

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
w Poznaniu



Wydział Fizyki i Astronomii
Katedra Akustyki

Rozprawa doktorska

**Percepcja długości pogłosu w salach
o regulowanej akustyce**

Łukasz Błasiński

Promotor:
prof. UAM dr hab. Jędrzej Kociński

Poznań 2025

Spis treści:

A.	Akustyka pomieszczeń: od historii do aktualnych kierunków badań i obecnych wyzwań badawczych i praktycznych	15
1	Krótką historia akustyki pomieszczeń.....	15
2	Akustyka sal koncertowych i sal wielofunkcyjnych.....	29
2.1	Odpowiedź impulsowa pomieszczenia	30
2.2	Parametry obiektywne w akustyce pomieszczeń	31
2.2.1	Czas pogłosu (ang. <i>Reverberation Time</i> , RT).....	32
2.2.1.1	Pomiary czasu pogłosu	32
2.2.2	Czas wczesnego zaniku (ang. <i>Early Decay Time</i> , EDT).....	34
2.2.3	Klarowność /Przejrzystość (ang. <i>Clarity</i> , C)	35
2.2.4	Wyrazistość (ang. <i>Definition</i> , D).....	35
2.2.5	Poziom dźwięku (ang. <i>Sound Level</i> , L)	36
2.2.6	Czas centralny (ang. <i>Center Time</i> , Ts).....	36
2.2.7	Czas pierwszego odbicia (ang. <i>Initial Time Delay Gap</i> , ITDG)	37
2.2.8	Sila dźwięku (ang. <i>Strength Index</i> , G).....	37
2.3	Przykładowe inne parametry wykorzystywane w akustyce wewnątrz.....	38
2.3.1	Stosunek basów/ Ciepło brzmienia (ang. <i>Bass Ratio/ Warmth</i>)	38
2.3.2	Stosunek sopranów/ Jasność brzmienia (ang. <i>Treble Ratio/ Brilliance</i>)	38
2.3.3	Współczynnik odbić bocznych (ang. <i>Lateral Energy Fraction</i> , LFE).....	38
2.3.4	Międzyuszna korelacja wzajemna (ang. <i>Inter-aural Cross Corelation</i> , IACC)	39
2.3.5	Odległość graniczna (ang. <i>Critical Distance</i>)	40
2.3.6	Kryterium echa (ang. <i>Echo Criteria</i> , EK)	41
2.3.7	Wsparcie sceny (ang. <i>Stage Support Early</i> , ST1; <i>Stage Support Late</i> , ST2)	41
2.3.8	Wczesny poziom zespołowości (ang. <i>Early Ensemble Level</i> , EEL)	41
2.3.9	Pogłosowość (ang. <i>Reverberance</i> , H - wg Beranka, 2004)	42
2.3.10	Czas pogłosu z uwzględnieniem poziomu, Czas wczesnego zaniku z uwzględnieniem poziomu (ang. <i>Loudness-based Reverberation Time</i> , RTN; <i>Loudness-based Early Decay Time</i> , EDTN)	42
2.3.11	Czas późnego zaniku (ang. <i>Late Decay Time</i> , LDT)	42
2.3.12	Stosunek dźwięku bezpośredniego do pogłosowego (ang. <i>Direct to Reverberation Ratio</i> , DRR)	43
2.3.13	Ocena zrozumiałości mowy	43
2.3.13.1	Współczynnik zrozumiałości mowy (ang. <i>Speech Transmission Index</i> , STI).....	43
2.3.13.2	Utrata wyrazistości spółgłosek (ang. <i>Articulation Loss of Consonants</i> , %ALCons).....	44
2.3.13.3	Powiązania pomiędzy różnymi wskaźnikami zrozumiałości mowy.....	44
2.4	Ocena właściwości akustycznych z wykorzystaniem proporcji różnych parametrów	45
2.5	Optymalne wartości parametrów w salach o różnym przeznaczeniu	45

2.5.1	Sugerowane wartości czasu pogłosu dla pomieszczeń o akustyce kwalifikowanej	46
2.5.2	Sugerowane wartości dla parametrów innych niż czas pogłosu dla pomieszczeń o akustyce kwalifikowanej.....	50
2.5.3	Sugerowane wartości Czasu wczesnego zaniku, EDT.....	50
2.5.4	Sugerowane wartości Klarowności, C80, C50.....	51
2.5.5	Sugerowane wartości Wyrazistości, D50.....	51
2.5.6	Sugerowane wartości Czasu centralnego T_s	52
2.5.7	Sugerowane wartości współczynników opisujących zrozumiałość mowy	52
2.5.8	Sugerowana wartość IACC (lub BQI=1-IACC).....	52
2.5.9	Sugerowane wartości dla Siły dźwięku (G).....	53
2.5.10	Sugerowane wartości dla LFE (Fracji Energii Bocznej)	53
2.5.11	Sugerowane wartości Wczesnego wsparcia zespołu (EEL)	53
2.5.12	Sugerowane wartości Bass Ratio.....	54
2.5.13	Sugerowane wartości Wsparcia sceny, ST_1 i ST_2	54
2.6	Najmniejsza zauważalna różnica (ang. <i>Just Noticeable Difference</i> - JND) dla różnych parametrów akustyki wewnątrz.....	54
2.6.1	JND dla czasu pogłosu.....	56
2.6.2	JND dla pozostałych parametrów akustyki wewnątrz.....	59
2.7	Parametry subiektywne w akustyce wewnątrz	61
2.7.1	Metoda Leo Beranka	61
2.7.2	Badania brytyjskie	67
2.7.2.1	Badania Mike'a Barrona	67
2.7.3	Badania niemieckie	70
2.7.4	Metoda Yoichi Ando.....	71
2.7.5	Wielowymiarowa ocena jakości akustyki sal - Tapio Lokki	72
3	Sal o regulowanej akustyce	77
3.1.1	Rozwiązania pasywne.....	78
3.1.1.1	Banery i kotary	78
3.1.1.2	Komory pogłosowe oraz regulowana objętość pomieszczenia	79
3.1.2	Rozwiązania aktywne	81
3.1.2.1	System Ambiophony	82
3.1.2.2	Wspomaganie rezonansów	84
3.1.2.3	Systemy regeneratywne.....	85
3.1.2.4	Systemy <i>in-line</i>	87
3.1.2.4.1	ACS (ang. <i>Acoustic Control System</i>) pierwszy system typu <i>in-line</i>	87
3.1.2.4.2	Pozostałe systemy typu <i>in-line</i>	87
3.1.2.5	Systemy hybrydowe.....	90
3.1.3	Aktywne systemy akustyczne: kluczowe wnioski.....	94
4	Badania percepcji pogłosowości sal koncertowych – przegląd uwarunkowań i obserwacji eksperymentalnych	95
4.1	Ogólne badania dotyczące percepcji pogłosu.....	96

4.1.1	R. H. Bolt i P. E. Doelz	96
4.1.2	M. R Schroeder, D. Gottlob i K. F. Siebrasse.....	97
4.1.3	R. J. Hawkes i H. Douglas	98
4.1.4	B. S. Atal, M. R. Schroeder i G. M. Sessler.....	99
4.1.5	A. Kotchy i in.	99
4.1.6	M. Barron.....	100
4.1.7	C. Lavandier.....	101
4.1.8	E. Kahle i J. P. Jullien.....	101
4.1.9	G. A. Soulodre i J. S. Bradley	102
4.1.10	T. Lokki i in.	103
4.1.11	D. Lee i in.	104
4.1.12	L. L. Beranek.....	106
4.1.13	Podsumowanie badań nad percepcją pogłosu w kontekście subiektywnego odbioru akustyki.....	106
4.2	Badania dotyczące percepcji pogłosu w pomieszczeniach sprzężonych akustycznie lub z systemami wspomagania	108
4.2.1	D. Pickard	109
4.2.2	D. T. Bradley i L. M. Wang.....	110
4.2.3	M. Ermann.....	111
4.2.4	I. Frissen i in.	111
4.2.5	D. Jeong i H. Joo (2013)	113
4.2.6	P. Luizard, B. F. G. Katz i C. Guastavino (2015a)	113
4.2.7	P. Luizard, B. F. G. Katz i C. Guastavino (2015b).....	114
4.2.8	D. Jeong i H. Joo (2017)	114
4.2.9	Podsumowanie badań dotyczących percepcji pogłosu w pomieszczeniach sprzężonych akustycznie.....	115
4.2.10	Ogólne uwagi do stanu badań nad percepcją pogłosu	117
5	Analiza wartości parametrów akustycznych sal koncertowych analizowanych przez Beranka (2004) w kontekście kształtu zaniku energii akustycznej.	121
5.1.1	Wpływ obecności widowni na wartości RT20 – analiza danych zestawu 1	122
5.1.2	Wartości RT20 i EDT bez obecności widowni – analiza danych zestawu 2....	124
5.1.3	Wartości RT20 bez widowni i EDT z widownią – analiza danych zestawu 3 .	125
5.1.4	Wartości RT20 i EDT bez widowni oraz RT20 z widownią – analiza danych zestawu 4.....	127
5.1.5	Wartości RT20 i EDT bez widowni oraz z widownią – analiza danych zestawu 5	128
B.	Wpływ aktywnych i pasywnych systemów wspomagania akustyki na charakterystyki pogłosowe sal koncertowych oraz kształt zaniku energii akustycznej – analiza wyników pomiarów	131
6	Pomiary parametrów obiektywnych sal koncertowych	133

6.1	Metodyka prowadzenia pomiarów	133
6.2	Sale z RES.....	134
6.2.1	Sala 1 z RES.....	135
6.2.2	Sala 2 z RES.....	136
6.2.3	Sala 3 z RES.....	137
6.2.4	Sala 4 z RES.....	138
6.2.5	Sala 5 z RES.....	139
6.2.6	Sala 6 z RES.....	140
6.2.7	Sala 7 z RES.....	141
6.2.8	Sala 8 z RES.....	142
6.2.9	Analiza liniowości zaników energii akustycznej w salach z RES.....	143
6.2.10	Analiza wpływu RES na jednorodność warunków akustycznych w salach z RES	144
6.2.11	Analiza wpływu RES na korelację pomiędzy zmierzonymi parametrami....	145
6.2.12	Podsumowanie wyników uzyskanych na drodze pomiarów obiektywnych parametrów akustycznych w salach z RES.....	146
6.2.12.1	Powtarzalne schematy działania systemu RES.....	146
6.2.12.2	Uzasadnienie dla stosowania RES w salach wielofunkcyjnych	147
6.2.12.3	Wpływ systemów RES na parametry obiektywne akustyki – podsumowanie wyników pomiarowych	147
6.3	Sale bez RES	148
6.3.1	Sale bez RES i bez regulacji akustyki (Sale 1, 3, 4, 6, 12, 13)	151
6.3.2	Sala 2 – bez RES	152
6.3.3	Sala 5 – bez RES	152
6.3.4	Sala 7 – bez RES	153
6.3.5	Sala 8 – bez RES	153
6.3.6	Sala 9 – bez RES	154
6.3.7	Sala 10 – bez RES	155
6.3.8	Sala 11 – bez RES	156
6.3.9	Sala 14 – bez RES	157
6.3.10	Analiza wpływu rozwiązań pasywnych na jednorodność warunków akustycznych w salach bez RES	157
6.3.11	Analiza liniowości rozkładu energii akustycznej w salach bez RES.....	157
6.3.12	Analiza wpływu pasywnych rozwiązań regulacji akustyki na korelację pomiędzy zmierzonymi parametrami	158
6.3.13	Wpływ kotar i banerów akustycznych na parametry pogłosowe – podsumowanie wyników pomiarowych.....	159
6.4	Porównanie wpływu RES i pasywnych rozwiązań do regulacji akustyki na wartości parametrów pogłosowych (EDT, RT20, RT30) oraz na charakter zaniku energii akustycznej	160

6.5	Zanik energii akustycznej w przestrzeniach zamkniętych – podsumowanie danych literaturowych i wyników pomiarów w kontekście planowanych eksperymentów psychoakustycznych.....	163
6.5.1	Analiza danych literaturowych oraz własnych wyników pomiarów	163
6.5.2	Wnioski z wyników pomiarów w kontekście planowanych eksperymentów psychoakustycznych	164
C.	Wpływ regulacji warunków akustycznych na subiektywny odbiór pogłosu – badania eksperymentalne.....	167
7	Percepcja długości pogłosu w salach z aktywną regulacją akustyki w porównaniu z salami bez regulacji lub z pasywną adaptacją pogłosową	167
8	Weryfikacja głównej hipotezy badawczej - eksperymenty psychofizyczne	171
8.1	Metodyka badań.....	173
8.1.1	Analizowane parametry.....	173
8.1.2	Próbki dźwiękowe – informacje ogólne	175
8.2	Pomiary parametrów obiektywnych pomieszczeń oraz rejestracja odpowiedzi impulsowych	176
8.2.1	Salę koncertowe	178
8.3	Procedura testowa	178
8.3.1	Testy dotyczące percepcji pogłosu – informacje ogólne	178
8.3.2	Analiza statystyczna uzyskanych wyników.....	181
8.3.2.1	Test dwumianowy	181
8.3.2.2	Analiza statystyczna zależności między odpowiedziami słuchaczy a różnicami wartości parametrów akustycznych.....	181
8.3.2.2.1	Kodowanie odpowiedzi i obliczanie różnicy parametrów	181
8.3.2.2.2	Weryfikacja rzetelności odpowiedzi	182
8.3.2.2.3	Uśrednianie i korelacja ze zmiennymi akustycznymi	182
8.3.2.2.4	Interpretacja siły efektu (wg Rea i Parkera, 1992)	183
8.3.2.3	Analiza porównawcza wyników uzyskanych w różnych eksperymentach.....	183
9	Eksperymenty percepcyjne – szczegółowa analiza wyników	185
9.1	Eksperyment E1 - Ocena trafności parametrów pogłosowych jako predyktorów percepcji długości pogłosu w przestrzeniach z systemami RES.	185
9.1.1	Założenia E1 i sformułowanie hipotezy badawczej.....	185
9.1.1.1	SRIR-y i próbki dźwiękowe w E1	186
9.1.1.2	Różne wartości EDT, zbliżone wartości RT10, RT20 i RT30 w E1	187
9.1.1.3	Różne wartości RT10, zbliżone wartości EDT, RT20 i RT30 w E1	187
9.1.1.4	Różne wartości RT20, zbliżone wartości EDT i RT10 w E1	188
9.1.1.5	Różne wartości RT30, zbliżone wartości EDT, RT10 i RT20 w E1	189
9.1.2	Słuchacze w E1	189
9.1.3	Procedura testowa w E1	190
9.1.4	Wyniki uzyskane w E1	191
9.1.5	Dyskusja wyników uzyskanych w E1	192
9.1.6	Wnioski z E1	194
9.2	Eksperyment E2 - Ocena trafności parametrów pogłosowych jako predyktorów percepcji długości pogłosu w przestrzeniach bez RES.....	195
9.2.1	Cel E2, hipoteza i uzasadnienie metodologiczne.....	195

9.2.2	SRIR-y i próbki dźwiękowe w E2	197
9.2.2.1	Różne wartości EDT, podobne wartości RT10, RT20 i RT30 w E2	197
9.2.2.2	Różne wartości RT10, zbliżone wartości EDT, RT20 i RT30 w E2	197
9.2.2.3	Różne wartości RT20, podobne wartości EDT i RT10 w E2	198
9.2.2.4	Różne wartości RT30, podobne wartości EDT, RT10 i RT20 w E2	199
9.2.3	Słuchacze w E2	199
9.2.4	Procedura testowa w E2	200
9.2.5	Wyniki uzyskane w E2	200
9.2.6	Dyskusja wyników uzyskanych w E2	201
9.2.7	Wnioski z E2	204
9.2.8	Analiza porównawcza wyników E1 i E2 w kontekście hipotezy głównej dysertacji	205
9.3	Eksperyment E3 - Ocena trafności parametrów pogłosowych EDT, RT10, RT20 i RT30 jako predyktorów percepcji długości pogłosu w przestrzeniach z RES z uwzględnieniem wartości parametrów w poszczególnych pasmach częstotliwości	208
9.3.1	Cel eksperymentu E3	208
9.3.2	SRIR-y i próbki dźwiękowe w E3	208
9.3.2.1	Różne wartości EDT, zbliżone wartości RT10, RT20 i RT30 w E3	209
9.3.2.2	Różne wartości RT10, podobne wartości EDT, RT20 i RT30 w E3	210
9.3.2.3	Różne wartości RT20, podobne wartości EDT i RT10 w E3	210
9.3.2.4	Różne wartości RT30, podobne wartości EDT, RT10 i RT20 w E3	211
9.3.3	Słuchacze w E3	211
9.3.4	Procedura testowa w E3	212
9.3.5	Wyniki uzyskane w E3	213
9.3.6	Dyskusja wyników uzyskanych w E3	214
9.3.7	Wnioski z E3	216
9.3.8	Analiza porównawcza wyników E1 i E3 w kontekście hipotezy głównej dysertacji	216
9.4	Eksperyment E4 – Ocena trafności parametrów pogłosowych EDT, RT10, RT20 i RT30 jako predyktorów percepcji długości pogłosu w przestrzeniach bez RES z uwzględnieniem wartości parametrów w poszczególnych pasmach częstotliwości	218
9.4.1	Cel eksperymentu E4	218
9.4.2	SRIR-y i próbki dźwiękowe w E4	218
9.4.2.1	Różne wartości EDT, zbliżone wartości RT10, RT20 i RT30 w E4	219
9.4.2.2	Różne wartości RT10, zbliżone wartości EDT, RT20 i RT30 w E4	219
9.4.2.3	Różne wartości RT20, zbliżone wartości EDT i RT10 w E4	220
9.4.2.4	Różne wartości RT30, zbliżone wartości EDT, RT10 i RT20 w E4	221
9.4.3	Słuchacze w E4	221
9.4.4	Procedura testowa w E4	222
9.4.5	Wyniki uzyskane w E4	222
9.4.6	Dyskusja wyników uzyskanych w E4	223
9.4.7	Wnioski z E4	225
9.4.8	Analiza porównawcza wyników E3 i E4 w kontekście hipotezy głównej dysertacji	225

9.4.9	Analiza porównawcza wyników E2 i E4 w kontekście ogólnej wiedzy o percepcji pogłosu.....	227
9.5	Eksperyment E5 – Analiza porównawcza percepcyjnej istotności EDT i RT20 w salach z RES.....	229
9.5.1	Cel eksperymentu E5	229
9.5.2	SRIR-y i próbki dźwiękowe w E5	230
9.5.3	Słuchacze w E5	230
9.5.4	Procedura testowa w E5	231
9.5.5	Wyniki uzyskane w E5	232
9.5.6	Dyskusja wyników uzyskanych w E5	232
9.5.7	Wnioski z E5	234
9.6	Eksperyment E6 – Analiza porównawcza percepcyjnej istotności EDT i RT20 w przestrzeniach bez RES.....	234
9.6.1	Cel eksperymentu E6	234
9.6.2	SRIR-y i próbki dźwiękowe w E6	235
9.6.3	Słuchacze w E6	235
9.6.4	Procedura testowa w E6	236
9.6.5	Wyniki uzyskane w E6	237
9.6.6	Dyskusja wyników uzyskanych w E6	237
9.6.7	Wnioski z E6	239
9.6.8	Analiza porównawcza wyników E5 i E6 w kontekście hipotezy głównej dysertacji.....	239
9.7	Eksperyment E7 - Analiza mechanizmów percepcji pogłosu w salach z systemem RES w fazie trwania i zaniku pogłosu	241
9.7.1	Cel eksperymentu E7	241
9.7.2	SRIR-y i próbki dźwiękowe w E7	241
9.7.3	Słuchacze w E7	242
9.7.4	Procedura testowa w E7	243
9.7.5	Wyniki uzyskane w E7	243
9.7.6	Dyskusja wyników uzyskanych w E7	244
9.7.7	Wnioski z E7	246
9.7.8	Analiza porównawcza wyników E7 i E1 w kontekście ogólnej wiedzy o percepcji pogłosu w salach z RES	247
9.8	Eksperyment E8 – Analiza mechanizmów percepcji pogłosu w salach bez systemów wspomagania akustyki w fazie trwania i zaniku pogłosu.....	249
9.8.1	Cel eksperymentu E8	249
9.8.2	SRIR-y i próbki dźwiękowe w E8	249
9.8.3	Słuchacze w E8	249
9.8.4	Procedura testowa w E8	250

9.8.5	Wyniki uzyskane w E8	250
9.8.6	Dyskusja wyników uzyskanych w E8	251
9.8.7	Wnioski z E8	253
9.8.8	Analiza porównawcza E8 i E7 w kontekście hipotezy głównej dysertacji	254
9.8.9	Analiza porównawcza E8 i E2 w kontekście ogólnej wiedzy o percepcji pogłosu w salach z nieliniowym zanikiem energii akustycznej	256
9.9	Eksperyment E9 - Percepcja pogłosu przy nieliniowym zaniku energii i stałych parametrach czasowych w salach z systemem RES.....	257
9.9.1	Cel eksperymentu E9	257
9.9.2	SRIR-y i próbki dźwiękowe w E9	258
9.9.3	Słuchacze w E9	259
9.9.4	Procedura testowa w E9	260
9.9.5	Wyniki uzyskane w E9	260
9.9.6	Dyskusja wyników uzyskanych w E9	261
9.9.7	Wnioski z E9	262
9.10	Eksperyment E10 - Percepcja pogłosu przy nieliniowym zaniku energii i stałych parametrach czasowych w salach bez systemów wspomaganie akustyki	263
9.10.1	Cel eksperymentu E10.....	263
9.10.2	SRIR-y i próbki dźwiękowe w E10	263
9.10.3	Słuchacze w E10	264
9.10.4	Procedura testowa w E10	265
9.10.5	Wyniki uzyskane w E10	265
9.10.6	Dyskusja wyników uzyskanych w E10.....	266
9.10.7	Wnioski z E10.....	267
9.10.8	Analiza porównawcza E9 i E10 w kontekście hipotezy głównej dysertacji.	268
9.11	Eksperyment E11 - Percepcja pogłosów dla próbek o takich samych wartościach parametrów w salach bez RES – zaniki liniowe.....	269
9.11.1	Cel eksperymentu E11.....	269
9.11.2	SRIR-y i próbki dźwiękowe w E11	270
9.11.3	Słuchacze w E11	270
9.11.4	Procedura testowa w E11	271
9.11.5	Wyniki uzyskane w E11	271
9.11.6	Dyskusja wyników uzyskanych w E11.....	272
9.11.7	Wnioski z E11.....	273
9.11.8	Analiza porównawcza E10 i E11 w kontekście ogólnej wiedzy o percepcji pogłosu	274
10	Podsumowanie.....	275
10.1	Weryfikacja hipotezy głównej.....	277
10.2	Pozostałe wyniki uzyskane w ramach przeprowadzonych eksperymentów	280

10.2.1	Wnioski z pomiarów przeprowadzonych w salach z RES.....	280
10.2.2	Wnioski z pomiarów przeprowadzonych w salach bez RES	281
10.2.3	Porównanie wpływu aktywnych i pasywnych metod regulacji na warunki akustyczne sal	281
10.2.4	Wpływ systemów regulacji akustyki i obecności widowni na nieliniowość zaniku pogłosu	282
10.2.5	Wzorce korelacyjne parametrów akustycznych a wpływ systemów regulacji	282
10.2.6	Wpływ systemów regulacji akustyki na jednorodność przestrzenną parametrów akustycznych	283
10.2.7	Wpływ wyników badań na projektowanie, ocenę i optymalizację sal o regulowanej akustyce.....	284
10.2.8	Projektowanie i modernizacja sal koncertowych oraz wielofunkcyjnych.....	284
10.2.9	Optymalizacja działania i kalibracji systemów RES.....	284
10.2.10	Konstrukcja i walidacja modeli predykcyjnych percepcji pogłosu	285
10.2.11	Rozwój norm i standardów w dziedzinie akustyki wewnątrz.....	285
10.2.12	Edukacja i szkolenia specjalistów z zakresu akustyki.....	285
10.2.13	Wsparcie procesów rewitalizacji istniejących przestrzeni.....	286
10.2.14	Projektowanie sal hybrydowych i adaptacyjnych.....	286
10.2.15	Optymalizacji algorytmów pogłosowych	286
10.3	Ciągłość badań i nowe wyzwania.....	287
Spis tabel:		289
Spis rysunków:.....		298
Literatura:		301

Streszczenie

Wprowadzenie - problem badawczy. Coraz większa świadomość słuchaczy oraz chęć zapewnienia jak najlepszej jakości doznań akustycznych widzom różnych wydarzeń kulturalnych, a także konieczność wykorzystania tych samych pomieszczeń do wydarzeń różnego rodzaju spowodowały powstanie różnych rozwiązań pozwalających na regulację parametrów akustycznych w salach koncertowych. Początkowo stosowano rozwiązania pasywne, wykorzystując różnego rodzaju tkaniny tłumiące skracające czas pogłosu, obecnie – w celu regulacji warunków akustycznych – wykorzystuje się skomplikowane systemy aktywne i zaawansowane algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów. Mimo upływu ponad 100 lat od wprowadzenia czasu pogłosu jako pierwszego kwantyfikatora w akustyce wnętrza, wciąż nie ustalono jednoznacznej zależności pomiędzy parametrami obiektywnymi a subiektywną oceną długości pogłosu przez słuchaczy. Niektórzy autorzy wskazują na silne powiązania między subiektywną oceną a parametrami czasu pogłosu (RT , EDT), podczas gdy inni dowodzą, że wskaźniki te nie zawsze dobrze odzwierciedlają wrażenia słuchowe. W części prac podkreśla się rolę parametrów związanych z klarownością lub wczesnymi odbiciami, które mogą istotnie wpływać na odbiór pogłosu. Pojawiają się także badania, w których różni słuchacze odmiennie interpretują długość pogłosu dla tych samych warunków akustycznych.

Cel. Niniejsza dysertacja poświęcona jest analizie wpływu systemów regulacji warunków akustycznych – zarówno pasywnych, jak i aktywnych – na właściwości pogłosowe pomieszczeń oraz percepcję właściwości akustycznych przez słuchaczy.

Celem pracy było zidentyfikowanie zmian w charakterystykach pogłosowych wynikających z różnych rozwiązań technicznych oraz określenie ich znaczenia dla percepcji słuchowej. Pomiary w salach koncertowych i eksperymenty psychoakustyczne umożliwiły zarówno weryfikację skuteczności systemów wspomagania akustyki, jak i pogłębioną analizę percepcji pogłosowości.

Analizie poddano zarówno obiekty wyposażone w elektroniczne systemy wspomagania akustyki, umożliwiające elastyczne kształtowanie warunków odsłuchowych, jak i sale wykorzystujące wyłącznie pasywne metody regulacji parametrów akustycznych. Takie podejście umożliwiło wszechstronną ocenę skuteczności poszczególnych rozwiązań i pozwoliło na porównanie ich wpływu na obiektywne i subiektywne aspekty akustyki pomieszczeń.

Metodyka. W pracy przyjęto perspektywę trójwymiarową, obejmującą przegląd literatury przedmiotu, analizę obiektywnych pomiarów akustycznych oraz eksperymenty psychoakustyczne. Pierwszym celem było zidentyfikowanie zmian w charakterystykach pogłosowych wynikających z zastosowania różnych rozwiązań technicznych, a nadrzędnym określenie, na ile zmiany te mają znaczenie z punktu widzenia percepcji słuchowej odbiorców. Dzięki szczegółowym pomiarom wykonanym w rzeczywistych salach koncertowych możliwa była weryfikacja skuteczności działania systemów regulacji akustyki, natomiast przeprowadzone w warunkach kontrolowanych eksperymenty psychoakustyczne pozwoliły na dogłębną analizę percepcji pogłosowości oraz zrozumiałości mowy na podstawie rzeczywistych materiałów dźwiękowych.

Część teoretyczna (A) stanowi przegląd zagadnień akustyki wewnątrz, ze szczególnym uwzględnieniem sal koncertowych i obiektów wielofunkcyjnych. Omówiono rozwój dyscypliny, aktualne metody badawcze i pomiarowe oraz kluczowe parametry akustyczne w kontekście funkcji użytkowych. Przeanalizowano również literaturę przedmiotu, w tym najważniejsze badania dotyczące relacji między właściwościami fizycznymi a subiektywnym odbiorem przez słuchaczy.

Część empiryczna (B) skupia się na analizie obiektywnych parametrów akustycznych wewnątrz z aktywną i pasywną regulacją pogłosowości, bazując na szerokim materiale pomiarowym z sal koncertowych. Wyniki zestawiono z klasycznymi danymi referencyjnymi, co pozwoliło zidentyfikować typowe schematy działania poszczególnych systemów oraz stanowiło podstawę dalszych badań percepcyjnych.

Część eksperymentalna (C) obejmuje weryfikację wpływu modyfikacji warunków akustycznych na percepcję pogłosowości i zrozumiałość mowy. W części tej opisano 11 przeprowadzonych eksperymentów badawczych, w których wykorzystano precyzyjnie przygotowany materiał dźwiękowy, pozwalający na manipulację wartościami wybranych parametrów akustycznych. Uczestnicy oceniali próbki odzwierciedlające warunki akustyczne rzeczywistych sal koncertowych, a zgromadzone dane zostały poddane szczegółowej analizie statystycznej. Analiza ta pozwoliła zidentyfikować zależności pomiędzy obiektywnymi, fizycznymi parametrami akustycznymi a subiektywnymi ocenami słuchaczy, co umożliwiło określenie percepcyjnej czułości na zmiany poszczególnych właściwości akustycznych.

Wyniki. Rezultaty przeprowadzonych eksperymentów jednoznacznie wskazują, że percepcja długości pogłosu w salach z systemami RES znacząco różni się od percepcji w przestrzeniach bez regulacji lub z rozwiązaniami pasywnymi. Zarówno dobór parametrów

najsilniej powiązanych z percepcją długości pogłosu, jak i ich znaczenie dla oceny subiektywnej, zależą od zastosowanego systemu regulacji oraz trybu pogłosu. W salach z RES obserwuje się większe znaczenie parametrów związanych z klarownością i zrozumiałością mowy oraz odmiennosc w kierunkach korelacji klasycznych wskaźników, takich jak EDT, w porównaniu z salami bez aktywnej regulacji.

Wnioski. Identyfikacja parametrów najlepiej skorelowanych z percepcją długości pogłosu, takich jak RT20 oraz C80, pozwala na lepsze dostosowanie ustawień systemów aktywnych do oczekiwanych efektów akustycznych. Zwrócono jednak uwagę, że w niektórych scenariuszach pomiarowych istotny okazał się także parametr EDT, co wskazuje na potrzebę monitorowania zarówno parametrów związanych z fazą późną, jak i z wczesnym przebiegiem zaniku energii. Wyniki eksperymentów pokazały również, że niektóre ustawienia RES mogą prowadzić do spadku jednorodności akustycznej, co powinno być uwzględniane przy projektowaniu i strojeniu systemów.

Wnioski płynące z pracy podkreślają praktyczne znaczenie zarówno obiektywnych parametrów akustycznych, jak i ich odbioru słuchowego w zastosowaniach inżynierskich i projektowych. Wyniki te stanowią kolejny krok w procesie naukowego poszukiwania relacji między parametrami pomiarowymi a subiektywną percepcją dźwięku w pomieszczeniach, która mimo wieloletnich badań wciąż pozostaje kluczowym wyzwaniem dla akustyków i projektantów. Ostateczną miarą jakości akustyki pozostaje bowiem odbiór subiektywny słuchacza, dla którego decydujące są indywidualne wrażenia towarzyszące przebywaniu w danym miejscu i odbiorowi prezentowanych utworów, niezależnie od wartości uzyskanych w pomiarach technicznych.

Summary

Background: Growing listener awareness and the desire to provide the best possible acoustic experience for audiences at various cultural events, coupled with the need to use the same rooms for different types of events, have led to the development of solutions for adjusting concert hall acoustics. Initially, passive solutions employing various types of sound-absorbing fabric were used to reduce reverberation time. Nowadays, complex active systems and advanced digital signal processing algorithms are employed to regulate acoustic conditions. Despite more than 100 years having passed since reverberation time was introduced as the first quantifier in interior acoustics, a clear relationship has yet to be established between objective parameters and listeners' subjective assessment of reverberation length. While some authors emphasise the strong links between subjective assessment and reverberation time parameters (RT, EDT), others argue that these indicators do not always accurately reflect auditory impressions. Some studies emphasise the role of parameters related to clarity or early reflections, which can significantly affect perception of reverberation. Furthermore, there are studies in which different listeners interpret the same acoustic conditions differently in terms of reverberation time.

Aim of the study: This dissertation analyses the impact of acoustic control systems (both passive and active) on the reverberation properties of rooms, and how these properties are perceived by listeners. The work aimed to identify changes in reverberation characteristics resulting from various technical solutions, and determine their significance for auditory perception. Measurements in concert halls and psychoacoustic experiments verified the effectiveness of acoustic support systems and enabled an in-depth analysis of reverberation perception. The analysis covered facilities with electronic acoustic support systems that enable flexible shaping of listening conditions, as well as halls that use passive methods of acoustic parameter control only. This approach allowed for a comprehensive evaluation of the effectiveness of the individual solutions and a comparison of their impact on objective and subjective aspects of room acoustics.

Methodology: The study took a three-dimensional approach, incorporating a literature review, analysis of objective acoustic measurements and psychoacoustic experiments. The primary objective was to identify changes in reverberation characteristics resulting from various technical solutions. The overarching objective was to determine the significance of these changes from the perspective of audience auditory perception. Detailed measurements taken in real concert halls verified the effectiveness of acoustic control systems, and

psychoacoustic experiments conducted under controlled conditions enabled an in-depth analysis of reverberation perception and speech intelligibility based on real sound materials.

The theoretical section (A) provides an overview of interior acoustics, with a particular focus on concert halls and multifunctional facilities. It discusses the development of the discipline, current research and measurement methods, and key acoustic parameters in the context of functional use. The literature on the subject is analysed, including the most important studies on the relationship between physical properties and listeners' subjective perception.

The empirical section (B) focuses on analysing the objective acoustic parameters of interiors with active and passive reverberation control, based on extensive measurement data from concert halls. These results were compared with classic reference data to identify typical operational patterns of individual systems, forming the basis for further perceptual research.

Part C (the experimental section) verifies the impact of acoustic modifications on the perception of reverberation and speech intelligibility. It describes 11 research experiments that used precisely prepared sound material to allow the manipulation of selected acoustic parameters. Participants evaluated samples reflecting the acoustic conditions of real concert halls, and the collected data were subjected to detailed statistical analysis. This analysis revealed correlations between objective acoustic parameters and subjective listener evaluations, enabling the determination of perceptual sensitivity to changes in individual acoustic properties.

Results: The results of the experiments clearly demonstrate that the perception of reverberation time differs significantly between rooms with and without RES systems, or with passive solutions. The parameters most strongly associated with the perception of reverberation time, and their significance for subjective assessment, depend on the control system and reverberation mode used. In rooms with RES, parameters related to speech clarity and intelligibility are more important, and the correlation directions of classic indicators such as EDT differ compared to rooms without active control.

Conclusions: Identifying the parameters that best correlate with the perception of reverberation time, such as RT20 and C80, enables more precise adjustment of active system settings to achieve the desired acoustic effects. However, it was noted that, in some measurement scenarios, the EDT parameter was also significant, indicating the need to monitor both late- and early-phase energy decay parameters. The results of the experiments

also showed that some RES settings can decrease acoustic homogeneity, a factor that must be considered when designing and tuning systems.

The conclusions drawn from this study emphasise the practical importance of objective acoustic parameters and their auditory perception in engineering and design applications. These results represent another step in the scientific investigation of the relationship between measurement parameters and the subjective perception of sound in rooms. Despite many years of research, this remains a key challenge for acousticians and designers. Ultimately, the subjective perception of the listener remains the ultimate measure of acoustic quality, as their individual impressions and perception of the presented works in a given place are decisive, regardless of the values obtained in technical measurements.

Wstęp

Niniejsza praca poświęcona jest analizie wpływu systemów regulacji warunków akustycznych – zarówno pasywnych, jak i aktywnych – na właściwości pogłosowe pomieszczeń oraz percepcję właściwości akustycznych tych pomieszczeń. Szczególną uwagę poświęcono przestrzeniom koncertowym, w których wymagania akustyczne są wyjątkowo wysokie, a jednocześnie z różnych przyczyn zachodzi konieczność dostosowania parametrów brzmieniowych do zróżnicowanych funkcji użytkowych. Dokładnej analizie poddano obiekty wyposażone w elektroniczne systemy wspomagania akustyki, umożliwiające elastyczne kształtowanie warunków odsłuchowych w zależności od rodzaju realizowanych wydarzeń, a dla celów porównawczych – także obiekty wykorzystujące pasywne metody regulacji parametrów akustycznych. W tym kontekście podjęto próbę połączenia trzech komplementarnych perspektyw: przeglądu literatury przedmiotu i współczesnych trendów badawczych, analizy pomiarów obiektywnych parametrów akustycznych w rzeczywistych salach, a także oceny subiektywnego odbioru pogłosowości w eksperymentach psychoakustycznych stworzonych na podstawie wyników badań pomiarowych w wielu pomieszczeniach i analizy otrzymanych w nich wyników.

Celem pracy było zatem nie tylko zidentyfikowanie zmian w charakterystykach pogłosowych wynikających z zastosowania różnych rozwiązań technicznych, ale przede wszystkim określenie, na ile zmiany te są istotne z punktu widzenia percepcji słuchowej. Szczegółowe pomiary wykonane w salach koncertowych umożliwiły weryfikację skuteczności działania systemów wspomagania akustyki, natomiast eksperymenty psychoakustyczne przeprowadzone w warunkach kontrolowanych pozwoliły na pogłębioną analizę percepcji pogłosowości z wykorzystaniem materiału dźwiękowego pozyskanego podczas tych pomiarów. Dzięki temu możliwe było sformułowanie praktycznych wniosków dotyczących projektowania i adaptacji akustycznej wnętrz, uwzględniających zarówno aspekty techniczne, jak i psychofizyczne związane z odbiorem dźwięku.

Wobec złożoności podejmowanej problematyki – obejmującej zarówno rozbudowany aparat teoretyczny, kompleksowe analizy pomiarowe, jak i empiryczną weryfikację hipotez badawczych w ramach eksperymentów percepcyjnych – niniejsza praca została podzielona na trzy zasadnicze części. Każda z tych części realizuje odrębny cel merytoryczny, koncentrując się na innym wymiarze zagadnień związanych z akustyką pomieszczeń w kontekście celu i hipotezy badawczej niniejszej dysertacji.

Część A stanowi systematyczne wprowadzenie teoretyczne do problematyki akustyki wnętrza, uwzględniając zagadnienia odnoszące się do sal koncertowych oraz obiektów wielofunkcyjnych. Zakres tematyczny tej części obejmuje zarówno syntetyczny przegląd historycznego rozwoju dyscypliny naukowej, jaką jest akustyka w kontekście jej analizy w przestrzeniach zamkniętych jak i krytyczną prezentację współczesnych podejść badawczych, metod pomiarowych oraz kryteriów oceny jakości akustycznej pomieszczeń. Dużą uwagę poświęcono również analizie parametrów akustycznych w ujęciu ilościowym oraz ich interpretacji w odniesieniu do funkcji użytkowych badanych obiektów.

Integralnym elementem tej części pracy jest analiza literatury przedmiotu, uwzględniająca zarówno klasyczne ujęcia, jak i najnowsze trendy badawcze. Przeprowadzony przegląd literatury obejmuje kompleksową prezentację kluczowych eksperymentów, które odegrały istotną rolę w kształtowaniu współczesnego stanu wiedzy w tej dziedzinie i są ważne z punktu widzenia celu niniejszej dysertacji. Omówiono również zagadnienia związane z progami percepcyjnej rozróżnialności zmian parametrów akustycznych oraz ich znaczeniem praktycznym w kontekście projektowania akustyki pomieszczeń.

Aby w pełni przedstawić tło historyczne i techniczne, w części tej przedstawiono również syntetyczny przegląd rozwiązań technicznych umożliwiających regulację warunków pogłosowych – zarówno w wymiarze pasywnym, jak i aktywnym – wraz z ich systematyzacją i omówieniem zasad działania. W końcowych rozdziałach Części A pokazano dotychczasowy dorobek badań percepcyjnych, koncentrując się na analizie relacji pomiędzy fizycznymi właściwościami akustycznymi a ich subiektywnym odbiorem przez słuchaczy, co stanowi istotne tło i naukowo wprowadza w zagadnienia eksperymentów psychofizycznych wykonanych w ramach prac badawczych dotyczących niniejszej dysertacji i opisywanych w dalszych częściach niniejszej pracy.

Z punktu widzenia konstrukcji eksperymentów opisanych w Części C niniejszej pracy istotne są dane umożliwiające ocenę, czy średnie wartości parametrów EDT i RT wskazują na liniowy, czy nieliniowy przebieg zaniku energii akustycznej w analizowanych salach. Ważne jest także to jaki wpływ na tę liniowość ma obecność publiczności a także jak powszechne jest zjawisko występowania nieliniowych zaników energii akustycznej w salach koncertowych. W związku z tym w Części A przedstawiono również analizę częstości występowania nieliniowych zaników energii akustycznej oraz wpływu obecności widowni na zmianę warunków akustycznych. Analizę opracowano w oparciu o największy jednorodny zbiór

danych dotyczących obiektywnych parametrów akustycznych najważniejszych sal koncertowych, opublikowany przez Beranka (2004).

Część B stanowi empiryczno-pomiarową podstawę niniejszej dysertacji i poświęcona jest analizie obiektywnych właściwości akustycznych wnętrz, z uwzględnieniem sal koncertowych wyposażonych w rozwiązania umożliwiające regulację warunków pogłosowych – zarówno w postaci systemów pasywnych, jak i aktywnych. Przedstawiono obszerny materiał pomiarowy obejmujący wartości obiektywnych parametrów akustycznych zmierzonych w salach koncertowych. Dokonano oceny ich przestrzennej dystrybucji, stopnia jednorodności, wzajemnych zależności korelacyjnych oraz charakterystyki czasowej zaniku energii akustycznej. Ponadto dane empiryczne porównano z klasycznym zestawieniem Beranka (2004), co umożliwiło osadzenie otrzymanych wyników w szerszym kontekście badawczym oraz pozwoliło na krytyczną weryfikację zgodności otrzymanych wyników badań parametrów obiektywnych z ustaleniami uznawanymi za referencyjne w literaturze przedmiotu.

W efekcie, Część B dostarcza danych na temat wpływu różnych typów rozwiązań regulacji akustyki pomieszczeń na strukturę parametrów pogłosowych oraz skuteczności zastosowanych systemów regulacji akustyki. Zgromadzony materiał umożliwia identyfikację powtarzalnych schematów działania, stanowiąc podstawę do dalszych analiz eksperymentalnych, obejmujących porównanie uzyskanych w tej części parametrów obiektywnych z wynikami badań percepcyjnych przedstawionych w części kolejnej dysertacji.

Część C poświęcona jest eksperymentom percepcyjnym, których celem była weryfikacja wpływu modyfikacji warunków akustycznych na subiektywny odbiór pogłosowości oraz zrozumiałość przekazu słownego.

W oparciu o przeprowadzone analizy pomiarowe oraz z uwagi na rosnącą popularność systemów wspomagania akustyki w nowoczesnych przestrzeniach koncertowych, sformułowano **główną hipotezę badawczą**, zgodnie z którą:

percepcja pogłosu w salach z zastosowanymi systemami elektronicznego wspomagania akustyki wykazuje odmienny charakter niż w przestrzeniach, w których nie stosuje się regulacji pogłosu lub w których regulacja pogłosu oparta jest wyłącznie na pasywnych rozwiązaniach.

Dla potrzeb weryfikacji hipotezy głównej, w Części C opisano zestaw 11 eksperymentów psychofizycznych przeprowadzonych z wykorzystaniem otrzymanych w Części B wyników

pomiarów oraz sygnałów. Każdy eksperyment oparty został na odrębnej hipotezie szczegółowej, powiązanej z założeniem nadrzędnym i ukierunkowanej na jej empiryczną weryfikację.

W eksperymentach uczestnicy dokonywali ocen próbek dźwiękowych odzwierciedlających warunki akustyczne rzeczywistych sal koncertowych wyposażonych w różne typy rozwiązań regulujących ich akustykę. Wykorzystywany w testach materiał dźwiękowy został przygotowany w taki sposób, aby umożliwić precyzyjną manipulację wartościami wybranych obiektywnych parametrów akustycznych, co pozwoliło na przeprowadzenie analizy percepcyjnej z uwzględnieniem zmiennych odzwierciedlających właściwości przestrzenne pomieszczeń. Zgromadzone podczas eksperymentów dane poddano szczegółowej analizie statystycznej, mającej na celu identyfikację zależności pomiędzy obiektywnymi, fizycznymi właściwościami akustycznymi a subiektywnymi odpowiedziami uczestników związanymi z ich percepcją prezentowanych próbek dźwiękowych. Część ta kończy się zestawieniem wyników poszczególnych eksperymentów wraz z ich porównaniem, co pozwala na sformułowanie wniosków dotyczących percepcyjnej czułości słuchaczy na zmiany określonych parametrów akustycznych wnętrza.

Uzyskane rezultaty, oparte na obszernym materiale pomiarowym oraz rozbudowanym zestawie eksperymentów percepcyjnych z udziałem licznej grupy słuchaczy, nie tylko dostarczają nowej wiedzy w zakresie percepcji właściwości akustycznych pomieszczeń, ale także reprezentatywnych danych wspierających proces projektowania sal koncertowych o wysokich walorach akustycznych, zorientowanych na wielofunkcyjny sposób użytkowania. Przeprowadzone analizy danych empirycznych – obejmujące zarówno rzeczywiste przestrzenie zróżnicowane pod względem rozwiązań technicznych, jak i zsyntetyzowane warunki odsłuchowe – stanowią uzupełnienie dotychczasowego stanu wiedzy w obszarze akustyki wnętrz oraz jej percepcji. Wnioski płynące z pracy wzbogacają istniejące podejścia badawcze, wskazując na praktyczne znaczenie zarówno parametrów akustycznych, jak i ich odbioru słuchowego w kontekście zastosowań inżynierskich i projektowych. Stanowią więc one kolejny element w naukowym procesie znalezienia relacji między obiektywnymi parametrami pomiarowymi a subiektywną percepcją dźwięku w pomieszczeniach, która nadal, mimo wielu dekad badań, stanowi elementarne wyzwanie dla badaczy i projektantów pomieszczeń. Nie można zapominać, że u kresu procesu badań i projektowania akustyki pomieszczenia nie znajduje się miernik, lecz człowiek – słuchacz. To on ostatecznie ocenia warunki akustyczne, najczęściej nie mając świadomości, jakie wartości przyjmują poszczególne

parametry obiektywne. Liczą się dla niego wyłącznie wrażenia towarzyszące przebywaniu w danym miejscu i odbiorowi prezentowanych tam utworów.

Niektóre wyniki pomiarów parametrów akustycznych oraz metodyki prowadzenia tych pomiarów umieszczone w tej pracy opublikowano wcześniej w materiałach konferencyjnych (Błasiński, 2022; Möller, Błasiński, 2023) i artykule naukowym (Błasiński, 2025). Ponadto część wyników eksperymentalnych oraz fragmenty opisu metodyki prowadzenia eksperymentów zostały wcześniej opublikowane w artykułach (Błasiński i in., 2023; Błasiński i in., 2024). Autor niniejszej dysertacji jest głównym autorem wszystkich wspomnianych powyżej materiałów naukowych.

Treści te zostały włączone do niniejszej pracy zgodnie z zasadami dobrej praktyki akademickiej, a ich ponowne użycie służy zapewnieniu spójności i kompletności opisywanych eksperymentów i przedstawionej analizy. Wszelkie ponownie wykorzystane fragmenty zostały opracowane przez autora niniejszej pracy.

A. Akustyka pomieszczeń: od historii do aktualnych kierunków badań i obecnych wyzwań badawczych i praktycznych

1 Krótka historia akustyki pomieszczeń

Akustyka jest nauką o dźwięku, a etymologia tego słowa pochodzi od greckiego „akouein”, co oznacza „słuchać”. Powszechnie uważa się, że to właśnie w starożytnej Grecji podjęto pierwsze badania nad naturą rozchodzenia się dźwięku.

Pitagoras żyjący w VI wieku p. n. e. (570-497 p.n.e.) badał zależność między wysokością dźwięku a długością struny i odkrył, że podzielenie długości wibrującej struny na proste proporcje daje konsonansowe interwały muzyczne (Makarewicz, 2004). Od początków swojej historii akustyka jest więc dziedziną, w której subiektywną percepcję otaczającego nas świata dźwięków próbuje się opisać językiem matematyki. Kolejnym greckim filozofem mającym swój wkład w rozwój akustyki był Arystoteles (384-322 p.n.e.), który stwierdził, że sposób propagacji zależy od właściwości materiału. Arystoteles jest autorem prawdopodobnie pierwszej pracy pisemnej „O akustyce” (grec. *Περὶ ἀκουστικῆς*), napisanej około 350 lat p.n.e., w której próbował wyjaśnić mechanizm powstawania i właściwości fizyczne dźwięku. Arystoteles uważał, że wysokie dźwięki są przenoszone szybciej niż niskie. Innego zdania był Teofrastos z Eresos (370-285 p.n.e.), który wnioskował, że „wysoka nuta nie różni się prędkością od niskiej, ponieważ gdyby tak było, szybciej dotarłaby do słuchu i nie byłoby harmonii. Jeśli istnieje współbrzmienie, obie nuty muszą mieć taką samą prędkość”. (Long, 2004). Kolejnym istotnym dokumentem w historii akustyki jest napisane około 25 lat p.n.e. dzieło rzymskiego architekta Witruwiusza (Marcus Vitruvius Pollio, żył w I wieku p.n.e.) „O architekturze ksiąg dziesięć” (łac. *De Architectura libri decem*). W piątym tomie swojej pracy Witruwiusz podkreśla rolę odpowiedniego kształtu amfiteatru oraz rozmieszczenia materiałów odbijających dźwięk, aby docierał on do widzów w różnych rejonach widowni. Opisuje on naturę rozchodzenia się fal dźwiękowych na podobieństwo rozchodzenia się fal na wodzie, zjawisko interferencji fal pochodzących od źródła dźwięku z falami odbitymi od ścian oraz niekorzystny wpływ echa na zrozumiałość słyszanego tekstu. Witruwiusz opisuje też działanie komór rezonansowych, powołując się na Arystoksenosa (345-300 p.n.e.), nazywając go w swoim dziele „starożytnym naukowcem”. Jego praca zawiera także opis i rysunki komór zbudowanych z gliny czy brązu, które odpowiednio umocowane w ścianach teatru mają zwiększać „siłę dźwięku” oraz uzupełniać pełnię brzmienia (Vitruvius, I w. p.n.e.). Jest to

również pierwszy dokument, który zawiera informacje dotyczące sposobu projektowania obiektów z uwzględnieniem akustyki.

Badania nad akustyką w średniowieczu rozwijały się w tempie zbliżonym do badań prowadzonych w innych dyscyplinach nauki, w związku z czym na kolejne odkrycia przyszło czekać kilkaset lat. Następne opisy zjawisk akustycznych pojawiają się dopiero w literaturze XVI wieku.

Giovanni Battista Benedetti (1530-1590) powiązał stosunek wysokości dźwięków ze stosunkiem częstotliwości wibrujących obiektów (Lindsay, 1966). Galileusz (1564-1642) analizował drgania strun i powiązał liczbę drgań struny na jednostkę czasu z wysokością dźwięku. W 1635 roku Pierre Gassendi (1592-1655), który twierdził, że dźwięk to „strumień małych i niewidocznych drobin”, zmierzył prędkość dźwięku przy użyciu broni palnej zakładając, że błysk pochodzący z wystrzału rozchodzi się natychmiastowo. Wartość, którą podał to 478 m/s. Gassendi zauważył też, że prędkość dźwięku nie zależy od wysokości dźwięku. W dokładniejszym eksperymencie, który przeprowadził Marin Mersenne (1588-1648) i opisał w książce „Uniwersalna harmonia” (fr. *Harmonie universelle*) autor ustalił, że prędkość dźwięku ma nieco niższą wartość i wynosi 450 m/s (Lenihan, 1951). Około 15 lat później, w 1650 roku, we Florencji, G. A. Borelli (1608-1670) i V. Viviani (1622-1703) uzyskali wartość jeszcze bliższą rzeczywistej prędkości dźwięku uzyskując wartość 350 m/s dźwięku (Miller, 1935). W innym eksperymencie G. L. Bianconi (1717-1781), wykazał, że prędkość dźwięku w powietrzu wzrasta wraz z temperaturą (Lenihan, 1952). Prace nad prędkością rozchodzenia się dźwięku oraz ustaleniem matematycznej zależności prędkości od wartości innych parametrów prowadził również Isaac Newton (1643-1727), który przedstawił swoją próbę sformalizowania teorii propagacji dźwięku w książce „Matematyczne zasady filozofii naturalnej” (łac. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*) wydanej w roku 1687. W pracy tej postawił hipotezę, że prędkość dźwięku jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z ciśnienia absolutnego podzielonego przez gęstość. Newton odkrył tym samym izotermiczną prędkość dźwięku w powietrzu. Prace kolejnych naukowców, głównie matematyków i fizyków, miały znaczący wpływ na rozwój akustyki, nawet jeśli nie dotyczyły akustyki bezpośrednio. W swoich pracach nad teorią mechaniki Joseph Louis Lagrange (1736-1813) badał zależności między ruchem ciał a właściwościami fizycznymi, takimi jak ciśnienie czy sprężystość. Jego prace prowadzone w ramach mechaniki teoretycznej i równań ruchu były później zastosowane do analizy fal dźwiękowych. Pierre Simon Laplace (1749-1827) uściślił odkrycia Newtona i Lagrange’a i ustalił wzór na prędkość dźwięku (c) jako:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$$

Wzór 1

gdzie: γ – wykładnik adiabatyczny, p – ciśnienie [Pa] i ρ – gęstość [kg/m³].

Obliczenia wykonane z użyciem tego wzoru dają znacznie lepszą zgodność z wartościami uzyskiwanymi w eksperymentach niż formuły wykorzystywane we wcześniejszych latach (Lindsay 1966). Leonard Euler (1707-1783) opublikował w 1766 roku szczegółowy traktat na temat mechaniki płynów, który zawierał rozdział w całości poświęcony falom dźwiękowym w rurach (Lindsay, 1966). Joseph Sauveur (1653-1719) prowadził badania dotyczące częstotliwości w odniesieniu do wysokości dźwięku. Angielski matematyk Brook Taylor (1685-1731) stworzył matematyczny opis ruchu struny opierając się na założeniu, że wibracja struny drgającej ze swoją podstawową częstotliwością może być przedstawiona w formie krzywej. Taylor powiązał długość struny, jej napięcie i masę stwarzając podwaliny dla równania falowego opracowanego przez Daniela Bernoulli'ego (1700-1782), który utworzył równanie różniczkowe cząstkowe dla drgającej struny i uzyskał rozwiązania, które Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) zinterpretował jako fale przemieszczające się w obu kierunkach wzdłuż struny (Lindsay, 1966).

XIX wiek przyniósł kolejne odkrycia w akustyce. W 1863 roku Hermann von Helmholtz (1821-1894) publikuje książkę „Nauka o wrażeniach dźwiękowych” (niem. *Lehre von den Tonempfindungen*). Ta pozycja jest jednym z najważniejszych dzieł w dziedzinie akustyki i teorii muzyki. Helmholtz, będący lekarzem, fizykiem i filozofem, w swoich eksperymentach badał sposób, w jaki dźwięki są odbierane przez ludzkie ucho, łącząc zagadnienia fizjologiczne, psychologiczne i muzyczne. Analizował właściwości dźwięków, takie jak częstotliwość, amplituda i długość fali, oraz ich zależność od percepcji wysokości i barwy. Zajmował się również teorią rezonansu, teorią barwy oraz psychologią wrażeń słuchowych, inicjując tym samym systematyczne badania nad percepcją dźwięku (Helmholtz, 1865). To Helmholtz wykorzystując instrumenty strunowe, kamertony, syreny i rezonatory wykazał, że wysokość dźwięku wynika z jego częstotliwości podstawowej, ale barwa dźwięku muzycznego wynika z obecności jego wyższych harmoniczných. Pokazał, w jaki sposób ucho może oddzielić różne składniki złożonego dźwięku. Stwierdził też, że jakość dźwięku zależy wyłącznie od liczby i względnej proporcji poziomu jego harmoniczných, a nie od ich względnej fazy. W 1877 roku ukazał się pierwszy z dwóch tomów „Teorii dźwięku” (ang. *Theory of Sound*), które napisał John William Strutt, czyli Lord Rayleigh (1842-1919). Pierwszy tom omawia teorię drgań oraz jej zastosowanie do strun, prętów, membran i płyt, natomiast początek drugiego tomu poświęcony jest drganiom powietrza i propagacji fal w płynach. Lord Rayleigh zebrał w swoim

dziale różne artykuły techniczne z tamtych czasów, a także dodał wiele własnych opracowań i w dość kompletny sposób określił teoretyczne podstawy akustyki (Raichel, 2006). W czasie swojego życia, Lord Rayleigh opublikował prawie 130 artykułów na temat akustyki. Niezwykle jest to, jak precyzyjny jest w jego niektórych dokumentach opis zjawisk akustycznych mimo braku możliwości, aby wyniki jego przemyśleń potwierdzić eksperymentalnie (Lindsay, 1966).

Znaczący postęp w badaniach nad zjawiskami akustycznymi umożliwił gwałtowny rozwój urządzeń elektroakustycznych w latach siedemdziesiątych XIX wieku. W 1874 roku Ernst Werner von Siemens (1816-1892) opatentował przetwornik z ruchomą cewką, a więc protoplastę głośnika. Urodzony w Edynburgu w Szkocji Alexander Graham Bell (1847-1922), który w 1868 roku przeniósł się z rodziną do Kanady, otrzymał w 1876 roku patent na telefon, składający się między innymi z mikrofonu węglowego. Dwa lata później, w 1878 Thomas Alva Edison (1847-1931) opatentował fonograf. Dzięki tym wynalazkom badacze uzyskali możliwość rejestracji, transmisji i odtwarzania dźwięku (Long, 2004). W efekcie możliwe stało się systematyczne badanie zjawisk akustycznych, a także rozwój metod pomiarowych i modeli opisujących propagację dźwięku w przestrzeniach zamkniętych.

Współczesna akustyka architektoniczna ma swój początek w 1885 roku. Wtedy właśnie Wallace Clement Sabine (1868-1919) z Uniwersytetu Harvarda w Bostonie intencjonalnie zmodyfikował akustykę Fogg Lecture Hall stając się tym samym pierwszym, nowożytnym badaczem akustyki pomieszczeń. Powszechnie uważany za pierwszego naukowca, który zajmował się akustyką wnętrz, Sabine tak zaczyna swój słynny artykuł na temat pogłosu: „Poniższe badanie nie zostało podjęte z wyboru, ale spadło na pisarza w 1895 r. w wyniku instrukcji Korporacji Uniwersytetu Harvarda, aby zaproponować zmiany w celu zaradzenia trudnościom akustycznym w sali wykładowej Fogg Art Museum, budynku, który właśnie został ukończony” (Sabine, 1900).

Na przestrzeni wieków wzniesiono wiele świątyń, teatrów, amfiteatrów i innych obiektów, w których akustyka odgrywała istotną rolę, natomiast aż do czasów eksperymentów Sabine’a jedynym znanym dziełem zawierającym wytyczne dotyczące akustyki pomieszczeń pozostawało traktat Witruwiusza. W okresie średniowiecza, choć istniała świadomość, że kształt i rozmiar budynku wpływają na sposób rozchodzenia się dźwięku we wnętrzu, nie zachowały się żadne dokumenty opisujące zależności między techniką wznoszenia lub wykończenia obiektów a panującymi w nich warunkami akustycznymi. Dopiero na początku XVI wieku wprowadzono w budownictwie zmiany bezpośrednio związane z akustyką. Wykorzystanie lokalnych języków w czasie nabożeństw, będące konsekwencją ruchów

reformatorskich, spowodowało zmniejszenie rozmiarów i zmianę kształtu kościołów protestanckich w porównaniu do budowli katolickich, w których nabożeństwa wciąż odprawiane były po łacinie (Harasimowicz, 2017). Dążenie do zapewnienia wysokiej zrozumiałości mowy, a zatem kryterium bezpośrednio związane z akustyką, stało się istotnym czynnikiem w procesie planowania i wznoszenia kościołów. We wcześniejszych stuleciach obserwowano raczej odwrotną zależność – to muzyka komponowana była w taki sposób, aby dostosować możliwości jej wykonywania do warunków jakie panowały w poszczególnych wnętrzach. Jeszcze pod koniec XIX wieku Jean Louis Charles Garnier (1825-1898), projektant Opery Paryskiej, tak podsumowuje brak literatury w tym zakresie oraz swoją próbę poznania reguł rządzących akustyką: „Zadałem sobie wiele trudu, aby opanować tę dziwną naukę, ale nigdzie nie znalazłem reguły, która by mnie prowadziła. Napotkałem jedynie sprzeczne stwierdzenia. Muszę powiedzieć, że nie przyjąłem żadnej reguły, że mój plan nie opiera się na żadnej teorii, a sukces lub porażkę pozostawiam całkowicie przypadkowi, jak akrobata, który zamyka oczy i trzyma się lin wznoszącego się balonu.” (Garnier, 1880). Aż do początków XX wieku projektanci głównie kopiowali inne budowle, w których udało się osiągnąć dobre warunki akustyczne niejako przypadkowo. Przykłady swobodnego kopiowania projektów, na przykład z wykorzystaniem innych materiałów wykończeniowych lub po przeskalowaniu wymiarów pomieszczenia, opisuje również Sabine, wskazując zarówno udane, jak i nieudane realizacje (Sabine, 1922). Jego dorobek obejmował jednak nie tylko analizy praktyczne, lecz także badania o charakterze teoretycznym, których najważniejszym efektem było opracowanie wzoru umożliwiającego obliczenie czasu pogłosu (ang. *Reverberation Time*, RT) na podstawie informacji o rozmiarze pomieszczenia i chłonności akustycznej materiałów, które się w nim znajdują (Sabine, 1922).

$$T = 0,161 V/A \quad \text{Wzór 2}$$

gdzie: T - czas pogłosu [s], V – objętość [m³], A - chłonność akustyczna [m²].

Wyniki doświadczeń Sabine’a z Fogg Lecture Hall zostały przez niego wykorzystane także w czasie prac nad siedzibą Boston Symphony Hall, do dziś uważanej za jedną z najlepszych sal symfonicznych na świecie (Egan, 1988), a opracowany przez niego wzór na czas pogłosu pozostawał najważniejszym narzędziem podczas projektowania akustyki sal koncertowych aż do lat 50. XX wieku (Barron, 2009).

Należy podkreślić, że Sabine zdawał sobie sprawę, iż opisanie jakości akustycznej pomieszczenia wymaga więcej niż jednego parametru, pisząc: „Aby słyszeć dobrze w każdym audytorium, konieczne jest, aby dźwięk był wystarczająco głośny; aby jednocześnie komponenty złożonego dźwięku zachowały swoją właściwą względną intensywność; oraz aby

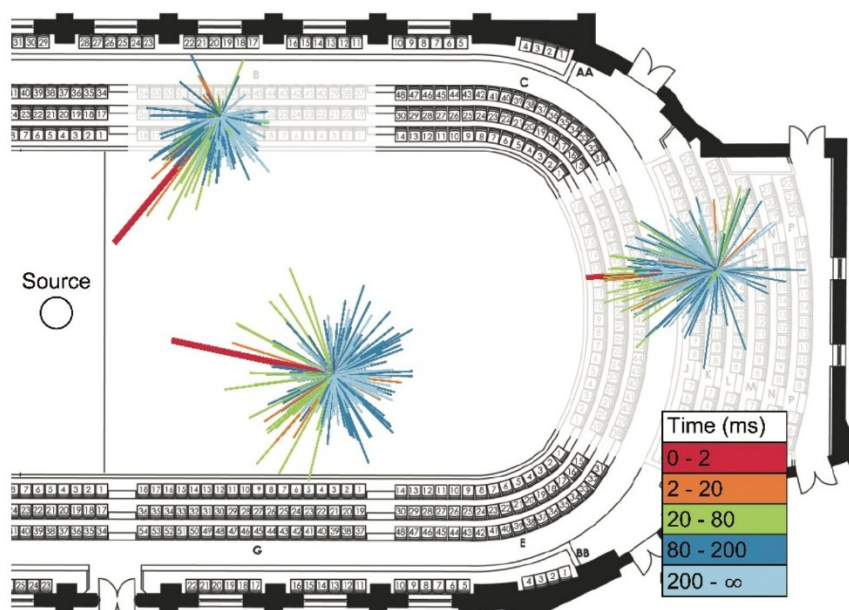
kolejne dźwięki w szybko poruszającej się artykulacji, zarówno mowy, jak i muzyki, były wyraźne i wolne od siebie i od obcych dźwięków. Te trzy warunki są konieczne i całkowicie wystarczające dla dobrego słyszenia.” (Sabine W.C. 1900). Należy zauważyć, że w tych słowach Sabine, będący autorem pierwszej ilościowej miary w akustyce pomieszczeń (pierwszego kwantyfikatora fizycznej charakterystyki pola pogłosowego), podkreśla znaczenie percepcyjnej oceny jakości dźwięku docierającego do słuchacza, określając trzy najważniejsze aspekty dobrego odbioru dźwięku: odpowiedniej głośności, właściwych proporcji, i należytej separacji pomiędzy poszczególnymi dźwiękami. W latach trzydziestych i czterdziestych XX wieku badania, eksperymenty i prace nad rozwojem teorii akustyki prowadzone były prowadzone w wielu ośrodkach badawczych, w szczególności na uniwersytecie Harvarda, *Massachusetts Institute of Technology* i Uniwersytecie Kalifornijskim w Los Angeles (UCLA). Działające od 1918 roku Towarzystwo Akustyczne w Londynie (ang. *Acoustical Society of London*) oraz założone w 1929 Amerykańskie Towarzystwo Akustyczne (ang. *Acoustical Society of America*), stały się platformą wymiany doświadczeń akustyków z różnych uczelni i instytutów badawczych. Jednym z kontynuatorów prac Sabine’a, którego prace przyczyniły się do rozwoju akustyki architektonicznej w pierwszej połowie XX wieku był Vern Knudsen (1893-1974), fizyk z UCLA zajmujący się badaniem propagacji i chłonności dźwięku. Knudsen jest autorem książki *Akustyka Architektoniczna* (ang. *Architectural Acoustics*), wydanej w 1932 roku, w której przedstawił szczegółową analizę odbicia fal dźwiękowych od przegród budowlanych, wpływu rezonansów własnych na akustykę pomieszczeń, zasad absorpcji dźwięku przez różne materiały oraz roli kształtu pomieszczenia w kształtowaniu pola akustycznego (Knudsen, 1932). Knudsen wraz z Cyrilem Harrisem są współautorami książki „Projektowanie architektoniczne w akustyce” (ang. *Architectural Designing in Acoustics*), w której podsumowują dotychczasową wiedzę w zakresie akustyki architektonicznej. Książka ta stanowi rozwinięcie pracy z 1932 roku, w której autorzy skoncentrowali się na metodach i technikach projektowania przestrzeni w celu osiągnięcia optymalnych warunków akustycznych w różnych typach wnętrz, takich jak sale koncertowe, teatry, studia nagraniowe, a także przestrzenie użyteczności publicznej, m.in. szkoły i biura. W pracy tej podkreślają rolę właściwej izolacyjności akustycznej oraz wskazują na różnice w projektowaniu poszczególnych wnętrz w celu osiągnięcia optymalnego komfortu akustycznego (Knudsen, Harris, 1950). W kolejnych latach prowadzono nowe eksperymenty dotyczące propagacji dźwięku, właściwości akustycznych pomieszczeń i materiałów wykończeniowych, percepcji zjawisk akustycznych oraz identyfikacji parametrów skorelowanych z ich odbiorem. W połowie lat 40 Richard Bolt (1911-2002), profesor fizyki w MIT przedstawił propozycję właściwych proporcji wymiarów

prostokątnych pomieszczeń, które minimalizują nierównomierny rozkład częstotliwości własnych pomieszczenia, co korzystnie wpływa na jakość akustyczną pomieszczeń (Bolt, 1946). W roku 1981 Oscar Bonello (ur. 1940) uzupełnił pracę Bolta i wykazał, że w pomieszczeniach o regularnych kształtach ważne jest, aby liczba modów własnych (naturalnych częstotliwości rezonansowych) pomieszczenia wzrastała monotonicznie wraz ze wzrostem częstotliwości. Spełnienie tego wymagania, a więc takie określenie wymiarów pomieszczenia, aby w każdym paśmie o szerokości $1/3$ oktawy było tyle samo lub więcej modów niż w paśmie poprzednim (licząc od najniższego pasma) zapewnia równowagę tonalną w pomieszczeniu (Bonello, 1981). Współpracujący z Boltem (zarówno w ramach MIT, jak i w ramach przedsiębiorstwa Beranek, Bolt, Newman) Leo Beranek (1914-2016) jest kolejnym amerykańskim akustykiem, którego badania mają istotny wpływ na rozwój akustyki architektonicznej. Zanim Beranek skoncentrował się na akustyce pomieszczeń, zajmował się badaniem właściwości tub gramofonowych oraz materiałów służących do redukcji hałasu. Był konstruktorem pierwszej komory bezdechowej, którą zbudował na potrzeby badań głośników dużej mocy, a także wynalazcą tłumiących hałas słuchawek dla pilotów (Barron, 2017). Pierwsze wydanie jego książki „Muzyka, Akustyka i Architektura” wydana w 1962 roku zawiera analizę 55 najsłynniejszych sal koncertowych świata. Kolejna edycja tej książki, wydana w 2004 roku, zawiera analizę aż 100 sal. W wyniku swoich badań nad jakością pomieszczeń koncertowych Beranek opisał kilka nowych parametrów akustycznych: „Czas pierwszego odbicia” (ang. *Initial Time Delay Gap*, ITDG), „Stosunek basów” (ang. *Bass ratio*, BR) i „Stosunek sopranów” (ang. *Treble ratio*, TR). Wartość ITDG skorelował z poczuciem intymności (ang. *Intimacy*), wartości RT z poczuciem żywotności pomieszczenia (ang. *Liveness*), a wartość parametru BR z „cieplem brzmienia” (ang. *Warmth*). Zależności pomiędzy wartościami BR i TR pozwalają na bardziej precyzyjne opisanie proporcji między czasem wybrzmiewania niskich i wysokich częstotliwości, czyli inaczej mówiąc określają równowagę tonalną pomieszczenia (Beranek, 1996). W późniejszym okresie Beranek włączył się również w badania nad przestrzennością dźwięku próbując liczbowo opisać wrażenie jakiego doświadcza słuchacz, do którego dźwięk dociera ze wszystkich stron (Beranek, 2004). Beranek jako pierwszy zaproponował systemową procedurę oceny jakości akustycznej sal koncertowych, w której wykorzystał zarówno wyniki pomiarów obiektywnych jak i subiektywne odczucia słuchaczy. Na potrzeby procedury oceny jakości sali koncertowej Beranek przygotował ankietę, w której umieścił 18 cech wrażenia słuchowego, z których 8 skorelował z obiektywnymi parametrami akustyki pomieszczeń. Poszczególne cechy uzupełnione są o dwa określenia towarzyszące, aby lepiej opisać występowanie lub brak

występowania danej cechy, co ułatwia ankietowanym udzielenie bardziej precyzyjnych odpowiedzi. Poszczególne cechy mają również przypisane odpowiednie wagi, wynikające z wpływu poszczególnych cech na ostateczną jakość akustyczną sali. Wagi odpowiadające udziałowi poszczególnych parametrów w ostatecznej ocenie sali są różne w zależności od stylu muzycznego, czego konsekwencją jest różna ocena tej samej sali w zależności od wykonywanego w niej repertuaru. Beranek opisał również optymalne wartości czasu pogłosu dla sal koncertowych o różnej objętości stwierdzając, iż dla pomieszczeń o większej objętości korzystniejsze są większe wartości czasu pogłosu. Inni akustycy prowadzący badania nad optymalnymi wartościami długości pogłosu ustalili, że optymalne wartości czasu pogłosu zależą nie tylko od objętości pomieszczenia, ale i repertuaru, który jest w nich wykonywany. Najkrótsze czasy pogłosu preferowane są w telewizyjnych studiach nagrań i salach kinowych, pośrednie w salach wykładowych, konferencyjnych i teatrach dramatycznych, nieco dłuższe w salach kameralnych i operowych a najdłuższe w salach symfonicznych (Lifshitz, 1926; MacNair 1930; Knudsen, Harris, 1950; Kuhl, 1954b; Doelle, 1972; Ando i in. 1982 i inni). Beranek, łącząc w swoich badaniach ocenę subiektywną i obiektywną sal koncertowych, odegrał istotną rolę w ugruntowaniu akustyki pomieszczeń jako dyscypliny, w której istnienie danego parametru obiektywnego oraz ocena jego wartości mają sens jedynie wtedy, gdy można je skorelować z wrażeniami odbiorców. Badania właściwości akustycznych sal z wykorzystaniem ankiet skierowanych do widzów i muzyków były wykonywane również w późniejszych latach (m.in. Cremer, Müller, 1978; Reichardt, Kussev, 1973; Barron 1988; Haan, Fricke 1993, 1995; Bradley, Soulodre, 1995a).

Możliwość wykorzystania urządzeń elektroakustycznych i nowych metod badawczych pozwoliło na bardziej precyzyjne pomiary zjawisk akustycznych niż na początku wieku. Helmut Haas analizował zdolność słuchaczy do wychwycenia odbicia dźwięku w oparciu o różnicę poziomu i czasu pomiędzy dźwiękiem bezpośrednim a odbitym. Wraz ze wzrostem poziomu i różnicy czasu rosła liczba słuchaczy wskazujących na wystąpienie echa. Percepcja echa była zależna od rodzaju bodźców, niższe progi percepcji stwierdzono dla mowy niż dla muzyki (Haas, 1951). Manfred Schroeder (1926-2009) był niemieckim fizykiem, który kontynuując prace Bolta wyznaczył granicę pomiędzy obszarem o dominującym charakterze modalnym a obszarem, w którym pole pogłosowe ma charakter statystyczny (Schroeder, 1987). Schroeder (wraz z Meyerem) udoskonalili również badanie Haasa poprzez zmianę kierunku nadejścia odbicia w stosunku do kierunku dźwięku bezpośredniego. W ich badaniu opóźniony sygnał docierał z bocznej kąta 90°, a ich ustalenia dotyczące słyszalności echa potwierdzały wyniki uzyskane przez Haasa. Ponadto stwierdzili oni, że odbicie z kierunku bocznej nie

miało wpływu na lokalizację przestrzennego źródła dźwięku, chyba że różnica czasu dotarcia i poziomu dźwięku odbitego była znaczna, w porównaniu z dźwiękiem bezpośrednim (Meyer, Schroeder, 1952). W roku 1965 Schroeder zaproponował nową metodę obliczania czasu pogłosu na podstawie całkowania odpowiedzi impulsowej pomieszczenia. Metoda ta pozwalała na wykonywanie wielokrotnie mniejszej liczby pomiarów i uwalniała od procedury uśredniania dużej liczby pomiarów co powodowało, że jej wykorzystanie było szybsze i dawało bardziej precyzyjne wyniki. Schroeder jest również autorem koncepcji budowy pierwszych dyfuzorów dźwięku, których właściwości można obliczyć w wykorzystaniem właściwych formuł, a które równomiernie rozpraszają dźwięk w szerokim zakresie częstotliwości (Schroeder, 1956). Dyfuzory Schroedera wykorzystywane są do eliminowania echa oraz do rozpraszania energii akustycznej, co zwykle jest korzystnie oceniane przez słuchaczy. Erwin Meyer (1899-1972) i Rolf Thiele (1935-2019) to kolejni niemieccy fizycy, którzy mają swój wkład w rozwój akustyki poprzez wprowadzenie pierwszej metryki uwzględniającą równowagę między wczesną i późną energią, którą to metrykę nazwali „Wyrazistością” (ang. *Definition*) (Meyer, Thiele, 1956). Wyrazistość to stosunek wczesnej energii akustycznej zmierzonej w czasie 50 ms do całkowitej zmierzonej energii akustycznej. W przypadku tego parametru potwierdzono wysoką korelację z testami artykulacyjnymi, wykazując tym samym znaczenie wczesnych odbić dla zrozumiałości sygnałów mowy (Boré, 1956). Thiele zaproponował również przestrzenną technikę prezentowania wyników pomiarów, w postaci diagramu przypominającego „kulistego jeża”, którą zaprezentował już w roku 1952 i która była później wykorzystana przez innych naukowców. Na Rysunku 1 pokazano wizualizację pomiarów dokonanych za pomocą programu IRIS (oprogramowanie stworzone przez Marshall Day Acoustics) do trójwymiarowej analizy pola akustycznego w przestrzeni sali koncertowej. Długość i kąt każdej linii (kolca jeża) odpowiadają sile i kierunkowi każdego odbicia w porównaniu do dźwięku bezpośredniego (Exton, 2014).



Rysunek 1: Wizualizacje pomiarów dokonanych za pomocą narzędzia do trójwymiarowej analizy pola akustycznego w przestrzeni ratusza w Auckland (Exton, 2014).

Inną koncepcję porównywania wczesnej i późnej energii przedstawiono w pracy Reicharda, Abdela i Schmidta (Reichard i in., 1974) w której autorzy badali wpływ długości pogłosu na jakość akustyczną sali. W tym przypadku porównano wczesną energię zmierzoną w określonym przedziale czasu do pozostałej zmierzonej energii, a uzyskaną wartość nazwano „klarownością” (ang. *Clarity*). W pracy opisano percepcję w kontekście klarowności muzyki oraz granicy między jej „użytecznym” a „nieużytecznym” zakresem czasowym w akustyce sal koncertowych. Na podstawie obserwacji czasu trwania nut oraz wybrzmiewania instrumentów muzycznych zaproponowano wartość 80 ms jako granicę całkowania energii dla klarowności muzyki, uznając odbicia docierające w tym przedziale czasu za korzystne dla słuchaczy (Reichard, Kussev, 1973). Dla mowy ustalono granicę 50 ms, wykazując, że odpowiada ona użytecznym odbiciom poprawiającym jej zrozumiałość (Cremer, Müller, 1978).

W latach 70. badacze zaproponowali cały szereg parametrów oceny jakości akustycznej, korelujących z subiektywną oceną i będących możliwymi do wykorzystania na etapie projektowania czy też budowy obiektów, w których akustyka odgrywa zasadniczą rolę. W 1970 roku Wilhelm Lassen Jordan (1909-1982) wprowadził parametr „Czas wczesnego zaniku” (ang. *Early Decay Time*, EDT), który definiuje się jako sześciokrotność czasu potrzebnego do spadku gęstości energii akustycznej o 10 dB, liczonego od momentu nadejścia dźwięku bezpośredniego. (Jordan, 1970). Późniejsze badania potwierdziły, że wartość EDT jest lepszym predyktorem długości pogłosu niż RT30 (Lehmann, Wilkens, 1980). W 1971 Rudolf Kürer wprowadził „Czas centralny” (ang. *Center time*) jako parametr opisujący energetyczny

środek ciężkości odpowiedzi impulsowej pomieszczenia, podkreślając zależność pomiędzy wartością tego parametru a subiektywną percepcją klarowności dźwięku i czasowej harmonii w pomieszczeniu. Zastosowanie proporcjonalnego podziału uwalnia od ograniczenia, wynikającego ze sztywnych wartości czasów integracji dla parametrów Klarowności czy Wyrazistości, dla których pojedyncze silne odbicie może spowodować znaczną zmianę wartości tych parametrów (Kürer, 1971). Peter Lehmann (ur. 1934) jest kolejnym badaczem zajmującym się zależnościami między obiektywnymi parametrami akustycznymi a subiektywnymi odczuciami słuchaczy w kontekście akustyki sal koncertowych. W swojej pracy doktorskiej Lehmann (1976) wykazał, że parametr G (siła dźwięku) – definiowany jako różnica poziomu ciśnienia akustycznego w danym punkcie pomieszczenia względem poziomu w polu swobodnym, wyrażona w decybelach – wykazuje najwyższą korelację z istotnym aspektem subiektywnej oceny, jakim jest percepcja siły dźwięku i rozmiaru źródła dźwięku. Od lat 70. XX wieku akustyka sal koncertowych rozwija się jako coraz bardziej wyrafinowana dyscyplina, w której wprowadzenie kolejnych parametrów oraz badanie ich korelacji z wrażeniami słuchowymi pozwoliły lepiej zrozumieć, dlaczego niektóre sale koncertowe są pod względem akustycznym lepsze od innych. W kolejnych latach badacze opracowali również parametry określające przestrzenność dźwięku w salach koncertowych. Przykładem tych parametrów są: energia boczna (ang. *Lateral Energy Fraction*, LEF), czyli miara energii dźwięku docierająca z kierunków bocznych, co wpływa na percepcję przestrzenności dźwięku w audytoriach (Barron, 1971; Barron, Morimoto, 1998), pozorna szerokość źródła, (ang. *Apparent Source Width*, ASW) czyli subiektywna szerokość źródła dźwięku postrzegana przez słuchacza, zależna głównie od wczesnych odbić bocznych w sali koncertowej (Ando, 1985) oraz otoczenie dźwiękiem (ang. *Listener Envelopment*, LEV), a więc parametr opisujący wpływ późnych odbić dźwięku na wrażenie przestrzenności, definiując LEV jako odczucie otoczenia słuchacza przez dźwięk (Bradley, Soulodre, 1995a). Parametry te liczbowo opisują wrażenie przestrzenności dźwiękowej jako obraz rozmiaru pomieszczenia wytworzone w świadomości słuchacza na skutek percepcji dźwięków bezpośrednich oraz pochodzących z odbić o różnych kierunkach i różnej energii. Przestrzennością zajmował się również Jordan, który uważał, że późną energię należy analizować w czasie od 25 do 80 ms, a nie w czasie 5 do 80 ms jak proponowali Barron i Morimoto (Jordan, 1980). Yoichi Ando (1931-2022) wraz z Peter'em Damaske opracowali metrykę, nazwaną międzyuszną korelacją wzajemną (ang. *Interaural Cross-Correlation*, IACC), której wartość zależy od różnicy w parametrach dźwięku docierającego do lewego i prawego ucha słuchacza. Wysoka wartość IACC wskazuje

na brak różnic i tym samym niewielką przestrzenność dźwięku, a niska wskazuje na wysoki stopień przestrzenności (Damaske, Ando, 1972).

Przez wiele lat badania nad akustyką pomieszczeń dotyczyły głównie sal koncertowych, koncentrując się na jakości dźwięku w przestrzeni widowni. Dopiero pod koniec lat 80 XX wieku, Jens H. Gade przedstawił parametry akustyczne związane z odbiorem dźwięku przez muzyków na scenie, które od tego czasu są uwzględniane podczas projektowania akustyki sal koncertowych. Parametr nazwany przez Gade „wsparciem sceny” (ang. *Stage Support*, ST) określa poziom akustycznego wsparcia dla muzyków znajdujących się na scenie. Wskaźnik ten jest przydatny w ocenie, w jakim stopniu muzycy słyszą na scenie własny instrument oraz pozostałych wykonawców (Gade, 1989a, 1989b).

Osobną grupę, o której należy wspomnieć, stanowią badania nad zrozumiałością mowy. Na początku lat 70. XX wieku Houtgast i Steeneken opracowali współczynnik zrozumiałości mowy (ang. *Speech Transmission Index*, STI) pozwalający obiektywnie określić zrozumiałość mowy w różnych warunkach akustycznych. Wykorzystując podobieństwo sygnałów mowy do sygnałów modulowanych amplitudowo i analizując w jaki sposób sygnały modulowane amplitudowo są zniekształcane przez akustykę pomieszczenia lub system nagłośnieniowy określali stopień zrozumiałości mowy w skali od 0 do 1, dzieląc ten zakres na kilka poziomów od bardzo zły, kolejno przez zły, średni, dobry i bardzo dobry zrozumiałość (Houtgast, Steeneken, 1971). Wykorzystanie metody pomiaru STI zapewniało powtarzalne, obiektywne wyniki. Innym wskaźnikiem określającym zrozumiałość mowy opracowanym w podobnym okresie jest współczynnik określający procent utraconych spółgłosek (ang. *Articulation Loss of Consonants*, %ALCons) w czasie transmisji sygnału mowy (Peutz, 1971). Utrata mniej niż 5% spółgłosek uważana jest za gwarantującą bardzo dobrą zrozumiałość, bardzo słaba zrozumiałość występuje wtedy, gdy wartość utraconych spółgłosek przekracza 20%.

W 1997 roku Międzynarodowa Organizacja Standaryzacji podsumowała dokonania akustyków w dziedzinie określania właściwości pogłosowych w przestrzeniach koncertowych i audytoryjnych publikując wytyczne dotyczące sposobu prowadzenia pomiarów parametrów akustycznych jako normę o numerze ISO 3382 (1997). Kolejne wersje tej normy zawierały wytyczne w osobnych częściach dla: pomieszczeń o akustyce kwalifikowanej, pomieszczeń zwyczajnych oraz dla pomieszczeń biurowych o otwartej przestrzeni, definiując dla każdego rodzaju przestrzeni zestaw parametrów istotnych ze względu na sposób ich wykorzystywania. Opracowanie wytycznych opisanych w normie ISO-3382 (2008) nie zamyka oczywiście badań nad akustyką i percepcją. Akustycy wciąż prowadzą badania nad akustyką pomieszczeń,

percepcją i korelacją z parametrami obiektywnymi. Dyskusja nad zgodnością parametrów z percepcją pozostaje otwarta i wciąż prowadzone są badania przy użyciu coraz nowocześniejszych metod badawczych. Przykładem mogą być badania prowadzone przez Tapio Lokkiego, który opracował system symulujący orkiestrę symfoniczną, składający się z 34 głośników, wykorzystany w ocenie jakości akustycznej sal koncertowych. W ramach swoich badań Lokki zastosował też model oceny preferencji akustycznych oparty na subiektywnych profilach sensorycznych, zapożyczonych z procedury testowania win (Lokki i in., 2012). Przymiotniki używane przez słuchaczy do opisu wrażeń słuchowych przyporządkował odpowiadającym im parametrom obiektywnym, uzyskując w ten sposób wielowymiarową ocenę jakości sali. Wyniki badań wskazują na istnienie dwóch grup słuchaczy o odmiennych preferencjach. Pierwsza grupa preferowała sale koncertowe, które zapewniają bliski dźwięk o wysokiej klarowności i przejrzystości, a więc takie w którym mogli łatwo rozróżnić poszczególne instrumenty i linie melodyczne. Druga grupa preferowała głośniejszy i bardziej pogłosowy dźwięk o dużej przestrzenności i z mocnym basem (Lokki i in. 2012).

Coraz większa świadomość słuchaczy oraz chęć zapewnienia jak najlepszej jakości doznań akustycznych widzom różnych wydarzeń kulturalnych, a także konieczność wykorzystania tych samych pomieszczeń do wydarzeń różnego rodzaju spowodowały powstanie różnych rozwiązań pozwalających na regulację parametrów akustycznych w salach koncertowych. Początkowo stosowano rozwiązania pasywne, wykorzystując różnego rodzaju tkaniny tłumiące skracające czas pogłosu lub komory pogłosowe, które go wydłużają. Jednak już od lat 50 XX wieku równolegle trwały prace nad systemami wykorzystującymi urządzenia elektroniczne w celu regulacji (zazwyczaj wydłużania) pogłosu w pomieszczeniach. Systemy te ewoluowały od prostych układów wykorzystujących pojedyncze pętle mikrofon – wzmacniacz – głośnik, aż po współczesne skomplikowane systemy wykorzystujące dziesiątki pętli i zaawansowane algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów (Poletti 2010; Bakker, Gillan, 2014).

Rozwój badań nad mechanizmami odbioru i propagacji dźwięku przyczynił się do wyodrębnienia kilku wyspecjalizowanych obszarów badawczych, takich jak psychoakustyka czy akustyka fizjologiczna. Psychoakustyka koncentruje się na subiektywnych aspektach słyszenia takich jak: percepcja głośności, barwy i wysokości dźwięku, zdolność słuchacza do lokalizacji źródła dźwięku, efekty związane z maskowaniem dźwięku oraz iluzji akustycznych. Z kolei akustyka fizjologiczna zajmuje się opisem fizycznego i biologicznego funkcjonowania narządu słuchu, obejmując zagadnienia takie jak: fizyczna budowa ucha, mechanika ślimaka, przetwarzanie sygnałów nerwowych i mechanizmy adaptacyjne układu słuchowego (Moore,

2013). Początki rozwoju tych wąskich specjalizacji wewnątrz szerzej pojmowanej akustyki zawdzięczamy urodzonemu w Budapeszcie, późniejszemu laureatowi Nagrody Nobla w dziedzinie fizjologii i medycyny za badania nad układem słuchowym, Georgowi von Békésy (1899-1972). Békésy określił statyczne i dynamiczne właściwości błony podstawnej i zbudował mechaniczny model ślimaka i prawdopodobnie był pierwszą osobą, która zaobserwowała prądy wirowe w płynie ślimaka. Józef Zwislocki (1922-2018) uważał, że istnienie takich ruchów płynu nieuchronnie prowadzi do nieliniowości, chociaż Helmholtz zakładał, że ucho wewnętrzne jest układem liniowym (Helmholtz, 1865; Zwislocki, 1962). Nieliniowy charakter układu słuchowego potwierdził również William Rhode (1937–2021), przeprowadzając na początku lat 70. XX wieku pionierskie pomiary *in vivo* (Rhode 1971). W ramach badań nad psychoakustyką, w 1933 roku Harvey Fletcher (1884–1981) i Wayne A. Munson (1931-2011) opublikowali pierwsze wyniki dotyczące krzywych izofonicznych, określając poziomy równej głośności poprzez porównanie głośności różnych tonów do tonu o częstotliwości 1000 Hz wykazując nieliniowość układu słuchowego w dziedzinie częstotliwości. Odkrycia dotyczące mechanizmów maskowania dźwięku również mają znaczący wpływ na rozwój teorii dotyczących przetwarzania dźwięku w uchu wewnętrznym i przyczyniły się do lepszego zrozumienia mechanizmów percepcji słuchowej (Wegel, Lane, 1924; Moore, i in., 1993).

Podsumowując, w tym rozdziale przedstawiono historię rozwoju akustyki ze szczególnym uwzględnieniem akustyki pomieszczeń, datami ustalenia najważniejszych parametrów w akustyce pomieszczeń oraz przełomowych metod badawczych w tym zakresie. Historia rozwoju akustyki jako nauki jasno wskazuje na nieprzerwany ciąg badań łączących obiektywizm pomiarów z subiektywną oceną zjawisk akustycznych.

Rozwój aktywnych systemów wspomagania akustyki oraz brak literatury dotyczący percepcji zjawisk akustycznych w takim środowisku, zachęca do kontynuowania prac również w tym zakresie. Określenie związków między parametrami fizycznymi dźwięku a subiektywnymi wrażeniami słuchowymi, ma kluczowe znaczenie dla projektowania przestrzeni akustycznych i technologii poprawiających jakość odbioru dźwięku, co jest tematem niniejszej pracy.

2 Akustyka sal koncertowych i sal wielofunkcyjnych

Zakres tematyczny niniejszego rozdziału obejmuje wprowadzenie do wybranych parametrów akustycznych pomieszczeń oraz metod ich oceny, zarówno obiektywnych, jak i subiektywnych. Ze względu na to, że są to zagadnienia fundamentalne, niezmiennie i powszechnie wykorzystywane w analizie akustyki sal koncertowych, ich opis w niniejszej pracy siłą rzeczy pokrywa się częściowo z treściami opracowanymi wcześniej przez autora w pracy magisterskiej.

Zachowanie spójności merytorycznej oraz klarowności wywodu wymagało odwołania się do tych samych terminów, klasyfikacji i definicji, co w pracy wcześniejszej. Ich ponowne opracowanie w zmienionej formie byłoby sztuczne i nieuzasadnione merytorycznie i mogłoby prowadzić do nieścisłości lub rozmycia znaczeń. W szczególności dotyczy to podstawowych definicji, opisów parametrów oraz niektórych ilustracji, które mają charakter ogólny i dydaktyczny.

Treści zawarte w tym rozdziale stanowią zatem teoretyczne i terminologiczne zaplecze niezbędne dla zrozumienia dalszych, autorskich analiz przedstawionych w kolejnych częściach rozprawy, które stanowią oryginalny wkład autora w rozwój omawianej problematyki.

Jak wykazano w poprzednim rozdziale, rozwój akustyki wewnątrz jako dziedziny nauki jest spowodowany m. in. potrzebą jak najdokładniejszego zbadania relacji pomiędzy obiektywnymi parametrami opisującymi sale koncertowe a odczuciami, jakie u słuchaczy wzbudza przebywanie w tych salach podczas wydarzeń artystycznych. Wieloletnie badania w tym zakresie doprowadziły do powstania różnych metod oceny jakości akustycznej pomieszczeń oraz do określenia wielu parametrów, które są współcześnie wykorzystywane w projektowaniu pomieszczeń. Znajomość zależności pomiędzy obiektywnymi miarami a subiektywną oceną umożliwia projektowanie obiektów, w których wysoka jakość akustyczna jest rezultatem świadomych decyzji projektowych opartych na wiedzy, a nie powielania wcześniejszych rozwiązań i liczenia na przypadkowy efekt, jak miało to miejsce aż do końca XIX wieku.

W związku z tym, w niniejszym rozdziale zawarto definicje wybranych parametrów oceny akustyki pomieszczeń. Przedstawiono zarówno parametry obiektywne, jak i subiektywne, a także optymalne wartości tychże parametrów w salach o konkretnych przeznaczeniu. Ponieważ wartości większości tych parametrów można wyznaczyć z odpowiedzi impulsowej pomieszczenia, na początku tego rozdziału zdefiniowano pojęcie odpowiedzi impulsowej pomieszczenia oraz opisano sposoby jej wyznaczania.

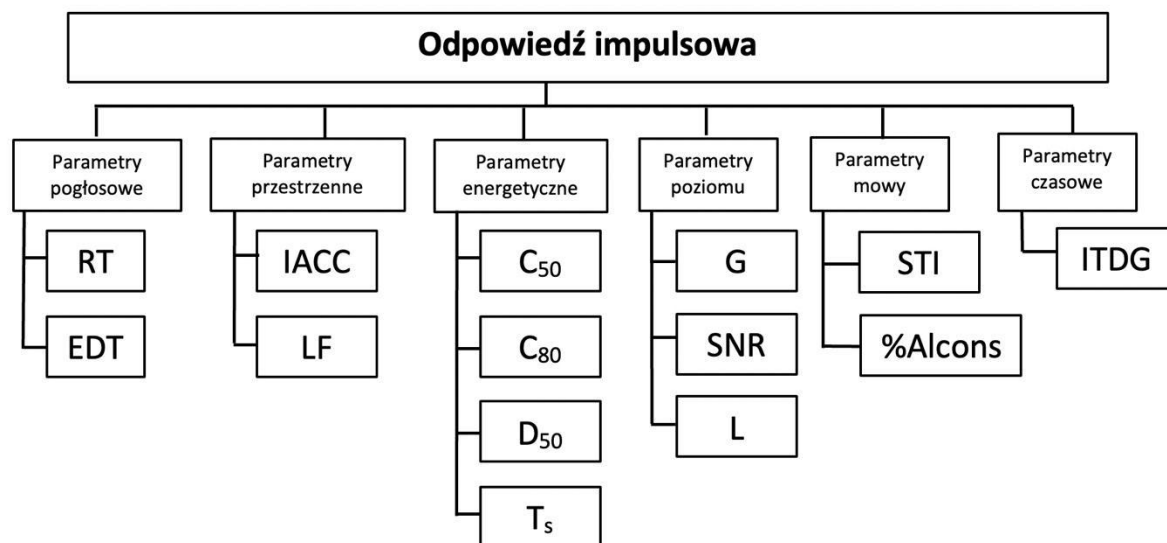
2.1 Odpowiedź impulsowa pomieszczenia

System liniowy niezmienny w czasie (ang. *Linear Time Invariant*, LTI) jest w pełni scharakteryzowany przez jego odpowiedź impulsową, ponieważ pozwala ona na wyznaczenie odpowiedzi systemu na pobudzenie dowolnym sygnałem wejściowym poprzez spłot tego sygnału z odpowiedzią impulsową pomieszczenia (ang. *Room Impulse Response*, RIR) (Oppenheim i in., 1999).

Analizę akustyki pomieszczeń można prowadzić w oparciu o teorię sygnałów, traktując pomieszczenie jako liniowy i niezmienny w czasie system. Założenie liniowości wynika głównie z faktu, że równanie falowe, które poprawnie opisuje zachowanie dźwięku w zakresie amplitud występujących dla konkretnych częstotliwości (w zakresie 20Hz-20kHz), jest równaniem liniowym (Kuttruff, 2009). Wprawdzie w sali koncertowej może dochodzić do zmian temperatury lub poziomu tła akustycznego podczas sesji pomiarowej, co narusza warunek niezmienności w czasie, ale ich wpływ jest ograniczony do odpowiedzi pomieszczenia tylko w zakresie wysokich częstotliwości (Satoh i in., 2005).

Zgodnie z normą ISO 3382-2 (2008), odpowiedź impulsowa pomieszczenia jest definiowana jako czasowy przebieg ciśnienia akustycznego rejestrowany w określonym punkcie, w odpowiedzi na emisję impulsu Diraca w innym punkcie tego samego pomieszczenia. Ponieważ wytworzenie i wyemitowanie impulsów przedstawiających czystą funkcję delta Diraca nie jest możliwe, w praktyce pomiarowej uznaje się, że krótkotrwałe dźwięki impulsowe (na przykład wystrzały pistoletów startowych) są jej wystarczająco dobrym przybliżeniem. Alternatywną techniką pomiarową jest „zastosowanie sygnału typu pseudolosowego w postaci ciągu o maksymalnej długości (ang. *Maximum Length Sequence*, MLS) lub innego określonego sygnału o płaskim widmie, jak *sine sweep* i przetworzenie zmierzonego sygnału na odpowiedź impulsową” (ISO 3382-2, 2008). Przez całkowanie w odwróconym czasie kwadratu odpowiedzi impulsowej otrzymuje się krzywą zaniku, czyli graficzne przedstawienie spadku poziomu ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu w funkcji czasu po wyłączeniu źródła dźwięku. Ponieważ zdecydowaną większość parametrów akustyki pomieszczeń wyznacza się na podstawie analizy sposobu, w jaki energia akustyczna rozprasa się i zanika w przestrzeni, uzyskanie krzywej zaniku ma kluczowe znaczenie dla oceny właściwości akustycznych wnętrz. W zależności od przyjętego sposobu analizy odpowiedzi impulsowej możliwe jest wyznaczenie różnych parametrów akustycznych. Ich wzajemne

zależności oraz sposób wyznaczania zilustrowano na Rysunku 2, a poszczególne parametry opisano w dalszej części pracy.



Rysunek 2: Parametry uzyskane z analizy odpowiedzi impulsowej (na podstawie Engel i in., 2007).

W celu uzyskania wartości poszczególnych parametrów, w praktyce wykonuje się od kilku do kilkudziesięciu pomiarów dla różnych kombinacji źródła dźwięku – mikrofon pomiarowy, a uzyskane wyniki uśrednia się zgodnie z wytycznymi norm (ISO 3382-1, 2009, ISO 3382-2, 2008).

Należy tu wspomnieć, że ponieważ IR jest zwykle uzyskiwana z wykorzystaniem pojedynczego wszechkierunkowego źródła dźwięku umieszczonego w kilku punktach w sali koncertowej, najnowsze badania kwestionują, czy technika ta może uchwycić złożone pole dźwiękowe generowane przez zespół złożony z wielu instrumentów (Braasch, Blauert, 2017), natomiast mimo pewnych ograniczeń, użycie tej metody jest wciąż powszechną praktyką, którą wykorzystuje się podczas analizy parametrów akustycznych sal koncertowych i innych pomieszczeń.

2.2 Parametry obiektywne w akustyce pomieszczeń

Rozdział ten zawiera przegląd najważniejszych obiektywnych parametrów stosowanych w ocenie akustyki pomieszczeń, wraz z ich definicjami oraz – tam, gdzie to możliwe – zalecanymi wartościami optymalnymi dla różnych typów przestrzeni. Szczególną uwagę poświęcono parametrom istotnym z perspektywy analiz przeprowadzonych w niniejszej pracy. Pozostałe ujęto skrótowo, wskazując jednocześnie źródła literaturowe szczegółowo analizujące te parametry.

2.2.1 Czas pogłosu (ang. *Reverberation Time*, RT)

Czas pogłosu, najwcześniej zdefiniowany parametr w akustyce pomieszczeń „to czas potrzebny do spadku uśrednionej w przestrzeni gęstość energii akustycznej o 60 dB po wyłączeniu źródła dźwięku” (ISO 3382-1, 2009). Innymi słowy, jest to czas, który jest potrzebny, aby po ustaniu pracy źródła dźwięku energia akustyczna pola dźwiękowego spadła do jednej milionowej swojej pierwotnej wartości (Kulowski, 2011). Termin ten został wprowadzony w 1898 roku przez Wallace'a Clementa Sabine'a. RT jest istotnym parametrem oceny akustyki wnętrz, określającym jego jakość akustyczną, a tym samym - ogólnie określającym jakość odbioru muzyki i zrozumiałość mowy. Do lat 40 XX wieku był to jedyny parametr wykorzystywany do oceny jakości akustycznej pomieszczeń. Ze względu na dużą korelację RT z innymi parametrami oceny jakości akustycznej, do dziś jest parametrem zawsze podawanym w ocenie akustyki wnętrz.

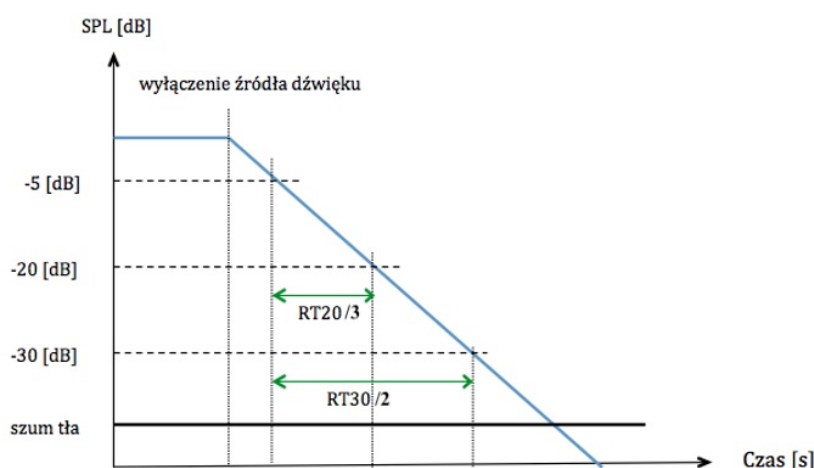
Znajomość wartości chłonności akustycznej pomieszczenia umożliwia obliczenie czasu pogłosu (RT) przy użyciu wzorów opracowanych przez różnych badaczy na przestrzeni dekad. Podstawą tych obliczeń jest wzór zaproponowany przez Sabine'a (Wzór 2), oparty na założeniu jednorodnego pola dźwiękowego. W praktyce daje on wyniki zbliżone do pomiarów jedynie w przypadku pomieszczeń o niewielkiej chłonności akustycznej. Z tego względu jego stosowalność ogranicza się głównie do sal słabo wytłumionych i o równomiernym rozkładzie chłonności. W celu wyeliminowania tych ograniczeń w kolejnych latach zaproponowano modyfikacje wzoru Sabine'a. Carl Eyring opracował formułę odpowiednią dla pomieszczeń o dowolnym stopniu wytłumienia. Millington zaproponował modyfikację dla przypadków dużych różnic we współczynnikach pochłaniania (Kulowski, 2011). Knudsen uwzględnił dodatkowo tłumienie energii akustycznej przez powietrze, natomiast Fitzroy – różnice w chłonności akustycznej przeciwnych par ścian (Rettinger, 1977). Rozwinięcia te poprawiają dokładność szacowania czasu pogłosu, jednak nie likwidują wszystkich ograniczeń – obliczenia nadal opierają się na statystycznym modelu propagacji fal, nieuwzględniającym zjawisk falowych, kierunkowości źródeł czy nierównomiernego rozkładu energii w przestrzeni. Ze względu na zakres tematyczny niniejszej dysertacji pominięto szczegółowy opis tych wzorów, ograniczając się jedynie do wskazania literatury, w której zagadnienia te zostały omówione szerzej.

2.2.1.1 Pomiary czasu pogłosu

Dokładną procedurę pomiaru RT dla pomieszczeń opisano w normach (ISO 3382-1, 2009; ISO 3382-2, 2008). W najprostszy sposób można zmierzyć czas pogłosu wykorzystując

szerokopasmowe źródło dźwięku oraz miernik z funkcją pomiaru długości RT. W praktyce, ze względu na brak izotropowości pola akustycznego najczęściej rejestruje się odpowiedzi impulsowe dla co najmniej kilku (najczęściej dla kilkunastu) kombinacji położenia źródła dźwięku i mikrofonu pomiarowego, ponieważ analiza zebranych odpowiedzi impulsowych i uzyskanych na ich podstawie krzywych zaniku dostarcza znacznie więcej informacji o parametrach akustycznych pomieszczenia niż tylko wartość RT.

Aby możliwe było wyznaczenie czasu zaniku poziomu dźwięku o 60 dB, jego źródło musi wygenerować sygnał pomiarowy o poziomie co najmniej 75 dB powyżej poziomu tła akustycznego w danym paśmie częstotliwości. Ponieważ w praktyce trudno jest uzyskać tak wysoki poziom ciśnienia akustycznego, czas pogłosu można określić na podstawie ekstrapolacji czasu dla zaników o mniejszej dynamice. W przypadku, gdy stosuje się taką metodę przy wyniku należy podać odpowiednie oznaczenie symboliczne. Jeśli RT jest określany od momentu, w którym krzywa zaniku po raz pierwszy osiąga spadek o 5 dB poniżej poziomu początkowego do spadku o 25 dB, taki czas pogłosu jest oznaczony symbolem RT20. Jeśli stosowana jest wartość spadku od 5 do 35 dB poniżej poziomu początkowego, stosuje się oznaczenie RT30 (ISO 3382-2, 2008). W podobny sposób można wyznaczyć czasy RT10, czy RT15 mierząc spadek poziomu ciśnienia w odpowiednim zakresie i mnożąc wynik odpowiednio przez 6 dla RT10 i 4 dla RT15, aby móc porównać go z parametrem RT60. Na Rysunku 3 zielonymi strzałkami zaznaczono zakresy wykorzystywane do określenia wartości parametrów RT20 i RT30.



Rysunek 3: Zakresy zaniku energii akustycznej wykorzystywane do obliczenia wartości parametrów RT20 i RT30.

Aby opisać zanik energii akustycznej w poszczególnych pasmach częstotliwości, wartości RT są podawane dla pasm oktaowych lub jeszcze dokładniej, dla pasm tercjowych. Norma (ISO 3382-2, 2008) stwierdza, że szerokość pasma sygnału pobudzającego pomieszczenie musi

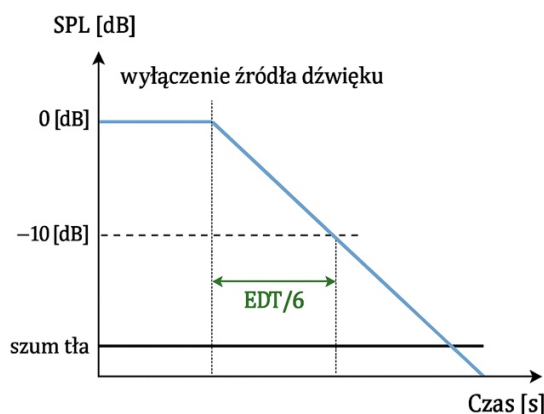
być większa lub równa szerokości pasma, dla którego dokonywany jest pomiar. Możliwy jest również jednoczesny pomiar wszystkich pasm, w którym to przypadku „należy uzyskać w przybliżeniu różowe widmo dźwięku w stanie ustalonym w pomieszczeniu w zakresie od 88 Hz do 5657 Hz” (ISO 3382-2, 2008). Podany zakres częstotliwości obejmuje pasma oktauwowe o częstotliwościach środkowych od 125 Hz do 4 kHz oraz pasma tercjowe o częstotliwościach środkowych od 100 Hz do 5 kHz (ISO 3382-2, 2008). Tabela 1 przedstawia częstotliwości środkowe trzeciej oktawy i pasm oktauwowych zgodnie z normą (ISO 3382-2, 2008). Analizę zależności wartości parametru od częstotliwości stosuje się nie tylko dla RT, ale również dla innych parametrów oceny akustyki wnętrz.

Tabela 1: Częstotliwości środkowe pasm tercjowych i oktauwowych.

Pasmo	Częstotliwości środkowe pasm (Hz)															
tercjowe	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
oktauwowe		125			250			500			1000			2000		4000

2.2.2 Czas wczesnego zaniku (ang. *Early Decay Time*, EDT)

Czas wczesnego zaniku (EDT) jest parametrem akustycznym opisującym szybkość zanikania energii dźwięku w pomieszczeniu w początkowej fazie zaniku. Jest definiowany jako sześciokrotność czasu potrzebnego na spadek poziomu dźwięku o 10 dB od momentu wyłączenia źródła dźwięku (Jordan, 1970). W praktyce oznacza to, że im krótszy czas EDT, tym szybciej dźwięk zanika, co wpływa na postrzeganą klarowność i zrozumiałość mowy oraz muzyki w danym pomieszczeniu. EDT często przyjmuje wartości niższe niż wartości RT. Wartość EDT silniej niż wartość RT zależy od punktu w pomieszczeniu, w którym znajduje się słuchacz (Barron, 1988). Na Rysunku 4 zielonymi strzałkami zaznaczono zakres wykorzystywany do obliczenia wartości parametru EDT.



Rysunek 4: Zakres zaniku energii akustycznej wykorzystywany do obliczenia wartości parametru EDT.

2.2.3 Klarowność /Przejrzystość (ang. *Clarity*, C)

Subiektywna zdolność rozróżniania szczegółów postrzeganego dźwięku, a także zdolność słyszenia krótkich dźwięków cichych instrumentów w porównaniu z głośną orkiestrą, jest ważnym parametrem oceny jakości akustycznej pomieszczenia. Ta zdolność ma swój liczbowy odpowiednik w postaci parametru zwanego Klarownością lub Przejrzystością. Liczbowo parametr ten jest definiowany jako stosunek energii docierającej do punktu pomiaru w czasie „t” po dźwięku bezpośrednim do pozostałej energii docierającej do punktu pomiaru, wyrażony w mierze logarytmicznej (Reichard, i in. 1975).

$$Ct = 10 \log \frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt} \quad \text{Wzór 3}$$

gdzie: Ct - Klarowność [dB], t - czas: 50 lub 80 [ms], p(t) - ciśnienie akustyczne w funkcji czasu (odpowiedź impulsowa) [Pa].

Ze względu na różnice w czasie pojawiania się kolejnych dźwięków w mowie i muzyce, głównie wykorzystuje się dwa przedziały czasowe: t=50 ms i t=80 ms odpowiednio dla mowy i muzyki. W konsekwencji otrzymujemy dwa podstawowe warianty Klarowności: C50 (Ahnert, Schmidt, 1980) i C80 (Abdel Alim, 1973), które najczęściej uwzględnia się w analizie akustyki pomieszczeń. Czasami wykorzystuje się również inne przedziały czasowe: C7 to Klarowność, w której uwzględnia się 7 ms przedział czasu, ten parametr dobrze koreluje z wrażeniem bezpośredniości i bliskości źródła dźwięku. C35 to Klarowność, w której uwzględnia się 35 ms przedział czasu, to Klarowność wykorzystywana do oceny wczesnych odbić (Ahnert, Schmidt, 1980).

2.2.4 Wyrazistość (ang. *Definition*, D)

Subiektywna zdolność do rozróżniania szybko następujących po sobie sekwencji dźwięków, ma swój liczbowy odpowiednik w postaci parametru zwanego Wyrazistością. Wyrazistość (D) to stosunek wczesnej energii docierającej do punktu pomiaru w czasie krótszym niż 50 ms do całkowitej energii akustycznej (Thiele, 1953). Przyjęcie granicy 50 ms jest uzasadnione wynikami badań przeprowadzonych przez Helmuta Haasa (1951), z których wynika, że im większa energia fal odbitych dociera do słuchacza w pierwszych 50 ms, tym łatwiej jest mu rozróżnić kolejne, szybko następujące po sobie dźwięki (Kulowski, 2011).

$$D = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^\infty p^2(t) dt} \quad \text{Wzór 4}$$

gdzie: D - Wyrazistość [dB], t - czas: 50 [ms], p(t) - ciśnienie akustyczne w funkcji czasu (odpowiedź impulsowa) [Pa].

2.2.5 Poziom dźwięku (ang. *Sound Level, L*)

Niektóre parametry akustyczne opisują energię akustyczną zgromadzoną w określonym przedziale czasu lub relacje między energiami w różnych okresach. W praktyce stosuje się także bezpośrednie pomiary poziomu dźwięku z wykorzystaniem różnych czasów całkowania. W Tabeli 2 zestawiono najczęściej wykorzystywane zakresy czasowe, odpowiadające im aspekty percepcyjne oraz ich powiązania z innymi parametrami akustyki wnętrz.

Tabela 2: Najczęściej wykorzystywane zakresy pomiarowe dla Poziomu dźwięku wraz odpowiadające im zjawiska percepcyjne oraz podobieństwo do innych parametrów akustyki wnętrz

Parametr	Zakres czasowy	Aspekt percepcyjny	Zastosowanie /powiązane parametry
L7	do 7 ms	Lokalizacja źródła dźwięku, czytelność sygnału bezpośredniego	Poziom dźwięku bezpośredniego
L35	do 35 ms	Wczesna energia wspomagająca klarowność	Poziom dźwięku bezpośredniego uwzględniający bardzo wczesne odbicia
L50	do 50 ms	Zrozumiałość mowy, separacja źródeł	Powiązany z C50 (Klarowność mowy)
L80	do 80 ms	Klarowność muzyki, artykulacja dźwięków	Powiązany z C80 (Klarowność muzyki)
Ltotal	cały czas trwania IR	Wrażenie siły dźwięku, pogłosowość, ogólna głośność	Związany z parametrem G (Siła dźwięku)

Wyniki pomiarów poziomu dźwięku wykorzystuje się również do określenia stosunku energii wczesnej do późnej dla różnych czasów całkowania. Stosunek ten informuje, jaka część całkowitej energii sygnału zawarta jest w początkowym okresie po dotarciu dźwięku, w porównaniu do jego późniejszej części. Przy granicach czasowych 50 ms i 80 ms wartości te są odpowiednikami parametrów klarowności C50 i C80. Poziom dźwięku, podobnie jak inne parametry akustyczne, może być analizowany w wybranych pasmach częstotliwości.

W literaturze spotyka się także statystyczne poziomy dźwięku, również oznaczane jako L_n , które wykorzystywane są w procedurach pomiaru hałasu. Liczbą „n” oznacza się wówczas procent czasu, w jakim przekraczane są określone poziomy hałasu. Ponieważ niniejsza praca koncentruje się na zagadnieniach dotyczących akustyki wnętrz a nie hałasu, wykorzystane w tej pracy określenia poziomu dźwięku będą każdorazowo dotyczyły poziomu ciśnienia akustycznego zmierzonego w określonym czasie.

2.2.6 Czas centralny (ang. *Center Time, Ts*)

Czas centralny, T_s [s] – jest definiowany jako czas, po którym energia impulsu osiąga 50% swojej całkowitej wartości, jest to więc czasowy środek ciężkości echogramu, który jest wysoko skorelowany ze współczynnikiem przejrzystości (Lehmann, Müller, 1971). Współczynnik ten

jest również wysoko skorelowany z subiektywnie odczuwaną pogłosowością pomieszczenia. Czas centralny wyraża się wzorem:

$$Ts = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad \text{Wzór 5}$$

gdzie: T_s - czas centralny [s], t - czas [s], $p(t)$ - ciśnienie akustyczne w funkcji czasu (odpowiedź impulsowa) [Pa].

Parametr ten zaproponowany został przez Kürera (1971). czas centralny T_s i czas pogłosu RT łączy następująca zależność (Bradley, 1986):

$$Ts = \frac{RT}{13,82} \quad \text{Wzór 6}$$

gdzie: T_s - czas centralny [s], RT - czas pogłosu [s].

2.2.7 Czas pierwszego odbicia (ang. *Initial Time Delay Gap, ITDG*)

Czas pierwszego odbicia, to czas jaki upływa pomiędzy dotarciem do słuchacza dźwięku bezpośredniego, a czasem, po którym do słuchacza dociera pierwsze odbicie dźwięku. Od wartości parametru ITDG zależy subiektywne wrażenie wielkości pomieszczenia (Davis, 1979; Beranek, 1996).

2.2.8 Siła dźwięku (ang. *Strength Index, G*)

Siła dźwięku (G) jest parametrem akustycznym określającym przyrost poziomu dźwięku źródła w pomieszczeniu w porównaniu z jego poziomem w polu swobodnym. Do słuchacza znajdującego się w pomieszczeniu dociera zarówno energia fali akustycznej dźwięku bezpośredniego jak i energia fali akustycznej dźwięku odbitego od poszczególnych powierzchni, subiektywnie odczuwana głośność jest więc większa, niż gdyby słuchacz znajdował się w polu swobodnym. W definicji przyjęto, że porównana zostanie głośność źródła w pomieszczeniu do głośności źródła w polu swobodnym w odległości 10 metrów (Lehmann, 1976). Wartość parametru G wyraża się wzorem:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \quad \text{Wzór 7}$$

gdzie: G - siła dźwięku [dB], $p(t)$ - ciśnienie akustyczne w funkcji czasu (odpowiedź impulsowa) [Pa], $p_{10}(t)$ - odpowiedź impulsowa w odległości 10 metrów od źródła dźwięku w polu swobodnym (ciśnienie akustyczne w funkcji czasu) [Pa].

Wartości G uśrednia się w pasmach 125 Hz i 250 Hz i uzyskuje parametr G_{low} oraz uśrednia w pasmach 500 Hz i 1000 Hz w celu uzyskania parametru G_{mid} . Wartość parametru

G_{mid} jest skorelowana z głośnością dźwięku, a różnica pomiędzy wartościami parametrów G_{low} i G_{mid} skorelowana jest z głośnością dźwięków o niskich częstotliwościach w czasie, gdy wybrzmiewa pogłos (Gade, 1986).

2.3 Przykładowe inne parametry wykorzystywane w akustyce wnętrz

Przedstawione poniżej parametry zostały zaproponowane na przestrzeni lat przez różnych badaczy, jednak dotychczas nie znalazły powszechnego zastosowania w ocenie jakości akustycznej wnętrz.

2.3.1 Stosunek basów/ Ciepło brzmienia (ang. *Bass Ratio/ Warmth*)

Stosunek basów to zależność pomiędzy czasem wybrzmiewania niskich i średnich częstotliwości (Beranek, 2004). Wartość parametru oblicza się z wartości czasu pogłosu dla poszczególnych pasm częstotliwości zgodnie ze wzorem:

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}} \quad \text{Wzór 8}$$

gdzie: BR - stosunek basów, RT_x - czas pogłosu dla oktawy o częstotliwości środkowej x.

2.3.2 Stosunek sopranów/ Jasność brzmienia (ang. *Treble Ratio/ Brilliance*)

Podobnie do stosunku basów określa się też stosunek sopranów, czyli jasność barwy dźwięku (Beranek, 2004). Wartość parametru oblicza się wykorzystując wartości czasu pogłosu dla poszczególnych pasm częstotliwości zgodnie ze wzorem:

$$TR = \frac{RT_{2000} + RT_{4000}}{RT_{500} + RT_{1000}} \quad \text{Wzór 9}$$

gdzie: TR - stosunek sopranów, RT_x - czas pogłosu dla oktawy o częstotliwości środkowej x.

2.3.3 Współczynnik odbić bocznych (ang. *Lateral Energy Fraction, LFE*)

Współczynnik odbić bocznych to stosunek energii docierającej do słuchacza z kierunków bocznych do energii docierającej bezpośrednio ze źródła w tym samym czasie. Parametr ten jest miarą przestrzenności dźwięku docierającego do słuchacza (Barron, 1971). Do pomiarów LFE wykorzystuje się dwa mikrofony umieszczone możliwie jak najbliżej siebie. Jeden z nich to mikrofon o charakterystyce dookólnej, a drugi o charakterystyce ósemkowej, przy czym oś najmniejszej czułości mikrofonu o charakterystyce ósemkowej przebiega w kierunku prostopadłym do źródła dźwięku. Rozróżnia się dwie fazy subiektywnego wrażenia przestrzenności dźwięku. Wczesna faza zawiera się w czasie $t < 80$ ms, a późna w czasie

$t > 80$ ms. We wczesnej fazie powstaje wrażenie szerokości źródła dźwięku (ang. *Apparent Source Width*, ASW) (Marshall, 1967), a w późnej wrażenie otoczenia słuchacza dźwiękiem (ang. *Listener Envelopment*, LE). Wzór opisujący pierwszą fazę to (ISO 3382-1, 2009):

$$LF_0^{80} = \frac{\int_5^{80} P_\infty^2(t) dt}{\int_5^{80} P^2(t) dt} \quad \text{Wzór 10}$$

gdzie: LF_0^{80} - współczynnik wczesnych odbić bocznych, $p(t)^\infty$ - ciśnienie akustyczne w danym punkcie pomieszczenia zmierzone mikrofonem o charakterystyce ósemkowej, którego oś najmniejszej czułości przebiega w kierunku źródła dźwięku, $p(t)$ - ciśnienie akustyczne w tym samym punkcie pomieszczenia zmierzone mikrofonem o charakterystyce dookólnej,

Przyjęty czas 5 ms wynika z konieczności uwzględnienia tylko energii fal odbitych bez energii fali bezpośredniej.

Wzór opisujący drugą fazę to:

$$LF_{80}^\infty = \frac{\int_{80}^\infty P_\infty^2(t) dt}{\int_{80}^\infty P^2(t) dt} \quad \text{Wzór 11}$$

gdzie: LF_{80}^∞ - współczynnik późnych odbić bocznych, p^∞ - ciśnienie akustyczne w danym punkcie pomieszczenia zmierzone mikrofonem o charakterystyce ósemkowej, którego oś najmniejszej czułości przebiega w kierunku źródła dźwięku [Pa], $p(t)$ - ciśnienie akustyczne w tym samym punkcie pomieszczenia zmierzone mikrofonem o charakterystyce dookólnej [Pa].

2.3.4 Międzyuszna korelacja wzajemna (ang. *Inter-aural Cross Corelation*, IACC)

Międzyuszna korelacja wzajemna to kolejna obiektywna miara przestrzenności dźwięku. Znormalizowaną międzyuszną funkcję korelacji wzajemnej opisuje Wzór 12 (ISO 3382-1, 2009):

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) p_r(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(\tau) dt}} \quad \text{Wzór 12}$$

gdzie: $p_l(t)$ - ciśnienie akustyczne w funkcji czasu przy wejściu do lewego kanału ucha (odpowiedź impulsowa) [Pa], $p_r(t)$ - ciśnienie akustyczne w funkcji czasu przy wejściu do prawego kanału ucha (odpowiedź impulsowa) [Pa].

Współczynnik międzyusznej korelacji wzajemnej opisuje Wzór 13 (ISO 3382-1, 2009):

$$IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}| \text{ dla } -1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms} \quad \text{Wzór 13}$$

Pomiary wartości współczynnika IACC wykonuje się z wykorzystaniem tak zwanej „sztucznej głowy” czyli bryły w kształcie ludzkiej głowy (czasami również z torsem) z zamodelowanymi małżowinami i kanałami słuchowymi. Na końcu kanałów słuchowych wewnątrz „sztucznej głowy”, znajdują się mikrofony rejestrujące dźwięk. Dzięki wykorzystaniu takiej konstrukcji rejestruje się dźwięk zbliżony do dźwięku jaki odbierałby słuchacz znajdujący się w tym samym miejscu. Parametrem IACC określa się jak bardzo różnią się lub jak bardzo podobne są do siebie sygnały docierające do uszu słuchacza znajdującego się na wprost źródła dźwięku, tym samym otrzymując informację o przestrzenności pomieszczenia. Podobnie jak w przypadku współczynnika odbić bocznych rozróżnia się dwie fazy subiektywnego wrażenia powiązanego z międzyuszną korelacją wzajemną. Wczesna faza zawiera się w czasie $t < 80$ ms, a późna w czasie $t > 80$ [ms]. We wczesnej fazie powstaje wrażenie szerokości źródła dźwięku, a w późnej wrażenie otoczenia słuchacza dźwiękiem. Wykorzystując różne wartości parametru t_1 i t_2 można analizować różne fazy docierania energii akustycznej do słuchacza (Damaske, 1967).

W literaturze spotyka się również przestrzenność opisywaną za pomocą zaproponowanego przez Leo Beranka parametru BQI – (ang. *Binaural Quality Index*), który powiązany z jest z parametrem IACC następującą zależnością (Hidaka i in., 1995):

$$BQI = 1 - IACC \quad \text{Wzór 14}$$

2.3.5 Odległość graniczna (ang. *Critical Distance*)

Odległość graniczna definiowana jest jako odległość od źródła dźwięku, w której poziom energii fali bezpośredniej jest równy poziomowi energii fal odbitych docierających do danego punktu pomiarowego. Wartość tego parametru koreluje z czasem pogłosu w pomieszczeniu, im dłuższy czas pogłosu, tym mniejsza odległość graniczna. Dla wszechkierunkowego źródła dźwięku umieszczonego w polu rozproszonym wartość ta jest jednakowa we wszystkich kierunkach i wynosi (Reichardt, Schmidt, 1966; Kuttruff, 2009):

$$r = 0,057 \sqrt{\frac{V}{RT}} \quad \text{Wzór 15}$$

gdzie: r - odległość graniczna [m], V - objętość pomieszczenia [m³], RT - czas pogłosu w pomieszczeniu [s].

Ponieważ większość źródeł dźwięku ma charakter kierunkowy, opracowano wzór, który umożliwia wyznaczenie odległości granicznej dla tego typu źródeł. Źródła kierunkowe to takie, dla których moc promieniowania energii akustycznej zmienia się wraz z kątem względem głównej osi promieniowania źródła. Dla takich źródeł określa się współczynnik kierunkowości

Q , który definiuje się jako stosunek natężenia dźwięku w osi głównej promieniowania źródła kierunkowego do natężenia dźwięku w tej samej odległości od źródła wszechkierunkowego o tej samej mocy akustycznej. Odległość graniczna dla źródła o znanej wartości współczynnika kierunkowości Q wynosi (Kuttruff, 2009):

$$r = 0,057 \sqrt{\frac{QV}{RT}} \quad \text{Wzór 16}$$

gdzie: r - odległość graniczna [m], Q - współczynnik kierunkowości, V - objętość pomieszczenia [m^3], RT - czas pogłosu w pomieszczeniu [s].

Ponieważ zarówno wartość czasu pogłosu jak i charakterystyka promieniowania źródła zależą od częstotliwości, odległość graniczna również jest zależna od częstotliwości.

2.3.6 Kryterium echa (ang. *Echo Criteria*, EK)

Echo definiuje się jako subiektywne „wyraźnie słyszalne powtórzenie zjawiska dźwięku bezpośredniego” (Kuhl, 1977). Liczbowo, możliwość wystąpienia echa określa się z wykorzystaniem tzw. kryterium Dietsch’a. Przekroczenie jednostkowej wartości współczynnika oznacza ryzyko wystąpienia echa dla sygnałów mowy, dla muzyki wartości limitu są wyższe i zależą między innymi od gatunku muzycznego (Dietsch, Kraak, 1986).

2.3.7 Wsparcie sceny (ang. *Stage Support Early*, ST1; *Stage Support Late*, ST2)

Parametry o nazwie ST1 i ST2 wykorzystuje się podczas analizy warunków odsłuchowych dla muzyków znajdujących się na scenie. Opisują one, jak dobrze muzycy słyszą samych siebie i swoich współwykonawców w przestrzeni koncertowej. *Stage Support Early* (ST1) - odnosi się do wczesnych odbić (do 100 ms), co jest istotne dla indywidualnego odsłuchu muzyka a także dla słyszenia innych muzyków w zespole, natomiast *Stage Support Late* (ST2), który uwzględnia odbicia późniejsze (do 1000 ms), ocenia ogólne poczucie przestrzeni dźwiękowej. ST1 i ST2 są obliczane jako logarytmiczna różnica poziomów dźwięku zmierzonych w dwóch różnych przedziałach czasowych (Gade 1989a, Gade 1989b, Gade 1992; Meyer, 1994).

2.3.8 Wczesny poziom zespołowości (ang. *Early Ensemble Level*, EEL)

Zgodnie z Gade (1989a; 1989b), miara energii EEL to miara wzajemnego słyszenia muzyków. EEL mierzy poziom dźwięku bezpośredniego oraz wczesnych odbić w relacji do energii emitowanej przez źródło dźwięku. Do pomiaru wykorzystuje się dwa mikrofony, pierwszy mikrofon znajduje się 1 metr od źródła (służy do pomiaru energii bezpośredniej

i odbicia od podłogi), drugi mikrofon umieszczony jest w innym miejscu na scenie, np. na pozycji innego instrumentu (Dammerud, 2006).

2.3.9 Pogłosowość (ang. *Reverberance*, H - wg Beranka, 2004)

Parametr pogłosowość zaproponowany przez Beranka jest podobny do wskaźników C50 (klarowność dla mowy) oraz D (wyrazistość), które również odnoszą się do proporcji energii wczesnych odbić do energii całkowitej. Wskaźnik ten określa, jak bardzo energia pogłosowa (czyli odbicia po czasie 50 ms) dominuje nad energią wczesnych odbić (a więc odbić w czasie pierwszych 50 ms) i tym samym pomaga w ocenie klarowności mowy i muzyki w pomieszczeniach, uwzględniając wpływ pogłosu na zrozumiałość przekazu dźwiękowego. Gdy H przyjmuje wartości dodatnie, to energia pogłosowa dominuje, co oznacza dużą ilość późnych odbić i potencjalnie mniejszą klarowność dźwięku, jeśli H jest ujemne, to energia wczesnych odbić jest większa, co sprzyja lepszej większej zrozumiałości mowy i wyższej klarowności dźwięku (Beranek, Schultz, 1965).

2.3.10 Czas pogłosu z uwzględnieniem poziomu, Czas wczesnego zaniku

**z uwzględnieniem poziomu (ang. *Loudness-based Reverberation Time*, RTN;
Loudness-based Early Decay Time, EDTN)**

Obydwa parametry bazują na analizie RIR, ale z uwzględnieniem poziomu ciśnienia akustycznego (ang. *Sound Pressure Level*, SPL) oraz percepcji głośności na podstawie modelu percepcji głośności opisanego przez Glasberga i Moore'a (2002). Model ten uwzględnia czasową zmienność głośności, co oznacza, że bierze pod uwagę dynamikę dźwięku i jego zmianę w czasie, a więc lepiej opisuje sposób, w jaki słuchacze odbierają dźwięki w naturalnym otoczeniu. W warunkach cichszych pogłos może być subiektywnie odbierany jako krótszy niż wynika to z wartości RT, natomiast w warunkach głośniejszych dźwięk bywa postrzegany jako dłużej trwający, mimo że fizyczny czas zaniku pozostaje zbliżony. Badania wskazują, że przy wyższym poziomie ciśnienia spadek głośności następuje wolniej, co prowadzi do różnic w percepcji pogłosowości. Wykazano ponadto, że parametr EDTN dobrze koreluje z odczuciem pogłosowości, zwłaszcza w odniesieniu do muzyki (Lee i in., 2017)

2.3.11 Czas późnego zaniku (ang. *Late Decay Time*, LDT)

Wartość parametru późnego zaniku wyznacza się z krzywej zaniku energii akustycznej (a więc podobnie jak dla parametrów EDT czy RT), z tym, że przez 6 mnoży się czas spadku poziomu w zakresie od -25 do -35 dB (Meissner, 2015). Czasu późnego zaniku jest wykorzystywany w ocenie proporcji wczesnej i późnej energii w pomieszczeniu, na przykład

porównanie wartości EDT do LDT wykorzystywane jest do określania liniowości zaniku energii (Bradley, Wang, 2010).

2.3.12 Stosunek dźwięku bezpośredniego do pogłosowego (ang. *Direct to Reverberation Ratio, DRR*)

Parametr DRR zaproponowano do oceny klarowności dźwięku i zrozumiałości mowy w salach koncertowych. Wysoka wartość DRR oznacza większą bezpośredniość i przejrzystość brzmienia, niski zaś – dominację pogłosu (Lehmann, 1976). W praktyce jego wyznaczenie jest utrudnione, ponieważ w salach o silnie rozproszonej energii identyfikacja pierwszego odbicia wymaga znajomości geometrii pomieszczenia oraz pozycji źródła i mikrofonu. Do oceny przejrzystości wykorzystuje się przede wszystkim parametry klarowności (C50, C80), które lepiej korelują z percepcją słuchaczy. Badania nad korelacją DRR z odczuciem odległości, przestrzenności czy zrozumiałości mowy (Griesinger, 2008; Zohourian, Martin, 2019) nie wykazały przewagi nad parametrami powszechnie stosowanymi, przez co DRR nie znalazł szerszego zastosowania.

2.3.13 Ocena zrozumiałości mowy

Ocena zrozumiałości mowy jest kluczowym aspektem akustyki wnętrz. Wysoki poziom zrozumiałości wymagany jest w teatrach, salach koncertowych, konferencyjnych, audytoryjnych, wykładowych i lekcyjnych, a także w obiektach użyteczności publicznej, gdzie emitowane są istotne komunikaty, np. ewakuacyjne. Możliwość obiektywnego określenia stopnia zrozumiałości mowy oraz wykorzystanie narzędzia do przewidywanego zakresu zrozumiałości już na etapie projektowania akustyki pomieszczeń jest istotna z punktu widzenia akustyków.

2.3.13.1 Współczynnik zrozumiałości mowy (ang. *Speech Transmission Index, STI*)

Współczynnik zrozumiałości mowy jest ważnym parametrem stosowanym w akustyce pomieszczeń służący do oceny jakości przekazu mowy w zróżnicowanych warunkach akustycznych. Za pomocą STI obiektywnie ocenia się jakość transmisji mowy w warunkach rzeczywistych, uwzględniając wpływ czynników takich jak pogłos, hałas tła czy zniekształcenia wprowadzane przez systemy elektroakustyczne. W pomiarze STI wykorzystuje się podobieństwo sygnałów mowy do sygnałów modulowanych amplitudowo. W pomiarze STI wyznacza się funkcje przejścia (ang. *Modulation Transfer Function, MTF*) pomiędzy źródłem i odbiornikiem dla siedmiu pasm oktaowych w zakresie od 125 Hz do 8 kHz, z których każde modulowane jest czternastoma częstotliwościami w zakresie od 0,63 do 12,5 Hz.

W procedurze pomiaru dla każdej pary źródła i odbiornika mierzy się łącznie 98 kombinacji, co jest czasochłonne. Szybszą od STI metodą pomiaru jest metoda RASTI (ang. *Room Acoustic Speech Transmission Index* lub, jak podają niektóre źródła, *Rapid Acoustic Speech Transmission Index*), która jest uproszczoną wersją STI. Pomiary wykonuje się dla dwóch pasm częstotliwości: pasmo 500 Hz modulowane jest czterema, a pasmo 2 kHz pięcioma częstotliwościami, co daje łącznie tylko 9 pomiarów. W praktyce najczęściej wykorzystuje się procedurę obliczenia STI z odpowiedzi impulsowych pomieszczenia (ISO 3382-2 2008). Kolejnymi wariantami metody określającej stopień transmisji mowy jest STIPA (ang. *Speech Transmission Index for Public Address Systems*) - współczynnik transmisji mowy dla systemów nagłośnieniowych. Współczynniki STI, RASTI i STIPA przyjmują wartości od 0 do 1 co odpowiada subiektywnie rozumianej zrozumiałości mowy zgodnie z zależnościami przedstawionymi w Tabeli 3 (Houtgast, Steeneken, 1971; Houtgast, Steeneken, 1973).

2.3.13.2 Utrata wyrazistości spółgłosek (ang. *Articulation Loss of Consonants*, %ALCons)

%ALCons określa procent utraconych spółgłosek w czasie transmisji sygnału mowy. Wskaźnik ten bazuje na założeniu, że zrozumiałość mowy zależy od poprawnego przekazu spółgłosek. Spółgłoski mają stosunkowo krótki czas trwania i wyraźne zmiany intensywności w porównaniu do samogłosek, co czyni je bardziej podatnymi na maskowanie przez hałas, pogłos i inne zakłócenia. Parametr wprowadzono na początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku, a więc równoległe ze współczynnikiem STI (Bistafa, Bradley, 2006). Wartości %ALCons oraz odpowiadające im stopnie zrozumiałości mowy przedstawiono w Tabeli 3.

2.3.13.3 Powiązania pomiędzy różnymi wskaźnikami zrozumiałości mowy

Zrozumiałość mowy silnie koreluje z niektórymi obiektywnymi parametrami akustyki wnętrz. Wykazano wysoką korelację pomiędzy wartością STI a wartością C50. Wzór 17 pokazuje zależność pomiędzy tymi parametrami (Steeneken, Houtgast, 1980).

$$C50 = \frac{STI - 0,572}{0,028} \quad \text{Wzór 17}$$

Współczynnik STI silnie koreluje także ze współczynnikiem D - wyrazistością oraz odległością graniczną. Wykazano również zależność pomiędzy STI a %ALCons określoną przez Wzór 18 (Bistafa, Bradley, 2006).

$$\%ALCons = 170e^{-5,4STI} \quad \text{Wzór 18}$$

Tabela 3 przedstawia zależność pomiędzy zrozumiałością mowy a współczynnikiem STI parametrem C50 i %ALCons.

Tabela 3: Zależność pomiędzy zrozumiałością mowy, %ALCons, wartościami współczynnika STI oraz C50

Zrozumiałość mowy	STI	%ALCons	C50
bardzo dobra	> 0,75	0 - 3 %	> 6,4
dobra	0,6 - 0,75	3 - 7 %	1 ÷ 6,4
dostateczna	0,45 - 0,59	7 - 15 %	- 4,4 ÷ 0,64
słaba	0,3 - 0,44	15 - 33 %	- 9,7 ÷ - 4,7
niedostateczna	< 0,3	33 - 100 %	< -9,7

2.4 Ocena właściwości akustycznych z wykorzystaniem proporcji różnych parametrów

C50 i C80 są powszechnie wykorzystywane w ocenie własności akustycznej pomieszczeń, nie są to jednak jedyne miary porównawcze, które można znaleźć w literaturze. Wysoka korelacja pomiędzy oceną subiektywną a wartościami klarowności inspirowała akustyków do poszukiwania innych współczynników, które będą przydatne w ocenie własności akustycznych pomieszczeń. Na przykład stosunek LDT do EDT może być miarą liniowości zaniku, podobnie jak stosunek RT10 do LDT, ponieważ zakresy pomiarów wartości RT10 i LDT dotyczą różnych czasów zaniku energii akustycznej. Jeżeli wartość RT10/LDT jest równa 1, wtedy zanik ma charakter liniowy, jeśli wartość jest różna od 1 mamy do czynienia z nieliniowym zanikiem energii akustycznej (Bradley, Wang, 2010).

2.5 Optymalne wartości parametrów w salach o różnym przeznaczeniu

Sugerowane wartości parametrów akustycznych dla tzw. pomieszczeń zwyczajnych, a więc takich, w których akustyka jest elementem ogólnie rozumianego komfortu przebywania w nim, opisano normie PN-B-02151-4:2015-06 (2015) zatytułowanej „Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań”. Dla większości pomieszczeń użyteczności publicznej ustalono czasy pogłosu i wartości współczynnika zrozumiałości mowy zależne od ich objętości. W przypadku tego typu pomieszczeń, niedopuszczenie do wystąpienia wad akustycznych, takich jak występowania echa, nadmiernej pogłosowości pomieszczenia czy też niewystarczającej izolacyjności akustycznej przegród budowlanych, zazwyczaj wystarcza do stworzenia poprawnego klimatu akustycznego. W niektórych przypadkach, na przykład w salach lekcyjnych czy miejscach wyposażonych w dźwiękowe systemy ostrzegawcze należy dodatkowo zadbać o to, aby wartość współczynnika transmisji mowy była wystarczająco wysoka (Kulowski, 2011). Norma PN-B-02151-4:2015-06 (2015) zawiera tabele dotyczące wartości RT i STI w pomieszczeniach przeznaczonych do komunikacji słownej. W normie opisano 15 kategorii pomieszczeń pełniących różne funkcje wraz z odpowiadającymi im zalecanymi wartościami parametrów akustycznych. Dodatkowo norma zawiera tabelę

określającą wartość chłonności akustycznej pomieszczenia (A) jako krotność powierzchni rzutu poziomego (S) dla danego typu pomieszczenia.

2.5.1 Sugerowane wartości czasu pogłosu dla pomieszczeń o akustyce kwalifikowanej

W pomieszczeniach o akustyce kwalifikowanej, czyli takich, których funkcja jest ściśle związana z jakością odbieranego dźwięku (np. sale koncertowe, teatry, opery, kina, studia nagrań, reżysernie dźwięku, sale prób i sale w szkołach muzycznych), wartości czasu pogłosu ustala się indywidualnie.

W wyniku wieloletnich badań nad właściwościami akustycznymi sal ustalono optymalne wartości czasu wielu parametrów akustyki pomieszczeń. Początkowo koncentrowano się głównie na optymalnej długości czasu pogłosu dla pomieszczeń o różnym przeznaczeniu. Zalecana wartość czasu pogłosu powinna pozostawać niezależna od częstotliwości, aczkolwiek dopuszczalne jest nieznaczne wydłużenie czasu pogłosu dla niskich częstotliwości oraz jego skrócenie w zakresie wysokich częstotliwości, ponieważ oba zjawiska są charakterystyczne dla przestrzeni o dużej objętości. Pierwsze wynika z coraz intensywniejszej falowej struktury pola akustycznego przy spadku częstotliwości, natomiast drugie z naturalnego tłumienia energii akustycznej przez powietrze, w którym rozchodzi się fala dźwiękowa. Ograniczony wzrost czasu pogłosu dla niskich częstotliwości jest według opinii słuchaczy korzystny dla walorów akustycznych sali. Słuchacze akceptują również krótszy czas pogłosu dla wysokich częstotliwości, ponieważ to odczucie jest zgodne z naturalnym doświadczeniem odbioru dźwięku dochodzącego z większej odległości (Davis i in., 2013). W literaturze szeroko omawiane są optymalne wartości czasu pogłosu dla pomieszczeń o różnym przeznaczeniu, natomiast rzadziej podaje się zalecenia dotyczące innych parametrów. Pierwsze eksperymenty w tym zakresie przeprowadził Sabine, wskazując jako optymalny czas pogłosu 2 do 2,2 s dla sal koncertowych oraz poniżej 1 s dla sal wykładowych. Erwin Meyer jako optymalne uznał czasy: od 1,8 do 2,2 sekundy dla sal koncertowych, zakres od 1,2 do 1,6 sekundy dla sal kameralnych i czas pogłosu krótszy niż 1 sekunda dla mowy (Meyer, 1950). Lothar Cremer wprowadził pojęcie „komfortowego czasu pogłosu” w zależności od objętości i zaproponował Wzór 19, w którym wartość współczynnika „k” zależała od sposobu wykorzystywania sali. Dla sal koncertowych wartość „k” ustalono jako 0,32 (Cremer, Müller, 1978).

$$RT_{\text{optymalny}} = k\sqrt[3]{V} \quad \text{Wzór 19}$$

gdzie: $RT_{\text{optymalny}}$ – optymalny czas pogłosu, V – objętość pomieszczenia [m^3],
k – współczynnik zależny od rodzaju pomieszczenia.

Opisywane we wcześniejszych rozdziałach tej pracy badania Leo Beranka również zaowocowały opracowaniem optymalnych wartości parametrów akustyki wnętrz. Tabela 4 przedstawia wartości przedstawione w pracy Beranka (2004), który przeanalizował wyniki pomiarów i oceny subiektywnej 100 sal koncertowych i operowych wykorzystując pomiary i badania przeprowadzone przez swój zespół oraz wyniki udostępnione przez innych akustyków. Tabela 4 zawiera nie tylko optymalne wartości czasu pogłosu, ale również innych parametrów akustyki wnętrz.

Tabela 4: Wartości parametrów zalecane przez Beranka (2004) dla sal symfonicznych i operowych.

Rozmiar Sali	RT [s] z widownią	EDT [s] bez widowni	BQI	G _{mid} [dB]	G _{125 Hz} [dB]	ITDG [ms]	C ₈₀ [dB]	ST1 [dB]
Sale symfoniczne z widownią ponad 1400 miejsc	1,8 - 2,1	2,2 - 2,6	0,65 - 0,71	1,5 - 5,5	3,0 - 6,0	<25	-3,0 - 0	≥ -14
Sale kameralne z widownią poniżej 700 miejsc	1,6 - 1,8	1,9 - 2,3	0,7 - 0,76	9,0 - 13	9,0 - 13	<20	-2,0 - 2,0	≥ -12
Sale operowe z widownią ponad 1200 miejsc	1,4 - 1,6	1,5 - 1,9	0,6 - 0,71	-1,0 - 2,0	-1,05 - 2,3	<23	1,0 - 3,0	---

Leo Beranek nie był jedynym akustykiem prowadzącym badania w tym zakresie. Tabela 5 przedstawia optymalne wartości RT zaproponowane przez Barrona (1993) na podstawie jego badań. Barron (2009) zaleca ponadto, aby w celu zwiększenia wrażenia akustycznego ciepła wartości RT30 i EDT poniżej 125 Hz były o około 40% wyższe niż w paśmie średnich częstotliwości. Zaznacza jednak, że wydłużanie pogłosu w niskich częstotliwościach należy traktować raczej jako kwestię indywidualnych preferencji niż jako sztywny wymóg projektowy.

Tabela 5: Wartości parametrów zalecane przez Barrona (1993) dla sal o różnym przeznaczeniu.

Rodzaj muzyki	Sugerowany czas pogłosu [s]
Teatr dramatyczny (wystąpienia słowne)	0,7-1,0
Muzyka kameralna	1,4-1,7
Opera	1,3-1,8
Wczesna muzyka klasyczna	1,6-2,2
Muzyka klasyczna okresu Romantyzmu	1,8-2,2
Muzyka organowa	>2,5

Kolejne Tabele o numerach od 6 i 7 przedstawiają wartości proponowane przez różnych akustyków na przestrzeni lat.

Tabela 6: Wartości czasu pogłosu proponowane przez Meyera i Neumanna (Kulowski, 2011).

Rodzaj produkcji dźwiękowej:		Czas pogłosu [s]:
	kabarety	0,8
Mowa:	widowiska, odczyty	1,0
	muzyka kameralna	1,0 do 1,5
Muzyka:	oper	1,3 do 1,6
	koncerty	1,7 do 2,1
	muzyka organowa	2,5 do 3,0

Tabela 7: Wartości czasu pogłosu proponowane przez Brückmayera (Kulowski, 2011).

Funkcja pomieszczenia	Czas pogłosu [s]	
	zakres	wartość zalecana
Sale chóru	1,0 do 1,2	1,2
Teatry dramatyczne	1,2 do 1,5	1,4
Teatry wielofunkcyjne	1,3 do 1,6	1,5
Teatry operowe	1,4 do 1,7	1,6
Sale koncertowe	1,7 do 2,0	1,9

Na podstawie badań Cremera wykazujących zależność czasu pogłosu od objętości, opracowano zalecane wartości RT z uwzględnieniem funkcji i kubatury pomieszczenia, które przedstawiono w Tabeli 8.

Tabela 8: Zalecany czas pogłosu zależny od funkcji i kubatury pomieszczenia (Kulowski, 2011).

Funkcja pomieszczenia	Czas pogłosu T(V) [s]	
Studia nagrań	$0,2 \log V + 0,31$	(1)
Studia nagrań słowne	$0,3 \log V - 0,2$	(5)
Studia nagrań muzyczne	$0,5 \log V - 0,5$	(5)
Wielkie studia koncertowe	$1,45 \log V - 2,85$	(5)
Sale kinowe	kino studyjne: $0,2 \log V + 0,41$	(1)
	sale typu multikino $0,3 \log V - 0,3$	(5)
Sale wykładowe	$0,2 \log V + 0,21$	(1)
	$0,3 \log V - 0,2$	(5)
Sale teatralne i konferencyjne	$0,075 V^{1/3}$	(2)
Sale konferencyjne z nagłośnieniem	$0,8 \times 0,3 \log V - 0,3$	(5)
Teatry dramatyczne	$0,3 \log V + 0,3$	(5)
Sale do muzyki kameralnej	$0,2 \log V + 0,31$	(1)
Sale operowe	$0,24 \log V + 0,39$	(1)
	$0,5 \log V - 0,5$	(5)
	$0,3 \log V + 0,46$	(1)
Sale koncertowe	$0,09 (V)^{1/3}$	(2)
	$0,38 (V)^{1/6}$	(3)
	$0,5 \log V$	(5)
Kościoły protestanckie lub synagogi	$0,35 \log V + 0,24$	(1)
	$0,4 \log V + 0,22$	(1)
Kościoły katolickie	$0,0596 (V)^{0,462} \pm 15\%$	(4)
	$0,1 (V)^{1/3}$	(2)
	$0,7 \log V + 0,2$	(5)

Oznaczenia użyte w Tabeli 8: V - objętość pomieszczenia,
 $T(V)$ - czas pogłosu dla pasma oktawowego o częstotliwości środkowej 1000 Hz,

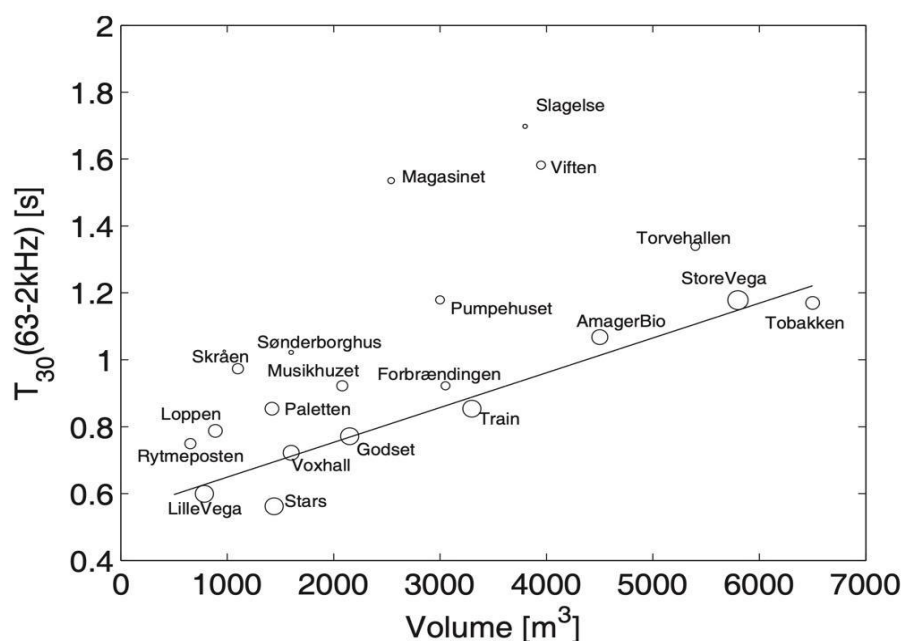
Formuły $T(V)$ przedstawiane przez następujących autorów:

(1) - M. Rettinger, (2) - L. Conturie, (3) - J. P. Maxfield, (4) - Hartman,

(5) - dane przedstawiane w literaturze w postaci graficznej (średnio) (Rettinger, 1977; Conturie, 1955; Maxfield, Harrison, 1926; Hartmann, 1982, podano za Kulowski, 2011 i Miszczak, 1969).

Przez wiele lat publikowano głównie wytyczne dla sal koncertowych przeznaczonych do prezentacji muzyki klasycznej oraz dla sal operowych, a więc miejsc, w których nie wykorzystuje się systemów nagłośnieniowych. Obecnie, większość koncertów i innych wydarzeń muzycznych odbywa się z wykorzystaniem systemów nagłośnieniowych i z odmiennym repertuarem, głównie z muzyką rozrywkową w stylach: rock, pop, rap i hip-hop. Ogólne wrażenie akustyczne sali koncertowej przeznaczonej dla wydarzeń tego typu jest silnie powiązane z postrzeganą klarownością i wyrazistością dźwięku również w zakresie małych częstotliwości. Dlatego też podczas projektowania akustycznego sali należy zwrócić szczególną uwagę na pasmo oktawowo 63 Hz. Oznacza to, że producenci materiałów akustycznych powinni również mierzyć i podawać właściwości akustyczne w zakresie częstotliwości do 63 Hz (Adelman-Larsen i in., 2010).

Rysunek 5 przedstawia średnią zmierzoną wartość RT_{30} na scenie i w rejonie widowni w zakresie od 63 Hz do 2 kHz w stosunku do objętości sali dla 20 sal objętych badaniem. Większy znacznik oznacza lepszą ogólną ocenę łączną uzyskaną w badaniu subiektywnym. Linia przedstawia zalecany czas pogłosu w funkcji objętości sali (Adelman-Larsen i in., 2010). Sugerowane wartości czasu pogłosu dla sal, w których wykorzystuje się systemy nagłośnieniowe są więc zdecydowanie niższe, niż dla sal operowych czy symfonicznych.



Rysunek 5: Średnia zmierzona wartość RT_{30} na scenie i na widowni w zakresie od 63 Hz do 2 kHz w stosunku do objętości sali dla 20 sal. Większy znacznik oznacza lepszą ogólną ocenę łączną. Linia przedstawia zalecany czas pogłosu w funkcji objętości Sali (Adelman-Lar.

2.5.2 Sugerowane wartości dla parametrów innych niż czas pogłosu dla pomieszczeń o akustyce kwalifikowanej

Wraz ze zdefiniowaniem nowych parametrów akustyki pomieszczeń, realizowano również badania nad ich właściwymi wartościami. Wyniki badań znalazły swoje odzwierciedlenie w normach przeznaczonych dla projektantów rozwiązań z zakresu akustyki. Tabela 9 przedstawia sugerowane wartości parametrów opisane w normie ISO 3382-1 (2009).

Tabela 9: Najczęściej spotykane wartości parametrów akustycznych (ISO 3382-1, 2009).

Parametr akustyczny	Typowy zakres wartości	Jednostka
Sila dźwięku - G	-2 do 10	[dB]
Czas wczesnego zaniku - EDT	1 do 3	[s]
Przejrzystość C80	-5 do 5	[dB]
Wyrazistość D	0,3 do 0,7	[dB]
Czas centralny Ts	60 do 270	[ms]

Barron (2006) również przeanalizował dane z wielu istniejących sal filharmonicznych i zestawiał wyniki pomiarów z wartościami subiektywnie uznawanymi za dobre, m.in. w oparciu o wcześniejsze badania z lat 80 i 90. Na bazie swojej zmodyfikowanej teorii rozkładu poziomu dźwięku w sali stwierdził, że równowaga między wczesnym a późnym dźwiękiem (C80) oraz ogólna ilość energii dźwiękowej docierającej do słuchacza (G) mają kluczowe znaczenie dla odbioru subiektywnego i należy je zestawiać z odpowiednimi zakresami akceptowalności, które podał w swojej pracy, a które prezentuje Tabela 10. Barron podkreśla również, że różni słuchacze preferują różne cechy akustyczne: jedni wolą dłuższy pogłos, inni wyższą intymność, jeszcze inni wysoką klarowność.

Tabela 10: Wartości parametrów akustycznych sugerowane przez Barrona (2006).

Parametr	Zakres akceptowalny
Czas pogłosu - RT	1,8 - 2,2 s
Czas wczesnego zaniku - EDT	1,8 - 2,2 s
Przejrzystość C80	-2 - 2 dB
Boczna frakcja energii - LF	0,1 - 0,35
Sila dźwięku - G	>0 dB

2.5.3 Sugerowane wartości Czasu wczesnego zaniku, EDT

W wielu salach, które opisywał Beranek (2004), EDT był o 5–20% krótszy niż RT, zwłaszcza w paśmie 500–2000 Hz. Barron (1988) wskazuje, że proporcja EDT/RT waha się w przybliżeniu w granicach 0,8–0,9, co jest zgodne z oczekiwaniami, ponieważ EDT rejestruje szybszy początkowy spadek energii. Obaj autorzy sugerują, że wartość RT nie powinna być dłuższa od EDT o więcej niż 15%.

2.5.4 Sugerowane wartości Klarowności, C80, C50

Wartości parametru C80, które mogą wynosić od niewielkich wartości ujemnych dla pomieszczeń o bardzo długim pogłosie do niewielkich wartości dodatnich charakterystycznych dla pomieszczeń martwych akustycznie, zazwyczaj mieszczą się w zakresie ± 5 dB. W przypadku sal koncertowych, preferowane wartości C80 wynoszą od -4 do 0 dB (Long, 2006). Kilka bardzo udanych sal koncertowych: w Bostonie, Amsterdamie i Wiedniu, ma wartości C80(3) mieszczące się w przedziale od -2,7 do -3,7 dB. Konwencja zapisu C80(3) wykorzystana przez autorów publikacji oznacza, że uśredniono wartość C80 w trzech pasmach oktawowych 500 Hz, 1 kHz i 2 kHz (Beranek, 1996; Long, 2006). W powyższych Tabelach o numerach 4 i 10 podano sugerowane wartości współczynnika C80 zaproponowane przez Beranka i Barrona. Abdel Alim w swojej pracy podaje wartość $C80 \geq -3$ dB jako kompromisową, ponieważ w świetle jego badań wartość $\geq -4,6$ dB jest właściwa dla muzyki okresu romantyzmu (np. Brahms, Wagner) a wartość $\geq -1,6$ jest właściwa dla muzyki klasycznej (np. Mozart, Haydn) (Abdel Alim, 1973).

W odniesieniu do miary definicyjnej C50 trudno wskazać jednoznaczne normatywne wytyczne dotyczące akustyki pomieszczeń. Istnieją jednak zasady oceny, które ustanawiają jakościowy związek pomiędzy wartością wskaźnika C50 a zrozumiałością mowy. Zgodnie z nimi wartość C50 powinna wynosić co najmniej -2 dB, aby zapobiec spadkowi zrozumiałości spółgłoskowej poniżej poziomu 80%. Dzięki obecności kontekstu, zrozumiałość całych wypowiedzi pozostaje nadal na poziomie około 95% mimo 20% utraty zrozumiałości spółgłosek. Wartość $C50 = -2$ dB przyjmuje się zatem jako dolną granicę „dopuszczalną” dla dobrej zrozumiałości mowy lub tekstu. Warto przy tym zauważyć, że subiektywna zależność pomiędzy częstotliwością a miarą C50 nie została dotąd wystarczająco zbadana. Wstępne próby w tym zakresie przedstawiono w pracy Hoffmeiera (1996).

2.5.5 Sugerowane wartości Wyrazistości, D50

Wyrazistość, pierwotnie określana jako „definicja” i wyrażana w procentach, była kryterium akustycznym związanym ze zrozumiałością mowy, opracowanym przez Thielego (1953). Ponieważ takie podejście zakładało, że zrozumiałość mowy można bezpośrednio wyrazić w procentach, sam Thiele określił stosunek energii mianem „części 50 ms”. W odniesieniu do subiektywnej oceny pomieszczeń, zaleca się, aby $D50 > 50\%$ oraz aby było niezależne od częstotliwości. Obecnie kryterium to jest stosowane rzadko, ponieważ zostało zastąpione miarą Klarowności C50. Wartości C50 i D50 są ze sobą ściśle powiązane matematycznie i można je wzajemnie przeliczać.

2.5.6 Sugerowane wartości Czasu centralnego T_s

Im wyższa jest wartość czasu centralnego T_s , tym, silniejsze wrażenie przestrzenności akustycznej odbiera słuchacz. Maksymalna możliwa długość T_s pozostaje jednak w zależności od optymalnego czasu pogłosu w danym pomieszczeniu. Jak wykazał Hoffmeier (1996), istnieje dobra korelacja pomiędzy czasem centralnym a zrozumiałością mowy, zwłaszcza w ocenach przeprowadzanych w pasmach oktawowych o częstotliwościach środkowych 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz i 4 kHz. Dla muzyki pożądany czas centralny T_s w paśmie 1000 Hz mieści się w przedziale od około 70 do 150 ms. W przypadku mowy wartości optymalne są niższe i wynoszą od 60 do 80 ms, uśrednione dla zakresu czterech oktaw od 500 Hz do 4 kHz (Hoffmeier, 1996). Z kolei Kürer (1971) podaje, że aby uzyskać właściwą zrozumiałość mowy, wartość czasu centralnego nie powinna przekraczać 130 ms. Według Barrona (1993) T_s nie powinna przekraczać 120 ms nawet w dużych salach koncertowych. Średnia wartość parametru T_s zmierzona w 100 salach przez Beranka (2004) wynosi 110 ms.

2.5.7 Sugerowane wartości współczynników opisujących zrozumiałość mowy

W Tabeli 3 podano zależności między wartościami różnych wskaźników zrozumiałości mowy. W zależności od sposobu wykorzystywania pomieszczenia oczekuje się, że zrozumiałość mowy będzie przyjmowała wartości z zakresów dobra lub bardzo dobra zrozumiałość.

2.5.8 Sugerowana wartość IACC (lub $BQI=1-IACC$)

Pomysłodawcą tego parametru był Leo Beranek, który zaproponował uśrednianie wyników dla pasm oktawowych o częstotliwościach środkowych od 500 Hz do 2 kHz. Dane często przedstawia się w postaci $BQI = 1 - IACC$, przy czym wartości powyżej 0,46 uznaje się za pożądane. Beranek wykorzystał ten parametr jako jeden z kluczowych w swojej metodzie oceny jakości akustycznej sal, proponując klasyfikację opartą na wartości IACCE (ang. *Interaural Cross-Correlation Coefficient – Early*, IACCE), obliczanej w pasmach 500, 1000 i 2000 Hz, oraz jego pochodnej $Q = (1 - IACCE)$. Parametry te wiązane są z subiektywnym odczuciem szerokości źródła dźwięku (Apparent Source Width, ASW)

Beranek wyróżnił trzy kategorie jakości akustycznej:

Kategoria „Doskonała do znakomitej” (ang. *Excellent to Superior*):
IACCE (500–2000 Hz) w zakresie 0,28–0,38.

Kategoria „Dobra do doskonałej” (ang. *Good to Excellent*):

IACCE w zakresie 0,39–0,54, co daje $\varrho = 0,46–0,61$.

Kategoria „Zadowolająca do dobrej” (ang. *Fair to Good*):

IACCE w zakresie 0,55–0,59, co odpowiada $\varrho = 0,41–0,45$.

Wartości te służą jako orientacyjne progi jakościowe przy ocenie akustyki przestrzennej sal koncertowych, szczególnie w kontekście szerokości postrzeganego źródła dźwięku (Beranek, 1996, 2004).

2.5.9 Sugerowane wartości dla Siły dźwięku (G)

Sugerowane wartości siły dźwięku na podstawie publikacji pokazano w Tabeli 11 (Barron, 1993; Beranek, 2004; ISO 3382-1, 2009). Preferowane wartości G_{mid} mieszczą się w zakresie 5 ± 1 dB (Long, 2006).

Tabela 11: Sugerowane wartości Siły dźwięku (Barron, 1993; Beranek, 2004; ISO 3382-1, 2009).

Rodzaj muzyki	Optymalna wartość G [dB]	Zakres akceptowalny [dB]
Muzyka symfoniczna	ok. 4–6	3–7
Muzyka kameralna	ok. 2–4	1–5
Muzyka współczesna (głośniejsza)	ok. 5–8	4–9

2.5.10 Sugerowane wartości dla LFE (Frakcji Energii Bocznej)

Dla sal koncertowych przeznaczonych do muzyki symfonicznej za optymalne uznaje się wartości LFE w zakresie od 0,20 do 0,35, średnio dla pasm oktawowych 500 Hz i 1000 Hz. W salach kameralnych preferowane są nieco niższe wartości, w przedziale od 0,15 do 0,30. W przypadku sal operowych i pomieszczeń przeznaczonych do mowy wartości LF nie powinny przekraczać 0,20, ponieważ zbyt wysoki udział bocznych odbić może negatywnie wpływać na klarowność dźwięku i lokalizację źródła.

Wartości LF poniżej 0,10 wskazują na niedobór bocznych odbić, co skutkuje mało przestrzennym dźwiękiem. Zakres 0,20–0,35 jest natomiast uznawany za najbardziej korzystny dla zapewnienia naturalnego wrażenia przestrzenności i otulenia dźwiękiem (ang. *listener envelopment*, LEV), szczególnie w muzyce orkiestrowej. Przekroczenie wartości 0,40 może prowadzić do zaburzeń w percepcji kierunku i stabilności źródła dźwięku (Gade, 1989a, 1992; Barron, 1981; ISO 3382-1:2009, 2009)

2.5.11 Sugerowane wartości Wczesnego wsparcia zespołu (EEL)

Badania Gade’a, (1989a, 1989b) przeprowadzone w 14 europejskich salach koncertowych, wykazały, że wartość wskaźnika EEL w zakresie średnich częstotliwości (od 500 Hz do 1 kHz)

mieści się zwykle w przedziale od -15 dB do -10 dB. Autor zaznacza jednak, że jak dotąd nie udało się jednoznacznie ustalić ilościowej zależności między wartością EEL a jakością wzajemnego słyszenia się muzyków na scenie. Brakuje również dokładnych danych na temat zmienności EEL w funkcji częstotliwości.

2.5.12 Sugerowane wartości Bass Ratio

W przypadku muzyki pożądany współczynnik basów wynosi $BR \approx 1,0$ do $1,3$, natomiast w przypadku mowy współczynnik basów powinien wynosić maksymalnie $BR \approx 0,9$ do $1,0$ (Beranek, 2004).

2.5.13 Sugerowane wartości Wsparcia sceny, ST_1 i ST_2

Wysoka wartość ST_1 skutkuje lepszą słyszalnością własnego instrumentu, co jest szczególnie istotne dla solistów. Wysoka wartość ST_2 pozwala na lepszą komunikację między muzykami na scenie. Zbyt niska wartość ST może powodować trudności w kontrolowaniu dynamiki gry i synchronizacji z innymi muzykami. Optymalne wartości mieszczą się w zakresie od -13 dB do -11 dB dla parametru ST_1 oraz od -15 dB do -13 dB dla parametry ST_2 (Gade, 1989a, 1989b, 1992).

2.6 Najmniejsza zauważalna różnica (ang. *Just Noticeable Difference* - JND) dla różnych parametrów akustyki wnętrza

W akustyce pomieszczeń kluczowe znaczenie ma powiązanie parametrów fizycznych z percepcją słuchową, ponieważ parametry akustyczne, które nie wykazują związku z percepcją słuchową, tracą znaczenie praktyczne. W badaniach nad akustyką pomieszczeń zaproponowano szereg parametrów opisujących określone cechy pola dźwiękowego, które dobrze korelują z percepcyjnymi aspektami akustyki wnętrza. Ze względu na specyfikę ludzkiego układu słuchowego relacje te mają zazwyczaj charakter nieliniowy (Moore, 2013). Jako pierwsze zbadano przede wszystkim te zjawiska psychoakustyczne, które prowadzą do wyraźnych różnic w percepcji, takie jak odczuwanie głośności czy wysokości dźwięku (Miller, 1947; Wier i in., 1977), w późniejszych okresach badano relacje związane z różnymi obiektywnymi parametrami oceny zjawisk akustycznych takich jak pogłosowość, klarowność czy zrozumiałość mowy.

Ustalenie wartości JND dla tych parametrów ma kluczowe znaczenie – zarówno z perspektywy naukowej jak i praktycznej. Z punktu widzenia badań podstawowych pozwala określić granice wrażliwości ludzkiego słuchu na złożone cechy pola akustycznego, takie jak

czas pogłosu czy klarowność, a tym samym uzupełnia klasyczne eksperymenty psychoakustyczne ograniczone do prostych zmian amplitudy lub częstotliwości. Z perspektywy praktycznej wiedza o progach JND stanowi niezbędne narzędzie w projektowaniu i ocenie akustyki pomieszczeń – tylko zmiany parametrów przekraczające wartość JND będą rzeczywiście zauważalne dla użytkowników, podczas gdy mniejsze modyfikacje, choć mierzalne, pozostaną akustycznie nieistotne.

Do ustalenia wartości JND wykorzystuje się trzy metody: metodę granic, metodę regulacji i metodę stałych bodźców (Gescheider, 1976). Metoda granic jest jedną z najstarszych i najczęściej stosowanych metod w psychofizyce. Polega na systematycznym prezentowaniu bodźców w uporządkowanej sekwencji – rosnącej (np. coraz głośniejszy dźwięk) lub malejącej. Zadaniem badanego jest sygnalizowanie momentu, w którym zauważa zmianę, np. kiedy dźwięk staje się zauważalnie głośniejszy od bodźca odniesienia. Metoda ta pozwala wyznaczyć próg różnicy, czyli wartość, przy której następuje przejście od „brak różnicy” do „różnica zauważalna”. Badanie przeprowadza się wielokrotnie, zarówno w kierunku rosnącym, jak i malejącym, a następnie oblicza się średnią wartość, która traktowana jest jako JND. Metoda narażona jest na efekt oczekiwania oraz wpływ przyzwyczajenia (Kuroda, Hasuo, 2014).

W metodzie regulacji to badany samodzielnie dostosowuje wartość parametru bodźca porównawczego, aż jego zdaniem stanie się on równy bodźcowi odniesienia. Na przykład uczestnik może zwiększać lub zmniejszać poziom dźwięku, aż uzna, że oba dźwięki są jednakowo głośne lub zmieniać długość pogłosu, aż uzna, że obie próbki mają tak samo długi pogłos. Czynność ta jest powtarzana wielokrotnie, a z uzyskanych wyników oblicza się średnią różnicę między ustawioną przez badanego wartością parametru a wartością odniesienia – ta średnia stanowi przybliżoną wartość JND (Gescheider, 1997; Kuroda, Hasuo, 2014).

Najbardziej czasochłonna, ale też najdokładniejsza jest metoda stałych bodźców, w której uczestnikowi prezentuje się bodźce porównawcze o wcześniej ustalonych, niezmiennych wartościach danego parametru, zestawiane z bodźcem odniesienia. W przeciwieństwie do metody regulacji, badany nie dokonuje żadnych zmian, lecz jedynie ocenia, czy bodziec porównawczy różni się od odniesienia, a jeśli tak – to w jaki sposób. Wartości bodźca porównawczego dobierane są z góry, zazwyczaj w taki sposób, aby obejmowały zakres od wyraźnie mniejszych do wyraźnie większych w porównaniu do bodźca odniesienia. Prezentowane są one wielokrotnie i w losowej kolejności, a zadaniem uczestnika jest udzielenie odpowiedzi przy każdej parze – na przykład, który dźwięk był głośniejszy, który miał dłuższy pogłos, lub czy słuchacz zauważył różnicę. Na podstawie wszystkich odpowiedzi oblicza się

odsetek przypadków, w których dana wartość została uznana za różną od bodźca odniesienia. Wartość parametru, dla której uczestnik stwierdza różnicę w 50% przypadków, przyjmuje się jako przybliżoną wartość progu różnicy, czyli JND. (Gescheider, 1997).

Dotychczasowe badania nad wartościami JND dla parametrów akustycznych wykorzystywanych w akustyce wnętrz były prowadzone niesystematycznie i obejmowały jedynie niewielką liczbę wskaźników. Różni autorzy stosowali odmienne metody wyznaczania JND, przy czym różnice dotyczyły zarówno konstrukcji eksperymentów, zastosowanych metod statystycznych, jak i liczby uczestników biorących udział w badaniach.

2.6.1 JND dla czasu pogłosu

Pierwsze kompleksowe badanie dotyczące wartości JND dla parametru RT30 zostało przeprowadzone przez Seraphima (1958). W tym przełomowym eksperymencie przebadano 500 osób, które miały porównać zaniki sygnałów szumu pasmowo-przepustowego. Badanym prezentowano dwa sygnały – jeden o stałym zaniku, a drugi o stopniowo zwiększanej wartości RT30 – w losowej kolejności. Zaniki miały charakter liniowy i kończyły się na poziomie stałego szumu maskującego.

Zadaniem uczestników było wskazanie dłuższego zaniku. JND została określona jako względna zmiana RT30, przy której 75% uczestników poprawnie rozpoznawało dłuższy pogłos. Eksperyment przeprowadzono z udziałem doświadczonych słuchaczy. W zakresie RT30 od 0,6 do 4 s JND była mniejsza niż 4%, natomiast przy RT30 = 0,2 s JND wzrastała do 12%, co wskazuje na większą wartość bezwzględnej JND w tym zakresie – około 0,024 s. Dla przestrzeni koncertowych kluczowy zakres RT30 mieści się między 1,5 a 3 s, gdzie JND według Seraphima wynosi około 3%. Na podstawie tych wyników załącznik do normy ISO 3382-1 (2009) przyjmuje 5% jako JND dla RT30 i EDT. Co ważne, zmiana poziomu zaniku do 20 dB oraz różne częstotliwości sygnałów nie wpłynęły znacząco na wyniki Seraphima. Wyniki te mogą być kwestionowane w kontekście sal koncertowych, ponieważ użyte sygnały szumu nie oddają w pełni złożoności muzyki.

Zależność JND RT30 od częstotliwości została zbadana przez Plengego (1965), który testował percepcję lokalnych zmian na krzywej RT30 jako funkcji częstotliwości. Modyfikował on współczynniki zaniku w sąsiednich pasmach i oceniał, kiedy badani zauważali różnice. Wyniki pokazały, że dla częstotliwości powyżej 2000 Hz względna JND była większa niż dla częstotliwości poniżej 1000 Hz. Wartości JND w zakresie 800–1600 Hz były zgodne z wynikami Seraphima. Istotnym ograniczeniem tego badania jest to, że jedynym uczestnikiem był sam autor.

W nowszym badaniu Karjalainena i Järveläinen (2001) wykorzystano wyidealizowane odpowiedzi impulsowe złożone z wykładniczo zanikającego szumu Gaussa. Testowano dwa rodzaje bodźców: szum oraz mowę nałożoną na RIR. W teście wykorzystano trzy RIR-y o wartościach RT30 wynoszącym 0,5 s, 1 s i 2 s, które modyfikowano o $\pm 5\%$ w czterech krokach. JND określono jako wartość, przy której uczestnicy poprawnie identyfikowali różnicę w 75% przypadków. Średnia względna JND wynosiła około 7% dla impulsu i 6% dla sygnału mowy. W badaniu wzięły udział tylko cztery osoby o prawidłowym słuchu co podobnie jak w przypadku badań Plengego jest istotnym ograniczeniem.

Niaounakis i Davies (2002) przeprowadzili eksperyment w reżyserni studia nagraniowego, używając metody limitów. Bodźce bazowały na bezechowym fragmencie muzyki odtwarzanym przez pojedynczy głośnik. Czas pogłosu regulowano poprzez zmianę chłonności akustycznej reżyserni przy użyciu szerokopasmowych absorberów. Uczestnicy najpierw słuchali pomieszczenia bez dodatkowej absorpcji, a następnie - po wprowadzeniu zmian - oceniali, czy odczuwają różnicę w pogłosie. Wiarygodność tej metody jest ograniczona ze względu na krótkotrwałą pamięć akustyczną (Gade, 2007). W eksperymencie wzięło udział 14 osób a uzyskany bezwzględny JND wyniósł 0,026 s. W ramach tego samego badania przeprowadzono też drugi eksperyment, w którym sygnały w tej samej reżyserni nagrywano z wykorzystaniem „sztucznej głowy”, czyli bryły w kształcie ludzkiej głowy z zamodelowanymi kanałami słuchowymi na końcu których znajdują się mikrofony. Tak wykonane nagrania zaprezentowano 11 uczestnikom z wykorzystaniem słuchawek. Średnia bezwzględna wartość JND w tym eksperymencie wyniosła 0,05 s.

Meng i współautorzy (2006) badali wartość JND dla RT30 z wykorzystaniem motywów muzycznych granych na tradycyjnych chińskich instrumentach. W badaniu wzięły udział 34 osoby z prawidłowym słuchem, którym bodźce prezentowano przez słuchawki. Zastosowano psychofizyczną metodę stałych bodźców. Średnie względne wartości JND uzyskane w badaniu wyniosły aż 26%, czyli wartość znacznie wyższą niż w innych eksperymentach. Autorzy przypisują te różnice m.in. rodzajowi bodźca (muzyka), zastosowanej metodzie (stałe bodźce zamiast metody granic), a także wyższym wartościom RT30 w ich eksperymencie.

Frissen i współpracownicy (2009) również analizowali wpływ rodzaju bodźca na wartość JND RT30. W pierwszym eksperymencie odtworzyli badanie Seraphima, tworząc sztuczne odpowiedzi impulsowe z wykładniczym zanikiem, nałożonym na szum biały o długości 170 ms. W badaniu wzięło udział 8 uczestników, a bodźce były prezentowane przez słuchawki. Zastosowano metodę stałych bodźców, a uczestnicy oceniali, który z dwóch prezentowanych

bodźców był bardziej pogłosowy. Do analizy użyto mediany JND dla każdego badania, co pozwoliło zminimalizować wpływ wartości odstających. Średnia JND wyniosła 6%, co potwierdziło wyniki uzyskane przez Seraphima.

W kolejnym eksperymencie Frissen i in. zbadali wpływ rodzaju bodźca, porównując sygnał szumu i nagranie pojedynczego słowa mówionego przez mężczyznę. W eksperymencie Seraphima wartość referencyjna RT30 została ustalona na 1,8 s, natomiast bodźce testowe obejmowały siedem różnych wartości RT30 mieszczących się w zakresie od 1,48 s do 2,12 s. Uczestnicy mieli za zadanie ocenić, czy prezentowane bodźce charakteryzują się identyczną, czy odmienną długością pogłosu. Do wyników dopasowano funkcję Gaussa, a jej odchylenie standardowe interpretowano jako JND. Wyniki wykazały brak istotnych różnic między typami bodźców – względna JND wyniosła 9,6% dla szumu i 10,4% dla mowy. Autorzy postulują, że zdolność do rozróżniania zmian RT30 nie zależy istotnie od rodzaju bodźca.

Billon i Embrechts (Billon, Embrechts, 2012; Embrechts, 2000) przeprowadzili badanie RT30 JND, wykorzystując odpowiedzi impulsowe uzyskane z symulacji sali *Grosser Musikvereinsaal* w Wiedniu, wykonanej w programie Salrev (wykorzystano metodę śledzenia promieni). W eksperymencie uczestniczyło 15 osób bez wykształcenia muzycznego. Bodźce testowe (biały szum, mowa, muzyka orkiestrowa) prezentowano przez słuchawki w neutralnym pomieszczeniu. W pierwszym eksperymencie zastosowano zmodyfikowaną metodę limitów. Uczestnikom prezentowano bodziec standardowy o stałym RT30 oraz porównawczy z różnicą 15%. Proces powtarzano trzykrotnie dla każdego rodzaju bodźca (mowa, szum, muzyka), zarówno w kierunku wzrostu, jak i spadku wartości RT30 względem wzorca. Średnie wartości JND wyniosły: 12,4% dla muzyki i szumu, oraz 10,3% dla mowy. Kierunek zmiany nie miał istotnego wpływu na wyniki.

W drugim eksperymencie autorzy zastosowali metodę regulacji. Uczestnicy mieli dostosować bodziec porównawczy, aż uznali go za akustycznie równy bodźcowi wzorcowemu. Eksperyment przeprowadzono sześciokrotnie dla każdego rodzaju bodźca. W badaniu wzięło udział 14 osób. Średnie wartości JND wyniosły: 10,5% dla muzyki, 11,4% dla szumu i 9% dla mowy. W obu eksperymentach rodzaj bodźca miał statystycznie istotny wpływ na wynik, w przeciwieństwie do kierunku zmiany RT30. Wyniki te są sprzeczne z wynikami Frissena i in. (2009), którzy nie znaleźli istotnego wpływu rodzaju bodźca na JND.

Blevins i współautorzy (2013) zaprojektowali swoje badanie JND dla RT30 w oparciu o symulacje sali koncertowej Elmia, wykonane w programie Odeon. Uzyskane odpowiedzi BRIR (ang. *Binaural Room Impulse Response*) spleciono z 500-milisekundowym szumem

pasmowym (środek: 1000 Hz). Wybrano trzy przypadki bazowe o RT30 równym 1,0 2,0 i 3,0 s. Dla każdego z nich przygotowano osiem bodźców o wartościach RT30 niższych i osiem o wartościach wyższych niż wartość referencyjna. Zastosowano metodę 3AFC (ang. *Three-Alternative Forced Choice* – test wymuszonego wyboru z trzema opcjami) w wersji adaptacyjnej: jedna niepoprawna odpowiedź zwiększała różnicę RT30 o 4%, a dwie poprawne ją o tyle samo zmniejszały. Wartość JND określono na podstawie punktu na funkcji psychometrycznej, przy którym uczestnicy rozpoznawali zmianę z prawdopodobieństwem 67%. Średnia JND wyniosła 24,5% (SD = 6,09%). Badanie objęło tylko 4 osoby, co podważa jego reprezentatywność.

Tabela 12 zawiera podsumowanie najważniejszych badań nad JND dla parametru RT30, tj. autorów, metody, liczbę uczestników, typ bodźców, uzyskane wyniki i najważniejsze uwagi.

Tabela 12: Wartości JND dla czasu pogłosu uzyskane w różnych eksperymentach.

Autorzy	Liczba uczestników	Metoda	Rodzaj bodźców	Średnia JND	Uwagi
Seraphim	500	Metoda limitów	Szum pasmowy	3% - 4%	Norma ISO: 5%
Plenge	1	Zmiany częstotliwości pasm	Szum	3%-4% dla pasma 800-1600 Hz	Tylko jeden uczestnik
Karjalainen & Järveläinen	4	Stale bodźce ($\pm 5\%$)	Szum RIR / mowa	6–7%	Prezentacja słuchawkowa
Niaounakis & Davies	14 / 11	Metoda limitów / atrapa głowy	Muzyka / nagrania binauralne	0,026s / 0,05s	Krytyka: krótka pamięć akustyczna
Meng i in.	34	Stale bodźce	Muzyka tradycyjna	26%	Wysokie JND przypisane muzyce i metodzie
Frissen i in.	8 / 7	Stale bodźce	Szum / mowa	6–10%	Brak wpływu rodzaju bodźca
Billon & Embrechts	15 / 14	Limity / Regulacja	Muzyka / szum / mowa	9–12,4%	Rodzaj bodźca istotny statystycznie
Blevins i in.	4 / 30	3AFC, adaptacyjna	Szum pasmowy	24,5% / 22,3%	Mała liczba uczestników w głównym teście

2.6.2 JND dla pozostałych parametrów akustyki wnętrza

W badaniu przeprowadzonym przez Coxa i współpracowników (1993) uzyskano wartości JND dla kilku parametrów akustycznych. W eksperymencie zastosowano symulator umożliwiający manipulowanie kierunkiem oraz intensywnością poszczególnych wczesnych odbić. Posługując się metodą granic, określono JND dla następujących wskaźników: wczesna boczna frakcja energii (JLF), międzyuszna korelacja krzyżowa (IACC), wskaźnik klarowności (C80), czas centralny (T_s) oraz czas pierwszego odbicia (ITDG), a więc metrykę związaną z percepcyjnym odczuciem przebywania w intymnym otoczeniu. W swoim badaniu Bradley i współautorzy określili wartość JND dla parametru C50 – metryki Klarowności, która najczęściej kojarzona jest ze zrozumiałością sygnałów mowy (Bradley i in., 1999; Bradley,

1986). Do tego celu wykorzystali symulowane pola dźwiękowe, wygenerowane za pomocą 8-bitowego algorytmu. Autorzy badania oszacowali też wartość JND dla C80 ekstrapolując wartości JND uzyskane dla parametru C50, argumentując, że pomiędzy tymi dwoma wskaźnikami istnieje prosta zależność liniowa (Bradley i in., 1999). Zasadność tego założenia może jednak budzić wątpliwości, ponieważ bodźce użyte w badaniu składały się wyłącznie z mowy, a nie muzyki. Co więcej, ogólna wiarygodność wyników pracy Bradleya i współautorów może być kwestionowana ze względu na ograniczoną liczbę uczestników, w eksperymencie wzięło udział jedynie 10 osób.

W nowszym badaniu Martellotta (2010) określił wartości JND dla parametrów C80 ($JND = 1,5 \pm 0,1$ dB) oraz T_s ($JND = 8,5\%$ wartości bazowej), korzystając nagrań przeprowadzonych w przestrzeniach o długich pogłosach, rejestrowanych za pomocą mikrofonu ambisonicznego. Zmierzone przestrzenne odpowiedzi impulsowe (ang. *Spatial Room Impulse Responses*, SRIR) zostały odtworzone w niemal bezechowym pomieszczeniu przy użyciu zestawu czterech głośników. Aby uzyskać bodźce testowe, początkowe 80 ms SRIR zostało stłumione w taki sposób, by stopniowo zwiększać wartość T_s przy minimalnym wpływie na parametry RT30 i EDT. Fragmenty muzyczne, przekształcone na podstawie SRIR-ów w formacie ambisonicznym, były prezentowane uczestnikom z wykorzystaniem dekodowania do wykorzystanego systemu głośnikowego. Do określenia JND zastosowano metodę limitów.

Z kolei Vigeant i współautorzy (2015) przeprowadzili szczegółowe badanie JND dla parametru C80, analizując jednocześnie wpływ różnych metod testowych na uzyskaną wartość JND. W swoich eksperymentach zastosowali metodę stałych bodźców, przeprowadzając trzy oddzielne testy, z których każdy opierał się na innym podejściu do wyznaczania hipotetycznych wartości JND dla C80. Eksperymenty odbywały się w komorze bezechowej wyposażonej w system ośmiu głośników, sterowanych cyfrowym procesorem sygnałowym. System ten umożliwiał precyzyjne manipulowanie kierunkiem, opóźnieniem i amplitudą odbić w czasie pierwszych 80 ms, co pozwalało na kontrolowaną zmianę wartości C80. Otrzymane dane analizowano poprzez dopasowanie funkcji psychometrycznych, a ich trafność oceniano przy użyciu wskaźnika powierzchni pod krzywą charakterystyki operacyjnej odbiorcy (ang. *Receiver Operating Characteristic Curve*, ROC).

Tabela 13 zawiera typowe wartości JND dla różnych parametrów akustyki wnętrz, które można odnaleźć w literaturze.

Tabela 13: Wartości JND dla niektórych parametrów akustyki wnętrz, które można znaleźć w literaturze.

Parametr	Pełna nazwa	Typowa wartość	Źródło / Uwagi
RT30	Czas pogłosu	$\pm 5\%$ jak dolny próg $\pm 5-10\%$	ISO 3382-1 (2009) Seraphim (1958)
EDT	Czas wczesnego zaniku	$\pm 5-10\%$ $\pm 18\%$	ISO 3382-1 (2009) Dorrego i Vigeant (2022)
C80	Klarowność dla muzyki	$\pm 1-2$ dB	Beranek (2004) Vigean i in. (2004)
C50	Klarowność dla mowy	± 1 dB	Bradley i in. (1999)
Ts	Czas centralny	8,5%	Martellotta (2009)
D50	Wyrazistość	$\pm 5\%$	ISO 3382-1 (2009)
G	Wskaźnik siły dźwięku	± 1 dB	Beranek (2004) Lehmann (1976)
IACC	Międzyuszną korelacja skrośna	$\pm 0,05$	Beranek (2004) Cox i in. (1993)
ITDG	Czas pierwszego odbicia	± 10 ms	Beranek (2004)
LF / LJLF	Frakcja bocznej energii	$\pm 0,05$	Cox i in. (1993)
ASW	Pozorna szerokość źródła	0,05	ISO 3382-1 (2009)

2.7 Parametry subiektywne w akustyce wnętrz

„Obok podstaw teoretycznych opracowano również, zwłaszcza dzięki rozwojowi elektroakustyki, dokładne aparaty pomiarowe, pozwalające w sposób znacznie precyzyjniejszy od naszego ucha ocenić zjawiska akustyczne. Trzeba jednak pamiętać, że cały aparat teoretyczny i laboratoryjny nie jest celem sam w sobie, ale tylko **środkiem**. Ostatecznym sprawdzianem dobroci projektu akustycznego nie jest teoretycznie obliczone wychylenie wskazówki przyrządu, lecz **jakość wrażeń słuchowych**. Dlatego fizyczna i psychiczno-fizjologiczna strona zjawisk akustycznych wiąże się ze sobą nierozdzielnie” (Malecki, 1949).

Powyższy cytat, pochodzący z jednej z najstarszych książek o akustyce wnętrz w polskiej literaturze naukowej, przedstawia ogólną ideę towarzyszącą akustykom w trakcie badań nad opracowaniem kolejnych parametrów. Oprócz zdefiniowania różnych parametrów akustycznych, rozwój akustyki pomieszczeń obejmował również próby kompleksowej oceny jakości akustycznej sal koncertowych. Podejmowano także starania, aby powiązać subiektywne oceny jakości dźwięku z obiektywnymi pomiarami parametrów akustycznych, co miało umożliwić przewidywalną ocenę sal koncertowych. W poniższych podrozdziałach przedstawione zostaną metody subiektywnej oceny jakości akustycznej sal oraz parametry, które w tym celu wykorzystywano.

2.7.1 Metoda Leo Beranka

W latach 50 XX wieku Leo Beranek został zaangażowany jako konsultant do spraw akustyki przy projektowaniu sali koncertowej w Lincoln Center w Nowym Jorku. W ramach przygotowań przeprowadził szeroko zakrojone badania istniejących sal koncertowych, aby

zrozumieć jakie cechy wpływają na jakość dźwięku. W tym celu przeprowadził pomiary parametrów akustycznych w 54 salach koncertowych na całym świecie oraz przygotował procedurę oceny jakości sal koncertowych, która uwzględniała nie tylko wyniki pomiarów obiektywnych, ale również subiektywną ocenę słuchaczy. Mimo szeroko zakrojonych badań, będących podstawą projektu akustycznego nowojorskiej filharmonii, sala po otwarciu w 1962 roku spotkała się z krytyką ze względu na problemy akustyczne.

Aby zrealizować swoje badania, Beranek towarzyszył najlepszym orkiestrom symfonicznym tamtych czasów podczas ich zagranicznych tournée. Wśród respondentów Beranka znajdowały się autorytety muzyczne o światowej renomie, takie jak Leonard Bernstein, Herbert von Karajan, Eugen Ormandy, Leopold Stokowski i Stanisław Skrowaczewski (Kulowski, 2011). Trudności natury pojęciowej i językowej w komunikacji pomiędzy artystami a technikami, które w swojej pracy napotkał Beranek, były wyraźne i zostały potwierdzone również przez wielu późniejszych autorów. W wyniku licznych dyskusji z muzykami Beranek zaproponował 18 terminów, z których większość było subiektywnymi odpowiednikami parametrów obiektywnych. Każdy z terminów ma dwa określenia towarzyszące, aby lepiej opisać występowanie lub brak występowania danej cechy, co ułatwia ankietowanym udzielenie bardziej precyzyjnych odpowiedzi. Nazwy poszczególnych parametrów oraz ich cech pokazano na Rysunku 6.

QUALITY		ANTITHESIS	
<i>Noun form</i>	<i>Adjectival form</i>	<i>Noun form</i>	<i>Adjectival form</i>
1 intimacy, presence	intimate	lack of intimacy lack of presence	non-intimate
2 liveness, fullness of tone reverberation	live reverberant	dryness deadness lack of reverberation	dry dead unreverberant
3 warmth	resonant	dryness	dry
4 loudness of the direct sound	warm loud direct sound	lack of bass	brittle
5 loudness of the reverberant sound	brilliant	faintness ... weakness ...	faint ... weak ...
6 definition, clarity	loud ...	faintness ... weakness ...	faint ... weak ...
7 brilliance	clear	poor definition	muddy
8 diffusion	brilliant	dullness	dull
9 balance	diffuse	poor diffusion	non-diffuse
10 blend	balanced	imbalance	unbalanced
11 ensemble	blended	poor blend	unblended
12 response, attack	—	poor ensemble	—
13 texture	responsive	poor attack	unresponsive
14 no echo	—	poor texture	—
15 quiet	echo-free anechoic	echo	with echo echoic
16 dynamic range	quiet	noise	noisy
17 no distortion	—	narrow dynamic range	—
18 uniformity	undistorted	distortion	distorted
	uniform	non-uniformity	non-uniform

Rysunek 6: Parametry oceny subiektywnej zaproponowane przez Beranka (1962).

Berank zaproponował zestaw osiemnastu terminów opisowych, z których większość stanowiła subiektywne odpowiedniki parametrów obiektywnych stosowanych w akustyce:

Intymność (ang. *Intimacy*) – wrażenie bliskości źródła dźwięku w pomieszczeniu, związane z daniem Beranka z krótkim czasem opóźnienia pierwszych odbić.

Pogłosowość (ang. *Liveness*) – subiektywne wrażenie przedłużonego i wzmocnionego brzmienia dźwięku w pomieszczeniu, wynikające z wielokrotnych odbić, raczej późnych niż wczesnych.

Ciepło brzmienia (ang. *Warmth*) – subiektywne wrażenie pełni i łagodności dźwięku, związane z przewagą większej pogłosowości dla średnich i niskich częstotliwości.

Głośność dźwięku bezpośredniego (ang. *Loudness of Direct Sound*) – percepcyjne odczucie natężenia dźwięku dochodzącego bezpośrednio do słuchacza, bez uwzględniania odbić.

Głośność dźwięku pogłosowego (ang. *Loudness of Reverberant Sound*) – percepcyjne odczucie głośności dźwięku pogłosowego, czyli dźwięku wynikającego z odbić i rozproszenia w pomieszczeniu.

Równowaga akustyczna i wymieszanie dźwięku (ang. *Balance and Blend*) – zrównoważenie poszczególnych sekcji orkiestry oraz relacja między orkiestrą a solistami, na którą wpływa konstrukcja sceny, fosy i widowni.

Rozproszenie (ang. *Diffusion*), które ocenia wrażenie równomiernego rozchodzenia się dźwięku we wszystkich kierunkach. Uzyskuje się je poprzez odpowiednie ukształtowanie elementów architektonicznych, takich jak kasetony, rzeźby i kolumny.

Zespołowość (ang. *Ensemble*), czyli zdolność muzyków do słyszenia się nawzajem, co jest istotne dla zgodnego brzmienia. Na tę cechę wpływa szerokość i głębokość sceny oraz powierzchnie odbijające dźwięk.

Pięć pierwszych atrybutów oceny Beranek powiązał wprost z wartościami parametrów obiektywnych. Zależności pomiędzy nimi pokazano w Tabeli 14. Pozostałe 3 atrybuty nie mają zdaniem Beranka odpowiednika w postaci miary obiektywnej, mają też znacznie niższe wagi przypisane tym parametrom w zaproponowanej procedurze oceny.

Tabela 14: Najważniejsze subiektywne parametry oceny jakości akustycznej pomieszczeń w metodzie Beranka i ich obiektywne odpowiedniki (Kulowski, 2011).

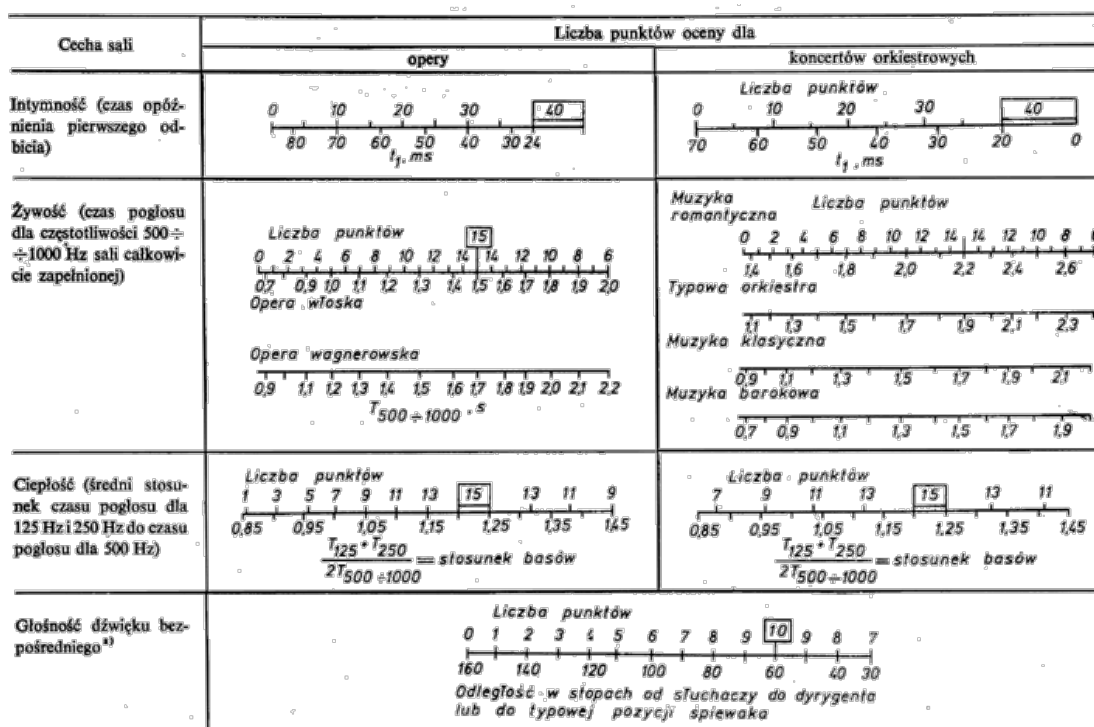
Cecha jakości akustycznej	Parametr obiektywny
Intymność	Czas opóźnienia pierwszego odbicia ITDG
Pogłosowość	Czas pogłosu w zakresie 500 Hz - 1000 Hz
Ciepło brzmienia	Stosunek czasu pogłosu $RT_{125}+RT_{500}/RT_{500}+RT_{1000}$
Głośność dźwięku bezpośredniego	Odległość słuchaczy od dyrygenta
Głośność dźwięku pogłosowego	Stosunek czasu pogłosu w zakresie 500-1000Hz do objętości

Tabela 15 pokazuje wagi, jakie Beranek przypisał poszczególnym elementom oceny w odniesieniu do sal koncertowych i operowych (Beranek, 1962). Rysunki 7 i 8 przedstawiają grafy wykorzystywane do przyznawania odpowiedniej liczby punktów w metodzie Beranka dla wymienionych w Tabeli 15 kategorii, w zależności od rodzaju sali i rodzaju muzyki w odniesieniu do wyrażonych liczbowo parametrów obiektywnych (Sadowski, 1971). Dodatkowo – zdaniem Beranka – od ogólnej oceny należy odjąć punkty za występowanie echa lub nadmiernego poziomu hałasu oraz dodać punkty za odpowiednią głośność dźwięku bezpośredniego na balkonach. Należy zauważyć, że największą wagę w metodzie Beranka ma cecha nazwana „intymnością” (40%), której głównym wyznacznikiem jest czas opóźnienia wczesnych odbić. Kluczowy wpływ na ten parametr mają kształt sali oraz układ powierzchni

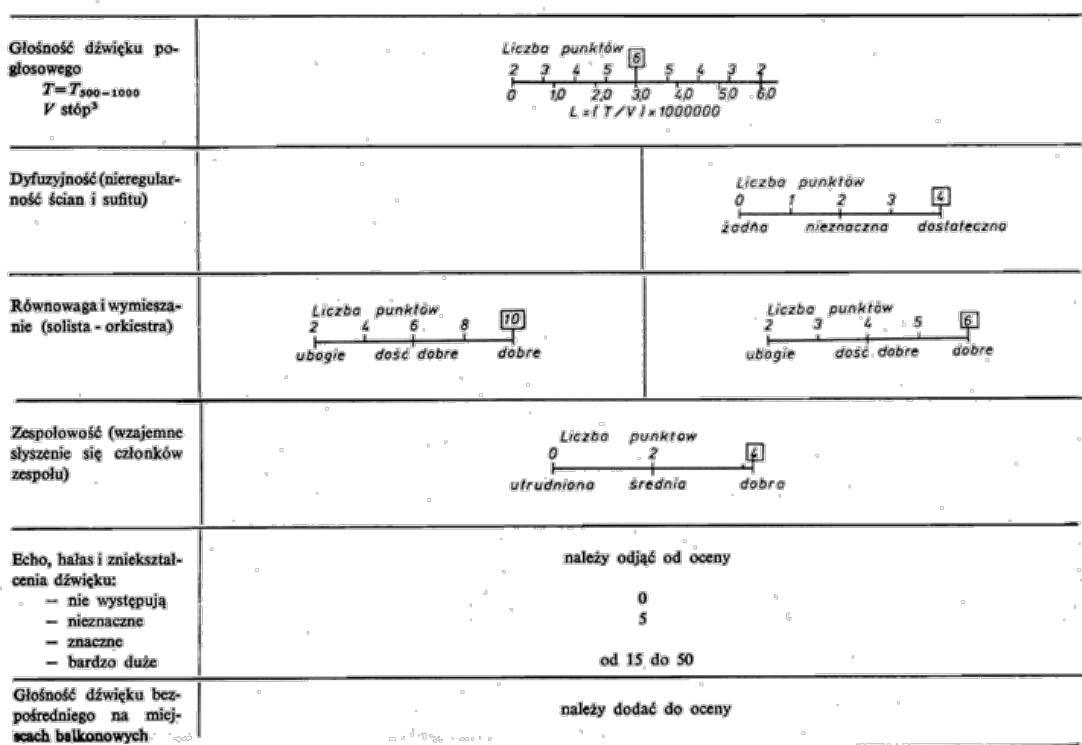
odbijających dźwięk, w tym profil sufitu i ścian oraz rozmieszczenie ekranów akustycznych. Wynika stąd, że konsultacje akustyczne powinny odbywać się już na etapie projektowania kształtu sali, a nie ograniczać się jedynie do doboru materiałów wykończeniowych.

Tabela 15: Wagi atrybutów oceny akustyki określone w % przez Beranka (1962).

Atrybut	Atrybut (ang.)	Salę koncertowe	Salę operowe
Intymność	<i>Intimacy</i>	40	40
Pogłosowość	<i>Liveness</i>	15	15
Ciepło brzmienia	<i>Warmth</i>	15	15
Głośność dźwięku bezpośredniego	<i>Loudness of Direct Sound</i>	10	6
Głośność dźwięku pogłosowego	<i>Loudness of Reverberant Sound</i>	6	6
Równowaga akustyczna i wymieszanie dźwięku	<i>Balance and Blend</i>	6	10
Rozproszenie	<i>Diffusion</i>	4	4
Zespołowość	<i>Ensemble</i>	4	4
Suma		100	100



Rysunek 7: Punkcja przy ocenie jakości akustycznej wg. metody Leo Beranka - część 1 (Sadowski, 1971).



Rysunek 8: Punktacja przy ocenie jakości akustycznej wg. metody Leo Beranka - część 2 (Sadowski, 1971).

Ostatecznie ocena jakości akustycznej sali metodą Beranka sprowadza się do zmierzenia parametrów akustycznych danej sali, przypisania im wartości punktowych w zależności od określonego repertuaru muzycznego oraz zestawienia sumy punktów ze skalą przyjętą przez Beranka, co pozwala określić jakość akustyczną sali. Tabela 16 przedstawia jakość akustyczną sali w zależności od liczby punktów uzyskanej w metodzie Beranka.

Tabela 16: Punktacja w ocenie jakości akustycznej sal wg. metody Leo Beranka (Sadowski, 1971).

Liczba punktów	Jakość akustyczna sali
90-100	doskonała
80-89	bardzo dobra do doskonałej
70-79	dobra do bardzo dobrej
60-69	dostateczna do dobrej
50-59	dostateczna
poniżej 50	niezadowolająca

Metoda Beranka ma jednak pewne ograniczenia. Uwzględnia jedynie sale przeznaczone do wykonywania repertuaru symfonicznego i operowego pomijając inne gatunki muzyczne takie jak śpiew, muzyka kameralna czy chóralna. Beranek nie określił istotności statystycznej uzyskanych wyników, a jego badania opierały się głównie na indywidualnych rozmowach z muzykami, co sprawia, że wyniki mogły być zależne od ówczesnego stylu wykonawczego, poddania się opinii wygłoszonej publicznie przez osobę uchodzącą w środowisku za autorytet, a także wpływu czynników pozaakustycznych. Przykładem takiego wpływu niech będzie opinia wygłoszona przez dyrygenta George'a Schell'a: „Jak ktokolwiek może tworzyć piękna muzykę w niebieskim wnętrzu?” (Soloudre, 2006). Na skutek badań innych akustyków,

w późniejszych latach Beranek zweryfikował zarówno najważniejsze atrybuty oceny jak i wagi im przypisane. Tabela 17 zawiera zestaw parametrów i ich wagi zaproponowany przez Beranka w 1996. Największa zmiana dotyczy zmiana istotności pierwszego odbicia na rzecz czasu wczesnego zaniku dźwięku i dźwięku rozproszonego dającego poczucie otoczenia dźwiękiem.

Tabela 17: Wagi atrybutów oceny jakości akustycznej sal (Beranek, 1966).

Atrybut	Opis	Punktacja
IACCE3	Międzyuszną korelację wzajemną (IACC)	25
TE	Czas wczesnego zaniku (EDT)	25
SDI	Współczynnik rozproszenia dźwięku	15
G	Siła dźwięku (G)	15
t1	Opóźnienie pierwszego odbicia (ITDG)	10
BR	Ciepło Brzemia (BR)	10
Suma punktów		100

2.7.2 Badania brytyjskie

Wypełnianie kwestionariuszy stanowiło jedną z metod wykorzystywanych także przez innych badaczy akustyki do oceny jakości akustycznej sal. W badaniu przeprowadzonym roku przez Hawkesa i Douglasa (1971) słuchacze uczestniczyli w koncertach na żywo i wypełniali kwestionariusze składające się z 16 przeciwstawnych atrybutów oceny. Autorzy tego badania ustalili, że 16 zaproponowanych przez nich atrybutów można zredukować do pięciu niezależnych parametrów, których wartości są istotne dla pozytywnej oceny akustyki sal. Kolejno to: **klarowność** - umożliwiającą docenienie szczegółów muzycznych, **pogłosowość pomieszczenia** zapewniającą słuchaczowi **wrażenie przestrzenności**, **intymność** - aby słuchacz mógł odczuwać wrażenia akustyczne jako bliskie i odpowiednia **głośność** (Barron, 1993). W kolejnym badaniu (Wilkins, Plenge, 1974), autorzy wymienili trzy istotne czynniki: głośność (47%), definicję (28%) i uznanie (14%). W badaniu tym słuchacze byli zgodni co do istotności tych trzech atrybutów, jednakże wyodrębniono dwie grupy w zakresie preferencji głośności oraz jasności dźwięku.

2.7.2.1 Badania Mike'a Barrona

W badaniu przeprowadzonym przez Barrona (1988), słuchacze będący ekspertami uczestniczyli w koncertach na żywo w jedenastu brytyjskich salach koncertowych, a po każdym koncercie wypełniali kwestionariusz, który był skróconą formą kwestionariusza opracowanego przez Hawkesa i Douglasa. Barron zbadał korelację zarówno między różnymi parametrami oceny subiektywnej, jak i wynikami ankietowymi a zestawem obiektywnych parametrów zmierzonych za pomocą dookólnego źródła dźwięku w salach pozbawionych publiczności. Wskaźniki subiektywne analizowane w tym badaniu to: pogłosowość, otoczenie dźwiękiem,

intymność, głośność, jasność brzmienia, pełnia brzmienia oraz ogólne wrażenie dobrej jakości. Ankietę wykorzystaną w tym badaniu pokazano na Rysunku 9.

CLARITY	Muddy	Clear
REVERBERANCE	Dead	Live
ENVELOPMENT	Expansive	Constricted
INTIMACY	Remote	Intimate
LOUDNESS	Loud	Quiet
BALANCE:	Weak Loud Treble re. mid-frequencies Bass re. mid-frequencies Singers/Soloists re. orchestra	
BACKGROUND NOISE:	Inaudible Acceptable Tolerable Intolerable	
OVERALL IMPRESSION:	Very poor Poor Mediocre Reasonable Good Very good Excellent	

N.B.: scale extremes refer to experience limits

Rysunek 9: Formularz odpowiedzi wykorzystywany w badaniach przez Barrona (Barron, 1998).

Uczestnicy oceniali akustykę sal za pomocą kwestionariusza zawierającego osiem parametrów, z których każdy opisuje inny aspekt wrażen słuchowych. Pierwszym ocenianym parametrem jest jasność dźwięku (*Clarity*), ocenianą w skali od *Muddy* (nieczytelny, „zamulony”) do *Clear* (czysty, wyraźny). Następnie znajduje się pogłosowość (*Reverberance*), w skali od *Dead* (martwy, suchy) do *Live* (żywy, pogłosowy). Kolejny parametr to otulenie dźwiękiem (*Envelopment*), gdzie ocena przechodzi od *Expansive* (rozległy, otaczający) do *Constricted* (ograniczony, zawężony). Czwartą cechą jest intymność (*Intimacy*), z zakresem od *Remote* (oddalony) do *Intimate* (bliski, intymny). Następnie ocenia się głośność (*Loudness*) w skali od *Loud* (głośno) do *Quiet* (cicho). W kategorii balans (*Balance*) znajdują się trzy skale porównujące wybrane pasma lub źródła dźwięku względem innych: wysokie tony względem średnich (*Treble re. mid-frequencies*), niskie tony względem średnich (*Bass re. mid-frequencies*) oraz wokaliści/soliści względem orkiestry (*Singers/Soloists re. orchestra*). Każda z tych skal przechodzi od *Weak* (słabe) do *Loud* (silne). W kwestionariuszu uwzględniono także hałas tła (*Background noise*), oceniany na czterostopniowej skali: *Inaudible* (niesłyszalny), *Acceptable* (akceptowalny), *Tolerable* (znośny) i *Intolerable* (nie do zniesienia).

Ostatni element kwestionariusza to ogólne wrażenie (*Overall impression*), oceniane w siedmiostopniowej skali: *Very poor* (bardzo złe), *Poor* (złe), *Mediocre* (przeciętne), *Reasonable* (zadowolające), *Good* (dobre), *Very good* (bardzo dobre) i *Excellent* (doskonale). W sumie

zebrano 227 kompletów ocen w 40 różnych lokalizacjach w 11 salach. W każdym miejscu zajmowanym przez słuchacza przeprowadzono również pomiary parametrów obiektywnych.

Baron wykazał korelację pomiędzy ogólnym wrażeniem dobrej jakości a pogłosowością, intymnością i głośnością. Istotną statystycznie korelację uzyskał również w parach: pogłosowość – otoczenie dźwiękiem, intymność – otoczenie dźwiękiem i intymność – głośność, co wskazuje na największy udział tych właśnie elementów na ocenę jakości akustycznej sal koncertowych.

Parametry obiektywne analizowane przez Barrona to: RT, EDT, C80, Ts, LTotal i LEarly. W analizie uwzględniono wartości parametrów dla całego zakresu częstotliwości oraz dla pasma niskich i średnich częstotliwości, co łącznie dało 18 wskaźników. Mimo uwzględnienia szerokiego spektrum badanych parametrów istotną statystycznie korelację uzyskano dla par: subiektywna klarowność – EDT, pogłosowość – EDT, intymność – LTotal (mid frequencies), głośność – LTotal oraz otoczenie dźwiękiem – Ts. Analiza ujawniła również istnienie dwóch grup odbiorców pod względem preferencji: jedna preferowała sale o większej intymności, a druga – sale o wyższej pogłosowości. Barron, podobnie jak inni akustycy napotkał też trudności natury językowej, ponieważ wyżej wyznaczone dwie grupy słuchaczy o różnych preferencjach prawdopodobnie inaczej oceniają otoczenie dźwiękiem kojarząc je albo z pogłosowością, albo z intymnością. Korelacje pomiędzy subiektywnymi wynikami a obiektywnymi pomiarami uzyskane w tym badaniu są stosunkowo niskie co auto tłumaczył wpływem obecności widowni w czasie koncertów i jej brakiem w czasie prowadzenia pomiarów. Obecność publiczności może mieć głęboki wpływ na akustykę sali (jak wykazano w Części B niniejszej pracy), dodatkowo promieniowanie energii akustycznej z tak rozległej struktury jaką jest orkiestra zajmująca przestrzeń sceny różni się od propagacji pochodzącej z pojedynczego głośnika umieszczonego na środku tej sceny (Soulodre, 2006). O ile słuchanie koncertów *in situ* daje najbardziej wiarygodną i naturalną percepcję, o tyle nie rozwiązuje problemu porównania jakości sal w przypadku badań ankietowych. Analiza danych z ustrukturyzowanych kwestionariuszy jest trudna, a czasem nawet niemożliwa, ze względu na porównania wykonywane w dużych odstępach czasu, jednoczesną zmienność dużej liczby parametrów, nieidentyczne bodźce a także indywidualne preferencje i nastrój badanych (Kahle, Jullien, 1995). Barron (1993) podał również inną niż Beranek definicję subiektywnej oceny intymności, jaka – zdaniem Beranka – wiąże się z parametrem ITDG. Jego zdaniem, intymność to odczucie, że muzyka jest odtwarzana w małym pomieszczeniu. Barron twierdzi, że intymność nie jest dokładnie tym samym, co ITDG. Poczucie, że znajdujemy się w małym pomieszczeniu z muzykami jest odczuwalne, gdy siedzimy blisko nich, niezależnie od wartości

ITDG. W rzeczywistości wartość ITDG jest często największa w miejscach znajdujących się najbliżej orkiestry, a przecież gdyby intymność zależała tylko od wartości ITDG, to dźwięk powinien być zawsze bardziej intymny z tyłu sali, gdzie odstęp czasowy jest najmniejszy. W pracy opublikowanej w 1996 roku Beranek zmodyfikował swoją definicję, wskazując, że jest to wrażenie odtwarzania dźwięku w pomieszczeniu o odpowiedniej wielkości, które jest przede wszystkim określane przez początkowe opóźnienie, ale odnosi się również do odczuwanej głośności.

2.7.3 Badania niemieckie

Inną drogę w badaniu jakości akustycznych sal obrali naukowcy niemieccy w badaniach przeprowadzonych przez dwie grupy badawcze w Getyndze i w Berlinie. Badania przygotowano w taki sposób, aby wyeliminować ograniczenia metodyki wykorzystanej przez Beranka, w szczególności poprzez rezygnację z konieczności dokonywania ocen w odstępie kilku miesięcy oraz ograniczenie wpływu czynników pozaakustycznych, takich jak cechy architektoniczne sal, ich reputacja czy zmienność wynikająca z różnic w repertuarze i składzie orkiestry.

Grupa berlińska wykorzystała nagrania wykonane z wykorzystaniem „sztucznej głowy” podczas trasy koncertowej Orkiestry Filharmonii Berlińskiej. W czasie prób przed koncertami w różnych salach koncertowych, orkiestra wykonywała te same, około dwuminutowe fragmenty utworów. Z nagrań przygotowano próbki dźwiękowe, które prezentowano słuchaczom w słuchawkach, a do oceny wykorzystano ankiety. Grupa z Getyngi wykorzystała nagrania z komory bezechowej odtwarzane przez głośniki ustawione na scenie, które ponownie nagrywano i prezentowano słuchaczom w komorze bezechowej. W tym badaniu słuchacze oceniali preferencje pomiędzy parami próbek (Cremer, Müller, 1978). Eksperymenty różniły się więc zarówno sposobem rejestracji próbek, sposobem prezentacji nagrań słuchaczom oraz sposobem oceny. W eksperymentach obydwu grup wykorzystano próbki dźwiękowe, co znacznie skróciło procedurę oceny.

Wyniki badań dwóch niemieckich grup niestety różnią się między sobą, a w odniesieniu do równowagi między klarownością a pogłosem są wręcz sprzeczne. Niektóre różnice mogły być spowodowane różnymi przyjętymi warunkami eksperymentalnymi. Jednak pomimo pewnych sprzeczności, na podstawie tych i wcześniejszych badań możliwe jest ustalenie konsensusu co do istotności niektórych parametrów w ocenie jakości akustycznej sal, którymi są pogłosowość, intymność i przestrzenność (Barron, 1988).

2.7.4 Metoda Yoichi Ando

Yoichi Ando zaproponował alternatywną w odniesieniu do Beranka metodę oceny akustyki sal, opartą na testach psychoakustycznych. Zamiast wysłuchiwanie całych utworów muzycznych wykonywanych przez orkiestrę, respondenci w jego badaniach słuchali nagrań testowych odtwarzanych w komorze bezechowej wyposażonej w kilkadziesiąt głośników. Wrażenia dźwiękowe były generowane tak, aby odpowiadały odczuciom powstałym w hipotetycznym pomieszczeniu. Wykorzystując wyniki badań innych autorów, Yoichi Ando opracował metodę, której podstawą było założenie, że długoterminowe widma badanych fragmentów muzycznych osiągają stabilizację w czasie krótszym niż 20 sekund. W ramach dalszych eksperymentów określił parametr τ_e , który jest efektywnym czasem trwania funkcji autokorelacji, czyli czasem, po którym obwiednia długoterminowej funkcji autokorelacji zmniejsza się do 0,1 swojej wartości maksymalnej. Czas ten jest charakterystyczny dla poszczególnych utworów lub ich konkretnych części. Fragmenty wykorzystane podczas pierwszych testów miały wartości parametru τ_e w granicach od 10 do 127 ms. Słuchaczom prezentowano się dwie próbki, które były preparacją tego samego fragmentu dźwiękowego, a które różniły się kilkoma parametrami: kierunkiem dochodzenia fal, amplitudą fal, opóźnieniami między falami dochodzącymi z poszczególnych kierunków oraz wartościami czasu pogłosu. Na podstawie testów każdemu parametrowi przypisuje się skalę preferencji subiektywnej, określającą stopień akceptacji danej wartości przez słuchaczy. Odsłuch próbek w warunkach komory bezechowej uwalnia test od wpływu czynników emocjonalnych i wrażeń pozaakustycznych towarzyszących obecności słuchacza w sali koncertowej, które mogłyby wpływać na wynik testu. Metoda Leo Beranka nierozzerwalnie związana jest z salami, w których wykonywany jest operowy lub symfoniczny repertuar klasyczny. Metoda Yoichi Ando jest wolna od tego ograniczenia, ponieważ bada preferencje słuchowe słuchacza, a więc pozwala na ocenę właściwości akustycznych pomieszczenia w odniesieniu do dowolnych przebiegów sygnałów akustycznych na przykład: mowy, fragmentów dowolnej muzyki itp. Procedura oceny jakości akustycznej w metodzie Yoichi Ando polega na:

- określeniu efektywnego czasu trwania funkcji autokorelacji, w kontekście którego oceniana jest jakość akustyczna pomieszczenia,
- określeniu maksymalnej funkcji korelacji wzajemnej pomiędzy sygnałami docierającymi do lewego i prawego ucha w określonym miejscu na widowni,
- rejestracji fragmentów testowych za pomocą standaryzowanej sztucznej głowy,
- zmierzeniu parametrów akustycznych sali, przede wszystkim RT i ITDG,

- sumowaniu punktów wagowych według skal subiektywnych preferencji odnoszących się do poszczególnych parametrów,

- klasyfikacja jakości akustycznej zgodnie z tabelą zaproponowaną przez autora metody.

Tabela 18 przedstawia preferowane wartości wybranych przez Ando parametrów sygnałów.

Tabela 18: Preferowane wartości wybranych parametrów sygnału w metodzie Yoichi Ando.

Parametr sygnału	Wartość preferowana
Poziom dźwięku niezależny od efektywnego czasu trwania funkcji autokorelacji	$L = 78 \pm 2$ dB
Kierunek dochodzenia pierwszej fali odbitej	$\alpha = 50^\circ \pm 20^\circ$
Czas opóźnienia pierwszej fali odbitej	$\Delta t_1 = \tau_e$
Czas opóźnienia drugiej fali odbitej	$\Delta t_2 = 1,8 \tau_e$
Czas pogłosu po dwóch odbiciach	$T_p = 23 \tau_e$

Oprócz parametrów wymienionych w powyższej Tabeli 18, w metodzie Ando bada się również:

- amplitudę pierwszej i drugiej fali odbitej,
- początkową amplitudę krzywej pogłosowej,
- maksymalną wartość funkcji korelacji wzajemnej pomiędzy sygnałami docierającymi do lewego i prawego ucha,
- charakter odbicia określony przez rodzaj powierzchni odbijającej dźwięk.

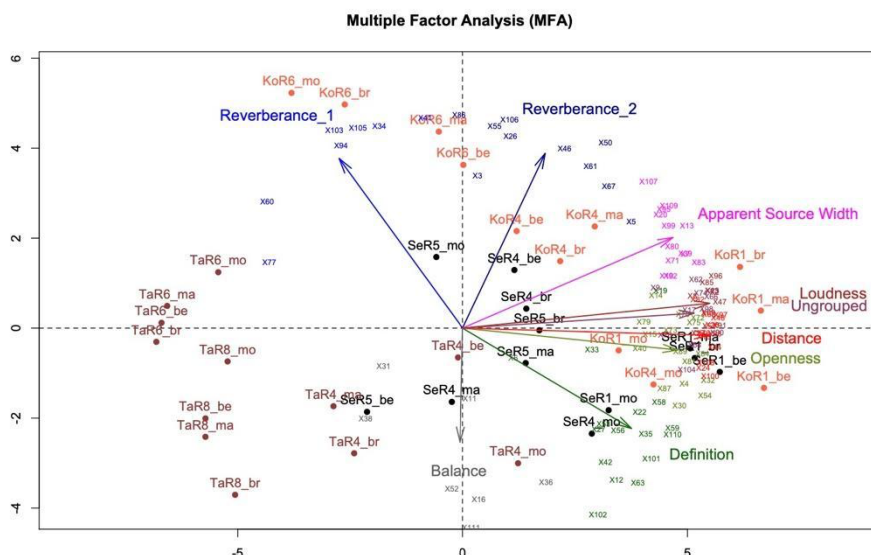
Najwyższą ocenę uzyskują próbki, których wartości odpowiadają najbardziej preferowanym wartościom z Tabeli 18. Gdy parametry pomieszczenia odbiegają od wartości preferowanych, jego jakość jest niższa w stopniu wynikającym ze skal preferencji opracowanych przez autora metody (Kulowski, 2011).

Podobnie jak u Beranka, skale preferencyjne Ando są zależne od charakteru materiału dźwiękowego. O ile Beranek klasyfikował sale w zależności od rodzaju muzyki (np. symfoniczna, operowa) i stylu (barok, klasycyzm), Ando wprowadził pojęcie efektywnego czasu trwania funkcji autokorelacji, który odnosi się do cech konkretnego utworu lub jego fragmentu. Badania Ando potwierdziły znaczenie czasu pierwszego odbicia, któremu tak dużą wagę przypisał pierwotnie Beranek ustalając, że preferowany początkowy czas opóźnienia wynosił nieco poniżej 20 ms. W późniejszym badaniu Ando zmniejszył istotność parametru ITDG utrzymując próg 20 ms jako najbardziej preferowany i określił też, że przekroczenie wartości 35 ms znacznie obniża jakość sali (Ando i in., 1996).

2.7.5 Wielowymiarowa ocena jakości akustyki sal - Tapio Lokki

Wielowymiarowa ocena jakości akustyki sal to metoda oceny akustyki sal koncertowych przy użyciu subiektywnej analizy sensorycznej, w której badani sami tworzą opisy cech dźwięku

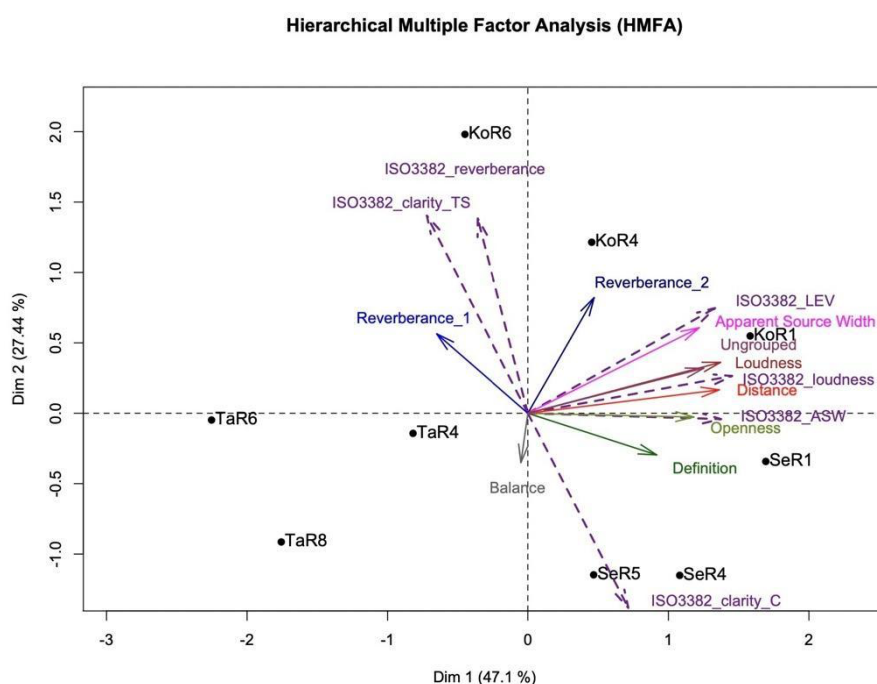
(ang. *Individual Vocabulary Profiling*, IVP) (Lokki i in., 2010, 2011). Celem autorów było określenie, jakie właściwości akustyczne mają kluczowe znaczenie dla słuchaczy oraz jak można je obiektywnie mierzyć podczas porównywania różnych sal i lokalizacji w ich obrębie. Metoda opracowana przez Tapio Lokki i jego zespół pozwala również przewyższyć niektóre z ograniczeń występujących w dotychczasowych badaniach. Do rejestracji RIR (ang. *Room Impulse Response*) Lokki wykorzystał układ 34 głośników, które odpowiednio rozstawione w przestrzeni sceny reprezentowały poszczególne sekcje instrumentów w orkiestrze symfonicznej tworząc tym samym układ wirtualnej orkiestry. Taki sposób zdaniem autorów lepiej odzwierciedlał sposób rozchodzenia się dźwięku w przestrzeni sali niż gdy do rejestracji odpowiedzi impulsowych wykorzystuje się wszechkierunkowe źródło dźwięku. Odpowiedzi impulsowe pomieszczenia są rejestrowane dla każdej kombinacji źródło dźwięku – odbiornik z wykorzystaniem czterokanałowych mikrofonów, z których sygnał kodowany jest do ambisonicznego formatu pierwszego rzędu (tzw. *B-format*). Taki sposób rejestracji umożliwia wierne odwzorowanie dźwięku przestrzennego oraz precyzyjną ocenę kierunku i poziomu docierania energii akustycznej w określonym czasie do pozycji, w której znajduje się mikrofon. Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu techniki *Spatial Decomposition Method* – metody analizy i syntezy pola akustycznego, która pozwala na szczegółowe rozdzielenie dźwięku na jego składowe czasowe i przestrzenne. Zarejestrowane odpowiedzi impulsowe spleciono z bezechowymi nagraniami instrumentów orkiestrowych. Tak przygotowane próbki testowe prezentowano w komorze bezechowej, w której zainstalowano przestrzenny system składający się z 16 głośników. Słuchacze samodzielnie definiowali atrybuty oceny, dzięki czemu uniknięto błędów związanych z narzucaniem z góry określonych pojęć, które mogą być różnie rozumiane przez poszczególnych słuchaczy. Po zakończeniu testów, 75 wybranych przez słuchaczy atrybutów zostało sklasyfikowanych i pogrupowanych w dziewięć ogólnych kategorii. W analizie statystycznej uzyskanych wyników wykorzystano analizę skupień, liniową analizę dyskryminacji oraz analizę wielowymiarową. Rysunek 10 pokazuje wynik analizy wielowymiarowej dla badania w 3 salach z wykorzystaniem nagrań 3 różnych kompozytorów (Lokki i in., 2011).



Rysunek 10: Wynik analizy wielowymiarowej. Skróty na Rysunku oznaczają: dla sal: Se=Sello, Ko=Konservatorio, Ta=Tapiola. Kompozytorzy mo=Mozart, be=Beethoven, ma=Mahler. KoR1 oznacza wyniki dla pozycji nagraniowej R1 w sali Konservatorium i utworów Mozarta (Lokki, 2011).

Oceniający, mimo stosowania różnych słów, wykazali wysoki poziom zgodności w swoich ocenach. Parametr G dobrze korelował z postrzeganą głośnością i odległością. Parametr EDT częściowo odpowiadał za percepcję pogłosu, ale nie oddawał dwóch różnych jego typów wskazanych przez słuchaczy (*Reverberance_1* i *Reverberance_2*). Parametry TS i C80 nie przewidywały skutecznie percepcji wyrazistości. Szerokość brzmienia była lepiej przewidywana przez parametr LEV (ang. *Listener Envelopment*), niż przez ASW (ang. *Apparent Source Width*). Wykazano, że taka metodyka sprawdza się dobrze w ocenie subiektywnych różnic między salami koncertowymi oraz między miejscami w jednej sali. W badaniu zmierzono efektywne cechy percepcyjne w sposób istotny statystycznie co pomogło zidentyfikować ważne atrybuty percepcyjne. Jednocześnie w trakcie kolejnych badań z wykorzystaniem opisanej metody wykazano, że wektory wyznaczające percepcję niektórych zjawisk akustycznych nie zawsze pokrywają się z wektorami parametrów, których formuły obecne są w normach pomiarowych. Przykładem niech będą dwie grupy określeń dotyczących pogłosowości, *Reverberance_1* i *Reverberance_2*, z których żaden nie pokrywa się z wektorem RT obliczonego zgodnie z wymaganiami normy ISO 3382 (Lokki i in. 2010). Jednocześnie słuchacze używali określenia „pogłos” zarówno dla wrażenia dotyczącego rozmiaru pomieszczenia (w badaniu opisanym jako *Reverberance_1*), a więc zgodny z ideą przedstawioną przez Sabine’a, ale także dla wrażenia związanego z otoczeniem przez dźwięk (w badaniu opisanym jako *Reverberance_2*). Wskaźniki C80 i Ts zostały przypisane do percepcyjnego wymiaru *Definition* (Wyrazistość). Analiza wyników pokazuje, że kierunki wektorów C80 i Ts są skierowane przeciwnie, a średnie wektory atrybutów *Definition* nie są z nimi zbieżne.

Oznacza to, że żaden z tych dwóch parametrów nie jest dobrym predyktorem subiektywnie ocenianej klarowności dźwięku w użytych próbkach muzycznych.



Rysunek 11: Wynik hierarchicznej analizy wielowymiarowej, który pokazuje uporządkowanie próbek w przestrzeni głównych składowych wraz z danymi subiektywnymi i obiektywnymi. Wektory subiektywne są średnimi poszczególnych wektorów atrybutów. (Lokki i in. 2010).

Zaproponowana przez autorów metoda była wykorzystana również przez innych naukowców, zarówno przy użyciu pełnego układu 32 głośników jak i mniejszego układu 24 głośników (Lachenmayr i in., 2023). Układ wirtualnej orkiestry oraz przestrzenną dekompozycję sygnałów zapożyczone z wyżej opisanej metody wykorzystano także do analizy parametrów obiektywnych sal koncertowych zmniejszając liczbę głośników reprezentujących układ orkiestry do zaledwie 8 sztuk (Möller, Pätynen, 2025).

3 Sale o regulowanej akustyce

Zakres tematyczny niniejszego rozdziału obejmuje przegląd systemów wspomagania akustyki oraz omówienie zasad ich działania. Część przedstawionych tutaj treści - w tym niektóre fragmenty opisu teoretycznego oraz ilustracje - została opracowana wcześniej przez autora w ramach pracy magisterskiej. Ze względu na fakt, iż niniejsza dysertacja stanowi kontynuację wcześniej podjętej problematyki badawczej, zdecydowano się na ich ponowne wykorzystanie.

Zachowanie spójności merytorycznej i logicznej wywodu wymaga odwołania się do tych samych podstawowych pojęć, klasyfikacji i rozwiązań technicznych. Próba stworzenia całkowicie nowego opisu tych samych zagadnień mogłaby prowadzić do niepotrzebnych niejasności lub sztucznego zróżnicowania treści. Ponadto, z praktycznego punktu widzenia, formułowanie na nowo identycznych informacji w innej postaci byłoby nie tylko nienaturalne, ale i nieuzasadnione merytorycznie.

Treści te pełnią funkcję tła historycznego i teoretycznego dla dalszych analiz i wyników badań prezentowanych w kolejnych częściach pracy, które stanowią oryginalny wkład autora w rozwój omawianej tematyki.

Współczesne obiekty kulturalne są coraz częściej projektowane jako przestrzenie wielofunkcyjne, które można wykorzystać dla różnorodnych wydarzeń – od koncertów muzyki klasycznej, przez pop i rock, przedstawienia teatralne, musicale i opery, po konferencje, bankiety czy wystawy. Niektóre funkcje wymagają przede wszystkim wysokiej zrozumiałości mowy, a inne parametrów pogłosowych o wartościach optymalnych dla danego typu wydarzenia. Wraz z upływem czasu, zmieniają się preferencje słuchaczy, zmienia się również sposób prezentowania niektórych form. Na przykład we współczesnej operze bardzo często wykonuje się utwory w oryginalnych wersjach językowych, a libretto w języku lokalnym wyświetlane jest na ekranach. Zapewnienie wysokiej zrozumiałości mowy nie jest zatem warunkiem koniecznym do uzyskania pozytywnego odbioru przedstawienia. Z punktu widzenia słuchacza korzystniejszy może być dłuższy czas pogłosu, który stwarza lepsze warunki do odbioru warstwy muzycznej opery (Beranek, 2004). W związku z rozwojem współczesnych gatunków muzycznych, takich jak pop czy rock, potrzeba elastycznego kształtowania akustyki jeszcze bardziej wzrosła – szczególnie ze względu na intensywną obecność niskich częstotliwości generowanych przez instrumenty elektroniczne. W takich przypadkach kluczowe znaczenie ma czytelność dźwięku w paśmie poniżej 125 Hz, a pożądaną

jest czas pogłosu o wartości stałej, niezależnej od częstotliwości (Adelman-Larsen i in., 2010; Rumsey, 2008).

Nowoczesne sale wielofunkcyjne powinny więc umożliwiać możliwie najwierniejsze odwzorowanie warunków akustycznych właściwych dla danego rodzaju występów (Barron, 1993). Chęć spełnienia tego wymagania doprowadziła do budowy obiektów o zmiennej akustyce. Rozwiązania stosowane w celu zmiany warunków akustycznych możemy podzielić na dwie główne kategorie: rozwiązania pasywne i rozwiązania aktywne.

3.1.1 Rozwiązania pasywne

Zmiany parametrów akustycznych w salach wielofunkcyjnych można osiągnąć poprzez zmianę wartości pochłaniania dźwięku w pomieszczeniu lub poprzez modyfikację ich objętości lub kształtu.

3.1.1.1 Banery i kotary

Instalując materiały pochłaniające, takie jak banery czy kurtyny akustyczne, można zmieniać parametry akustyczne pomieszczenia (Arni, 1950; Ward i in., 1994; Kuttruff, 2009; Adelman-Larsen i in., 2010). Właściwości akustyczne materiałów, takich jak bawełna, wełna serżowa i plusz, zależą od ich gęstości i struktury. Bawełna o gęstości $0,3 \text{ kg/m}^2$ zapewnia umiarkowaną absorpcję dźwięku w zakresie średnich i wysokich częstotliwości. Wełna serżowa, dzięki gęstszej strukturze wykazuje wyższe współczynniki absorpcji, zwłaszcza w niższych częstotliwościach. Plusz o gęstości około $0,4 \text{ kg/m}^2$ skutecznie absorbuje dźwięk w zakresie średnich częstotliwości, co również czyni go odpowiednim do zastosowań wymagających tłumienia dźwięku (Na i in., 2007). Zastosowanie takich materiałów powoduje zmianę wartości RT jedynie w ograniczonym zakresie, zwykle nieprzekraczającym 20% wartości wyjściowej. Warto podkreślić, że w przypadku rolet i kurtyn zmiany wartości parametrów akustycznych występują najczęściej w paśmie oktawowym o częstotliwości środkowej 250 Hz oraz w pasmach wyższych (Błasiński, 2025). Skracanie czasu pogłosu przez zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia prowadzi również do spadku poziomu dźwięku, co nie zawsze jest pożądane (Barron, 1993). Analogicznie, ograniczenie chłonności akustycznej w niewielkich pomieszczeniach w celu wydłużenia czasu pogłosu, odpowiedniego dla muzyki kameralnej, może prowadzić do nadmiernego poziomu głośności (Aretz, Orłowski, 2009; Zha i in., 2002). Zmienność chłonności można uzyskać także przez zastosowanie paneli obrotowych, których różne strony mają odmienne właściwości akustyczne, ich skuteczność zależy w dużej mierze od ich rozmiarów (Arni, 1950; Barron, 1993; Beranek, 1996).

3.1.1.2 Komory pogłosowe oraz regulowana objętość pomieszczenia

Czas pogłosu można regulować również poprzez zmianę objętości pomieszczenia, na przykład dzięki wykorzystaniu przestrzeni nad sufitem (Barron, 1993; Valentine, 1997) lub przez zastosowanie komór pogłosowych z otworami o regulowanej powierzchni sprzężenia (Beranek, 1996; Johnson i in., 1995; Ermann, Johnson, 2005). Odpowiednio zaprojektowane komory umożliwiają optymalizację dodatkowej objętości pod kątem akustycznym. Gdy przestrzeń ta jest słabo sprzężona z głównym wnętrzem, zanikanie dźwięku w sali głównej staje się zgodne z charakterystyką komory (Eyring, 1931; Kuttruff, 2009; Cremer i in., 1982). Aby osiągnąć większą elastyczność, czasami stosuje się kilka współsprzężonych komór, co umożliwia zwiększenie stopnia sprzężenia i modulowanie wartości RT w przestrzeni głównej (Jaffe, 2005). Regulując powierzchnię sprzężenia i wartości pochłaniania w komorach, można uzyskać wybrzmiewanie o podwójnym nachyleniu, które pozwala modyfikować czas wczesnego wybrzmiewania (Bradley & Wang, 2005; Bradley & Wang, 2010). Jedną z głównych zalet uzyskania zaniku o podwójnym nachyleniu jest możliwość zachowania stosunkowo wysokiej przejrzystości dźwięku i zrozumiałości mowy przy jednoczesnym uzyskaniu długiego pogłosu (Johnson i in., 1995). Objętość pomieszczenia można także regulować z wykorzystaniem paneli zawieszonych pod sufitem. Zmiana wysokości podwieszenia paneli wpływa na objętość wnętrza, a tym samym na czas pogłosu. Panele mogą mieć formę dużych, pojedynczych płaszczyzn lub układów mniejszych elementów (Izenour, 1977).

Innym sposobem na zmianę objętości pomieszczenia jest instalacja ruchomych ścian lub sufitów. Ruchomy sufit zastosowano na przykład w Jesse Jones Hall w Houston w USA (Klepper i in. 1968). Konstrukcja sufitu została zaprojektowana tak, aby jego elementy mogły być mechanicznie opuszczane lub podnoszone, co wpływa na całkowitą objętość pomieszczenia, a tym samym na czas pogłosu, więc umożliwia dostosowanie akustyki sali koncertowej do różnych typów wydarzeń. W przypadku Jesse Jones Hall obniżenie sufitu do poziomu drugiego balkonu pozwala skrócić czas pogłosu o około 1 sekundę – z wartości około 1,8 s do 0,8 s – co jest znaczącą zmianą z punktu widzenia percepcji akustycznej.

Kolejnym rozwiązaniem, zastosowanym na przykład w sali koncertowej Logomo w Turku (Finlandia) jest przesuwana widownia. Fotele widowni zainstalowane są w amfiteatralnym układzie na ruchomej konstrukcji, którą można przesuwać wzdłuż pomieszczenia, zmieniając rozmiar całej widowni w dużym zakresie. W najmniejszym możliwym układzie do dyspozycji jest 750 miejsc siedzących, a układ największy to widownia z miejscami siedzącymi dla 2300

widzów i dodatkowa przestrzeń pomiędzy sceną a amfiteatralnie ustawioną widownią dla 3200 widzów zajmujących miejsca stojące (Riionheimo i in., 2012, Jurkiewicz i in., 2024).

Zwiększenie objętości pomieszczenia wpływa na wydłużenie czasu pogłosu w całym paśmie częstotliwości bez istotnego wpływu na głośność. Choć nie prowadzi to zazwyczaj do pojawienia się zniekształceń w postaci rezonansów modowych, może wpłynąć na spadek klarowności dźwięku. Jednocześnie jednak zwiększony pogłos sprzyja wrażeniu przestrzenności i otulenia akustycznego, co jest pozytywnie odbierane przez wielu słuchaczy.

Właściwości zarówno wczesnej, jak i późnej energii akustycznej można także modyfikować poprzez odpowiednie kształtowanie promieniowania dźwięku ze sceny, na przykład poprzez zastosowanie muszli scenicznych w czasie koncertów symfonicznych. Muszla sceniczna to specjalna konstrukcja umieszczana na scenie – zwykle za i nad orkiestrą – która wpływa na sposób propagacji dźwięku w przestrzeni sali. W teatrach operowych scena sąsiaduje z dużymi przestrzeniami technicznymi (takimi jak kieszenie boczne czy komin sceny), które mogą istotnie oddziaływać na jakość dźwięku docierającego do widowni. Muszla sceniczna niweluje wpływ przestrzeni technicznych kierując dźwięk orkiestry w stronę widowni, co zwiększa udział tzw. wczesnych odbić (w ciągu pierwszych 80 ms po dźwięku bezpośrednim) i odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu klarowności brzmienia orkiestry. Wykorzystanie muszli scenicznej, ograniczającej przestrzeń przeznaczoną dla orkiestry, wywiera także korzystny wpływ na wzajemne słyszenie się muzyków (Barron, 1978; Harkness, 1984).

Połączenie zmiennej absorpcji i objętości może zapewnić szeroki zakres warunków akustycznych. Przykładowo, sala koncertowa w Lucernie umożliwia regulację objętości i pochłaniania, co pozwala zmieniać RT w zakresie od 1,5 do 2,15 s (Beranek, 1996). Espace de Projection w IRCAM również wykorzystuje zmienną objętość i absorpcję, uzyskując zakres RT od 0,5 do 2 sekund (Barron, 1993). Ze względu na dużą złożoność systemów mechanicznych koniecznych do realizacji tych zmian, rozwiązania te nie są powszechnie spotykane.

Podsumowując, zmiana warunków akustycznych z wykorzystaniem rozwiązań pasywnych może oferować znaczące korzyści, ale wymaga dużych i czasochłonnych interwencji technicznych. Wiele istniejących rozwiązań pasywnych nie zapewnia odpowiednio szerokiego zakresu zmienności czasu pogłosu, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości, co jest niezbędne do dostosowania sal wielofunkcyjnych zarówno do koncertów muzyki klasycznej, jak i współczesnej muzyki rozrywkowej (Adelman-Larsen i in., 2010; Aretz, Orłowski, 2009; Arni, 1950).

3.1.2 Rozwiązania aktywne

Alternatywą dla opisanych w poprzednim podrozdziale pasywnych metod modyfikacji parametrów akustycznych pomieszczeń jest zastosowanie aktywnych systemów wspomagania akustyki. Umożliwiają one przystosowanie sal do różnych rodzajów wydarzeń - spektakli, koncertów czy widowisk - poprzez dostosowanie parametrów akustycznych do specyfiki danego wydarzenia. W porównaniu z rozwiązaniami pasywnymi, systemy aktywne są znacznie tańsze i oferują szerszy zakres regulacji. Ich istotną zaletą jest możliwość zapisania i szybkiego przywoływania ustawień różnych trybów działania, co jest znacznie bardziej efektywne niż mechaniczne przestawianie elementów konstrukcyjnych, takich jak panele ściennie, sufity czy komory pogłosowe.

W obliczu rosnących oczekiwań publiczności względem jakości dźwięku podczas wydarzeń muzycznych, kluczowe jest, że zastosowanie systemów aktywnych eliminuje konieczność kompromisów akustycznych niezależnie od wielkości widowni czy kubatury sali. Co więcej, możliwość natychmiastowej zmiany konfiguracji pozwala na kreatywne wykorzystanie tych systemów do tworzenia wirtualnych przestrzeni akustycznych - rozwiązanie coraz częściej wykorzystywane w produkcjach multimedialnych.

Systemy wspomagania akustyki są stosowane w wielu salach koncertowych na całym świecie, w tym w renomowanych obiektach, takich jak Opera w Sydney, Staatsoper w Berlinie, Royal Albert Hall w Londynie czy mediolańska La Scala. Znajdują zastosowanie nie tylko w salach koncertowych, teatralnych czy operowych, lecz także w obiektach sakralnych. Przykładowo, protestanckie kościoły w USA, często liczące ponad 10 000 miejsc, wymagają bardzo dobrej zrozumiałości mowy i odpowiednich warunków akustycznych dla zespołów muzycznych towarzyszących nabożeństwom.

Systemy te służą nie tylko do wydłużania czasu pogłosu czy wspomagania wczesnych odbić, ale również do korekcji niektórych defektów akustycznych - m.in. poprawy równomierności propagacji dźwięku w trudno dostępnych miejscach, takich jak boczne rejony widowni, przestrzenie pod balkonami czy orkiestrony. Czasem są wykorzystywane także do poprawy wzajemnej słyszalności artystów - na przykład pomiędzy solistami a orkiestrą lub chórem znajdującym się w głębi sceny, szczególnie przy rozbudowanej scenografii. W takich przypadkach aktywne systemy wspomagania akustyki mogą być jedynym możliwym rozwiązaniem.

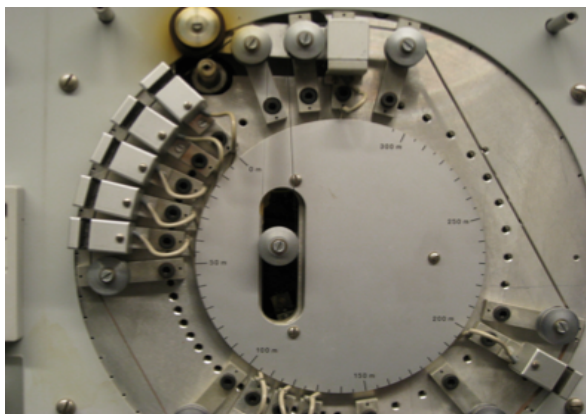
Pierwsze systemy tego rodzaju nazywano „ambiofonicznymi”, zgodnie z ówczesną terminologią, w której pojęcie ambiofonii odnosiło się do wielokanałowych systemów

dźwiękowych, zaprojektowanych w celu otoczenia słuchacza dźwiękiem. „*Ambiophony*” to również nazwa pierwszego opatentowanego systemu wspomagania akustyki, stworzonego przez firmę Philips. Jak opisano: „Ambiofonia polega na zmianie warunków akustycznych w pomieszczeniu przeznaczonym do słuchania audycji (przeważnie muzycznej), w miejscu jej wykonywania. Zmiana ta może polegać na zwiększeniu pogłosu oraz na innych efektach, stwarzających u słuchacza wrażenie słuchowe, charakterystyczne dla pomieszczeń innego rodzaju (z reguły większych)” (Miszczak, 1969).

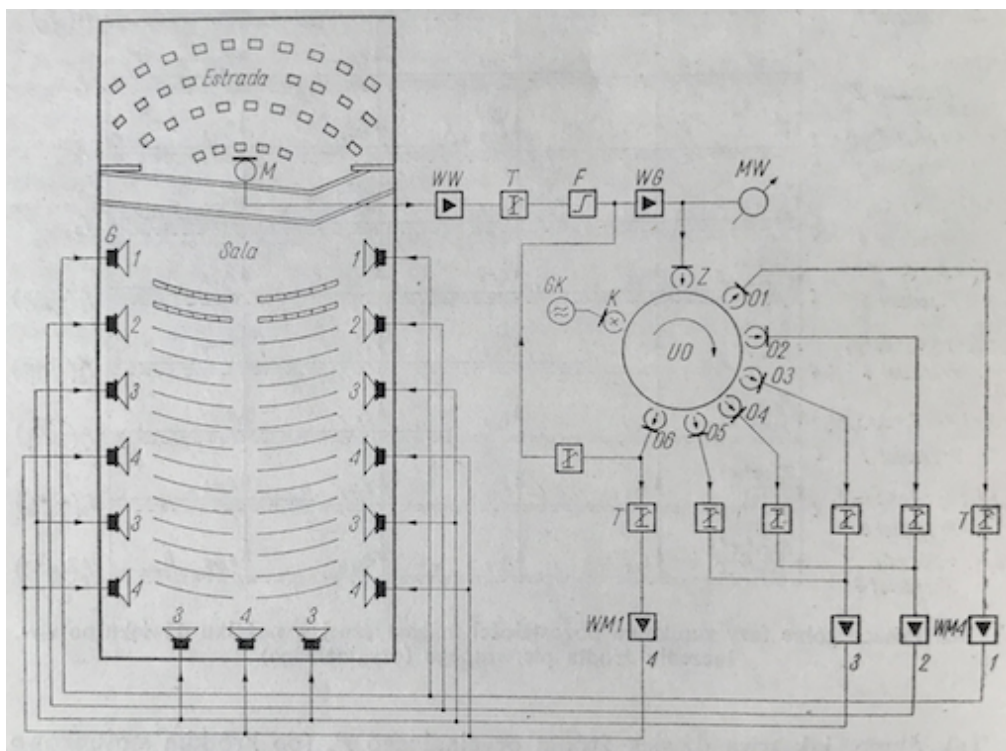
3.1.2.1 System Ambiophony

Pierwszy system wspomagania akustyki został opatentowany w 1959 roku przez R. Vermeulena, pracującego dla firmy Philips (Vermeulen, Kleis, 1959). Opracowany przez niego system, nazwany *Ambiophony*, składał się z kierunkowego mikrofonu umieszczonego w pobliżu źródła dźwięku na scenie, centralnej jednostki sterującej w postaci wielogłowicowego magnetofonu, wzmacniaczy oraz głośników rozmieszczonych na bocznych ścianach pomieszczenia. Rysunek 12 przedstawia centralną jednostkę tego systemu. Sygnał akustyczny rejestrowany przez mikrofon był zapisywany na taśmie magnetofonowej, a następnie odtwarzany za pomocą systemu głowic, kierowany do wzmacniaczy, a dalej do głośników rozmieszczonych w pomieszczeniu. Pozycje głowic odczytujących oraz prędkość przesuwu taśmy zostały dobrane tak, aby odpowiadały rozmieszczeniu głośników na ścianach. Dzięki temu dźwięk emitowany z głośników był odpowiednio opóźniony względem dźwięku bezpośredniego docierającego ze sceny do konkretnego miejsca na widowni. Zasadniczy układ takiego systemu ilustruje Rysunek 13.

Dzięki precyzyjnemu doborowi opóźnień czasowych oraz poziomów głośności sygnałów emitowanych przez poszczególne głośniki, system umożliwiał symulację wczesnych odbić, ważnego elementu wpływającego na jakość odbioru dźwięku (Miszczak, 1969; Bakker, Gillan, 2014).



Rysunek 12: Układ głowic w urządzeniu Ambiophony firmy Philips (Bakker, Gillan, 2014).



Rysunek 13: Zasadniczy układ urządzenia ambiofonicznego (Miszczak, 1969).

Oznaczenia wykorzystane na Rysunku to: *M* - mikrofon, *WW* - wzmacniacz wstępny, *T* - tłumik, *F* - filtr, *WG* - wzmacniacz główny, *WM* - miernikysterowania, *UO* - urządzenie opóźniające (magnetofon z obracającym się talerzem), *Z* - głowica zapisująca, *01-06* głowice odczytujące, *K* - głowica kasująca, *GK* - generator w.c.z. (kasujący), *WM1-WM4* - wzmacniacze mocy, *G* - głośniki.

Skuteczność działania systemu była ograniczona ze względu na ryzyko występowania sprzężenia zwrotnego, co wymuszało umieszczenie mikrofonu możliwie blisko źródła dźwięku oraz utrzymywanie poziomu odtwarzanego sygnału na stosunkowo niskim poziomie. Dodatkowo, nierównomierności charakterystyk częstotliwościowych poszczególnych elementów toru elektroakustycznego prowadziły do koloryzowania dźwięku przetwarzanego przez system.

Pomimo wspomnianych niedoskonałości, urządzenie okazało się na tyle skuteczne, a uzyskiwane efekty brzmieniowe wystarczająco interesujące, że system *Ambiophony* został zainstalowany w kilku salach koncertowych w Europie, w tym między innymi w mediolańskiej La Scali. Podobną zasadę działania zastosowano w opracowanym w 1975 roku systemie *ERES* (ang. *Electronic Reflected Energy System*), w którym do generowania sztucznych wczesnych odbić wykorzystano cyfrowe linie opóźniające. System *ERES* był instalowany głównie w salach koncertowych Ameryki Północnej (Ballou, 2015). Urządzenia ambiofoniczne znalazły również zastosowanie w studiach telewizyjnych, na przykład w studiach BBC w Londynie (Miszczak,

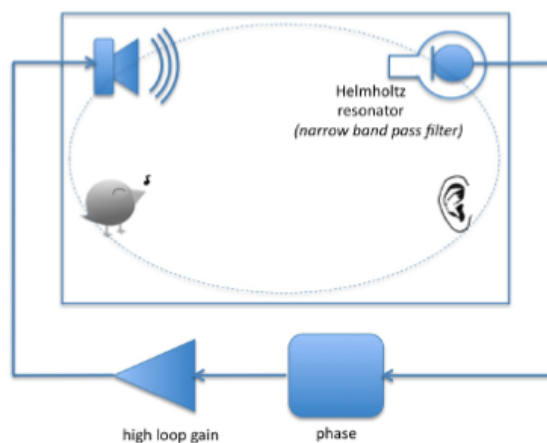
1969). Opisywane powyżej rozwiązania są czasem klasyfikowane jako systemy typu *S-SF* (ang. *Synthesis of Sound Field*), czyli systemy syntezy pola akustycznego (Bakker, Gillan 2014).

3.1.2.2 Wspomaganie rezonansów

Odmianą od opisaną powyżej koncepcję przyjęli twórcy systemu aktywnego wspomaganie rezonansów. Zamiast operowania sygnałem szerokopasmowym, co wymagało ograniczania poziomu wzmacnienia w celu uniknięcia sprzężeń zwrotnych, zdecydowano się na zastosowanie sygnałów wąskopasmowych. Takie podejście pozwalało na uzyskanie wyższego stopnia wzmacnienia oraz precyzyjną kontrolę nad wybranymi, wąskimi pasmami częstotliwości.

W 1964 roku P. H. Parkin i K. Morgan, pracujący dla brytyjskiej instytucji *Scientific and Industrial Research*, zainstalowali w *Royal Albert Hall* w Londynie eksperymentalny system wspomaganie rezonansów. System obejmował liczne niezależne tory mikrofon–wzmacniacz–głośnik, przy czym każdy mikrofon umieszczono w rezonatorze Helmholtza dostrojonym do konkretnej częstotliwości. Rezonator był zlokalizowany w miejscu, gdzie fala akustyczna osiągała maksimum ciśnienia akustycznego dla tej właśnie częstotliwości.

Działanie systemu opierało się na kontrolowanym uzyskaniu dodatniego sprzężenia akustycznego w wąskim paśmie – zjawiska, które w innych systemach było uznawane za niepożądane. Dzięki odpowiedniej regulacji poziomu wzmacnienia i fazy sygnału możliwe było osiągnięcie stabilnej pracy systemu przy zachowaniu neutralnego brzmienia. Ideę działania tego systemu ilustruje Rysunek 14 (Bakker, Gillan 2014).



Rysunek 14: Wspomaganie rezonansów - koncepcja działania systemu (Bakker, Gillan 2014).

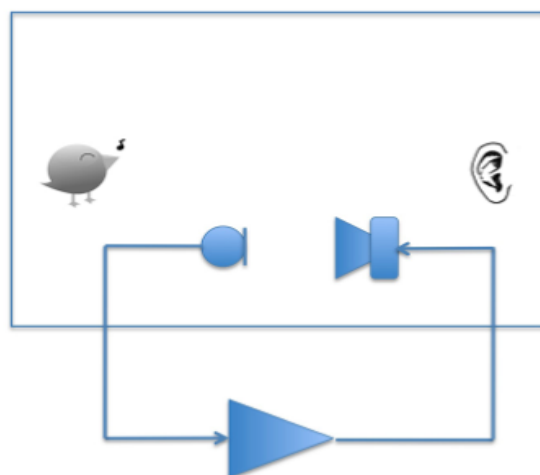
Celem autorów systemu było poprawienie brzmienia w zakresie częstotliwości od 70 do 340 Hz, ponieważ użytkownicy *Royal Albert Hall* zgłaszali niedobór subiektywnie odczuwanego „ciepła brzmienia” - cechy związanej z obiektywnym parametrem *Bass Ratio*. Ze względu na to, że każda pętla systemu działała w bardzo wąskim paśmie, skuteczna

ingerencja w czas pogłosu w zadanym zakresie wymagała instalacji aż 98 pętli. W późniejszym etapie system został rozbudowany o kolejne pętle, których działanie objęło pasmo do 700 Hz. Jednak, aby rozszerzyć kontrolę nad akustyką pomieszczenia do zakresu aż do 8 kHz, konieczna byłaby instalacja ponad tysiąca niezależnych pętli. Z tego powodu system nie został nigdy wprowadzony do sprzedaży jako rozwiązanie komercyjne (Bakker, Gillan 2014).

3.1.2.3 Systemy regeneratywne

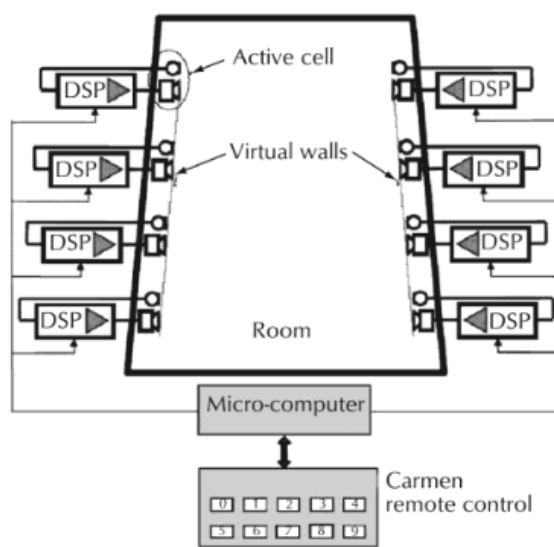
W 1969 roku, dziesięć lat po zaprezentowaniu systemu *Ambiophony*, firma Philips przedstawiła kolejny system wspomagania akustyki, którego głównym autorem był N. V. Franssen. System ten, znany jako MCR, wykorzystywał wiele niezależnych pętli mikrofon–wzmacniacz–głośnik, z których każda przetwarzała pełnopasmowy sygnał o niskim poziomie wzmocnienia. Aby uzyskać pożądany efekt akustyczny na odpowiednią skalę, konieczne było zainstalowanie około 100 takich pętli w pomieszczeniu. Choć liczba ta jest znaczna, to i tak znacząco mniejsza niż w przypadku systemu wspomagania rezonansów.

Zastosowanie wielu pętli pozwalało zminimalizować ryzyko wystąpienia sprzężeń akustycznych w poszczególnych torach oraz uniknąć zakolorowania dźwięku, które mogłoby pojawić się w sytuacji, gdyby dana pętla działała na granicy stabilności. W przeciwieństwie do systemu *Ambiophony*, w którym mikrofony kierunkowe były umieszczane blisko źródła dźwięku, system MCR wykorzystywał mikrofony dookólne, zlokalizowane w odległości większej niż odległość graniczna. Dzięki temu mikrofony zbierały więcej energii pochodzącej z odbić od powierzchni pomieszczenia niż energii sygnału bezpośredniego. Koncepcję działania pojedynczej pętli systemu regeneratywnego ilustruje Rysunek 15. System MCR został zainstalowany w wielu salach koncertowych na całym świecie i wciąż pozostaje dostępny jako produkt komercyjny (Poletti, 2010).



Rysunek 15: System regeneratywny - koncepcja działania pojedynczej pętli systemu (Bakker, Gillan 2014).

Na podobnej zasadzie co system *MCR* działa również system *Carmen*. Główna różnica pomiędzy tymi dwoma rozwiązaniami polega na sposobie rozmieszczenia elementów składowych pętli. W systemie *Carmen* mikrofon i głośnik należące do jednej pętli są umieszczone blisko siebie, tworząc tzw. komórkę systemu. Równomierne rozmieszczenie takich komórek na powierzchniach ścian i sufitów powoduje powstanie wirtualnych powierzchni o regulowanej chłonności akustycznej. Ideę rozmieszczenia komórek systemu *Carmen* w przestrzeni pomieszczenia ilustruje Rysunek 16 (Ballou, 2015).



Rysunek 16: Wirtualna ściana systemu CARMEN (Ballou, 2015).

Systemy *Carmen* czy *MCR* regenerują naturalny pogłos istniejący w pomieszczeniu, w którym zostały zainstalowane. Dzięki temu ich brzmienie może być odbierane jako naturalne, pod warunkiem, że sama akustyka sali nie wykazuje istotnych wad, a jej właściwości pogłosowe są pozytywnie oceniane przez słuchaczy.

W przypadku pomieszczeń o niekorzystnej akustyce, działanie systemu regeneratywnego może uwypuklić istniejące niedoskonałości akustyczne. Jednym z efektów ubocznych stosowania tego typu systemów jest również wzrost poziomu głośności wraz z wydłużaniem czasu pogłosu, co z punktu widzenia jakości dźwięku nie zawsze jest pożądane. Możliwość wydłużenia czasu pogłosu w takich systemach jest ograniczona, zazwyczaj nie przekracza dwukrotnej wartości naturalnego czasu pogłosu danego pomieszczenia.

Jedną z istotnych zalet systemów regeneratywnych jest ich równomierne działanie w całej przestrzeni pomieszczenia. Dzięki temu muzycy występujący na scenie doświadczają takiego samego wrażenia wydłużenia pogłosu jak słuchacze na widowni, co ma szczególne znaczenie w przypadku niektórych rodzajów muzyki. Co więcej, sposób działania systemu nie zależy od lokalizacji źródła dźwięku. Jest to istotne zwłaszcza w kontekście współczesnych inscenizacji

teatralnych i operowych, w których niektóre elementy przedstawienia realizowane są poza sceną, na przykład na widowni lub w bezpośredniej interakcji z publicznością (Poletti, 2010).

3.1.2.4 Systemy *in-line*

3.1.2.4.1 ACS (ang. *Acoustic Control System*) pierwszy system typu *in-line*

Podczas gdy systemy regeneratywne opierają swoje działanie na wykorzystaniu naturalnego pogłosu pomieszczenia, systemy typu *in-line* charakteryzują się odmiennym podejściem - generują pogłos niezależny od naturalnych właściwości akustycznych sali, w której zostały zainstalowane.

W 1987 roku A. J. van Berkhout i D. de Vries z Uniwersytetu Technicznego w Delft zaprezentowali system ACS (ang. *Acoustic Control System*), który stanowił przykład rozwiązania tego typu. System ten wykorzystuje od 18 do 24 mikrofonów kierunkowych umieszczonych nad sceną, zbierających dźwięk z całej jej przestrzeni. Zarejestrowany w ten sposób sygnał był następnie poddawany procesowi ekstrapolacji, a uzyskany przebieg dźwięku odtwarzany jest w sali za pomocą matrycy głośników. ACS był jednym z pierwszych systemów, który wykorzystywał w pełni cyfrowe przetwarzanie dźwięku w czasie rzeczywistym. Sygnały z wielu mikrofonów były przetwarzane przez procesory DSP (ang. *Digital Signal Processing*), co pozwalało na precyzyjną kontrolę nad czasem pogłosu, wczesnymi odbiciami i innymi parametrami akustycznymi. W przeciwieństwie do systemów regeneratywnych (działających na zasadzie dodatniego sprzężenia zwrotnego), ACS był systemem nieregeneratywnym. Oznacza to, że sygnał mikrofonowy nie był wzmacniany i odtwarzany bezpośrednio, lecz modyfikowany (np. pod względem opóźnień, kierunku czy barwy), a następnie emitowany przez zestaw głośników. ACS umożliwiał symulowanie różnych warunków akustycznych w tym samym pomieszczeniu - od krótkiego czasu pogłosu właściwego dla mowy, po warunki odpowiednie dla muzyki chóralnej czy symfonicznej. System oferował zatem elastyczne i szybkie dostosowanie akustyki do potrzeb konkretnego wydarzenia. Celem projektantów ACS było stworzenie systemu, który nie tylko kontroluje pogłos, ale czyni to w sposób „przezroczysty” - nie narzucając charakteru brzmieniowego systemu, lecz podtrzymując lub kształtując naturalnie brzmiącą akustykę (Poletti, 2010).

3.1.2.4.2 Pozostałe systemy typu *in-line*

Krótko po zaprezentowaniu systemu ACS pojawiły się kolejne rozwiązania typu *in-line*. W 1988 roku firma Lexicon wprowadziła system *LARES* (ang. *Lexicon Acoustic Reinforcement and Enhancement System*), a w 1991 roku van Münster i Prinnsen zaprezentowali system *SLAP* (ang. *System for Improved Acoustic Performance*). W 2008 roku swoją premierę miał kolejny system

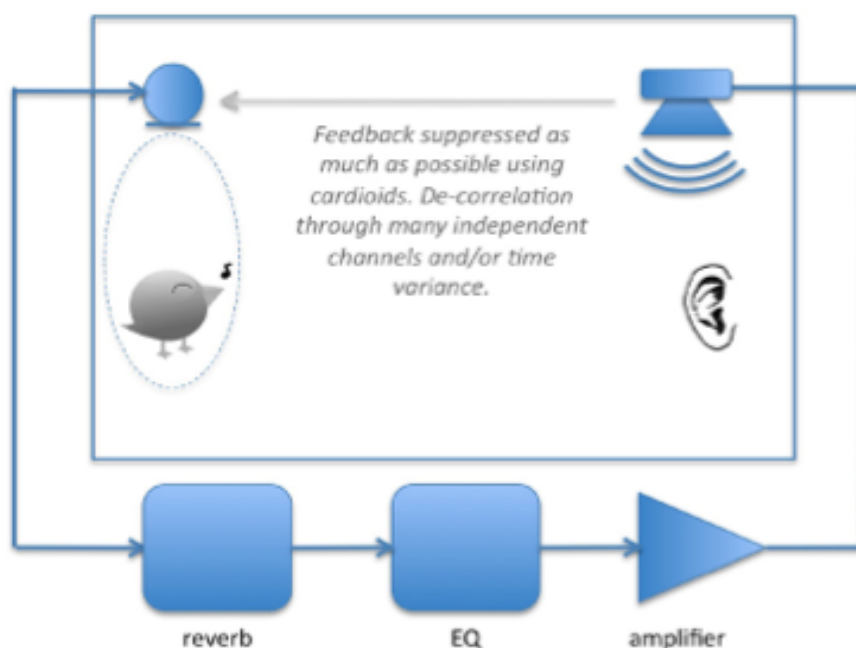
tego typu - *VIVACE*, opracowany przez firmę *Stagetec*, znaną z produkcji wielkoformatowych konsolet studyjnych i emisyjnych.

Wszystkie wymienione systemy oparte są na tej samej podstawowej architekturze: mikrofon – urządzenie pogłosowe – wzmacniacz – głośniki. Mikrofony kierunkowe są umieszczone w pobliżu źródeł dźwięku, zazwyczaj w rejonie sceny. Sygnał z mikrofonów jest przetwarzany - dodawany jest do niego sztuczny pogłos - a następnie przekazywany do licznych głośników rozmieszczonych w przestrzeni widowni.

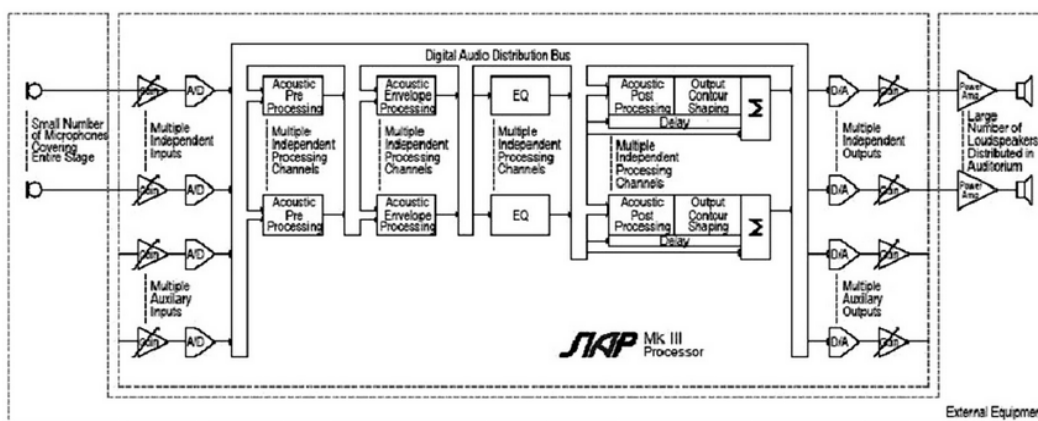
Taka konfiguracja umożliwia uzyskanie wysokiego wzmocnienia w pojedynczej pętli oraz precyzyjne kształtowanie warunków akustycznych sali. Dzięki wykorzystaniu wielu algorytmów pogłosowych o zróżnicowanej długości, możliwa jest także skuteczna kontrola nad generowaniem sztucznych wczesnych odbić - podobnie jak miało to miejsce w systemie *Ambiophony*. Charakterystyczną cechą tych systemów jest stosunkowo niewielka liczba mikrofonów w porównaniu do liczby głośników.

Różnice pomiędzy poszczególnymi systemami dotyczą przede wszystkim zastosowanych urządzeń i algorytmów pogłosowych. System *LARES* wykorzystuje technologię i algorytmy znane z produktów firmy *Lexicon*. Pozostali producenci, w tym twórcy *SLAP* i *VIVACE*, nie ujawniają szczegółów dotyczących działania swoich systemów.

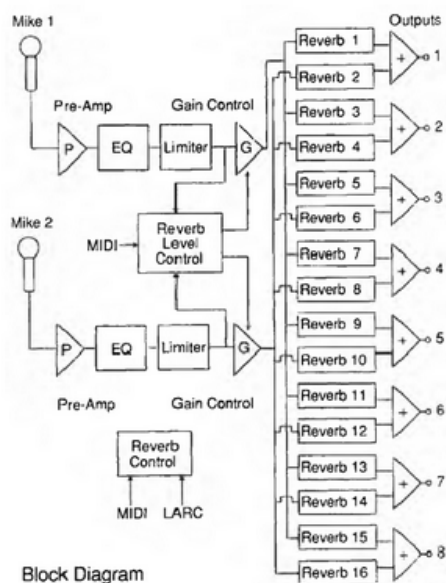
Ideę działania systemu typu *in-line* przedstawia Rysunek 17 (Bakker, 2012); Rysunek 18 ilustruje schemat blokowy systemu *SLAP*, natomiast Rysunek 19 przedstawia schemat systemu *LARES* (Ballou, 2015).



Rysunek 17: Idea działania systemu typu *in-line* (Bakker, 2012).



Rysunek 18: Schemat blokowy systemu SIAP (Ballou, 2015).



Rysunek 19: Rysunek 9: Schemat blokowy systemu LARES (Ballou, 2015).

Jedną z głównych wad systemów typu *in-line* jest ich jednokierunkowe działanie - mikrofony są zlokalizowane w rejonie sceny, natomiast głośniki rozmieszczone są w przestrzeni widowni. W przeciwieństwie do systemów regeneratywnych, wrażenie przestrzenności nie jest równomierne w całym pomieszczeniu. System traci również swoją skuteczność, gdy źródła dźwięku znajdują się poza sceną, co może mieć miejsce na przykład podczas przedstawień angażujących publiczność lub wspólnych modlitw, charakterystycznych dla protestanckich kościołów w USA (Poletti, 2010).

Wykorzystanie systemów typu *in-line* w celu poprawy wzajemnej słyszalności muzyków na scenie jest również ograniczone. Zastosowanie takiego systemu wymagałoby zmniejszenia wzmocnienia poszczególnych pętli sygnałowych i zwiększenia ich liczby, co wiązałoby się z większym ryzykiem wystąpienia sprzężeń akustycznych.

Z drugiej strony, systemy *in-line* umożliwiają bardzo wierne odtworzenie wczesnych odbić - dzięki temu, że mikrofony – podobnie jak w systemie *Ambiophony* – są umieszczone blisko

źródeł dźwięku. Dodatkowo pozwalają na zastosowanie różnych algorytmów pogłosowych i swobodne wydłużanie czasu pogłosu, ponieważ ryzyko wystąpienia sprzężeń akustycznych jest w tym przypadku minimalne. Warto też podkreślić, że zastosowanie systemów *in-line* nie prowadzi do zwiększenia ogólnego poziomu głośności w pomieszczeniu, co odróżnia je od systemów regeneratywnych (Poletti, 2010).

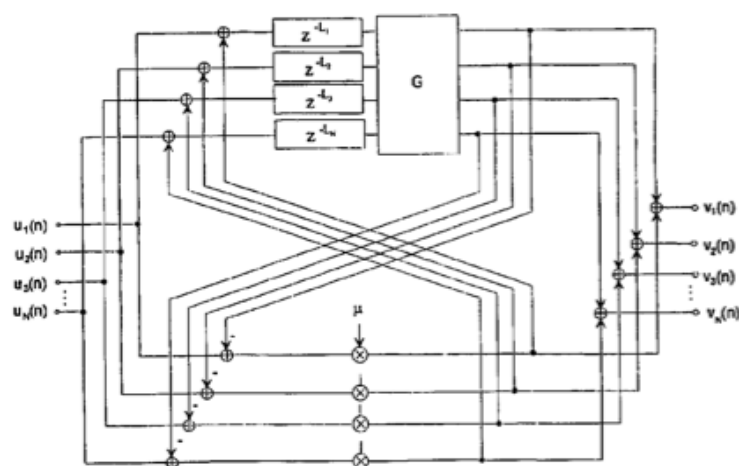
3.1.2.5 Systemy hybrydowe

W 1987 roku firma Yamaha zaprezentowała system *AFC* (ang. *Acoustic Field Control*), który stanowił połączenie koncepcji systemów regeneratywnego i typu *in-line*. Celem jego twórców było opracowanie rozwiązania umożliwiającego naturalne zwiększenie czasu pogłosu w pomieszczeniu bez jednoczesnego wzrostu poziomu głośności.

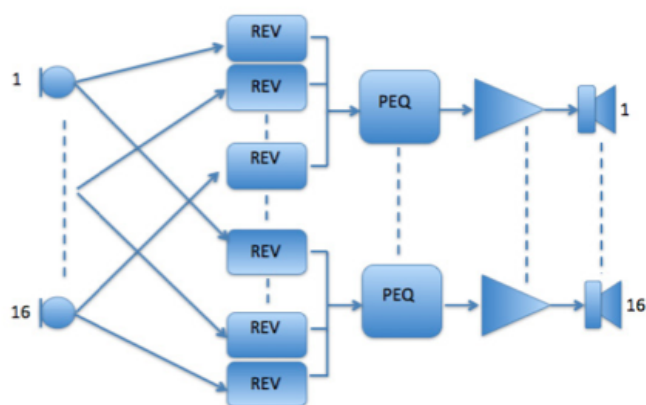
Podobna idea przyświecała M. Polettiemu, autorowi systemu *VR4* (ang. *Variable Room Acoustic*), który został zaprezentowany w 1991 roku. Zarówno *AFC*, jak i *VR4* wykorzystują urządzenia pogłosowe umieszczone w pętach regeneratywnych, jednak każdy z tych systemów realizuje to w nieco inny sposób. System *AFC* stosuje technikę uśredniania przestrzennego sygnałów, natomiast *VR4* opiera się na użyciu wielu różnych urządzeń pogłosowych w każdym z kanałów.

Oba rozwiązania umożliwiają znaczące ograniczenie liczby pętli w porównaniu do klasycznych systemów regeneratywnych, co przekłada się na większą stabilność działania i łatwiejsze zarządzanie systemem. Rysunek 20 przedstawia ideę działania hybrydowego systemu *VR4*, zaczerpniętą z wniosku patentowego złożonego przez M. Polettiego (Poletti, 2006), natomiast Rysunek 21 pokazuje przykład konfiguracji systemu *VR4* z 16 mikrofonami i 16 głośnikami tworzącymi 16 fizycznych kanałów (Bakker, Gillan 2014).

Zastosowanie wielu niezależnych urządzeń pogłosowych w każdym kanale pozwala na uzyskanie stabilnie działającego systemu o naturalnym i dobrze ocenianym brzmieniu.

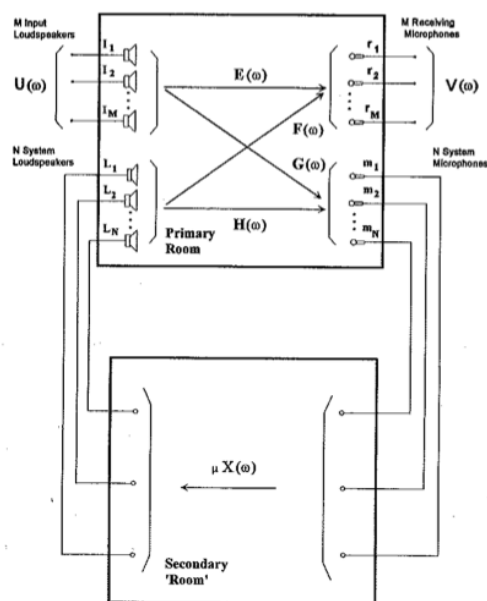


Rysunek 20: Idea działania systemu VRA (Poletti, 2006).



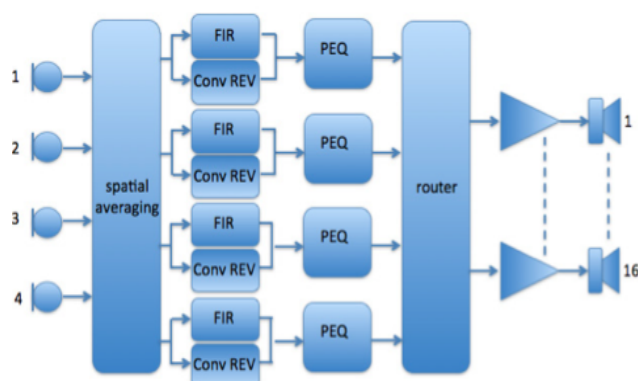
Rysunek 21: Idea działania szesnastokanałowego systemu VRA (Bakker, Gillan 2014).

W 1994 roku M. Poletti rozwinął koncepcję systemu VRA, proponując rozwiązanie, w którym zestaw urządzeń pogłosowych został zastąpiony emulacją komory akustycznej sprzężonej z salą koncertową za pomocą zestawu mikrofonów i głośników. Kluczowym założeniem tej koncepcji było to, że zmiana parametrów emulowanej komory pozwalała na modyfikację parametrów pogłosowych w samej sali koncertowej. Ideę działania takiego systemu ilustruje Rysunek 22 (Poletti, 1994). W celu lepszego zrozumienia interakcji zachodzących pomiędzy układem dwóch sprzężonych pomieszczeń, przeprowadzono symulację zjawisk akustycznych z wykorzystaniem analogii do obwodów elektrycznych. Zastosowanie analogii umożliwiło przeprowadzenie cyfrowych symulacji zachowania się układu i przewidywanie efektów zmian parametrów komory na akustykę sali koncertowej. Rozwiązanie Polettiego zostało wykorzystane w systemie *Constellation* instalowanym przez firmę *Meyer Sound*.



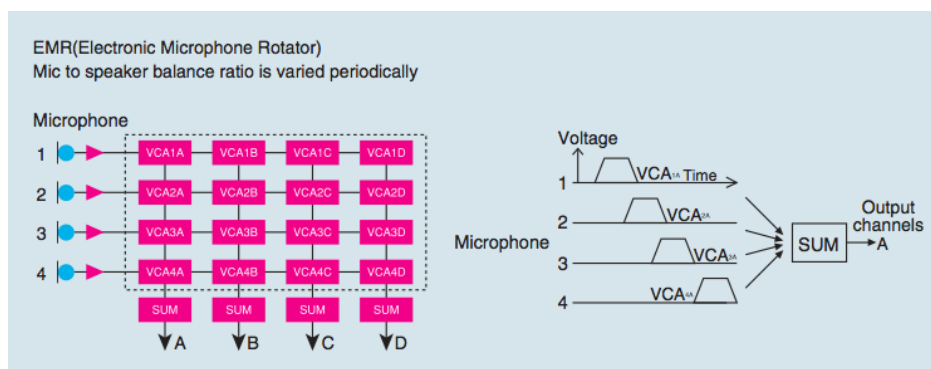
Rysunek 22: Idea działania systemu VRA (Poletti, 1994)

Porównując schemat szesnastokanałowego systemu *VRA* (Rysunek 21) ze schematem szesnastokanałowego systemu *Yamaha AFC* (Rysunek 23), można łatwo zauważyć, że w systemie *AFC* zastosowano jedynie 4 mikrofony, podczas gdy w systemie *VRA* wykorzystano ich aż 16.



Rysunek 23: Idea działania systemu AFC (Bakker, Gillan 2014).

Możliwość zastosowania mniejszej liczby mikrofonów w systemie *Yamaha AFC* wynika z wykorzystania modułu *EMR* (*Electronic Microphone Rotator* – oznaczony na Rysunku 23 jako *spatial averaging*), który jest charakterystycznym elementem tego systemu. Moduł ten umożliwia uśrednianie przestrzenne sygnałów pochodzących z kilku mikrofonów, co pozwala na znaczące ograniczenie liczby aktywnych mikrofonów bez pogorszenia jakości działania systemu. Dodatkową zaletą zastosowania modułu *EMR* jest ograniczenie ryzyka wystąpienia sprzężeń akustycznych, ponieważ zapobiega on nadmiernej koncentracji energii w jednej pętli. Ideę działania modułu *EMR* ilustruje Rysunek 24 (pl.yamaha.com).



Rysunek 24: Schemat działania modułu EMR (pl.yamaha.com).

Hybrydowe systemy regeneratywne stanowią jedno z najbardziej zaawansowanych technologicznie rozwiązań w dziedzinie wspomagania akustyki pomieszczeń. Ich zastosowanie pozwala na szeroką regulację parametrów akustycznych, w tym niezależne kształtowanie poziomu wczesnych odbić i czasu pogłosu. Dodatkowo systemy te zapewniają równomierne pokrycie dźwiękiem całej przestrzeni bez słyszalnych zmian barwy oraz eliminują możliwość lokalizacji poszczególnych głośników przez odbiorców.

W ostatnich latach na rynku pojawiło się także wiele zaawansowanych systemów dźwięku immersyjnego, które nie tylko umożliwiają precyzyjne pozycjonowanie źródeł dźwięku w przestrzeni, ale także oferują funkcje zmiany warunków akustycznych pomieszczeń. Systemy immersyjne nowej generacji stają się więc nie tylko narzędziem do przestrzennej dystrybucji dźwięku, lecz także do aktywnego kształtowania akustyki wnętrza, oferując elastyczność niedostępną dla klasycznych systemów pasywnych i regeneratywnych. Takie rozwiązania znajdują zastosowanie w salach koncertowych, teatrach, kościołach oraz przestrzeniach multimedialnych i edukacyjnych. Poniżej przedstawiono kilka najważniejszych systemów tego typu:

L-Acoustics L-ISA + Room Engine (2016, aktualizacja 2024). System L-ISA oferuje funkcję Room Engine umożliwiającą kontrolę parametrów akustycznych (czas pogłosu, wczesne odbicia, przestrzenność) dla konkretnych źródeł dźwięku. Wspierany przez system zarządzania akustyką Hyriss, pozwala na realistyczne odwzorowanie różnorodnych przestrzeni akustycznych.

d&b Soundscape (2017). System składa się z procesora DS100 i dwóch modułów programowych: En-Scene – do obiektowego pozycjonowania źródeł dźwięku oraz En-Space – do modelowania wirtualnej akustyki różnorodnych wnętrz. Soundscape umożliwia symulację akustyki pomieszczeń oraz niezależną kontrolę wczesnych i późnych odbić.

Meyer Sound Spacemap Go (2020). System oparty na procesorze Galaxy umożliwia intuicyjne miksowanie dźwięku immersyjnego. Integracja z platformą D-Mitri daje ograniczoną kontrolę nad akustyką pomieszczenia, choć głównym celem pozostaje przestrzenne pozycjonowanie dźwięku.

Adamson Fletcher Machine (2022). Zaawansowany system do pozycjonowania źródeł dźwięku i modyfikacji warunków akustycznych. Obsługuje OSC i MIDI oraz współpracuje z systemami śledzenia ruchu.

Dolby Atmos Live (od 2016). Sceniczna wersja systemu Dolby Atmos oferuje zarówno zaawansowane miksowanie obiektowe jak i symulację przestrzeni akustycznej.

Astro Spatial Audio SARA II (2018). Niezależny procesor przestrzenny umożliwiający dynamiczną kontrolę akustyki pomieszczenia i pozycjonowanie obiektowe. Wykorzystywany jest w teatrach i salach koncertowych.

Amadeus ART:IP Immersive Engine (2025). System opracowany przez firmę Amadeus Acoustics umożliwia przetwarzanie sygnału w czasie rzeczywistym dla maksymalnie 256 kanałów głośnikowych. System umożliwia regulację czasu pogłosu, barwy i przestrzenności dźwięku.

Transcend Active Acoustic System. Zaprojektowany przy współpracy firmy Wenger Harman system pozwala na kontrolę pogłosu w maksymalnie czterech strefach. System może automatycznie dostosować ustawienia w zależności od rodzaju sygnału, może np. zwiększyć pogłos po pojawieniu się muzyki a zredukować wcześniej dodany pogłos po wykryciu sygnałów mowy.

3.1.3 Aktywne systemy akustyczne: kluczowe wnioski

Wykorzystanie aktywnego systemu wspomagania akustyki umożliwia osiągnięcie odpowiednich warunków akustycznych dla różnych typów zastosowań. Nowoczesne systemy wspomagania oferują znaczną poprawę parametrów akustycznych, przy zachowaniu wysokiej jakości oraz większej elastyczności w porównaniu z rozwiązaniami pasywnymi. Warto podkreślić, że zmiana ustawień takiego systemu może odbywać się bardzo szybko i bez ingerencji w wystrój wnętrza. Taka możliwość może zostać wykorzystana jako element dramaturgiczny, np. w spektaklach teatralnych, pozwalając na dynamiczne kształtowanie warunków akustycznych w trakcie przedstawienia (Błasiński, 2022; Möller, Błasiński, 2023).

4 Badania percepcji pogłosowości sal koncertowych – przegląd uwarunkowań i obserwacji eksperymentalnych

Już od czasów pionierskich badań Sabine’a naukowcy próbowali ustalić jakie są percepcyjne atrybuty, które pozwalają na rozróżnienie sal o dobrej i złej akustyce. Określając pierwszy kwantyfikator jakości akustyki sal, czyli czas pogłosu, Sabine równocześnie rozpoczął erę poszukiwań parametrów obiektywnych, które będą korelować z subiektywną oceną słuchaczy.

W swoich badaniach Sabine zwracał także uwagę na istotność innych atrybutów oceny: głośności, zakłóceń, rezonansów pomieszczenia i echa (Sabine, 1920). Od początków współczesnej akustyki wiadomo również, że sam czas pogłosu nie jest wystarczający do pełnego opisu złożonej kombinacji parametrów (często pozaakustycznych), które determinują postrzeganie danej sali koncertowej przez słuchacza (Soulodre, Bradley, 1995). Subiektywne porównanie sal koncertowych nie jest łatwym zadaniem, ponieważ preferowana akustyka pomieszczenia zależy od wielu elementów. Wykazano choćby, że repertuar, praca dyrygentów i jakość wykonania utworów przez orkiestry w znacznym stopniu wpływają na wrażenia słuchowe; w tej sytuacji wkład akustyki audytorium jest trudny do wyizolowania za pomocą subiektywnych ankiet (Lokki, 2013). Griesinger (1997) zwracał uwagę, że pamięć akustyczna w badaniach psychoakustycznych jest krótkotrwała i wymaga bliskiego zestawienia bodźców w czasie, ponieważ pamięć słuchowa dla zaniku pogłosu trwa zaledwie kilka sekund. Oceny oparte na dłuższych odstępach opierają się raczej na schematach, doświadczeniu i pamięci semantycznej, więc porównania prowadzone w dłuższych odstępach czasu (np. między salami odwiedzanymi z przerwą kilku dni), precyzja ocen dramatycznie spada, a wpływają na nie czynniki poza percepcyjne, na przykład wystrój sali, rodzaj muzyki, emocje słuchaczy.

Jednocześnie, czas pogłosu jest wciąż podstawowym parametrem charakteryzującym właściwości akustyczne pomieszczeń. Barron (1988) zauważył, że w ocenie ogólnego wrażenia akustycznego, najwyższą korelację ($r=0,57$) osiągnięto właśnie dla wartości czasu pogłosu.

Badania pogłosów o nieliniowym zaniku energii akustycznej podważają jednak istotność powszechnie dotychczas wykorzystywanych parametrów EDT i RT w ocenie długości pogłosu, jednocześnie wskazując na różną ocenę jakości sal w zależności od udziału wczesnego i późnego zaniku energii akustycznej (Luizard i in., 2015).

Przez lata do badania akustyki sal koncertowych wykorzystywano wiele różnych subiektywnych metod badawczych. Metody te można ogólnie podzielić na badania terenowe

i laboratoryjne. Oba podejścia stanowią kompromis między koniecznością ścisłej kontroli eksperymentalnej, możliwej do osiągnięcia w warunkach laboratoryjnych, a potrzebą dokładnego wystawienia badanych na działanie pełnego pola akustycznego, które można uzyskać wyłącznie w sali koncertowej. W związku z tym oba podejścia mają swoje zalety i wady (Soulodre, 2006). Wnioski, czasami sprzeczne, płynące z wyników różnych eksperymentów oraz proponowane nowe metody analizy powodują, że badanie percepcji pogłosu wciąż pozostaje aktualnym zagadnieniem w akustyce wnętrz.

W tym podrozdziale podsumowano najważniejsze odkrycia poszczególnych badaczy, które znacząco wpłynęły na rozwój wiedzy o percepcji pogłosu w pomieszczeniach. Przedstawiono zarówno klasyczne eksperymenty terenowe, jak i nowoczesne badania laboratoryjne wykorzystujące symulacje komputerowe i zaawansowane techniki odsłuchowe. Uwzględniono również próby identyfikacji nowych parametrów akustycznych lepiej odzwierciedlających subiektywne wrażenie długości pogłosu niż tradycyjnie stosowane RT czy EDT, a także opisano eksperymenty dotyczące percepcji pogłosów o nieliniowym zaniku. Celem zestawienia jest ukazanie, jak zmieniały się metody badawcze i rozumienie percepcji pogłosu na przestrzeni ostatniego stulecia. Wyniki przedstawione w tym rozdziale są prezentowane zgodnie z materiałami źródłowymi, dlatego występują różne formy przedstawiania siły zależności między zmiennymi. Zależności te czasami przedstawiane są jako „ r ” czyli współczynnik korelacji liniowej Pearsona, który przyjmuje wartości od -1 do 1 i opisuje kierunek oraz siłę liniowej zależności między dwiema zmiennymi, a w innych przypadkach jako „ R^2 ”, czyli współczynnik determinacji będący kwadratem „ r ” w przypadku regresji liniowej, który określa, jaka część zmienności jednej zmiennej może być wyjaśniona przez drugą. R^2 przyjmuje wartości od 0 do 1 .

4.1 Ogólne badania dotyczące percepcji pogłosu

4.1.1 R. H. Bolt i P. E. Doelz

W swoim artykule (Bolt, Doelz, 1950) autorzy koncentrują się nie na klasycznym czasie pogłosu, lecz na początkowym odcinku zaniku dźwięku – tzw. krótkoterminowej odpowiedzi przejściowej (ang. *short-term transient response*). Autorzy zauważyli, że dwa pomieszczenia o niemal identycznym czasie pogłosu mogą znacząco różnić się pod względem subiektywnej „jakości słyszenia”, a kluczową rolę odgrywa tu charakter zaniku dźwięku w pierwszych 20–30 dB. Inspiracją do opracowania nowego kryterium były badania Haasa (1951) nad pojedynczymi echami. Z tych badań wynika, że echo o opóźnieniu 1–35 ms jest maskowane przez dźwięk bezpośredni i może nawet poprawiać odbiór mowy, pod warunkiem, że jego poziom nie

przekracza o więcej niż 10 dB poziom sygnału bezpośredniego. Autorzy przeprowadzili badanie subiektywne z udziałem 21 słuchaczy, którzy oceniali akustykę sali kinowej z czterech różnych miejsc na widowni. Odpowiedzi porównano z analizą odpowiedzi impulsowych z tych samych lokalizacji. Autorzy sugerują, że zamiast skupiać się wyłącznie na całkowitym czasie pogłosu, warto analizować strukturę odbić w pierwszych 400 ms, gdyż to ona w największym stopniu determinuje subiektywną jakość brzmienia, szczególnie pod względem zakłócającej obecności echa. Choć badanie to nie dotyczy wprost percepcji pogłosu, to jednak jako pierwsze w historii koncentruje uwagę na początkowej części odpowiedzi impulsowej.

4.1.2 M. R Schroeder, D. Gottlob i K. F. Siebrasse

Schroeder (1965) zaproponował nową metodę pomiaru czasu pogłosu. W odróżnieniu od uśredniania wielu pomiarów, które – jak wskazuje autor – jest nieefektywne i nie pozwala na precyzyjne określenie rzeczywistego kształtu rozkładu energii akustycznej, szczególnie w jej początkowej części, zaproponowana metoda całkowania kwadratu IR w odwróconym czasie. Metoda ta umożliwia uzyskanie w pojedynczym pomiarze krzywej zaniku odpowiadającej średniej z nieskończonej liczby krzywych zaniku, jakie powstałyby w wyniku pobudzenia pomieszczenia szumem filtrowanym pasmowo. Metoda ta pozwalała na uzyskanie bardziej gładkich i dokładnych krzywych zaniku, eliminując losowe fluktuacje obecne w uśrednianych pomiarach.

W celu sprawdzenia skuteczności działania nowej metody pomiarowej, Schroeder i in. (1974). przeprowadzili jedno z najbardziej znanych badań nad związkiem między subiektywnymi preferencjami akustycznymi a mierzalnymi parametrami akustycznymi, w tym przede wszystkim czasem pogłosu. W artykule opisano, które fizyczne cechy sal koncertowych – takie jak czas pogłosu, szerokość sali, opóźnienie pierwszego odbicia czy współczynnik skrośnej korelacji międzysusznej najlepiej korelują z subiektywną oceną jakości dźwięku i preferencjami słuchaczy. Badania zrealizowano w 22 salach koncertowych, w których odtwarzano identyczne nagranie orkiestry (fragment IV części Symfonii „Jowiszowej” Mozarta), rejestrowane następnie przy użyciu systemu „sztucznej głowy”. Otrzymane próbki prezentowano słuchaczom w komorze bezdechowej za pomocą stereofonicznego zestawu głośnikowego, co pozwalało na ich bezpośrednie porównywanie poprzez przełączanie się między próbkami przy zachowaniu naturalnego pola dźwiękowego. W eksperymencie wzięło udział 12 słuchaczy, którzy oceniali pary nagrań metodą porównań preferencyjnych (A/B). Utworzono macierz preferencji i poddano ją analizie czynnikowej, co pozwoliło wyodrębnić jeden dominujący czynnik „zgodnej preferencji” oraz kilka mniej znaczących wymiarów różnic

indywidualnych. Jednym z najważniejszych wyników eksperymentu było stwierdzenie, że czas pogłosu (RT) jest parametrem najsilniej skorelowanym z ogólną preferencją słuchaczy w salach, których RT był niższy niż 2,2 sekundy. Dla tej grupy sal, korelacja RT z preferencją była niemal idealnie dodatnia: im dłuższy pogłos, tym wyższa ocena jakości akustyki. Równocześnie, parametr D (wyrazistość) wykazywał silną ujemną korelację z preferencją, co jest naturalne, ponieważ te dwa wskaźniki są odwrotnie proporcjonalne. W salach o dłuższym czasie pogłosu (powyżej 2 s), zależność nie była już jednoznaczna. Ujawniono silne różnice indywidualne: niektórzy słuchacze preferowali pogłos powyżej 2,5 s, podczas gdy inni uznawali go za zbyt długi. RT w tej grupie nie korelował już liniowo z preferencją ogólną. Stwierdzono, że zbyt długi czas pogłosu może pogarszać ocenę jakości sali, jeśli prowadzi do utraty klarowności i wyrazistości. Autorzy podkreślają w swojej pracy, że najważniejszym celem jaki im przyświecał podczas opracowania nowej metody pomiarowej było przyczynienie się to do lepszego zrozumienia zjawiska pogłosu oraz lepszej korelacji pomiędzy wynikami pomiarów a subiektywną oceną.

4.1.3 R. J. Hawkes i H. Douglas

W swoim artykule Hawkes i Douglas (1971) przeprowadzili badanie, którego celem było zrozumienie, jak różne cechy akustyczne sal koncertowych są subiektywnie odbierane przez słuchaczy. Szczególny nacisk położono na zidentyfikowanie odrębnych doznań akustycznych, takich jak „pogłosowość” (ang. *reverberance*) oraz określenie ich relacji z mierzalnymi parametrami fizycznymi, takimi jak czas pogłosu. Badanie zostało zrealizowane w kilku etapach. W pierwszej fazie uczestnicy (publiczność koncertowa) oceniali akustykę w Royal Festival Hall podczas serii koncertów symfonicznych, w trakcie których stopniowo zmieniano ustawienia systemu wspomagania akustyki (ang. *Assisted Resonance System*). Słuchacze wypełniali kwestionariusze zawierające 16 dwubiegunowych skal oceny, takich jak np. pogłosowe–niepogłosowe, żywe–martwe, ciepłe–chłodne, przejrzysty–niewyraźny, zmieszany–niezmieszany. Badania miały na celu uchwycenie pełnego spektrum wrażeń związanych z akustyką pomieszczenia. Dane poddano analizie statystycznej, która wykazała, że subiektywna percepcja akustyki jest zjawiskiem wielowymiarowym. W pierwszej fazie badania zidentyfikowano pięć do sześciu niezależnych wymiarów (czynników) ocen akustycznych, wśród których jeden z najsilniejszych był opisany jako „*resonance*”, czyli wymiar zawierający odczucia pogłosowości. Korelację z pogłosowością uzyskano dla następujących atrybutów: *reverberant* ($r=0,811$), *resonant* ($r=0,772$), *responsive* ($r=0,466$) i *large dynamic range* ($r=0,405$). Oznacza to, że uczestnicy rozumieli „pogłosowość” jako złożone wrażenie

akustyczne, łączące zarówno odczucie zaniku dźwięku (pogłosu), jak i jego bogactwo brzmieniowe (rezonans), a także dynamikę. W drugiej fazie badania oceniano subiektywnie akustykę w czterech różnych salach koncertowych (*Royal Festival Hall*, *Queen Elizabeth Hall*, *Fairfield Hall*, *Swiss Cottage Odeon*) w różnych ich miejscach. Celem było sprawdzenie, jak zmienia się percepcja pogłosowości między salami i w obrębie każdej z nich. Analiza wykazała, że oceny pogłosowości są na ogół zgodne z wartością czasu pogłosu, przy czym subiektywna percepcja pogłosowości okazuje się doświadczeniem złożonym – słuchacze oceniają ją nie tylko na podstawie długości zaniku dźwięku, lecz także biorą pod uwagę dynamikę i ogólne brzmienie sali. Jest to jednocześnie pierwsze badanie uwzględniające akustykę sali koncertowej z zainstalowanym systemem wspomagania akustyki.

4.1.4 B. S. Atal, M. R. Schroeder i G. M. Sessler

W 1965 roku przeprowadzono eksperyment, którego celem było zbadanie związku między subiektywnym odczuciem długości pogłosu a rzeczywistym przebiegiem zaniku dźwięku (Atal i in., 1965). Autorzy stworzyli sztuczne próbki dźwiękowe zawierające różne kształty nachylenia IR, w których celowo zmieniano tempo opadania energii w czasie. Słuchacze porównywali próbki w parach i oceniali, w której próbce pogłos jest dłuższy. Najsilniejszy wpływ na percepcję długości pogłosu miał początkowy odcinek zaniku (pierwsze 160 ms). Nawet jeśli dalsza część zaniku była bardzo długa, to jeśli początkowy zanik był szybki, słuchacze postrzegali pogłos jako krótki. W przeciwnym przypadku, wolny początkowy zanik prowadził do wrażenia długiego pogłosu, nawet jeśli dalsza część spadku energii przebiegała szybciej. Wnioski z tej pracy były kluczowe dla późniejszego wprowadzenia parametru EDT który uwzględnia tylko pierwsze 10 dB spadku energii jako reprezentatywne dla subiektywnego odbioru pogłosu.

4.1.5 A. Kotchy i in.

Węgierscy badacze (Kotchy i in., 1974) przeprowadzili badania dotyczące subiektywnej oceny długości pogłosu z wykorzystaniem sztucznie wygenerowanych IR o różnych kształtach. Celem badania było ustalenie, która część krzywej zaniku energii akustycznej ma większy wpływ na subiektywną ocenę długości pogłosu, czy jest to część początkowa czy też istotny jest całkowity czas zaniku energii. W eksperymencie wykorzystano 24 pary próbek różniących się wartościami parametrów EDT i RT oraz o różnych punktach załamania kształtu IR. Próbkę prezentowano w parach, a uczestnicy mieli wskazać, która z dwóch próbek w każdej parze pogłos był odczuwany jako dłuższy. Badanie obejmowało dwie serie: w pierwszej, 25 uczestników odsłuchiwało próbki w komorze bezdechowej a w drugiej, 136 osób

odsluchiwało próbki w słuchawkach. Badania wykazały, że w krótszych próbkach większy wpływ miało początkowe tempo spadku poziomu dźwięku natomiast w przypadku dłuższych zaników decydującym czynnikiem oceny był całkowity czas zaniku. W przypadkach trudnych do rozróżnienia, uczestnicy również kierowali się końcową fazą zaniku. Szczególnie interesujący był przypadek dwóch par próbek, w których mimo większej początkowej stromości i krótszego czasu całkowitego, uczestnicy uznali pogłos za dłuższy – co skutkowało subiektywną oceną przeciwną do obiektywnego przebiegu, czyli ujemną korelacją z fizycznymi parametrami.

4.1.6 M. Barron

Mike Barron (1988) opisał wyniki swoich obszernych badań dotyczących subiektywnej oceny akustyki jedenastu dużych brytyjskich sal koncertowych, skupiając się m.in. na tym, jak słuchacze odbierają ich pogłosowość. Badania zostały przeprowadzone w warunkach rzeczywistych koncertów symfonicznych, z udziałem doświadczonych słuchaczy – głównie akustyków. Celem było powiązanie subiektywnych ocen z obiektywnymi parametrami akustycznymi – szczegóły tego eksperymentu opisano wcześniej w rozdziale 2.7.2.1 niniejszej pracy. Wyniki pokazały, że subiektywne odczucie pogłosowości korelowało najlepiej z EDT w paśmie średnich częstotliwości. Korelacja ta była umiarkowana ($r \approx 0,35$), ale istotna. Gdy pominięto dane z jednej z sal, która znacząco zaniżała korelację, współczynnik wzrósł do $r \approx 0,53$. Sugeruje to, że EDT jest lepszym predyktorem percepcji długości pogłosu niż klasyczny RT. Zastanawiające jest pominięcie w analizie statystycznej wyników jednej z sal dlatego, że znacząco odbiegały od pozostałych i zaniżały współczynnik korelacji między oceną subiektywną a czasem wczesnego zaniku. Autor rozważa możliwe przyczyny tego odstępstwa, jednak nie przedstawia jednoznacznego i przekonującego dowodu uzasadniającego wykluczenie tych danych. W badaniu stwierdzono również, że słuchacze dzielą się na dwie grupy preferencji: jedna z nich bardziej ceniła pogłosowość, a druga – intymność. Dla grupy preferującej pogłosowość najwyższą korelację z ogólną oceną sali miała właśnie skala „*Reverberance*”. Co więcej, w tej grupie skala „*Envelopment*” (poczucie otoczenia dźwiękiem) korelowała silnie z pogłosowością, co sugeruje, że słuchacze ci utożsamiali przestrzenność z obecnością pogłosu. Natomiast słuchacze z grupy preferującej intymność wiązali „*Envelopment*” bardziej z poczuciem bliskości i siłą wczesnych odbić dźwięku. Ogólny wniosek z badania był taki, że choć istnieją różnice indywidualne w preferencjach, czas pogłosu – w szczególności EDT – pozostaje kluczowym czynnikiem kształtującym percepcję pogłosowości, a co za tym idzie – ogólne wrażenie akustyczne sali. Barron zwrócił również

uwagę na przypadek, w którym przy wartości RT większej niż EDT (np. o około 20%) możliwe jest jednocześnie osiągnięcie wysokiej intymności i odpowiednio długiego czasu pogłosu.

Należy pamiętać, iż Barron skorelował subiektywne wyniki uzyskane w czasie trwania koncertów z zestawem obiektywnych wielkości zmierzonych w salach bez udziału publiczności. Ponieważ obecność słuchaczy ma istotny wpływ na akustykę sali, osoby biorące udział w ankiecie słuchały koncertów w innych warunkach niż te, które panowały w sali koncertowej w czasie pomiarów. Taki sposób prowadzenia pomiarów stanowi ograniczenie regularnie napotykaną w badaniach obejmujących koncerty na żywo.

4.1.7 C. Lavandier

Badania nad percepcją pogłosu, będące elementem badań nad jakością akustyczną sal opisane w rozprawie doktorskiej Lavandier (1989) miały na celu ocenę, które parametry akustyczne najlepiej oddają subiektywne wrażenia słuchaczy dotyczące jakości akustyki sal, w tym szczególnie pogłosu. W ramach eksperymentu przeprowadzono kontrolowane testy odsłuchowe w komorze bezchowej, z wykorzystaniem systemu, który składał się z procesora pogłosowego, procesorów opóźniających dźwięk i korektorów barwy dźwięku. Próbkę dźwiękową będącą fragmentami muzyki klasycznej prezentowano z wykorzystaniem dziewięciu głośników rozmieszczonych półsferycznie wokół słuchacza oraz w przypadkach, w których nie oceniano efektów przestrzennych z wykorzystaniem słuchawek. Komputerowo sterowany system pozwalał na zmianę różnych parametrów testu: czasu pogłosu, klarowności, energii bocznej oraz wczesnych i późnych odbić. W obrębie badań nad percepcją pogłosu, próbki były tak konstruowane, aby manipulować wartością czasu pogłosu niezależnie od wartości innych parametrów. W badaniu wzięło udział 12 słuchaczy, muzyków - amatorów. Wykazano, że nie tylko wartość RT, ale także wczesne odbicia mają wpływ na subiektywne wrażenia oraz, że RT i C80 częściowo kompensują się w percepcji, co oznacza, że przy niskiej klarowności wydłużenie pogłosu niekoniecznie prowadzi do pogorszenia ogólnej oceny akustycznej.

4.1.8 E. Kahle i J. P. Jullien

W swoich badaniach Kahle i Jullien (1994, 1995) analizowali zależność pomiędzy subiektywnym wrażeniem pogłosowości a parametrami obiektywnymi. Eksperymenty prowadzono w okresie około dwóch lat w grupie od 8 do 10 słuchaczy, którzy brali udział w koncertach w 9 obiektach takich, jak sale filharmoniczne, opery i audytoria. W przerwach koncertu uczestnicy zmieniali miejsca, które zajmowali, aby pełniej określić warunki

akustyczne panujące w różnych rejonach widowni. W ramach badań ustalono, że pogłosowość to niezależny wymiar percepcyjny, najlepiej reprezentowany przez EDT15, który zdefiniowano jako wartość parametru liczona jak EDT, a więc od początku zaniku energii akustycznej w pomieszczeniu, ale z uwzględnieniem 15 dB, a nie 10 dB spadku poziomu ciśnienia akustycznego. Wyniki badań nie spowodowały jednak zmiany ustandaryzowanego zakresu pomiaru wartości EDT, który nadal mierzy się jako sześciokrotność czasu spadku energii akustycznej o 10 dB. Zdaniem autorów, klasyczny parametr RT60 nie jest wystarczający do wyjaśnienia percepcji pogłosu, zwłaszcza w różnych miejscach sali koncertowej. Analiza wykazała, że współczynnik korelacji pomiędzy subiektywnymi ocenami a wartościami EDT15 dla różnych lokalizacji w sali osiąga $r = 0,639$ przy częstotliwości 2 kHz, podczas gdy dla RT najwyższa wartość współczynnika korelacji wynosi $r = 0,562$. Ponadto stwierdzono, że wartości EDT uzyskane dla źródła dźwięku o charakterystyce kierunkowej i wszechkierunkowej różnią się istotnie, co wskazuje, iż właściwości źródła mają istotny wpływ na percepcję czasu pogłosu. Autorzy zauważyli również, że parametr RT160 (czas pogłosu liczony w pierwszych 160 ms trwania spadku) zaskakująco dobrze koreluje z subiektywnym odbiorem pogłosu, co potwierdza, że początkowa część odpowiedzi impulsowej odgrywa kluczową rolę w percepcji. Autorzy obliczali również stosunki energii przychodzącej w różnych odcinkach czasu (np. 0–40 ms, 0–80 ms, 0–160 ms itd.) i ustalili, że energia dźwięku przychodząca w tym przedziale czasowym ma niewielki wpływ na percepcję pogłosu, być może ze względu na maskowanie przez wcześniejsze odbicia.

Podobnie, jak w czasie innych badań prowadzonych w salach koncertowych, pomiary parametrów obiektywnych były prowadzone bez udziału publiczności. Warto zaznaczyć, że prowadzenie badań w okresie około 2 lat w różnych salach koncertowych z wykorzystaniem różnorodnego repertuaru również może mieć wpływ na uzyskane wyniki, co nie zostało przeanalizowane przez autorów. Należy pamiętać, że kilkuminutowe odstępy uniemożliwiają obiektywną ocenę różnych miejsc w sali, na przykład w sytuacji, kiedy słuchacz zmieniał w czasie koncertu miejsce (Moore, 2013).

4.1.9 G. A. Soulodre i J. S. Bradley

W badaniu przeprowadzonym przez Soulodre'a and Bradley'a (1995) sprawdzono korelację pomiędzy parametrami obiektywnymi i subiektywną oceną. Oceniano m.in. głośność, klarowność, pogłosowość, ciepło brzmienia, jasność brzmienia, otoczenie dźwiękiem, pozorną szerokość źródła oraz ogólne wrażenie słuchaczy. Nagrany w komorze bezechowej fragment opery Mozarta („Wesele Figara”) spleciono z binauralnymi odpowiedziami

impulsowymi zmierzonymi w dziesięciu salach koncertowych. Odpowiedzi impulsowe zarejestrowano za pomocą zestawu sztucznej głowy z torsem (B&K 4128). Pomiarów parametrów obiektywnych wykonano z wykorzystaniem wszechkierunkowego źródła dźwięku. Do prezentacji próbek dźwiękowych wykorzystano stereofoniczny zestaw głośników z zastosowaniem fizycznych barier oraz dodatkowej, cyfrowej eliminacji przesłuchów, co zapewniało separację kanałów przekraczającą 30 dB. Uczestnicy odsłuchiwali pary brzmień, mając możliwość swobodnego przełączania się między nimi w czasie rzeczywistym bez restartu utworu. W badaniu wzięło udział dziesięciu słuchaczy z doświadczeniem muzycznym i odsłuchowym, którzy przed właściwym testem przeszli odpowiedni trening. W przypadku oceny długości pogłosu najlepszy okazał się parametr EDT obliczony jako średnia z sześciu pasm oktaowych w zakresie od 125 Hz do 4 kHz. Wartość współczynnika korelacji wyniosła $r=0,971$. Bardzo dobrą zgodność ($r = 0,977$) uzyskano również dla czasu centralnego T_s . Czas pogłosu wyrażony jako RT miał niższą korelację (wartości r w przedziale 0,74 – 0,80), co wskazuje na jego mniejszą przydatność w przewidywaniu percepcji pogłosowości. W badaniu tym zaproponowano kilka nowych miar akustycznych, opartych na rozkładzie energii w czasie, szczególnie w określonych pasmach częstotliwości i przedziałach czasowych. Miary te dotyczą jednak percepcji jasności czy ciepła brzmienia oraz klarowności i nie odnoszą się do percepcji długości pogłosu.

Kluczową zaletą metody zastosowanej w badaniu Soulodre'a i Bradley'a jest to, że odpowiedzi impulsowe użyte do wytworzenia bodźców badanych były identyczne z tymi, które użyto do obliczenia wartości miar obiektywnych. W tym badaniu uzyskano wysokie wartości korelacji pomiędzy subiektywnymi wynikami odpowiadających im obiektywnych pomiarów. Ponownie pewne wątpliwości budzi odtwarzanie próbek nagranych za pomocą sztucznej głowy z wykorzystaniem głośników.

4.1.10 T. Lokki i in.

W swoich badaniach Lokki i in. (2010, 2011) zastosowali metodę sensorycznej oceny akustyki sal koncertowych z użyciem indywidualnego profilowania słownego (ang. *Individual Vocabulary Profiling*, IVP), aby zidentyfikować percepcyjne cechy różnych parametrów akustycznych. Próbki dźwiękowe uzyskano przez splot bezechowych nagrań muzyki symfonicznej z RIR uzyskanymi z wykorzystaniem „wirtualnej orkiestry”, czyli zestawu 34 aktywnych głośników rozmieszczonych na scenie sali koncertowej reprezentujących ustawienie klasycznej orkiestry. Rejestracja odpowiedzi impulsowych odbywała się z wykorzystaniem mikrofonów ambisonicznych w kilku pozycjach w sali. Próbki dźwiękowe

były odtwarzane w komorze bezchowej przez zestaw 16 głośników w układzie przestrzennym, a badani oceniali próbki przypisując wartości do własnoręcznie zdefiniowanych cech percepcyjnych. W eksperymencie uczestniczyło 20 doświadczonych słuchaczy, którzy w procesie kilku sesji wyodrębnili od czterech do sześciu własnych atrybutów percepcyjnych (łącznie 102 różne określenia). Atrybuty te zostały następnie pogrupowane metodami statystycznymi, przede wszystkim hierarchiczną analizą skupień i analizą czynnikową. Oprócz innych parametrów akustyki, zidentyfikowano dwa główne typy powiązane z percepcją pogłosowości. Pierwszy typ, oznaczony jako *Reverberance_1*, wiązał się z odczuciem wielkości przestrzeni - zawierał takie określenia jak „pogłos”, „pogłosowość”, „rozmiar sali” czy „ilość odbić”. Drugi typ, nazwany *Reverberance_2*, dotyczył pogłosu otaczającego zawierając cechy takie jak „otoczenie dźwiękiem”, „szerokość”, „pełnia basu” i „rozkład w przestrzeni”. Odróżnienie tych dwóch aspektów pogłosowości zostało potwierdzone zarówno statystycznie, jak i przez analizę słownictwa uczestników. Wartość *Reverberance_1* rosła wraz z odległością od źródła, podczas gdy wartość *Reverberance_2* silnie różnicowało sale niezależnie od pozycji odsłuchowej. Wyniki analizy wskazały, że klasyczny parametr EDT, choć korelował z percepcją pogłosu, nie był wystarczający do uchwycenia zróżnicowania tych dwóch typów pogłosowości. *Reverberance_1* korelowała z odległością i głośnością, a więc parametrem G, zaś *Reverberance_2* znajdowała odzwierciedlenie w parametrze związanym z przestrzennością LEV, ale nie z pozorną szerokością źródła ASW. Wnioski z badania wskazują, że pogłos w salach koncertowych jest zjawiskiem wielowymiarowym i nie może być ujęty pojedynczym wskaźnikiem. Podział na pogłosowość związaną z przestrzenią i pogłos otaczający może mieć znaczenie w dalszym doskonaleniu metod oceny akustyki sal oraz projektowania nowych parametrów. Zastosowana metoda IVP okazała się skuteczna w uchwyceniu indywidualnych, ale spójnych percepcyjnie ocen pogłosu, bez uprzednich założeń terminologicznych.

4.1.11 D. Lee i in.

W badaniu (Lee i in., 2017) porównano skuteczność trzech nowych, zaproponowanych przez autorów, psychoakustycznych parametrów pogłosowości – RTN (czas zaniku z uwzględnieniem poziomu dźwięku), EDTN (wczesny czas zaniku z uwzględnieniem poziomu dźwięku) oraz PREV (wskaźnik pogłosowości oparty na sygnale) – względem klasycznych wskaźników EDT i RT20. Szczególnie interesujący jest parametr PREV, którego wartość jest obliczana bezpośrednio z próbki dźwiękowej, a więc ze splotu sygnału dźwiękowego (np. mowy, muzyki) z odpowiedzią impulsową pomieszczenia. Jego wartość

zależy nie tylko od właściwości samej RIR, ale także od charakterystyki źródła dźwięku (np. dynamiczne zmiany, barwa, czas trwania). PREV jest obliczany z wykorzystaniem psychoakustycznego filtra głośności (np. zgodnie z ISO 532-1:2017), który odwzorowuje działanie ludzkiego układu słuchowego. Uczestnicy słuchali w słuchawkach następujących par: próbki odniesienia (uzyskanej przez splot bezechowych nagrań muzyki orkiestrowej lub głosu z odpowiedzią impulsową) oraz jednej z 24 próbek porównawczych o zmienionym pogłosie. Interfejs graficzny testu pozwalał uczestnikom na zwiększanie lub zmniejszanie długość zaniku RIR, by dopasować próbkę porównawczą do referencyjnej. W eksperymentach uczestniczyło odpowiednio 20 i 15 osób, z których po odrzuceniu danych niespełniających kryterium czułości, do analizy włączono dane od 16 i 11 osób. Analizę przeprowadzono w odniesieniu do warunków akustycznych o różnych poziomach dźwięku i czasach pogłosu, bazując na danych zebranych z dwóch typach eksperymentów: dopasowywania pogłosowości (eksperymenty A) oraz bezpośredniego oceniania pogłosowości (eksperymenty B). Ustalono, że parametry TN i EDTN cechowały się najmniejszym współczynnikiem zmienności między dopasowanymi próbkami, co wskazuje na ich wysoką zgodność z percepcją uczestników. W eksperymencie A.1 EDTN był istotnie lepszy niż pozostałe wskaźniki (z wyjątkiem TN), a w eksperymencie A.2 zarówno TN, jak i EDTN wypadły istotnie lepiej niż klasyczne wskaźniki EDT i RT. PREV miał natomiast największy współczynnik zmienności, co przypisano jego dużej wrażliwości na zmiany poziomu dźwięku. Dla zestawu próbek o wyrównanym poziomie SPL wszystkie badane parametry wypadły podobnie.

W eksperymentach B (B.1–B.4) oceniano bezpośrednie reakcje uczestników na próbki dźwiękowe w skali ciągłej. Wykorzystano zarówno symulowane BRIR-y (B.1 i B.2), jak i BRIR-y zmierzone w rzeczywistych salach (B.3 i B.4). Próbkę dźwiękowe stanowiły sploty bezechowych nagrań wiolonczeli lub mowy z różnymi BRIR-ami. W eksperymentach B.1 i B.2 uczestniczyło pięciu doświadczonych słuchaczy, a w B.3 i B.4 – piętnastu studentów o zróżnicowanym wykształceniu muzycznym. Prezentacja odbywała się w procedurze podwójnie ślepej z zastosowaniem metody mieszanej oceny (łącej ocenę bezwzględną i porównawczą). Analiza korelacji wykazała, że w eksperymentach B.1 i B.4 najwyższą zgodność z ocenami uczestników uzyskiwał parametr PREV, zarówno dla muzyki, jak i dla mowy. W eksperymencie B.2 (symulowane warunki akustyczne) PREV był jedynym parametrem, który wykazał istotną korelację z ocenami pogłosowości dla mowy. W eksperymencie B.3 (bez normalizacji poziomu dźwięku) PREV wypadł słabiej, co potwierdziło jego wysoką wrażliwość na poziom dźwięku. Z kolei EDTN osiągał wysoką korelację w eksperymencie B.3, szczególnie dla muzyki. Ogólnie PREV okazał się lepszy do

oceny pogłosowości mowy, szczególnie w warunkach kontrolowanego SPL, natomiast EDTN lepiej odwzorowywał percepcję muzyki i był mniej wrażliwy na różnice poziomu sygnału.

Podsumowując, PREV sprawdził się najlepiej w ocenie względnych zmian pogłosowości, zwłaszcza dla próbek mowy przy małych różnicach poziomu dźwięku, natomiast TN i EDTN – jako parametry oparte na analizie RIR i wyrażone w sekundach – są bardziej stabilne i odpowiednie do oceny absolutnej pogłosowości, szczególnie dla muzyki. Spośród nich to EDTN jest preferowany jako lepszy predyktor percepcyjny.

4.1.12 L. L. Beranek

Wkład Beranka w badania nad akustyką sal koncertowych jest bardzo ważny, jednak odnosi się głównie do jakości akustycznej sal. W swoich pracach powiązał wartości parametrów obiektywnych i subiektywnych oraz zaproponował ich optymalne wartości dla sal o różnym przeznaczeniu (Beranek, 1996). W zakresie percepcji pogłosu powiązał wartość parametru EDT z ogólną dobrą oceną sali koncertowej stwierdzając, że w przypadku sal symfonicznych wysoka wartość EDT jest korzystnie oceniana przez słuchaczy (Beranek 2003, Barron, 1998). Beranek zaproponował własną miarę pogłosowości, jednak ocena pogłosowości pomieszczenia z wykorzystaniem tego parametru nie przyjęła się w akustyce, prawdopodobnie dlatego, że miara ta jest odwrotnością Klarowności C50 (Beranek, Schultz, 1965).

4.1.13 Podsumowanie badań nad percepcją pogłosu w kontekście subiektywnego odbioru akustyki

Tabela 19 przedstawia zestawienie kluczowych badań dotyczących percepcji pogłosu, prowadzonych od początku XX wieku. Ujęto w niej nazwiska autorów, rok przeprowadzenia eksperymentu, zastosowaną metodę badawczą, liczbę uczestników, typ badania (laboratoryjne lub terenowe) oraz najważniejsze wnioski sformułowane przez autorów. Tabela 19 obejmuje zarówno klasyczne badania pionierów akustyki, takich jak Sabine, jak i nowoczesne eksperymenty z wykorzystaniem technik binauralnych, symulacji komputerowych czy zaawansowanej analizy statystycznej. Przedstawione prace pokazują ewolucję podejścia do badania pogłosowości – od prostych obserwacji opartych na odsłuchu, po precyzyjne testy odsłuchowe w warunkach kontrolowanych. Wnioski z badań potwierdzają, że postrzeganie długości i jakości pogłosu zależy od wielu czynników, w tym od struktury czasowej zaniku dźwięku, repertuaru muzycznego oraz indywidualnych preferencji słuchaczy.

Tabela 19: Podsumowanie badań nad percepcją pogłosu.

Rok badania	Nazwiska badaczy	Metoda badawcza	Liczba słuchaczy	Typ badania	Najważniejsze wnioski
1900	W. C. Sabine	subiektywna ocena czasu zaniku dźwięku	-	terenowe	Wprowadzenie RT; pomiar czasu zaniku na podstawie długości wybrzmiewania piszczałek
1950	R. H. Bolt, P. E. Doelz	subiektywna ocena jakości akustyki sali	21	terenowe	Wpływ początkowego zaniku dźwięku; podkreślenie znaczenia pierwszych 400 ms odpowiedzi impulsowej
1965	B. Atal, M. R. Schroeder	porównania par próbek z różnym tempem zaniku	-	laboratoryjne	Początkowy zanik (0–160 ms) kluczowy dla percepcji długości pogłosu; podstawa dla EDT
1971	R. J. Hawkes, H. Douglas	skale semantyczne, analiza czynnikowa	323	uczestnictwo w koncertach	Pogłosowość jako złożone zjawisko; silna korelacja z RT i odczuciem przestrzenności
1974	M. R. Schroeder i in.	porównania par binauralnych nagrań, analiza czynnikowa	12	laboratoryjne	RT i D50 skorelowane z preferencjami; wyrazistość negatywnie skorelowana; indywidualne różnice w preferencjach
1974	A. Kotchy i in.	porównania par IR z różnym przebiegiem	25 w komorze bezechowej i 136 w słuchawkach	lab + terenowe	Początek decyduje w krótkich próbkach; w dłuższych – czas całkowity; możliwa odwrotna korelacja
1988	M. Barron	kwestionariusz w 11 salach, pomiary obiektywne	29 akustyków lub doświadczonych słuchaczy	terenowe	EDT koreluje lepiej niż RT z oceną pogłosowości; preferencje: pogłos vs. intymność
1989	C. Lavandier	testy w komorze bezechowej, zmienne parametry IR	12	laboratoryjne	EDT i C80 częściowo kompensują się; wpływ wczesnych odbić; pogłosowość zależy od kombinacji parametrów
1994	E. Kahle, J. P. Jullien	kwestionariusz podczas koncertów	od 8 do 10 w każdej z sal	terenowe	EDT15 lepszy niż RT; początek zaniku (np. RT160) najważniejszy; wpływ lokalizacji i źródła dźwięku

1995	G. Soulodre, J. S. Bradley	porównania preferencyjne z wykorzystaniem IR i BRIR	10	laboratoryjne	Najlepsza korelacja z EDT ($r=0,971$) i Ts ($r=0,977$); RT mniej trafny; nowe miary przestrzenne
2010	T. Lokki i in.	indywidualne profilowanie słowne (IVP), analiza MFA	20	laboratoryjne	Dwa typy pogłosowości: przestrzenna i otaczająca; EDT niewystarczający; konieczność nowych wskaźników
2017	D. Lee i in.	eksperymenty A/B z dopasowaniem i oceną bezwzględną	16 + 11 + 5 + 15	laboratoryjne	PREV najlepszy dla mowy, EDTN dla muzyki; nowe wskaźniki przewidują pogłos lepiej niż klasyczne

4.2 Badania dotyczące percepcji pogłosu w pomieszczeniach sprzężonych akustycznie lub z systemami wspomagania

Zjawisko podwójnego lub wielokrotnego zaniku opisywano w literaturze prawie od początku badań nad akustyką pomieszczeń (Eyring, 1931, Cremer, Mueller 1978). W literaturze na przestrzeni lat przedstawiano różne podejścia do opisu nieliniowego (w skali logarytmicznej) charakteru zaniku energii akustycznej. Metody analityczne pozwalające na szczegółową ocenę dokładności kształtu nachylenia zaproponowano stosunkowo niedawno (Luizard, Katz 2011, Xiang, Goggans 2003, Xiang, Goggans 2011). Z uwagi na to, że – jak wskazują niektórzy autorzy – miary EDT i RT, powszechnie wykorzystywane do ilościowego opisu pogłosu, są nieodpowiednie dla nieliniowych zaników energii akustycznej (Luizard, Katz, 2015), nadal prowadzi się poszukiwania miary zdolnej scharakteryzować zanik o wielu nachyleniach.

Analiza energii nieliniowych zaników oraz jej związku z parametrami akustycznymi pomieszczenia ma kluczowe znaczenie, ponieważ nieliniowy charakter zaniku jest zjawiskiem powszechnie obserwowanym w wielu współczesnych salach koncertowych. W niektórych z nich zjawisko to wynika ze złożonego kształtu pomieszczenia, w innych ze względu na zainstalowane komory pogłosowe lub systemy wspomagania akustyki (Jaffe, 1995; Błaśiński, 2022). Dotychczasowe badania skupiają się nie tyle na percepcji samej długości pogłosu, ile na efektywności różnych rozwiązań służących do modyfikowania warunków akustycznych w pomieszczeniach oraz na użyteczności tych rozwiązań w kontekście poprawy jakości odbioru muzyki, na przykład pod kątem dopasowania charakterystyki pogłosu do wybranego nagrania muzycznego.

4.2.1 D. Pickard

Pickard (2003) przeprowadziła badanie, którego celem było zbadanie czy słuchacze są w stanie rozpoznać nieliniowy charakter zaniku. Wstępne eksperymenty zrealizowano z udziałem po 8 osób w każdej konfiguracji zadaniowej (m.in. testy dwualternatywne oraz oceny pojedynczych próbek). W głównym eksperymencie uczestniczyło natomiast 16 osób. Przeprowadzono następujące eksperymenty: test wykrywalności, pomiar punktu równowagi percepcyjnej oraz porównanie metod oceny. Test wykonano z wykorzystaniem procedury 2AFC (dwualternatywnego wymuszonego wyboru, ang. *two alternative forced choice*). W teście wykrywalności porównywano próbki z liniowym i nieliniowym zanikiem pogłosu o takiej samej długości pogłosu ($RT = 1,8$ s). W przypadku próbek nieliniowych, zanik rozpoczynał się od szybszego tempa (ang. *early RT*), a po określonym czasie (t_i) przechodził w wolniejszy spadek (ang. *Late RT*). W eksperymencie manipulowano punktem przejścia (t_i) w zakresie od ok. 70 ms do 400 ms. Zadaniem uczestników było wskazanie czy próbki różnią się między sobą. W pomiarze punktu równowagi percepcyjnej uczestnicy porównywali nieliniowe zaniki (*early RT* = 1 s, *late RT* = 1,8 s) z liniowymi zanikami o różnych czasach pogłosu (1,8–2,4 s), by określić wartość RT, przy której oba warianty wydają się „brzmieć podobnie” pod względem długości pogłosu. Celem było wyznaczenie tzw. punktu subiektywnej równoważności (ang. *Point of Subjective Equality* - PSE). W trzecim eksperymencie połączono metody 2AFC oraz subiektywne oceny pojedynczych próbek (z pytaniem: „Czy to jest liniowy zanik?”) i porównywano skuteczność detekcji w obu wariantach przy użyciu tych samych bodźców. Uczestnicy potrafili wykryć różnicę między liniowym i nieliniowym zanikiem pogłosu, szczególnie gdy punkt przejścia (t_i) między szybszym a wolniejszym zanikiem następował stosunkowo późno (w zakresie 150–400 ms). Próg detekcji dla zauważalnej różnicy osiągnęto w ok. 75% przypadków – co sugeruje, że różnice w kształcie zaniku są słyszalne, choć nie zawsze oczywiste. W eksperymencie określono, że aby liniowy zanik był postrzegany jako podobny do nieliniowego, jego czas pogłosu musiał być dłuższy – co wskazuje na asymetrię w percepcji długości pogłosu przy różnych profilach energetycznych. Pozycja słuchacza (np. bliżej bocznej ściany vs. centralnie) oraz obecność wybrzmiewającego końcowego dźwięku (tzw. ang. *stop-chord*) wpływały na zdolność rozróżniania zaniku. Nie stwierdzono jednoznacznych preferencji słuchaczy co do rodzaju zaniku, słuchacze potrafili dostrzegać różnice jednak nie przejawiali wyraźnych upodobań dla któregoś z profili. Zaniki pogłosu o nieliniowym przebiegu mogą być słyszalnie odróżnialne od pogłosów liniowych, zwłaszcza gdy różnice dotyczą późnej fazy zaniku. Mimo to ich wykrycie zależy od warunków odsłuchu i rodzaju zadania.

4.2.2 D. T. Bradley i L. M. Wang

Bradley i Wang (2005) opisali wpływ trzech parametrów architektonicznych na zjawisko nieliniowego zaniku energii w pomieszczeniach ze sprzężonymi komorami. Eksperyment przeprowadzono zarówno w aspekcie obiektywnym, jak i subiektywnym, z wykorzystaniem modelowania komputerowego oraz testów słuchowych. W badaniu wykorzystano RIR stworzone w programie do modelowania akustyki wewnątrz ODEON. Wykorzystano 60 modeli sal o stosunkowo prostej geometrii, różnych stosunkach sprzężonych objętości, różnych powierzchniach sprzężenia oraz dla różnych stosunków absorpcji energii akustycznej pomiędzy przestrzeniami. Z zestawu 60 modeli do testów subiektywnych wybrano 15 konfiguracji. Skoncentrowano się na kombinacjach objętości i powierzchni otworu przy najniższym poziomie absorpcji (3%), co sprzyjało wystąpieniu nieliniowego zaniku. Dla wszystkich RIR-ów wyznaczono wartości EDT, C80, współczynnik sprzężenia określony jako stosunek RT30 do RT15, a także nowe miary opisane jako *decay ratio* i ΔdB . Parametr *decay ratio* został opisany jako stosunek czasu zaniku dwóch różnych nachyleń (składowych) przebiegu pogłosu o podwójnym nachyleniu (ang. *double slope decay*). Innymi słowy, *decay ratio* opisuje relację między wolniejszym a szybszym zanikiem energii w przestrzeni o sprzężonych objętościach. Parametr ΔdB został zdefiniowany jako różnica poziomów początkowych (punktów przecięcia z osią czasu) dwóch linii opisujących wczesny i późny etap w przebiegu zaniku energii. Eksperyment przeprowadzono z udziałem 30 słuchaczy; materiał odsłuchowy prezentowano im przy użyciu słuchawek. Analiza statystyczna wyników subiektywnych wykazała istotny wpływ zarówno stosunku objętości jak i powierzchni sprzężenia na percepcję pogłosowości, a także istotną interakcję między tymi zmiennymi. Większe objętości sprzężone i większe powierzchnie sprzężenia prowadziły do wyższej percepcji pogłosowości. Efekty te były zgodne z wartościami EDT i nowymi parametrami *decay ratio* oraz ΔdB . W zakresie klarowności nie odnotowano istotnych różnic, co tłumaczono uproszczoną geometrią modeli, które nie generowały wyraźnych wczesnych odbić odpowiedzialnych za wartość C80. Pomimo to, uzyskane wyniki wskazują, że subiektywna percepcja pogłosowości dobrze koreluje z *decay ratio* i ΔdB , choć trudniej było jednoznacznie określić, który z tych dwóch parametrów lepiej opisuje zjawisko nieliniowości pogłosu. Nie udało się też potwierdzić hipotezy, że pogłosy o nieliniowym zaniku prowadzą jednocześnie do wysokiej pogłosowości i klarowności, ze względu na brak istotnych zmian w ocenie klarowności.

4.2.3 M. Ermann

Ermann (2007) analizował, czy słuchacze potrafią rozpoznać nieliniowy zanik energii o podwójnym nachyleniu (ang. *double-sloped decay*) oraz czy preferują go w porównaniu do pogłosu o zaniku liniowym. Próbkę dźwiękową przygotowano wykorzystując sploty bezechowych nagrań muzycznych z RIR-ami uzyskanymi w programie *CATT-Acoustic* na podstawie modeli dwóch sal koncertowych, w których symulowano działanie komór pogłosowych. Próbkę odtwarzano z wykorzystaniem słuchawek, a uczestnicy odpowiadali, czy słyszą pomiędzy nimi różnicę, który pogłos jest bardziej dwuetapowy, a także który z nich jest preferowany. Dwie testowane pary zawierały identyczne próbki co pozwalało ocenić tendencję do błędnego wskazywania różnic i zostało wykorzystane do wybrania najbardziej wiarygodnych słuchaczy. W dwóch etapach testów wzięło udział odpowiednio 21 i 26 osób. W pierwszym teście, w którym próbki dźwięku w parach różniły się powierzchnią sprzężenia pomiędzy objętościami, zauważono, że im większa była różnica w późnej części impulsu (czyli dalszym etapie zaniku), tym częściej słuchacze poprawnie wskazywali różnicę oraz identyfikowali bardziej dwuetapowy charakter pogłosu. Natomiast nie zaobserwowano wyraźnej zależności między typem pogłosu a preferencją słuchaczy. Drugi test zawierał cztery pary nagrań, z których dwie były ucięte przed końcowym akordem, by wykluczyć jego wpływ, ponieważ po pierwszym teście niektórzy uczestnicy zgłaszali, że potrafili rozpoznać pogłos o podwójnym nachyleniu jedynie na podstawie końcowego akordu, (tzw. *stop-chord*). Wyniki wskazały, że percepcja zaników nieliniowych jest możliwa także bez wyraźnego słyszenia wybrzmiewania pogłosu. Jest to stanowisko przeciwne do Beranka, który opisał efekt komór pogłosowych jako „nieoczywisty”, zauważalny tylko po zatrzymanych akordach, ale nie jako pogłos bieżący (Beranek, 1996; Long, 2006).

W badaniu stwierdzono, że słuchacze rozpoznawali pogłosy o nieliniowym zaniku szczególnie, gdy różnice występowały w późnej części próbki dźwiękowej. Autor sugeruje, że w odbiorze wrażeń akustycznych związanych z zanikami nieliniowymi istotne mogą być również inne czynniki jak np. binauralne parametry przestrzenne, a nie tylko sama charakterystyka pogłosu.

4.2.4 I. Frissen i in.

W artykule (Frissen i in., 2009) opisano wyniki trzech eksperymentów, które przeprowadzono, aby zbadać, jak ludzie postrzegają pogłos w dużych pomieszczeniach, zarówno o liniowym jak i nieliniowym zaniku energii. Głównym celem było określenie progów rozróżniania różnych typów pogłosu oraz ustalenie czy percepcja zależy od charakteru źródła

dźwięku i rodzaju przebiegu zaniku – liniowego lub nieliniowego. W pierwszym eksperymencie badano czułość słuchu na niewielkie różnice w czasie pogłosu w przypadku sztucznie wygenerowanych odpowiedzi impulsowych o liniowym zaniku. Ośmiu uczestników, w tym dwóch autorów, słuchało przez słuchawki próbek powstałych przez splot 170-ms szumu białego z odpowiedziami impulsowymi o czasie pogłosu od 1,48 do 2,21 s. Zadaniem uczestników było wskazanie, która z dwóch prezentowanych próbek miała więcej pogłosu. Procedura oparta była na metodzie stałych bodźców i wymuszonego wyboru (2AFC). Wartość JND wyniosła około 6%, co jest wynikiem nieznacznie wyższym niż ten, którą uzyskano we wcześniejszych eksperymentach na przykład przez Seraphim'a (1958). W drugim eksperymencie sprawdzano, czy charakter źródła dźwięku wpływa na zdolność rozróżniania pogłosu. Porównano próbki pogłosu z szumem oraz z bezechowym nagraniem mowy. W teście wzięło udział czterech uczestników z pierwszego eksperymentu. Stwierdzono, że próg rozróżniania dla próbek z głosem (9,8%) był niemal identyczny z tym dla próbek z szumem (9,1%), a różnica ta nie była istotna statystycznie. Oznacza to, że percepcja różnic w pogłosie jest zasadniczo niezależna od rodzaju sygnału dźwiękowego. Trzeci eksperyment dotyczył percepcji pogłosu o nieliniowym przebiegu, charakterystycznym dla pomieszczeń sprzężonych. Symulowano pogłosy złożone z dwóch nachyleń odpowiadających wczesnej (*RTearly*) i późnej (*RTlate*) energii i różnych punktach przecięcia linii wyznaczających te parametry. Przyjęto dwie strategie badawcze. W pierwszym scenariuszu jako punkt odniesienia wybrano pogłos o liniowym zaniku i o $RT=1,8$ s, a porównywane z nim były pogłosy nieliniowe, w których modyfikowano położenie punktu przecięcia i czas pogłosu późnej fazy (*RTlate*). W drugim scenariuszu za punkt odniesienia przyjęto pogłos nieliniowy, a porównywane były pogłosy o zaniku liniowym o różnym poziomie początkowym i czasie pogłosu dobranym tak, by wszystkie kończyły się na tym samym poziomie. Wyniki dla pierwszego scenariusza wskazały, że pogłos nieliniowy o późnym czasie pogłosu 2,9 s (z przecięciem przy 385 ms) był postrzegany jako różny od pogłosu liniowego z $RT=1,8$ s w 75% przypadków. Dla drugiego scenariusza ustalono, że pogłos nieliniowy z $RT_{early} = 1,0$ s i $RT_{late} = 1,8$ s był uznawany za równoważny percepcyjnie pogłosowi liniowemu o RT około 1,9 s. W przypadku niektórych uczestników wystąpiły trudności z dopasowaniem danych, co przypisano złożoności bodźców oraz trudności w sformułowaniu stabilnego kryterium percepcyjnego.

W podsumowaniu stwierdzono, że próg rozróżniania pogłosu w pomieszczeniach o jednolitym zaniku wynosi około 6%, niezależnie od rodzaju sygnału dźwiękowego.

W przypadku pogłosów nieliniowych trudniej było jednoznacznie określić granice rozróżniania i równoważności, co wskazuje na większą złożoność percepcji takich przebiegów.

4.2.5 D. Jeong i H. Joo (2013)

Celem badania było sprawdzenie jak słuchacze postrzegają pogłos w warunkach nieliniowego zaniku energii akustycznej w celu opracowania nowego parametru predykcyjnego właściwie odzwierciedlającego subiektywną percepcję pogłosu w takich warunkach. W eksperymencie wykorzystano 12 RIR-ów wygenerowanych za pomocą *CATT-Acoustics*. Wygenerowane RIR-y różniły się stopniem nieliniowości zaniku zależnym od chłonności pomieszczenia, sprzężonej objętości oraz powierzchni sprzężenia. W ankiecie wzięło udział 26 uczestników, muzyków i chórzystów z co najmniej 10 letnim wykształceniem muzycznym. Słuchacze wskazywali, która z prezentowanych próbek jest ich zdaniem bardziej pogłosowa. Odpowiedzi korelowano z trzema różnymi miarami zaniku energii akustycznej w trzech zakresach: T1 dla zakresu od -5dB do -15 dB, T2 od -15dB do -25 dB i T3 od -25dB do -35 dB. Z wykorzystaniem tych zakresów wyliczono pojedynczy parametr TN:

$$TN = \alpha T1 + \beta T2 + \gamma T3 \quad \text{Wzór 20}$$

gdzie współczynniki (α, β, γ) zostały dobrane na podstawie regresji wielokrotnej względem ocen subiektywnych. W badaniu uzyskano istotne statystycznie różnice dla wszystkich 12 odpowiedzi impulsowych. Największy wpływ na subiektywną ocenę miał parametr T1, czyli wczesna faza zaniku ($R^2=0,66$). Obliczony model regresji PR, czyli subiektywnie oceniany pogłos wyniósł:

$$PR = 0,959T1 + 0,266T2 + 0,07T3 - 3,688 \quad \text{Wzór 21}$$

Zaproponowany model miał wysoką zgodność z wynikami ($R^2=0,942$), a parametr TN okazał się być lepszym predyktorem niż klasyczne wskaźniki RT30 oraz EDT, dla których uzyskano odpowiednio $R^2=0,465$ i $R^2=0,382$. Zdaniem autorów zaproponowany wskaźnik TN wykazuje lepszą korelację z subiektywnym odczuciem pogłosu, przy czym szczególne znaczenie ma analiza wczesnej fazy zaniku (T1).

4.2.6 P. Luizard, B. F. G. Katz i C. Guastavino (2015a)

W eksperymencie Luizarda i współautorów (2015a) analizowano, jak doświadczeni słuchacze oceniają, czy dany pogłos (o liniowym bądź nieliniowym zaniku energii akustycznej) jest właściwy dla prezentowanego sygnału muzycznego. W badaniu wzięło udział 23 słuchaczy, będących muzykami lub realizatorami dźwięku. Oceniali oni cztery różne próbki, powstałe w wyniku splotu nagrań bezechowych z pięcioma różnymi pogłosami o identycznym

czasie trwania ($RT = 1,8$ s), lecz odmiennych kształtach zaniku, wynikających z różnych powierzchni sprzężenia pomiędzy pomieszczeniem a komorą pogłosową. Po odsłuchaniu próbek w laboratorium wyposażonym w przestrzenny system odtwarzania dźwięku w konfiguracji 6.1, słuchacze wypełniali ankiety, w których oceniali stopień dopasowania pogłosu do prezentowanego materiału muzycznego. Zdaniem słuchaczy, pogłosy o liniowym spadku były bardziej odpowiednie dla dużych składów orkiestrowych a pogłosy o nieliniowym zaniku lepiej pasują do muzyki solowej, chóralnej. W badaniu uzyskano bardzo niską, ale istotną statystycznie miarę zgodności pomiędzy uczestnikami (W. Kendall'a w zakresie od 0,05 do 0,2).

4.2.7 P. Luizard, B. F. G. Katz i C. Guastavino (2015b)

W artykule (Luizard i in. 2015b) opisano eksperyment, którego celem było określenie wartości JND w percepcji pogłosu o nieliniowym zaniku (związanego z przestrzeniami sprzężonymi) w zależności od wielkości powierzchni sprzężenia (Sc) między dwiema przestrzeniami. Sygnały testowe zostały przetworzone poprzez splot z syntetycznie wygenerowanymi odpowiedziami impulsowymi, których kształty odzwierciedlały zmienną powierzchnię sprzężenia sali z komorami pogłosowymi (od 1% do 10%). W dwóch eksperymentach wzięło udział 40 osób mających co najmniej dziesięcioletnie doświadczenie muzyczne lub w realizacji dźwięku. W wyniku eksperymentów dowiedziono, że percepcja pogłosu nieliniowego zależy od powierzchni sprzężenia, a minimalna słyszalna zmiana to 10% wartości aktualnej. Słuchacze wykazują znacznie większą wrażliwość na zmiany kształtu zaniku energii akustycznej w jego początkowej fazie niż w fazie późniejszej.

W artykule zasugerowano wykorzystanie nowych parametrów: DT1 (ang. *Decay Time 1*) i DT2 (ang. *Decay Time 2*) oraz BPT (ang. *Bending Point Time*) – czas wystąpienia punktu ugięcia kształtu IR, i BPL ang. (*Bending Point Level*) – poziom dźwięku w dB w momencie przejścia z DT1 do DT2 jako kolejnych atrybutów w ocenie długości pogłosu.

Warto zauważyć, że w obydwu wyżej opisanych pracach autorzy nie analizują wartości innych parametrów oceny akustyki oraz nie korelują wartości tych parametrów z subiektywną oceną słuchaczy.

4.2.8 D. Jeong i H. Joo (2017)

Celem badania (Jeong, Joo, 2017) było ustalenie, w jaki sposób słuchacze postrzegają pogłos o nieliniowym zaniku. Na podstawie wyników opisanych w swojej wcześniejszej pracy (D. Jeong i H. Joo, 2013) zaproponowali nowy parametr – ważony czas zaniku

(T_w równoważny T_N , opisany powyżej w rozdziale 4.2.6), który miałby lepiej przewidywać odczucia słuchowe związane z pogłosem. W pierwszym eksperymencie przeprowadzono test z wykorzystaniem bezechowych nagrań muzyki klasycznej splecionych z 12 różnymi RIR-ami wytworzonymi w programie *CATT-Acoustics* na bazie modelu sali z przestrzeniami sprzężonymi, które reprezentowały pogłos o nieliniowym zaniku. Zadaniem uczestników było wskazanie, która z dwóch próbek wydaje się być bardziej pogłosowa. W drugim eksperymencie zweryfikowano zaproponowany model z udziałem innej grupy słuchaczy oraz pięciu nowych odpowiedzi impulsowych. Trzeci eksperyment przeprowadzono, aby sprawdzić, czy rodzaj muzyki wpływa na percepcję pogłosowości. W badaniach wzięli udział zarówno muzycy, jak i osoby bez wykształcenia muzycznego. W pierwszym eksperymencie uczestniczyło 26 muzyków w wieku od 22 do 40 lat, wszyscy z co najmniej dziesięcioletnim doświadczeniem muzycznym. W drugim – 17 studentów inżynierii architektonicznej w wieku od 19 do 28 lat. W trzecim eksperymencie udział wzięło dziesięciu muzyków orkiestrowych. Wyniki wykazały, że postrzegana pogłosowość zależy w dużym stopniu od tempa zaniku dźwięku, zwłaszcza w początkowej fazie przebiegu – między poziomami -5 dB a -15 dB. Zaproponowany parametr T_w , oparty na ważeniu częściowych czasów zaniku, silnie korelował z subiektywnymi ocenami słuchaczy. W pierwszym eksperymencie współczynnik korelacji wynosił od 0,92 do 0,95, a po usunięciu jednej odstającej próbki osiągnął wartość 0,96. Dla muzyki orkiestrowej korelacja mieściła się w zakresie od 0,85 do 0,87. Dla porównania, klasyczne parametry akustyczne wykazywały niższe korelacje: RT_{30} około 0,72, EDT około 0,66, T_s około 0,83, a RT_{160} około 0,82.

Wnioski z badania potwierdziły, że parametr T_w lepiej od tradycyjnych wskaźników przewiduje subiektywne wrażenie pogłosowości. Szczególnie istotna okazała się wrażliwość słuchaczy na tempo zaniku w pierwszej fazie zaniku energii, co ma znaczenie zwłaszcza w przestrzeniach o złożonym, nieliniowym pogłosie. Wyniki te okazały się spójne niezależnie od rodzaju muzyki i doświadczenia słuchaczy, co sugeruje szeroką przydatność tego podejścia.

4.2.9 Podsumowanie badań dotyczących percepcji pogłosu w pomieszczeniach sprzężonych akustycznie

Percepcję pogłosu o nieliniowym zaniku analizowano dotychczas dwójako: na podstawie kształtu odpowiedzi impulsowej, wykorzystywanego do testowania nowych propozycji badawczych oraz na podstawie standardowych parametrów akustycznych wyznaczanych z tej odpowiedzi. W symulacjach pomieszczeń sprzężonych manipulowano wartościami nachyleń, tworząc wielozanikowe odpowiedzi impulsowe (nie zawsze odpowiadające rzeczywistym

systemom), lub modelowano przykładowe systemy z uwzględnieniem powierzchni sprzężenia. Tabela 20 zestawia wybrane badania eksperymentalne dotyczące percepcji pogłosu o nieliniowym zaniku, obejmując autorów, metody, liczbę uczestników i główne wnioski. Wszystkie opisane badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych.

W zestawieniu szczególnie nacisk położono na eksperymenty, w których analizowano wpływ zmiennych takich jak: kształt przebiegu zaniku, obecność punktów przełamania (ang. *bending point*), stopień nieliniowości, czy charakter źródła dźwięku. W wielu przypadkach autorzy proponują nowe parametry opisujące subiektywnie postrzeganą długość pogłosu, które ich zdaniem lepiej oddają percepcyjne różnice niż tradycyjne wskaźniki takie jak RT czy EDT. Tabela 20 ilustruje, że percepcja pogłosów nieliniowych jest złożona i wymaga zaawansowanych miar opartych na analizie struktury czasowej odpowiedzi impulsowej, zwłaszcza jej początkowej fazy.

Tabela 20: Podsumowanie badań nad pogłosami o nieliniowym zaniku.

Rok badania	Nazwiska badaczy	Metoda badawcza	Liczba uczestników	Najważniejsze wnioski
2003	D. Pickard	Porównanie par, test preferencji	8 + 8 + 16	Możliwe jest rozpoznanie pogłosu o nieliniowym zaniku dla punktu przejścia w zakresie 15-400 ms; brak wyraźnych preferencji;
2005	D. T. Bradley, L. M. Wang	symulacja + testy słuchowe	30	Percepcja zależna od objętości i otworu sprzężenia; <i>decay ratio</i> i Δ dB lepiej opisują nieliniowy pogłos niż klasyczne wskaźniki
2007	M. Ermann	porównania par pogłosów, test preferencji i wykrywalności	21 + 26	Możliwe jest rozpoznanie pogłosu o nieliniowym zaniku; brak wyraźnych preferencji; wpływ końcowego akordu; możliwe znaczenie parametrów przestrzennych
2009	I. Frissen i in.	3 eksperymenty: 2AFC, głos vs szum, nieliniowe RIR	8, 4, 16	JND dla RT ok. 6%; percepcja nieliniowych pogłosów trudniejsza; punkt przecięcia wpływa na rozróżnialność
2013	D. Jeong, H. Joo	ankieta + korelacja z $TN = (T1+T2+T3)$	26	Parametr T1 najważniejszy ($R^2=0,66$); TN lepszy niż RT30 i EDT; model PR z $R^2=0,942$
2015	P. Luizard i in. (2015a)	ocena dopasowania pogłosu do muzyki, ankieta	23	Liniowy pogłos lepszy dla orkiestr, nieliniowy dla solistów/chórów; niska, ale istotna zgodność ocen (Kendall's W = 0,05–0,2)
2015	P. Luizard i in. (2015b)	ocena różnic pogłosów o nieliniowym zaniku	40	Minimalna słyszalna zmiana wynosi 10% powierzchni sprzężenia; nowa propozycja wskaźników DT1, DT2, BPT, BPL
2017	D. Jeong, H. Joo	3 eksperymenty: dopasowanie, weryfikacja, wpływ muzyki	26, 17, 10	Tw lepiej niż klasyczne wskaźniki odwzorowuje pogłosowość ($R^2\sim 0,95$); decydująca wczesna faza zaniku

4.2.10 Ogólne uwagi do stanu badań nad percepcją pogłosu

Na podstawie dotychczas przeprowadzonych eksperymentów wciąż nie można jednoznacznie stwierdzić, jaka jest korelacja pomiędzy czasem pogłosu a subiektywnie odczuwaną pogłosowością czy długością pogłosu ani czy istnieje pojedyncza miara jednoznacznie opisująca relacje między pomiarami i odczuciami słuchaczy.

W niektórych eksperymentach uczestniczyła zaskakująco niewielka liczba słuchaczy, a w żadnym z opisanych testów nie podano informacji, czy liczebność próby była wystarczająca do uzyskania wyników o odpowiedniej wiarygodności statystycznej.

Wszystkie eksperymenty porównawcze prowadzone w salach koncertowych siłą rzeczy odbywają się w pewnych odstępach czasu, są więc obciążone wadą krótkiej pamięci akustycznej słuchaczy. Pamięć akustyczna zaliczana jest do ultrakrótkiej pamięci sensorycznej, która w przypadku bodźców słuchowych trwa zwykle nie dłużej niż kilka sekund. W przypadku oceny w eksperymentach porównawczych (np. przy dosłuchiwaniu różnych nagrań), kluczową rolę odgrywa pamięć robocza. Szacuje się, że subiektywne wrażenie może utrzymywać się przez kilkanaście – maksymalnie do około 20–30 sekund – i to pod warunkiem, że nie ma rozpraszających bodźców między próbami (Zahorik, Wightman, 2001).

W przypadku badań Barrona (1998) zadziwia fakt pominięcia w analizie statystycznej wyników jednej z sal koncertowych jedynie dlatego, że znacząco odbiegały od pozostałych i obniżały wartość współczynnika korelacji między oceną subiektywną a EDT, co znacząco wpłynęło na wynik eksperymentu, na który powołuje się wielu kolejnych autorów. Barron podaje dwie możliwe przyczyny, dla których wyniki dla jednej sali odbiegały od pozostałych. Jednym z powodów jest to, że słuchacze mogli ocenić pogłosowość tej sali niżej z powodu innych subiektywnych niedociągnięć, np. niskiej głośności czy słabej przestrzenności, co obniżyło ich ogólne postrzeganie pogłosowości. Drugim podanym przez Barrona powodem może być zmienność parametrów akustycznych w tej sali. Parametry pogłosowe zależą od zmiany chłonności akustycznej, co może oznaczać, że zarówno wartości RT jak i EDT dla pełnej widowni (czyli w czasie koncertu) były niższe niż zmierzono w pustej sali. Badania dotyczące sal pustych oraz z udziałem widowni wskazują na możliwość wystąpienia znacznych różnic wartości parametrów. Według Beranka (2004), czas pogłosu w sali pełnej może być krótszy nawet o 0,2–0,6 sekundy w porównaniu do sali pustej, w zależności od liczby i rodzaju foteli. Co istotne, zmiana ta nie jest równomierna w całym paśmie – największy spadek czasu pogłosu występuje w zakresie częstotliwości średnich (około 500 Hz) i wysokich (od 1000 Hz do 4000 Hz). Także wartość EDT ulega skróceniu po zapelnieniu sali i zmiany te bywają

jeszcze bardziej wyraźne niż w przypadku RT. Na przykład w *Boston Symphony Hall* – jednej z najlepiej udokumentowanych sal w pracach Beranka – różnica w czasie pogłosu między salą pustą a zapelnioną wyniosła około 0,4 sekundy, natomiast różnica w EDT sięgnęła aż 0,6 sekundy, w obu przypadkach zmiana wartości kilkukrotnie przekracza próg JND.

Różnice między wartościami parametrów akustycznych mierzonymi w salach pustych a tymi uzyskiwanymi w obecności publiczności stanowią istotne ograniczenie wszystkich eksperymentów, w których testy odsłuchowe prowadzono podczas koncertów, natomiast pomiary wykonano bez udziału widowni. Ograniczenie to dotyczy w praktyce wszystkich badań omawianych w niniejszym rozdziale, odnoszących się do sal koncertowych.

Eksperymenty, w których wykorzystano nagrania zarejestrowane przy użyciu sztucznej głowy, a następnie odtwarzane w systemie stereofonicznym, również budzą pewne wątpliwości. Przede wszystkim, pole akustyczne generowane przez głośniki wchodzi w interakcję z akustyką tego pomieszczenia – do uszu słuchacza dociera zarówno dźwięk bezpośrednio jak i odbicia, które nie były częścią pierwotnego nagrania. Geometryczna pozycja słuchacza względem głośników musi być bardzo dokładnie kontrolowana – minimalne przesunięcia głowy mogą prowadzić do poważnych zmian w obrazie przestrzennym, a także zniekształcać relacje międzyuszne, ponieważ nie jest zachowana właściwa separacja pomiędzy kanałami (Hartmann & Wittenberg, 1996). W przypadku odsłuchu głośnikowego przestrzeń akustyczna reprezentowana jest tylko z obszaru, w którym znajdują się głośniki, co oznacza, że kierunki wczesnych odbić, tak istotne dla percepcji pogłosu, nie są odtwarzane zgodnie z ich rzeczywistym rozmieszczeniem przestrzennym podczas rejestracji. W praktyce oznacza to, że odsłuch z wykorzystaniem głośników nie oddaje wiernie przestrzenności sygnału zapisanego przez sztuczną głowę, chyba że zastosowane zostaną zaawansowane techniki rekonstrukcji pola akustycznego, takie jak ambisonia czy systemy wielokanałowe z korekcją HRTF (ang. *Head Related Transfer Function*), co jednak znacznie komplikuje procedurę odsłuchu.

Kolejnym problemem przy użyciu głośników jest to, że w czasie odsłuchu słuchacz używa własnych filtrów HRTF (ang. *Head Related Transfer Function*), a nie tych, które były związane z nagraniem przez sztuczną głowę – co prowadzi do tzw. podwójnego filtrowania, które może zaburzać obraz przestrzenny, szczególnie w ocenie bliskości dźwięku (Kulkarni, Colburn, 1998).

W badaniu (Soulodre, Bradley, 1995) w czasie odsłuchu zadbano o właściwą separację sygnałów, ale wciąż wykonane nagrania obarczone są filtrem HRTF układu nagrywającego, co musiało prowadzić do podwójnej filtracji w czasie odsłuchów.

Do czasu eksperymentów bezpośrednio dotyczących zaników o nieliniowym charakterze, zazwyczaj nie podano wartości parametrów, w tym czasu pogłosu dla próbek, które wykorzystano w eksperymentach. Wyjątkiem jest badanie (Kotchy i in. 1974). Nie wiadomo więc, czy badano zaniki liniowe, czy nieliniowe. Jest to niezwykle istotne, gdyż wyniki badań nad zanikami nieliniowymi dodatkowo komplikują korelację wrażeń subiektywnych i pomiarów obiektywnych.

Należy podkreślić, że wszystkie opisane badania dotyczące nieliniowych zaników opierają się wyłącznie na symulacjach przeprowadzonych w programach do modelowania warunków akustycznych. Dotychczasowe prace nie obejmują eksperymentów wykorzystujących próbki lub odpowiedzi impulsowe (RIR) zarejestrowane w salach koncertowych, w których występują nieliniowe zaniki energii akustycznej. Z uwagi na braki w literaturze autor niniejszej pracy przeprowadził własne badania, których wyniki zostaną przedstawione w Części C.

5 Analiza wartości parametrów akustycznych sal koncertowych analizowanych przez Beranka (2004) w kontekście kształtu zaniku energii akustycznej.

W związku ze stwierdzeniem częstego występowania nieliniowego zaniku energii w salach o regulowanej akustyce, zarówno dla działających RES jak i wykorzystywanych rozwiązań pasywnych (Błasiński, 2022; Błasiński, 2025), przeanalizowano dane literaturowe w celu konfrontacji otrzymanych wyników i weryfikacji jak często zjawisko to występuje w innych salach koncertowych. W tym celu wykorzystano największy opublikowany zbiór danych pomiarowych dotyczących sal koncertowych jaki opublikowano w historii akustyki pomieszczeń- książkę autorstwa L.L. Beranka (Beranek, 2004) uznając, że przedstawione w niej wyniki pomiarów 100 obiektów są reprezentatywne. Publikacja ta zawiera wyniki pomiarów przeprowadzonych przez różne zespoły badawcze, w różnych okresach czasu i dla odmiennych kondycji pomiarowych. Wszystkie dane omawiane w niniejszym rozdziale pochodzą wyłącznie z tej publikacji. W kontekście opisanych w niniejszej dysertacji wyników pomiarowych analiza opublikowanych przez Beranka danych umożliwiającą ocenę, czy średnie wartości parametrów EDT i RT wskazują na liniowy, czy nieliniowy przebieg zaniku energii akustycznej oraz jaki wpływ na tę liniowość ma obecność publiczności jest istotna z punktu widzenia konstrukcji eksperymentów opisanych w Części C niniejszej pracy, a które dotyczą przede wszystkim percepcji pogłosu i różnym charakterze zaniku. W związku z tym spośród opublikowanych przez Beranka wyników, do szczegółowej analizy wybrano te, które umożliwiają określenie liniowości zaniku oraz wpływu obecności widzów na zmianę wartości parametrów akustycznych. Uwzględniono zatem wyniki pomiarów parametrów EDT i RT20 wykonane z udziałem publiczności jak i bez niej.

Ze względu na różnorodność zakresu danych w poszczególnych przypadkach (dla niektórych obiektów Beranek (2004) podaje np. tylko wartości RT20 zmierzone bez udziału widowni a dla innych podaje wartości zarówno EDT jak i RT20 zmierzone zarówno bez publiczności jak i z jej udziałem), w niniejszej analizie dane ze wspomnianej publikacji podzielono na zestawy odpowiadające określonym warunkom pomiarowym, umożliwiającym analizę liniowości zaniku oraz wpływu obecności widowni na wartości parametrów EDT i RT20. Uwzględniono wyłącznie te przypadki, w których pomiary zostały przeprowadzone przez ten sam zespół badawczy, w ramach jednej sesji pomiarowej, aby zminimalizować różnice metodyczne wynikające z faktu wykonywania pomiarów przez różne grupy badawcze w różnym okresie.

Tabela 21 przedstawia pięć zestawów pomiarowych, zróżnicowanych pod względem kombinacji dostępnych danych.

Tabela 21: Liczba sal koncertowych z opublikowanymi wartościami RT20 i EDT w różnych warunkach pomiarowych, na podstawie (Beranek, 2004).

Numer zestawu	Warunki pomiarowe uwzględnione w zestawie				Liczba sal spełniających warunki pomiarowe
1	RT20 bez widowni	RT20 z widownią			52
2	RT20 bez widowni		EDT bez widowni		81
3	RT20 bez widowni			EDT z widownią	16
4	RT20 bez widowni	RT20 z widownią	EDT bez widowni		25
5	RT20 bez widowni	RT20 z widownią	EDT bez widowni	EDT z widownią	15

W zestawie 1 ujęto 52 sale, w których dostępne są dane RT20 zarówno bez widowni, jak i z jej udziałem, co umożliwia analizę wpływu obecności publiczności na długość pogłosu wyrażoną tym parametrem. Zestaw 2 jest najliczniejszy, obejmuje 81 sal, dla których opublikowano wartości RT20 i EDT zmierzone bez udziału publiczności. Zestaw 3 obejmuje 16 sal z pomiarami RT20 bez publiczności oraz EDT z publicznością, natomiast zestaw 4 obejmuje 25 sal, w których dostępne są wartości RT20 (z i bez widowni) oraz EDT bez widowni. Najbardziej kompletny pod względem danych jest zestaw 5, który obejmuje 15 sal z pełnym zestawem pomiarów RT20 i EDT wykonanych zarówno z publicznością, jak i bez niej. Takie uporządkowanie danych umożliwia przeprowadzenie analizy liniowości zaniku energii akustycznej oraz oceny wpływu obecności widzów na wartości parametrów EDT i RT20. Należy zaznaczyć, że niektóre sale występują w różnych zestawach – na przykład wszystkie sale z zestawu 5 zawierają się w zestawie 1. Dlatego suma sal przedstawionych w Tabeli 21 przekracza faktyczną liczbę unikalnych scenariuszy pomiarowych.

5.1.1 Wpływ obecności widowni na wartości RT20 – analiza danych zestawu 1

W Tabeli 22, opracowanej na podstawie danych Beranka (2004) przedstawiono średnie wartości RT20 zmierzone bez udziału widowni i z jej udziałem, a także zmiany wartości RT20 wynikające z obecności publiczności. W nawiasach podano wartość SD dla poszczególnych wyników.

Tabela 22: Zestaw pomiarowy 1, zmiana wartości RT20 bez udziału widowni i z widownią. Na podstawie Beranka (2004).

Numer sali	RT20 [s] bez widowni (SD)	RT20 [s] z widownią (SD)	Zmiana wartości RT [s]	Numer sali	RT20 [s] bez widowni (SD)	RT20 [s] z widownią (SD)	Zmiana wartości RT [s]
1	1,86 (0,10)	1,58 (0,10)	0,28	27	2,16 (0,13)	1,96 (0,19)	0,20
2	1,78 (0,12)	1,66 (0,09)	0,12	28	2,02 (0,15)	1,74 (0,13)	0,28
3	2,11 (0,31)	1,67 (0,32)	0,44	29	1,73 (0,31)	1,48 (0,15)	0,25
4	2,58 (0,56)	2,35 (0,35)	0,23	30	1,58 (0,23)	1,35 (0,19)	0,23
5	1,97 (0,39)	1,57 (0,22)	0,40	31	1,75 (0,31)	1,55 (0,34)	0,20
6	2,51 (0,07)	2,15 (0,10)	0,36	32	2,08 (0,19)	1,50 (0,14)	0,58
7	2,68 (0,64)	2,01 (0,48)	0,67	33	2,71 (0,36)	1,98 (0,20)	0,73
8	2,31 (0,50)	1,86 (0,35)	0,45	34	2,08 (0,60)	1,70 (0,35)	0,38
9	1,64 (0,15)	1,36 (0,13)	0,28	35	1,99 (0,32)	1,28 (0,35)	0,71
10	2,50 (0,39)	2,07 (0,30)	0,43	36	2,22 (0,41)	1,98 (0,23)	0,24
11	1,68 (0,10)	1,52 (0,16)	0,16	37	2,53 (0,35)	1,95 (0,24)	0,58
12	2,10 (0,27)	1,91 (0,27)	0,19	38	2,23 (0,09)	1,89 (0,12)	0,34
13	2,13 (0,08)	1,72 (0,12)	0,41	39	2,43 (0,17)	1,99 (0,16)	0,44
14	1,72 (0,10)	1,49 (0,11)	0,23	40	1,98 (0,13)	1,52 (0,20)	0,46
15	2,66 (0,29)	1,92 (0,15)	0,74	41	1,57 (0,12)	1,50 (0,14)	0,07
16	2,03 (0,29)	1,76 (0,27)	0,27	42	2,23 (0,31)	1,81 (0,25)	0,42
17	2,97 (0,51)	2,08 (0,12)	0,89	43	2,01 (0,19)	1,93 (0,13)	0,08
18	2,84 (0,47)	2,87 (0,48)	-0,03	44	2,27 (0,13)	1,88 (0,34)	0,39
19	2,45 (0,17)	1,93 (0,16)	0,52	45	2,25 (0,15)	1,90 (0,07)	0,35
20	2,62 (0,44)	2,51 (0,54)	0,11	46	1,88 (0,33)	1,69 (0,30)	0,19
21	3,38 (0,80)	2,03 (0,60)	1,35	47	2,14 (0,39)	2,03 (0,32)	0,11
22	2,95 (0,07)	2,39 (0,34)	0,56	48	2,23 (0,49)	1,53 (0,32)	0,70
23	2,08 (0,21)	1,88 (0,23)	0,20	49	2,26 (0,35)	2,02 (0,36)	0,24
24	2,15 (0,28)	1,96 (0,25)	0,19	50	2,02 (0,14)	1,65 (0,13)	0,37
25	1,71 (0,42)	1,78 (0,32)	-0,07	51	1,68 (0,09)	1,51 (0,13)	0,17
26	1,81 (0,16)	1,49 (0,10)	0,32	52	1,60 (0,26)	1,38 (0,19)	0,22

Na podstawie danych zawartych w Tabeli 22 można zauważyć wyraźną tendencję do skrócenia czasu pogłosu po wprowadzeniu publiczności do sali. W zdecydowanej większości przypadków obecność widzów prowadziła do zmniejszenia wartości RT20. Spośród 52 sal, w 49 odnotowano spadek wartości RT20, w przypadku 38 z 52 sal wartość RT20 zmierzona z obecnością widowni zmniejszyła się przynajmniej o 10 % w porównaniu do wartości zmierzonej bez widowni, a dla ponad połowy sal (27 przypadków) spadek wartości RT20 wyniósł co najmniej 15 %. W dwóch przypadkach (sale nr 18 i 25) nastąpił nieznaczny wzrost RT20 odpowiednio o 0,03 s i 0,07 s, jednak jest on zaniedbywalny ze względu na niepewność pomiarową (wartości SD dla tych pomiarów są dla tych pomiarów są co najmniej pięciokrotnie

większe niż zaobserwowane różnice). Średnia zmiana wartości dla wszystkich sal RT20 wyniosła 0,36 s (SD = 0,25).

Podsumowując, w kontekście wyników niniejszej dysertacji należy stwierdzić, że obecność widowni w sali znacząco zmienia długość czasu pogłosu wyrażonego jako RT20. W ponad połowie przypadków różnica ta byłaby zauważalna przez słuchaczy w związku z przekroczeniem górnego progu JND dla postrzegania długości RT.

5.1.2 Wartości RT20 i EDT bez obecności widowni – analiza danych zestawu 2

W Tabeli 23 pokazano wyniki opracowane na podstawie pracy Beranka (2004) dla drugiego zestawu pomiarowego zawierającego wartości RT20 i EDT zmierzone w salach bez obecności widowni. Z punktu widzenia wyników opisanych przez autora niniejszej pracy doktorskiej zestaw ten pozwala na analizę liniowości zaników energii akustycznej w tych pomieszczeniach. Porównanie wartości RT20 i EDT pozwala (przy konsekwentnym stosowaniu kryterium JND przyjętym w niniejszej dysertacji pracy) na ustalenie, w ilu salach zestawionych w publikacji Beranka (2004) stwierdzić można nieliniowy zanik energii akustycznej.

Tabela 23: Zestaw pomiarowy 2, wartości RT20 i EDT bez udziału widowni. Opracowano na podstawie Beranka (2004).

Numer sali	RT20 [s] bez widowni (SD)	EDT [s] bez widowni (SD)	Różnica RT20 i EDT [s]	Numer sali	RT20 [s] bez widowni (SD)	EDT [s] bez widowni (SD)	Różnica RT20 i EDT [s]
1	1,86 (0,10)	1,81 (0,07)	0,05	42	1,90 (0,40)	1,89 (0,45)	0,01
2	1,78 (0,12)	1,71 (0,11)	0,07	43	2,06 (0,31)	1,80 (0,37)	0,26
3	2,11 (0,31)	2,17 (0,32)	-0,06	44	1,91 (0,16)	1,88 (0,21)	0,03
4	2,58 (0,56)	2,43 (0,50)	0,15	45	2,18 (0,21)	2,20 (0,26)	-0,02
5	1,97 (0,39)	1,97 (0,36)	0,00	46	2,45 (0,33)	1,88 (0,31)	0,57
6	2,51 (0,07)	2,19 (0,06)	0,32	47	2,20 (0,25)	2,14 (0,22)	0,06
7	2,68 (0,64)	2,52 (0,51)	0,16	48	1,51 (0,10)	1,34 (0,10)	0,17
8	2,31 (0,50)	2,14 (0,44)	0,17	49	1,31 (0,29)	1,20 (0,14)	0,11
9	1,64 (0,15)	1,65 (0,15)	-0,01	50	1,21 (0,17)	1,17 (0,17)	0,04
10	2,50 (0,39)	2,48 (0,43)	0,02	51	2,46 (0,35)	2,41 (0,37)	0,05
11	1,68 (0,10)	1,56 (0,19)	0,12	52	1,96 (0,25)	1,80 (0,29)	0,16
12	2,10 (0,27)	1,85 (0,20)	0,25	53	2,10 (0,14)	2,02 (0,12)	0,08
13	2,13 (0,08)	2,00 (0,19)	0,13	54	2,13 (0,14)	2,09 (0,19)	0,04
14	1,72 (0,10)	1,63 (0,11)	0,09	55	2,18 (0,16)	2,11 (0,17)	0,07
15	2,66 (0,29)	2,51 (0,31)	0,15	56	1,97 (0,19)	1,93 (0,26)	0,04
16	2,03 (0,29)	1,95 (0,32)	0,08	57	1,95 (0,17)	1,93 (0,26)	0,02
17	2,97 (0,51)	2,79 (0,38)	0,18	58	1,40 (0,25)	1,21 (0,14)	0,19
18	2,84 (0,47)	1,87 (0,16)	0,97	59	1,44 (0,45)	1,23 (0,18)	0,21
19	2,45 (0,17)	2,27 (0,27)	0,18	60	2,18 (0,15)	2,03 (0,19)	0,15

20	3,38 (0,80)	3,22 (0,76)	0,16	61	2,10 (0,13)	1,92 (0,18)	0,18
21	2,95 (0,07)	2,60 (0,06)	0,35	62	2,52 (0,24)	2,50 (0,28)	0,02
22	2,08 (0,21)	1,82 (0,19)	0,26	63	2,53 (0,10)	2,33 (0,24)	0,20
23	2,15 (0,28)	2,04 (0,32)	0,11	64	2,49 (0,23)	2,44 (0,24)	0,05
24	1,71 (0,42)	1,74 (0,42)	-0,03	65	2,39 (0,23)	2,38 (0,24)	0,01
25	1,81 (0,16)	1,58 (0,13)	0,23	66	2,40 (0,23)	2,58 (0,26)	-0,18
26	3,30 (0,75)	3,09 (0,67)	0,21	67	2,15 (0,21)	2,13 (0,27)	0,02
27	1,28 (0,16)	1,13 (0,13)	0,15	68	2,29 (0,24)	1,84 (0,21)	0,45
28	1,32 (0,12)	1,20 (0,06)	0,12	69	2,13 (0,38)	1,60 (0,19)	0,53
29	1,95 (0,13)	1,97 (0,14)	-0,02	70	2,01 (0,24)	1,84 (0,29)	0,17
30	2,19 (0,34)	2,10 (0,49)	0,09	71	1,83 (0,28)	1,82 (0,29)	0,01
31	1,85 (0,32)	1,65 (0,36)	0,20	72	2,38 (0,33)	2,25 (0,30)	0,13
32	1,85 (0,18)	1,81 (0,19)	0,04	73	3,04 (0,59)	3,03 (0,65)	0,01
33	1,77 (0,16)	1,72 (0,18)	0,05	74	2,47 (0,17)	2,37 (0,16)	0,10
34	2,88 (0,45)	2,94 (0,48)	-0,06	75	2,03 (0,13)	2,08 (0,10)	-0,05
35	2,85 (0,40)	2,80 (0,41)	0,05	76	2,48 (0,20)	2,20 (0,17)	0,28
36	2,81 (0,32)	2,82 (0,34)	-0,01	77	2,37 (0,18)	2,26 (0,22)	0,11
37	1,54 (0,19)	1,38 (0,17)	0,16	78	1,89 (0,40)	1,51 (0,35)	0,38
38	1,50 (0,13)	1,35 (0,13)	0,15	79	1,87 (0,35)	1,58 (0,35)	0,29
39	1,56 (0,22)	1,47 (0,32)	0,09	80	1,43 (0,25)	1,20 (0,16)	0,23
40	1,80 (0,25)	1,69 (0,50)	0,11	81	2,00 (0,30)	2,08 (0,36)	-0,08
41	2,02 (0,13)	1,20 (0,47)	0,82				

Dla 21 z 81 sal (26 %), wartość EDT jest przynajmniej o 10 % mniejsza niż wartość RT20, można więc uznać, że różnica ta jest zauważalna i w tych salach obserwuje się nieliniowy zanik energii. Dla 10 sal wartość EDT jest większa niż wartość RT20, jednakże wartości SD dla tych pomiarów są większe niż zaobserwowane różnice co wskazuje to, że zmiany te mieszczą się w granicach błędu pomiarowego i nie należy ich uznać za istotne akustycznie.

Podsumowując, zjawisko nieliniowego zaniku energii w salach koncertowych opisanych przez Beranka, a więc salach bez aktywnej lub pasywnej regulacji akustyki występuje w 26% przypadków i nie jest dominujące, choć nie można go uznać za marginalne, jego obecność jest istotna z punktu widzenia oceny akustyki sal.

5.1.3 Wartości RT20 bez widowni i EDT z widownią – analiza danych zestawu 3

W Tabeli 24 pokazano wyniki dla 3 zestawu danych zestawionych przez Beranka (2004) zawierającego wyniki pomiarów dla sal, w których zmierzono wartości RT20 bez widowni i EDT z widownią).

Tabela 24: Zestaw pomiarowy 3, wartości RT20 bez widowni i EDT z udziałem widowni. Opracowano na podstawie Beranka (2004).

Numer Sali	RT20 [s] bez widowni (SD)	EDT [s] z widownią (SD)	Różnica RT20 i EDT [s]
1	1,86 (0,10)	1,49 (0,07)	0,37
2	1,78 (0,12)	1,62 (0,10)	0,16
3	2,11 (0,31)	1,46 (0,22)	0,65
4	2,58 (0,56)	2,08 (0,52)	0,50
5	1,97 (0,39)	1,60 (0,24)	0,37
6	2,51 (0,07)	2,08 (0,07)	0,43
7	2,68 (0,64)	2,04 (0,32)	0,64
8	2,31 (0,50)	1,88 (0,26)	0,43
9	1,64 (0,15)	1,44 (0,14)	0,20
10	2,50 (0,39)	2,06 (0,27)	0,44
11	1,68 (0,10)	1,31 (0,20)	0,37
12	2,10 (0,27)	1,80 (0,20)	0,30
13	2,13 (0,08)	1,59 (0,19)	0,54
14	1,72 (0,10)	1,33 (0,17)	0,39
15	2,66 (0,29)	1,74 (0,12)	0,92
16	2,62 (0,44)	2,26 (0,53)	0,36

W związku z tym, iż obecność widowni wpływa na zmianę wartości parametrów RT20 (co wykazano w Rozdziale 5.5.1) oraz EDT (Beranek, 1999), niewłaściwe byłoby bezpośrednie porównywanie tych wyników. Z analizy wyników dla zestawu pomiarowego numer 1 (Rozdział 5.5.1 niniejszej pracy) wynika, że średnia zmiana wartości RT20 dla sal bez i z widownią wynosi 0,36 s (SD = 0,25), dla średniej wartości RT20 wynoszącej 2,17 s (SD = 0,4). Przy założeniu, że dla sal z zestawu 3 zależność jest analogiczna. Potwierdza to fakt, że w zestawie 3 uzyskano średnią wartość RT20 wynoszącą 2,18 s (SD = 0,37) i w związku z tym uznać należy, że w 4 salach energia akustyczna przyjmuje nieliniowy kształt zaniku (różnica wartości RT20 i EDT jest większa niż JND), co stanowi 25% sal.

Podsumowując, wyniki uzyskane dla zestawu 3 wskazują, że zjawisko nieliniowego zaniku energii w salach koncertowych występuje w 25 % przypadków. Wyniki te są zgodne z wynikami uzyskanymi dla zestawu 2 (Rozdział 5.5.2), dla którego także uzyskano 25 % nieliniowych zaników.

5.1.4 Wartości RT20 i EDT bez widowni oraz RT20 z widownią – analiza danych zestawu 4

W Tabeli 25 pokazano wyniki dla 4 zestawu pomiarowego opracowanego na podstawie Beranka (2004), a więc wyniki pomiarów dla sal, w których zmierzono wartości RT20 i EDT bez widowni oraz RT20 z widownią.

Tabela 25: Zestaw pomiarowy 4, wartości RT20 bez widowni i z widownią, różnica wartości pomiędzy nimi oraz wartości EDT bez widowni. Opracowano na podstawie Beranka (2004).

Numer sali	RT20 [s] bez widowni (SD)	RT20 [s] z widownią (SD)	EDT [s] bez widowni (SD)	Różnica RT20 z widownią i bez [s]	Różnica RT20 i EDT bez widowni [s]
1	1,86 (0,10)	1,58 (0,10)	1,81 (0,07)	0,28	0,05
2	1,78 (0,12)	1,66 (0,09)	1,71 (0,11)	0,12	0,07
3	2,11 (0,31)	1,67 (0,32)	2,17 (0,32)	0,44	-0,06
4	2,58 (0,56)	2,35 (0,35)	2,43 (0,50)	0,23	0,15
5	1,97 (0,39)	1,57 (0,22)	1,97 (0,36)	0,40	0,00
6	2,51 (0,07)	2,15 (0,10)	2,19 (0,06)	0,36	0,32
7	2,68 (0,64)	2,01 (0,48)	2,52 (0,51)	0,67	0,16
8	2,31 (0,50)	1,86 (0,35)	2,14 (0,44)	0,45	0,17
9	1,64 (0,15)	1,36 (0,13)	1,65 (0,15)	0,28	-0,01
10	2,50 (0,39)	2,07 (0,30)	2,48 (0,43)	0,43	0,02
11	1,68 (0,10)	1,52 (0,16)	1,56 (0,19)	0,16	0,12
12	2,10 (0,27)	1,91 (0,27)	1,85 (0,20)	0,19	0,25
13	2,13 (0,08)	1,72 (0,12)	2,00 (0,19)	0,41	0,13
14	1,72 (0,10)	1,49 (0,11)	1,63 (0,11)	0,23	0,09
15	2,66 (0,29)	1,92 (0,15)	2,51 (0,31)	0,74	0,15
16	2,03 (0,29)	1,76 (0,27)	1,95 (0,32)	0,27	0,08
17	2,97 (0,51)	2,08 (0,12)	2,79 (0,38)	0,89	0,18
18	2,84 (0,47)	2,87 (0,48)	1,87 (0,16)	-0,03	0,97
19	2,45 (0,17)	1,93 (0,16)	2,27 (0,27)	0,52	0,18
20	3,38 (0,80)	2,03 (0,60)	3,22 (0,76)	1,35	0,16
21	2,95 (0,07)	2,39 (0,34)	2,60 (0,06)	0,56	0,35
22	2,08 (0,21)	1,88 (0,23)	1,82 (0,19)	0,20	0,26
23	2,15 (0,28)	1,96 (0,25)	2,04 (0,32)	0,19	0,11
24	1,71 (0,42)	1,78 (0,32)	1,74 (0,42)	-0,07	-0,03
25	1,81 (0,16)	1,49 (0,10)	1,58 (0,13)	0,32	0,23

Dla 6 spośród 25 sal (24%) można stwierdzić, że wartość EDT jest mniejsza od RT20 przynajmniej o wartość górnego progu JND, co pozwala wnioskować, że w salach tych występuje nieliniowy zanik energii akustycznej. Średnia zmiana wartości RT20 dla pomiarów sal zestawu 4 wykonanych z udziałem publiczności i bez niej to 0,38 s (SD = 0,3), przy średniej wartości RT20 = 2,26 (SD = 0,47). Są to wartości zbliżone do uzyskanych dla zestawu 1 (Rozdział 5.5.1).

Podsumowując, wyniki uzyskane dla zestawu 4 są zbliżone do wyników przedstawionych w rozdziałach 5.5.1–5.5.3 niniejszej pracy i także znacząco podbudowują istotność opisanych w niej badań. Zarówno odsetek sal, w których występuje nieliniowy zanik energii akustycznej, jak i średnia zmiana wartości parametru RT20, były w zestawie 4 bardzo zbliżone do tych obserwowanych w pozostałych zestawach.

5.1.5 Wartości RT20 i EDT bez widowni oraz z widownią – analiza danych zestawu 5

W Tabeli 26 pokazano wyniki dla 5 zestawu pomiarowego opracowanego na podstawie Beranka (2004), a więc wyniki pomiarów dla sal, w których zmierzono wartości RT20 i EDT bez widowni i z widownią.

Tabela 26: Zestaw pomiarowy 5, wartości RT20 oraz EDT bez widowni i z widownią, różnica wartości pomiędzy poszczególnymi parametrami. Opracowano na podstawie Beranka (2004).

Nr sali	RT20 [s] bez widowni (SD)	RT20 [s] z widownią (SD)	EDT [s] bez widowni (SD)	EDT [s] z widownią (SD)	Różnica RT20 z widownią i bez widowni [s]	Różnica EDT z widownią i bez widowni [s]	Różnica RT20 i EDT bez widowni [s]	Różnica RT20 i EDT z widownią [s]
1	1,86 (0,10)	1,58 (0,10)	1,81 (0,07)	1,49 (0,07)	0,28	0,32	0,05	0,09
2	1,78 (0,12)	1,66 (0,09)	1,71 (0,11)	1,62 (0,10)	0,12	0,09	0,07	0,04
3	2,11 (0,31)	1,67 (0,32)	2,17 (0,32)	1,46 (0,22)	0,44	0,71	-0,06	0,21
4	2,58 (0,56)	2,35 (0,35)	2,43 (0,50)	2,08 (0,52)	0,23	0,35	0,15	0,27
5	1,97 (0,39)	1,57 (0,22)	1,97 (0,36)	1,60 (0,24)	0,40	0,37	0,00	-0,03
6	2,51 (0,07)	2,15 (0,10)	2,19 (0,06)	2,08 (0,07)	0,36	0,11	0,32	0,07
7	2,68 (0,64)	2,01 (0,48)	2,52 (0,51)	2,04 (0,32)	0,67	0,48	0,16	-0,03
8	2,31 (0,50)	1,86 (0,35)	2,14 (0,44)	1,88 (0,26)	0,45	0,26	0,17	-0,02
9	1,64 (0,15)	1,36 (0,13)	1,65 (0,15)	1,44 (0,14)	0,28	0,21	-0,01	-0,08
10	2,50 (0,39)	2,07 (0,30)	2,48 (0,43)	2,06 (0,27)	0,43	0,42	0,02	0,01
11	1,68 (0,10)	1,52 (0,16)	1,56 (0,19)	1,31 (0,20)	0,16	0,25	0,12	0,21
12	2,10 (0,27)	1,91 (0,27)	1,85 (0,20)	1,80 (0,20)	0,19	0,05	0,25	0,11
13	2,13 (0,08)	1,72 (0,12)	2,00 (0,19)	1,59 (0,19)	0,41	0,41	0,13	0,13
14	1,72 (0,10)	1,49 (0,11)	1,63 (0,11)	1,33 (0,17)	0,23	0,30	0,09	0,16
15	2,66 (0,29)	1,92 (0,15)	2,51 (0,31)	1,74 (0,12)	0,74	0,77	0,15	0,18

Z punktu widzenia celu i hipotezy badawczej niniejszej dysertacji, to najciekawszy z zestawów, ponieważ pozwala na analizę zależności w najszerszym zakresie. Średnia różnica wartości RT20 dla pomiarów wykonanych z udziałem i bez udziału widowni wynosi 0,36 s (SD = 0,18), średnia różnica wartości dla EDT i tego samego scenariusza to 0,34 s (SD = 0,2). Co więcej, uzyskana dla zestawu 5 różnica wartości RT20 dla pomiarów z i bez widowni jest

niemal identyczna z wynikami uzyskanymi dla zestawów 1 i 4 gdzie otrzymano odpowiednio różnice o wartościach 0,36 s i 0,38 s i wartościach SD odpowiednio 0,25 i 0,3.

Dla dwóch sal (13%) i pomiarów bez udziału widowni stwierdzić można (zgodnie z założeniami niniejszej dysertacji) nieliniowy zanik energii, w przypadku pomiarów z udziałem widowni nieliniowość zaniku stwierdzono dla 4 sal (27%) (różnica w wartościach pomiędzy RT20 a EDT większa niż górny próg JND).

W innej publikacji, Beranek (2003) pisze: „Należy zauważyć, że parametr EDT w sali jest mniej podatny na wpływ obecności publiczności niż czas pogłosu RT, z wyjątkiem sal z bardzo lekko tapicerowanymi fotelami.” Jednak w świetle danych przedstawionych w książce (Beranek, 2004) trudno zgodzić się z tym stanowiskiem. Spośród 15 sal, dla których możliwa była analiza wartości parametrów RT20 i EDT zmierzonych zarówno w warunkach z widownią, jak i bez niej, w jednej sali oba parametry zmieniły się o taką samą wartość. W 7 salach większą zmianę zaobserwowano dla RT20, natomiast w pozostałych 7 dla EDT. Najmniejsza zmiana wartości EDT wyniosła 0,05 s, a największa 0,77 s. Dla RT20 zmiany te wynosiły odpowiednio 0,12 s i 0,74 s. Średnia zmiana RT20 wyniosła 0,36 s ($SD = 0,18$), natomiast średnia zmiana EDT wynosiła 0,34 s ($SD = 0,20$). Mimo zmian EDT i RT20 o podobnych wartościach, na skutek udziału słuchaczy zmieniła się liczba sal, dla których średnie wartości EDT i RT20 wskazują na nieliniowy zanik energii. Dla pomiarów bez widowni, różnicę wartości RT20 i EDT o ponad 10% stwierdzono dla 2 sal, a dla pomiarów z udziałem widowni taką samą zależność stwierdzono dla 4 sal. Na podstawie tych danych należy uznać, że wpływ obecności publiczności na parametry EDT i RT20 jest bardzo podobny, ale należy również zaznaczyć, że obecność publiczności zwiększa prawdopodobieństwo pojawienia się nieliniowych zaników energii akustycznej.

B. Wpływ aktywnych i pasywnych systemów wspomagania akustyki na charakterystyki pogłosowe sal koncertowych oraz kształt zaniku energii akustycznej – analiza wyników pomiarów

Pomiary parametrów obiektywnych sal koncertowych stanowią istotny element akustyki wnętrz. Porównanie wyników pomiarowych z odczuciami słuchaczy jest w praktyce jedyną dostępną metodą pozwalającą określić korelację między oceną obiektywną a subiektywną. Wyniki tych porównań służą do definiowania parametrów oceny, ustalania zakresów pomiarowych, określania istotności poszczególnych wskaźników oraz wyznaczania wartości optymalnych dla sal o określonym przeznaczeniu. Historycznie najważniejsze prace w akustyce wnętrz opierają się właśnie o procedurę porównania pomiarów z indywidualnymi odczuciami słuchaczy. Przykłady poszczególnych badań oraz płynących z nich wniosków przedstawiono wcześniej w tej pracy w rozdziale 4.

W kontekście celu niniejszej dysertacji pomiary parametrów obiektywnych nie stanowią ostatecznego efektu, a są elementem wyjścia do prowadzonych na ich podstawie badań nad percepcją pogłosowości. Z tego względu opis badań i uzyskanych wyników pomiarowych dotyczących samych pomieszczeń został wydzielony jako osobną część stanowiącą istotny element całej pracy badawczej wykonanej przez autora niniejszej rozprawy, ale też jednocześnie nie będą odpowiedzią na hipotezy badawcze postawione w niniejszej rozprawie.

Co więcej, w założeniu, ma to ułatwić szybkie odniesienie wyników poszczególnych eksperymentów dotyczących percepcji pogłosu do wyników obiektywnych pomiarów, gdyż wszystkie one zebrane zostały w jednym miejscu. Ostatecznie takie podejście ułatwi innym czytelnikom znalezienie zestawienia wszystkich danych pomiarowych w jednym miejscu, a ich zwarte przedstawienie umożliwi wykorzystanie ich do innych badań.

Nawiązując do dominującego w akustyce wnętrz kierunku badawczego, autor niniejszej rozprawy przeprowadził analizę warunków akustycznych w 8 salach wyposażonych w systemy RES oraz w 14 salach bez RES. W salach z RES zmierzono 39 scenariuszy a w salach bez RES zmierzono 28 scenariuszy. Łącznie zmierzono 67 wariantów w 21 salach koncertowych i jednym pomieszczeniu przygotowanym jak pomieszczenie demonstracyjne dla RES.

Dodatkowo, na potrzeby niniejszej pracy przeprowadzono nie tylko analizę warunków akustycznych w oparciu o średnie wartości poszczególnych parametrów, lecz także oceniono wpływ zastosowanych systemów - zarówno pasywnych, jak i aktywnych - na wartości poszczególnych parametrów co pozwala dokładniej opisać rozkład pola akustycznego

w analizowanych salach. To prawdopodobnie największy zestaw danych dotyczących warunków akustycznych w salach o regulowanej akustyce.

W związku z konstrukcją eksperymentów psychakustycznych opisanych w Części C niniejszej pracy, przeprowadzono również analizę liniowości zaników energii akustycznej w opisywanych obiektach oraz analizę danych dotyczących innych sal, które można odnaleźć w literaturze.

W związku z tym, iż początkowo eksperymenty opisane w części C niniejszej pracy prowadzono dla sal z RES, które charakteryzują się nieliniowymi zanikami energii akustycznej, przeprowadzono również analizę powszechności występowania nieliniowych zaników zarówno w salach z RES jak i salach bez RES.

Ze względu na brak ustalonej w literaturze procedury rozróżniania liniowych zaników energii akustycznej od zaników nieliniowych, w tej pracy przyjęto, że jeśli wartość EDT różni się od wartości RT20 lub RT30 o mniej niż 5% (a więc poniżej dolnego progu JND: ISO 3382-1 (2009); Seraphim (1958)), to spadek energii jest liniowy, a jeśli wartość EDT różni się od wartości RT20 lub RT30 o więcej niż 10% (a więc powyżej górnego progu JND: ISO 3382-1 (2009); Seraphim (1958)), to spadek jest nieliniowy. Ustalenie dolnej granicy 5% JND dla RT20 odpowiada wynikom eksperymentów nad progami JND dla RT natomiast górna granica równa 10% wartości RT20 znajduje uzasadnienie zarówno w wynikach badań nad JND dla RT20, jak i w ustalonych eksperymentalnie progach dyskryminacji nieliniowych zaników energii akustycznej (Pickard, 2003).

Przyjęcie powyższych uzasadnione jest tym, że żadna z nowych, proponowanych w literaturze (Xiang, Goggans, 2003, 2011; Luizard i in., 2015b) metod oceny liniowości zaniku na podstawie analizy jej kształtu nie jest powszechnie stosowana w praktyce badawczej. Wybór parametrów RT20 i EDT spowodowany jest tym, że RT20 i EDT są najczęściej podawanymi w literaturze parametrem do oceny czasu pogłosu, na przykład w książce Beranka (Beranek, 2004) dla 100 zmierzonych sal (niektóre z sal zmierzono wielokrotnie), zawsze podano wartości EDT i RT20, tylko w jednym przypadku wykorzystując parametr RT30. Proporcje parametrów EDT i RT20 były wykorzystane w najważniejszych pracach dotyczących akustyki pomieszczeń (Barron 1988; Soulodre, Bradley, 1995; Beranek, 1996). Prowadzenie badań z wykorzystaniem oceny liniowości spadku na podstawie różnic pomiędzy wartościami parametrów EDT, RT20 pozwala więc na porównanie uzyskanych wyników z wynikami z literatury.

6 Pomiary parametrów obiektywnych sal koncertowych

6.1 Metodyka prowadzenia pomiarów

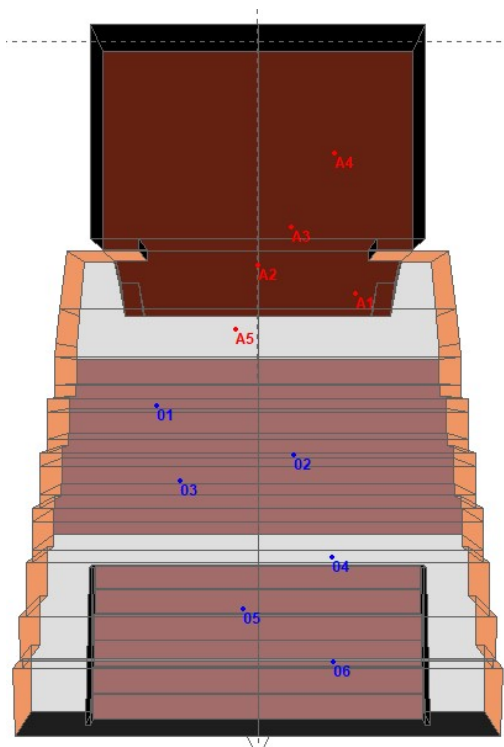
W niniejszej pracy, zgodnie z wytycznymi norm opisanymi w ISO 3382-1 (2009) i ISO 3382-2 (2008) (PN-EN ISO 3382-1, 2009; PN-EN ISO 3382-2, 2008) skupiono się na analizie najczęściej stosowanych obiektywnych parametrów akustyki pomieszczeń, takich jak: Czas pogłosu (RT20 i RT30), czas wczesnego zaniku (EDT), klarowność (C80, C50), Wyrazistość (D50), Czas centralny (Ts) oraz Współczynnik transmisji mowy (STI) (Meyer, Thiele, 1956; Sabine, 1922; Kürer, 1969; Damaske, Ando, 1972; Houtgast, Steeneken, 1973; Reichardt i in., 1974).

W czasie pomiarów stosowano wszechkierunkowe źródło dźwięku Neotek Dodecahedron DO12-PLUS z dedykowanym wzmacniaczem. Do pomiarów wykorzystano mikrofony dookólne iSEMCon EMX7150, a do rejestracji SRIR-ów wykorzystano mikrofony AKG C414-XLII. Zarówno pomiary, jak i ich analiza zostały przeprowadzone przy użyciu oprogramowania EASERA (AFMG Technologies GmbH) z interfejsami Roland Octa Capture lub Roland Studio Capture. Do pomiarów, rejestracji SRIR-ów i obliczania wartości wszystkich parametrów przedstawionych w tej pracy wykorzystano oprogramowania EASERA Pro v. 1,2. Oprogramowanie to oblicza wartości parametrów na podstawie ekstrapolacji liniowej spadku poziomu charakterystycznego dla poszczególnych parametrów, co jest zgodne z wymaganiami norm (ISO 3382-1,2; 2008, 2009).

W każdej z analizowanych sal wykonano pomiary dla co najmniej czterech różnych pozycji źródła dźwięku na scenie oraz jednej umieszczonej bezpośrednio przed sceną i co najmniej sześciu pozycji mikrofonowych. W salach o większej liczbie miejsc stosowano (zgodnie z wymaganiami normy ISO 33821 (2009) 9 lub 12 mikrofonów rozmieszczonych na widowni. Dla poszczególnych sal, do obliczenia średnich wartości parametrów akustycznych, wykorzystano pomiary przeprowadzone dla kilkudziesięciu (od 30 do 80) kombinacji pomiarowych źródło–odbiornik, jedynie w sali będącej pomieszczeniem demonstracyjnym dla RES (o stosunkowo niewielkiej przestrzeni w porównaniu do sal koncertowych) pomiary przeprowadzono dla 15 kombinacji źródło dźwięku-mikrofon co nadal przekracza wymagania normy 3382-1 (2009) i precyzyjnej metody pomiaru.

Dla sal z systemami RES wykonano pomiary dla wszystkich zaprogramowanych ustawień systemu i nie modyfikowano jego sposobu działania. Dla sal bez RES pomiary wykonano dla wszystkich możliwych kombinacji rozwinięcia kotar lub banerów, nie uwzględniano

scenariuszy z częściowo rozwiniętymi kotarami lub banerami. Rysunek 25 przedstawia widok modelu jednej z sal, w której prowadzono pomiary. Czerwone punkty A1 do A6 reprezentują pozycje źródła a niebieskie o numerach od 01 do 06 reprezentują pozycje mikrofonów pomiarowych.



Rysunek 25: Widok modelu sali, w której prowadzono pomiary. Czerwone punkty A1 do A6 reprezentują pozycje źródła dźwięku a niebieskie o numerach od 01 do 06 reprezentują pozycje mikrofonów pomiarowych.

6.2 Sale z RES

W ramach badań przeprowadzono pomiary parametrów akustycznych oraz nagrania stereofonicznych odpowiedzi impulsowych pomieszczeń (ang. *Stereo Room Impulse Response*, SRIR) w ośmiu salach wyposażonych w system RES. Pomiary i nagrania prowadzono bez udziału publiczności. Sześć sal, w których prowadzono pomiary i rejestrowano SRIR-y wyposażone były w system Yamaha AFC3 (sale od 1 do 6 w Tabeli 27), a po jednej z sal w systemy: Vivace (sala 7) i Constellation (sala 8). W Tabeli 27 przedstawiono podstawowe informacje o salach z RES, w których prowadzono pomiary i rejestrowano SRIR-y.

Tabela 27: Podstawowe informacje o salach z RES, w których prowadzono pomiary parametrów akustycznych.

Numer sali	Liczba miejsc	Sposób wykorzystania	Kształt Sali	Widownia	Balkony
Sala 1	325	Wielofunkcyjna	Prostopadłościan	Pochylona	Nie
Sala 2	408	Wielofunkcyjna	Prostopadłościan	Pochylona	Tak
Sala 3	497	Wielofunkcyjna	Prostopadłościan	Pochylona	Tak
Sala 4	320	Wielofunkcyjna	Prostopadłościan	Pochylona	Tak

Sala 5	540	Opera	Prostopadłościan	Pochylona	Tak
Sala 6	1736	Opera	Podkowiasta	Pochylona	Tak
Sala 7	100	Sala demonstracyjna	Prostopadłościan	Płaska	Nie
Sala 8	1829	Wielofunkcyjna	Wachlarz	Pochylona	Tak

W tabelach umieszczonych w dalszej części rozdziału numer 5, gdzie opisano wyniki pomiarów przeprowadzonych w poszczególnych salach pokazano średnie wartości zmierzonych parametrów dla wszystkich możliwych ustawień zmiennej akustyki. W nawiasach okrągłych podano wartości odchylenia standardowego dla poszczególnych parametrów. W kolejnych podrozdziałach opisano wpływ poszczególnych wariantów pracy RES na wartości zmierzonych parametrów. W przypadku opisu wartości STI porównano je z poziomami zrozumiałości określonymi w normie (IEC 60268-16, 2020).

6.2.1 Sala 1 z RES

W Tabeli 28 zebrano wyniki pomiarów najważniejszych, obiektywnych parametrów akustycznych zmierzonych w sali 1 z RES.

Tabela 28: Wartości parametrów zmierzone w sali 1 z RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
Sala 1	Bez RES	0,74 (0,16)	0,88 (0,08)	0,89 (0,06)	4,2 (1,7)	7,5 (1,6)	54 (0)	42 (9)	0,69 (0,04)
	Wariant 1	0,85 (0,18)	1,12 (0,09)	1,16 (0,05)	3,8 (1,7)	6,7 (1,6)	70 (8)	48 (11)	0,67 (0,04)
	Wariant 2	0,92 (0,19)	1,21 (0,08)	1,24 (0,05)	3,5 (1,9)	6,4 (1,7)	69 (9)	51 (12)	0,66 (0,04)
	Wariant 3	0,99 (0,19)	1,31 (0,08)	1,34 (0,05)	3,3 (2)	6 (1,8)	68 (9)	54 (14)	0,65 (0,04)

W konfiguracji bez systemu RES w sali 1 uzyskano następujące wartości: RT20 = 0,88 s, klarowność C50 = 4,2 dB, C80 = 7,5 dB oraz STI = 0,69, co wskazuje na dobrą zrozumiałość mowy. Zastosowanie wariantu 1 systemu RES powoduje umiarkowane wydłużenie pogłosu (RT20 = 1,12 s), niewielki wzrost Ts (do 48 ms) oraz nieznaczne pogorszenie klarowności (C50 = 3,8 dB, C80 = 6,7 dB). Wariant 2 wzmacnia efekt pogłosowy – RT20 wzrasta do 1,21 s, Ts do 51 ms. Jednocześnie klarowność nieznacznie się pogarsza (C50 = 3,5 dB, C80 = 6,4 dB), przy zachowaniu stabilnej wartości parametru (D około 70%). Wariant 3 przynosi największe zmiany, RT20 osiąga 1,31 s, Ts rośnie do 54 ms, a klarowność spada do C50 = 3,3 dB i C80 = 6,0 dB. Bez względu na wariant pracy RES, STI pozostaje w przedziale dobrej zrozumiałości mowy. Wartości SD dla poszczególnych pomiarów wskazują na możliwość różnej percepcji wczesnego zaniku (wartości SD dla EDT przekraczają 0,15 przy górnym progu JND dla EDT wynoszącym 10% wartości) oraz klarowności (wartości SD od 1,6 do 2,0

przy progu JND wynoszącym 1 dB), stosunkowo równomiernym rozkładzie wartości RT20 i RT30 (SD w zakresie od 0,05 do 0,09, próg JND to 10% wartości). SD dla czasu centralnego mieści się w zakresie od 9 do 14, zwiększając swoją wartość dla każdego kolejnego wariantu (przy progu JND równym 5 ms). We wszystkich przypadkach poza parametrami D i STI, które utrzymują wartości SD na stabilnym, niskim poziomie, wartości SD w ogólności wzrastają wraz z każdym kolejnym wariantem RES co świadczy o niekorzystnym wpływie RES na jednorodność akustyczną.

Podsumowując, wszystkie warianty systemu RES w sali 1 skutkują wydłużeniem czasu pogłosu (RT20 i RT30), niewielką zmianą wartości EDT i zwiększeniem Ts przy stopniowym, lecz umiarkowanym pogorszeniu parametrów klarowności i zrozumiałości. Klarowność obniża się wraz z każdym wariantem RES jednak zauważalną zmianę w odniesieniu do sali 1 z wyłączonym RES, uzyskano dopiero dla skrajnie wydłużonego pogłosu w wariantcie 3 RES. STI pozostaje powyżej 0,65, a zatem w granicach dobrej zrozumiałości. System RES w tym przypadku skutecznie zwiększa pogłosowość sali bez nadmiernego pogorszenia zrozumiałości mowy. Wyniki wskazują więc na oddziaływanie RES na późną fazę zaniku energii akustycznej w pomieszczeniu.

6.2.2 Sala 2 z RES

W Tabeli 29 zebrano wyniki pomiarów najważniejszych, obiektywnych parametrów akustycznych zmierzonych w sali 2 z RES.

Tabela 29: Wartości parametrów zmierzone w sali 2 z RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
Sala 2	Bez RES	0,82 (0,08)	0,91 (0,03)	0,9 (0,02)	1,3 (0,8)	4,6 (0,7)	53 (0)	60 (5)	0,64 (0,04)
	Wariant 1	0,98 (0,08)	1,24 (0,06)	1,27 (0,05)	0,8 (1,4)	3,8 (1,3)	54 (7)	68 (11)	0,6 (0,03)
	Wariant 2	1,02 (0,08)	1,27 (0,06)	1,29 (0,05)	0,8 (1,4)	3,8 (1,2)	54 (7)	70 (11)	0,6 (0,03)
	Wariant 3	1,24 (0,09)	1,61 (0,07)	1,63 (0,06)	0,1 (1,5)	3,0 (1,3)	51 (8)	80 (13)	0,57 (0,04)

W konfiguracji bez RES, w sal 2 uzyskano czasy pogłosu o wartościach RT20 = 0,91 s i RT30 = 0,90 s, klarowność C50 = 1,3 dB, C80 = 4,6 oraz czas centralny Ts = 60 ms. Wskaźnik zrozumiałości mowy wynosi STI = 0,64. Wariant 1 działania systemu RES powoduje umiarkowane wydłużenie pogłosu (RT20 = 1,24 s), a także wzrost Ts do 68 ms. Klarowność wyraźnie się obniża (C50 = 0,8 dB, C80 = 3,8 dB), co skutkuje niewielkim spadkiem STI do 0,6. Odchylenia standardowe pozostają na niskim poziomie, co oznacza równomierne działanie systemu w przestrzeni. Wariant 2 wprowadza dalsze (nieznaczne)

wydłużenie czasu pogłosu ($RT_{20} = 1,27$ s) oraz zwiększenie T_s do 70 ms. Wartości klarowności pozostają bez zmian w stosunku do wariantu 1, wartość D również pozostaje na stałym poziomie 54%. STI obniża się do 0,60, co oznacza pogorszenie zrozumiałości mowy, choć ta wciąż utrzymuje się w zakresie dobrej zrozumiałości. W wariantach 2 i 3 obserwuje się najsilniejszy wpływ systemu RES: RT_{20} wzrasta aż do 1,61 s, a T_s do 80 ms. Klarowność dźwięku znacząco się pogarsza ($C_{50} = 0,1$ dB, $C_{80} = 3,0$ dB), a wskaźnik STI spada do 0,57, co może mieć wpływ na percepcję mowy w tej konfiguracji. Analiza wartości odchyień standardowych przynosi podobne wnioski jak w sali 1. Wartości SD świadczą o możliwości wyrażnie różnej percepcji wczesnego zaniku i klarowności w zależności od miejsca w sali, stosunkowo jednorodnym rozkładzie wartości parametrów RT_{20} i RT_{30} oraz bardzo stabilnym i o niskim rozrzucie wartości D i STI . W przypadku RT_{20} i RT_{30} obserwuje się dwukrotny wzrost SD w porównaniu do wartości uzyskanych przy niedziałającym RES co świadczy o zmniejszeniu jednorodności rozkładu wartości tych parametrów. W przypadku klarowności obserwuje się wzrost SD dla wszystkich wariantów RES, w przypadku w przypadku wariantu 3 prawie dwukrotnie. Rozrzut wartości klarowności świadczy o pogorszeniu jednorodności tego parametru na skutek działania RES.

Podsumowując, każdy z wariantów RES wprowadza systematyczne wydłużenie czasu pogłosu (RT_{20} i RT_{30}) przy mniejszej zmianie wartości EDT i nieznacznym obniżeniu klarowności, co stopniowo pogarsza wskaźnik STI (z 0,64 do 0,57). Podobnie jak w sali 1 i sali 2, na skutek działania RES uzyskano odmienne wartości parametrów akustycznych.

6.2.3 Sala 3 z RES

W Tabeli 30 zebrano wyniki pomiarów najważniejszych, obiektywnych parametrów akustycznych zmierzonych w sali 3 z RES.

Tabela 30: Wartości parametrów zmierzone w sali 3 z RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT_{20} [s] (SD)	RT_{30} [s] (SD)	C_{50} [dB] (SD)	C_{80} [dB] (SD)	D [%] (SD)	T_s [ms] (SD)	STI (SD)
Sala 3	Bez RES	0,65 (0,1)	0,75 (0,03)	0,74 (0,03)	5 (1,5)	8,6 (1,1)	54 (0)	36 (7)	0,69 (0,03)
	Wariant 1	0,76 (0,1)	0,94 (0,05)	0,95 (0,03)	4,1 (1,3)	7,4 (1)	72 (6)	43 (7)	0,65 (0,03)
	Wariant 2	0,8 (0,1)	1,08 (0,06)	1,11 (0,04)	4 (1,4)	7,1 (1,1)	71 (6)	46 (8)	0,65 (0,03)
	Wariant 3	0,87 (0,13)	1,43 (0,11)	1,52 (0,07)	3,8 (1,4)	6,8 (1,1)	70 (6)	49 (9)	0,64 (0,03)

W stanie bez systemu RES, sala 3 charakteryzuje się czasem pogłosu $RT_{20} = 0,75$ s, klarownością $C_{50} = 5$ dB i $C_{80} = 8,6$ dB oraz dobrą zrozumiałością mowy, wskaźnik STI wynosi 0,69. Czas centralny T_s o wartości 36 ms sprzyja wrażeniu bliskości dźwięku. Wariant

1 działania RES powoduje wydłużenie czasu pogłosu do $RT20 = 0,94$ s oraz nieznaczny spadek wartości klarowności ($C50 = 4,1$ dB, $C80 = 7,4$ dB). T_s wzrasta do 43 ms, a STI spada do 0,65, wciąż mieszcząc się w zakresie dobrej zrozumiałości mowy. W wariancie 2 czasy pogłosu wydłużają się jeszcze bardziej ($RT20 = 1,08$ s), a T_s osiąga 46 ms. Klarowność i zrozumiałość mowy pozostają podobne do wariantu 1 ($C50=4$ i $STI= 0,65$). Wariant 3 przynosi najbardziej pogłosowy charakter – $RT20$ wzrasta do 1,43 s (prawie dwukrotność wartości bazowej), T_s rośnie do 49 ms, a klarowność obniża się ($C50 = 3,8$ dB, $C80 = 6,8$ dB). Pomimo tych zmian, STI maleje tylko nieznacznie – do 0,64, co świadczy o umiarkowanym wpływie RES na zrozumiałość mowy w tej przestrzeni. Analiza wartości SD w sali 3 przynosi następujące wnioski: zmiana SD poszczególnych parametrów osiąga te same kierunki i podobne zakresy wartości jak w salach 1 i 2. Zakres zmienności parametrów klarowności oraz EDT jest większy niż $RT20$ i $RT30$. Wartości D i STI pozostają na zbliżonym poziomie co przekłada się na te same zależności percepcyjne co w salach 1 i 2: różnica w klarowności i zaniku wczesnej energii jest wyraźnie zauważalna, długości późnego pogłosu i T_s może być zauważalna a STI i D pozostają na poziomie nierozróżnialnym bez względu na miejsce zajmowane w sali.

Podsumowując, wszystkie warianty RES w sali 3 prowadzą do wydłużenia czasu pogłosu i pogorszenia klarowności, przy jednoczesnym niewielkim spadku zrozumiałości mowy (STI z 0,69 do 0,64). Wariant 1 oferuje najłagodniejsze zmiany, natomiast wariant 3 wyraźnie pogłębia efekt pogłosowy, ale wciąż utrzymuje parametry w granicach dobrej zrozumiałości mowy.

6.2.4 Sala 4 z RES

W Tabeli 31 zebrano wyniki pomiarów najważniejszych, obiektywnych parametrów akustycznych zmierzonych w sali 4 z RES.

Tabela 31: Wartości parametrów zmierzone w sali 4 z RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	T_s [ms] (SD)	STI (SD)
Sala 4	Bez RES	0,44	0,42	0,43	8,4	13,9	55	21	0,8
		(0,06)	(0,03)	(0,03)	(1,4)	(1,3)	(0)	(4)	(0,02)
	Wariant 1	0,54	1,16	1,44	7	10,6	83	30	0,75
		(0,07)	(0,15)	(0,11)	(1,6)	(1,5)	(5)	(7)	(0,03)
	Wariant 2	0,59	1,26	1,48	6,4	9,8	81	35	0,74
		(0,07)	(0,15)	(0,1)	(1,8)	(1,7)	(6)	(10)	(0,04)
	Wariant 3	0,48	0,96	1,3	7,5	11,6	84	27	0,77
		(0,06)	(0,15)	(0,13)	(1,7)	(1,6)	(5)	(7)	(0,03)
	Wariant 4	0,63	1,08	1,16	5,2	8,7	76	39	0,72
		(0,07)	(0,09)	(0,06)	(1,6)	(1,3)	(6)	(8)	(0,03)

W stanie bez systemu RES, sala 4 charakteryzuje się czasem pogłosu $RT_{20} = 0,42$ s, klarownością $C_{50} = 8,4$ dB, $C_{80} = 13,9$ dB oraz bardzo dobrą zrozumiałością mowy, $STI = 0,8$. Wariant 1 przynosi znaczną zmianę charakteru akustycznego sali, RT_{30} wzrasta niemal trzykrotnie do 1,16 s, T_s rośnie do 30 ms, a klarowność C_{50} spada do 7 dB. W efekcie STI obniża się do 0,75, co oznacza niewielki spadek zrozumiałości, zrozumiałość nadal pozostaje na dobrym poziomie. Wariant 2 stanowi kompromis między wydłużeniem czasu pogłosu a utrzymaniem klarowności. RT_{20} wzrasta do 1,16 s, ale klarowność nadal pozostaje wysoka ($C_{50} = 7$ dB), a STI wynosi 0,75. T_s również wzrasta, do wartości 35 ms. Wariant 3 dodatkowo wydłuża czas pogłosu ($RT_{30} = 1,26$ s), przy nieco niższej klarowności w porównaniu do wariantu 2, pozostając na poziomie wyższym od wariantu 1 ($C_{50} = 6,4$ dB) i $T_s = 35$ ms. Mimo tego, STI nadal pozostaje wysoki (0,74), co podobnie jak w salach od 1 do 3 wskazuje, że w salach z RES dłuższy pogłos niekoniecznie musi znacząco ograniczać zrozumiałość mowy. Warianty 3 i 4 mają krótsze wartości czasu pogłosu niż wariant 2 czy wariant 1. RT_{20} osiąga odpowiednio 0,96 s i 1,08 s, T_s 27 i 39 ms, STI wynosi 0,77 i 0,74. Choć wartości STI są niższe niż bez RES, nadal mieszczą się na granicy dobrej i bardzo dobrej zrozumiałości, co jest rzadkością w salach koncertowych – typowe wartości STI w takich wnętrzach to od 0,45 do 0,65 (Błasiński, 2025). Wartość D pozostaje niezmienną dla każdego wariantu RES (0,8 dB) i jest tylko o 0,1 dB niższa niż bez RES. Wartości SD w warunkach działającego RES nie zmieniają się znacząco pomiędzy poszczególnymi wariantami, kierunek ich zmian dla EDT , RT_{20} i RT_{30} jest taki sam jak w salach 1-3: wraz ze wzrostem wartości parametru zwiększa się wartość SD . Wartości SD dla EDT , RT_{20} i RT_{30} zmieniają się znacznie w stosunku do stanu bez RES, jednak nie bardziej niż w salach 1-3. SD dla klarowności, D i STI pozostają na podobnych poziomach dla wszystkich wariantów.

Podsumowując, wszystkie warianty systemu RES w sali 4 prowadzą do znacznego wydłużenia czasu pogłosu i obniżenia klarowności, co skutkuje spadkiem STI z 0,80 do zakresu 0,72–0,74. Wariant 2 wydaje się najlepiej zachowywać balans między efektem pogłosowym a zrozumiałością mowy, natomiast wariant 3 wprowadza największe zmiany – zarówno pod względem pogłosu, jak i utraty klarowności.

6.2.5 Sala 5 z RES

W Tabeli 32 zebrano wyniki pomiarów najważniejszych, obiektywnych parametrów akustycznych zmierzonych w sali 5 z RES.

Tabela 32: Wartości parametrów zmierzone w sali 5 z RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
Sala 5	Bez RES	1,07	1,1	1,05	0,3	3	51	76	0,57
		(0,09)	(0,03)	(0,03)	(1,1)	(1)	(6)	(7)	(0,02)
	Wariant 1	1,11	1,32	1,36	1,1	3,7	56	80	0,55
		(0,07)	(0,08)	(0,14)	(1,5)	(1,1)	(8)	(9)	(0,03)
	Wariant 2	1,08	1,29	1,36	1,8	4,3	60	74	0,55
		(0,09)	(0,06)	(0,03)	(1,6)	(1,2)	(59)	(10)	(0,02)

W konfiguracji bez RES, sala 5 charakteryzuje się pogłosem nieznacznie dłuższym niż w salach 1-3 ($RT_{20} = 1,1$ s), klarownością $C_{50} = 0,3$ dB, $C_{80} = 3$ dB oraz średnią zrozumiałością mowy: $STI = 0,57$. Czas centralny T_s wynosi 76 ms, co wskazuje na pogłosowe, choć jeszcze zbalansowane warunki akustyczne. Wariant 1 działania systemu RES wydłuża czas pogłosu do $RT_{20} = 1,32$ s i zwiększa T_s aż do 80 ms. Klarowność dźwięku wzrasta i osiąga wartości $C_{50} = 1,1$ dB i $C_{80} = 3,7$ dB, natomiast wskaźnik STI nieznacznie spada, do wartości 0,55. Wariant 2 daje bardziej zrównoważony efekt – pogłos pozostaje długi ($RT_{20} = 1,29$ s), a klarowność jest jeszcze wyższa niż w wariant 1 ($C_{50} = 1,8$ dB, $C_{80} = 4,3$ dB). T_s również jest krótszy (74 ms), a STI pozostaje na poziomie 0,55, co oznacza porównywalną zrozumiałość mowy względem stanu bez RES. Wartości SD dla EDT, RT_{20} i RT_{30} we wszystkich wariantach wskazują na możliwość nieznacznie odmiennej percepcji zjawisk akustycznych opisywanych przez te parametry w różnych miejscach sali. SD dla D i STI pozostają na stabilnym poziomie, podobnie jak w salach 1 do 4. To

Podsumowując, wszystkie warianty RES w sali 5 wydłużają czas pogłosu i zwiększają T_s , a ich wpływ na zrozumiałość mowy jest umiarkowany. To pierwszy z analizowanych w tej pracy przypadków, w którym wykorzystanie RES zwiększa średnie wartości klarowności.

6.2.6 Sala 6 z RES

W Tabeli 33 zebrano wyniki pomiarów najważniejszych, obiektywnych parametrów akustycznych zmierzonych w Sali 6 z RES.

Tabela 33: Wartości parametrów zmierzone w sali 6 z RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
Sala 6	Bez RES	1,32	1,5	1,44	0,5	2,9	53	85	0,57
		(0,26)	(0,15)	(0,17)	(1,7)	(1,4)	(1)	(14)	(0,04)
	Wariant 1	1,38	1,58	1,51	-0,6	2,1	53	96	0,57
		(0,23)	(0,17)	(0,18)	(1,9)	(1,3)	(1)	(15)	(0,04)
	Wariant 2	1,35	1,59	1,58	0,1	2,6	53	91	0,56
		(0,25)	(0,16)	(0,16)	(1,5)	(1,3)	(0)	(14)	(0,04)

W stanie bez zastosowania systemu RES, Sala 6 ma czas pogłosu $RT20 = 1,5$ s, klarowność $C50 = 0,5$ dB, $C80 = 2,9$ dB i średnią zrozumiałość mowy ($STI = 0,57$) oraz $T_s = 85$ ms. Wariant 1 działania systemu RES nieznacznie wydłuża czas pogłosu ($RT20 = 1,58$ s), a klarowność nieznacznie się pogarsza ($C50 = -0,6$ dB). T_s wzrasta do 96 ms, a STI pozostaje na poziomie 0,57. Wariant 2 wykazuje bardzo podobny charakter – $RT20$ wzrasta do 1,59 s, $C50$ spada w porównaniu do wariantu 1 (o 0,4 dB), T_s wynosi 91 ms, a STI spada do poziomu 0,56. Oznacza to, że zrozumiałość mowy pozostaje niemal niezmienną względem stanu początkowego. SD dla parametrów pogłosowych we wszystkich wariantach pomiarowych osiągają wartości przekraczające JND co wskazuje na nierównomierność tych parametrów bez względu na wykorzystanie czy brak RES. Wartości SD dla $C50$, $C80$ i T_s pozostają w podobnym zakresie bez względu na wariant i wskazują na możliwość zaistnienia różnic percepcyjnych w przestrzeni tej sali. Wartości SD dla D oraz STI podobnie jak w salach 1-5 pozostają na stabilnych niskich poziomach.

Podsumowując, działanie RES w sali 6 wprowadza jedynie niewielkie zmiany – zarówno w zakresie czasu pogłosu, jak i parametrów percepcyjnych.

6.2.7 Sala 7 z RES

W Tabeli 34 zebrano wyniki pomiarów najważniejszych, obiektywnych parametrów akustycznych zmierzonych w sali 7 z RES.

Tabela 34: Wartości parametrów zmierzone w sali 7 z RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	T_s [ms] (SD)	STI (SD)
Sala 7	Bez RES	0,56 (0,05)	0,56 (0,02)	0,57 (0,02)	5,7 (2,4)	9,8 (2,2)	54 (1)	32 (12)	0,75 (0,03)
	Wariant 1	0,6 (0,06)	0,68 (0,03)	0,69 (0,02)	5,3 (2,6)	9 (2,4)	76 (10)	35 (13)	0,73 (0,04)
	Wariant 2	0,61 (0,07)	0,75 (0,05)	0,81 (0,1)	5,5 (3)	9 (2,8)	76 (11)	35 (15)	0,73 (0,05)
	Wariant 3	0,62 (0,07)	0,81 (0,05)	0,86 (0,03)	5,3 (2,7)	8,8 (2,5)	75 (11)	36 (15)	0,73 (0,05)
	Wariant 4	0,64 (0,07)	0,81 (0,06)	0,87 (0,03)	4,9 (2,7)	8,4 (2,5)	74 (11)	38 (15)	0,72 (0,05)
	Wariant 5	0,65 (0,07)	0,93 (0,09)	1,05 (0,05)	4,8 (2,7)	8,3 (2,5)	73 (11)	40 (16)	0,71 (0,05)
	Wariant 6	0,62 (0,07)	0,98 (0,11)	1,1 (0,06)	5,2 (2,6)	8,8 (2,5)	75 (10)	38 (15)	0,72 (0,05)
	Wariant 7	0,63 (0,08)	1,04 (0,12)	1,18 (0,06)	5,1 (2,6)	8,7 (2,4)	75 (10)	38 (15)	0,72 (0,05)
	Wariant 8	0,63 (0,1)	1,19 (0,13)	1,3 (0,07)	5,3 (3)	8,8 (2,8)	75 (11)	39 (17)	0,72 (0,05)
	Wariant 9	0,64 (0,07)	1,41 (0,2)	1,64 (0,09)	5,1 (2,6)	8,6 (2,5)	75 (11)	41 (17)	0,71 (0,05)
	Wariant 10	0,75 (0,17)	2,8 (0,47)	3,53 (0,23)	5 (2,9)	8,2 (2,7)	74 (11)	51 (23)	0,7 (0,06)

W stanie bez RES, Sala 7 cechuje się czasem pogłosu $RT20 = 0,56$ s, klarownością $C50 = 5,7$ dB, $C80 = 9,8$ dB oraz dobrą zrozumiałością mowy ($STI = 0,75$). Czas centralny wynosi 32 ms, co sprzyja czytelności sygnału bez pogłosowego rozmycia. Warianty 1–9 działania RES wprowadzają stopniowe wydłużanie czasów pogłosu, $RT20$ rośnie od 0,68 s w wariancie 1 do 1,41 s w wariancie 9. Towarzyszy temu wzrost T_s do około 41 ms, przy niewielkich zmianach klarowności ($C50$ i $C80$ pozostają na poziomie 4,8–5,5 dB i 8,3–9,0 dB). Wskaźnik STI nieznacznie maleje z 0,75 do 0,71, co świadczy o umiarkowanym wpływie systemu na percepcję mowy mimo znacznego wydłużenia pogłosu w porównaniu do wariantu bez RES. Wariant 10 przynosi wyraźne zmiany: $RT20$ wzrasta do 2,8 s, a $RT30$ aż do 3,53 s, T_s nieznacznie przekracza 50 ms, a STI spada do 0,7. Wartość klarowności ($C50 = 5$ dB) pozostaje na poziomie zbliżonym do wartości z wyłączonym RES, podobnie jak wartość STI – nawet uzyskanie tak dużej wartości czasu pogłosu nie wpływa negatywnie na czytelność mowy. SD dla parametrów EDT, $RT20$ i $RT30$ mają stosunkowo niskie wartości dla większości wariantów. Dla każdego ze zmierzonych wariantów działania RES, wartości SD dla klarowności są dwukrotnie większe od JND. Jedynie parametry D i STI mają niskie wartości SD, dla pozostałych parametrów SD przynajmniej dwukrotnie przekraczają próg JND, co świadczy o niskiej jednorodności akustycznej Sali. Największe wartości SD uzyskano dla wariantu 10, który prawie pięciokrotnie ($RT20$) lub sześciokrotnie ($RT30$) wydłuża czas pogłosu. Należy zauważyć, że wartości SD dla sali 7 z wyłączonym RES również są wyższe niż w przypadku innych analizowanych w tym rozdziale sal. Jednocześnie sala 7 nie jest typową salą koncertową a pomieszczeniem, które jest kilkukrotnie mniejsze niż sale koncertowe i jest wykorzystywane do prezentacji RES, co niewątpliwie ma wpływ uzyskane wyniki.

Podsumowując, w sali 7 system RES pozwala precyzyjnie kształtować czas pogłosu, przy zbliżonych poziomach klarowności i STI we wszystkich wariantach.

6.2.8 Sala 8 z RES

W Tabeli 35 zebrano wyniki pomiarów najważniejszych, obiektywnych parametrów akustycznych zmierzonych w sali 8 z RES.

Tabela 35: Wartości parametrów zmierzone w sali 8 z RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
Sala 8	Bez RES	0,92 (0,16)	1,07 (0,05)	1,07 (0,05)	3,8 (1,8)	6,4 (1,7)	41 (3)	56 (10)	0,66 (0,04)
	Wariant 1	1,44 (0,11)	1,53 (0,03)	1,54 (0,02)	-1,2 (1,4)	1,8 (1)	44 (7)	102 (11)	0,55 (0,04)
	Wariant 2	1,51 (0,14)	1,77 (0,07)	1,83 (0,08)	-1,1 (1,5)	1,9 (1,3)	45 (8)	106 (14)	0,55 (0,04)

Wariant 3	1,5 (0,14)	1,94 (0,07)	2,1 (0,08)	-0,6 (2,1)	2,4 (1,7)	47 (11)	102 (19)	0,54 (0,04)
Wariant 4	1,55 (0,13)	2,29 (0,12)	2,58 (0,09)	-0,9 (2)	2,1 (1,5)	45 (10)	107 (18)	0,53 (0,04)

W konfiguracji bez RES, Sala 8 charakteryzuje się czasem pogłosu $RT_{20} = 1,07$ s, klarownością $C_{50} = 3,8$ dB i $C_{80} = 6,4$ dB, wartością $STI = 0,66$ wskazującą na dobrą zrozumiałość mowy i wartością $D = 41\%$. Oznacza to środowisko akustyczne o silnym pogłosie i niskiej bezpośredniości, ale z dobrą zrozumiałością. W wariantach 1, czasy pogłosu wzrastają ($RT_{20} = 1,53$ s), a T_s wydłuża się do 102 ms, co skutkuje spadkiem STI do 0,55. Wartość C_{50} spada do -1,2 dB, a D pozostaje praktycznie bez zmian. W wariantach 2, RT_{20} osiąga 1,77 s, a STI wartość 0,55. W wariantach 3 następuje kolejne wydłużenie czasu pogłosu w porównaniu z poprzednim wariantem ($RT_{20} = 1,94$ s), przy podobnym poziomie pozostałych parametrów. STI pozostaje niezmienny (0,55), a T_s nieznacznie rośnie (102 ms), co może wskazywać na lepszą równowagę między czasem pogłosu a początkową energią dźwięku. Wariant 4 przynosi najdłuższy pogłos ($RT_{20} = 2,29$ s) i najniższy $STI = 0,53$, mimo umiarkowanie poprawionych wskaźników klarowności i wyrazistości ($C_{80} = -0,9$ dB, $D = 45\%$). T_s utrzymuje się na wysokim poziomie (102 ms), co świadczy o znacznie wydłużonej odpowiedzi sali i ograniczeniu zrozumiałości mowy. Wartości SD dla parametrów RT_{20} i RT_{30} w czasie działania RES są niskie i świadczą o wysokiej jednorodności wartości parametrów w obrębie sali. SD dla klarowności przekracza JND zarówno bez jak i z działającymi wariantami RES. Dla EDT wartość SD jest w zakresie od 0,11 do 0,16 co świadczy o różnicy wartości EDT w różnych miejscach w sali 8 większej niż JND.

Podsumowując, działanie RES w sali 8 prowadzi do istotnego wydłużenia czasu pogłosu i spadku zrozumiałości mowy (STI obniża się z 0,67 do 0,53–0,55), przy jednoczesnym spadku wartości parametrów klarowności.

6.2.9 Analiza liniowości zaników energii akustycznej w salach z RES

Stosując klasyfikację spadków zaników energii akustycznej jako liniowe lub nieliniowe z wykorzystaniem kryterium wartości JND (konsekwentnie stosowaną w tej pracy), należy uznać, że uśrednione ze wszystkich pomiarów wyniki wskazują na nieliniowy zanik w 3 z 8 (37%) sal z RES w pomiarach przeprowadzonych bez działających RES. W sumie, dla 31 różnych ustawień RES w 8 salach akustycznych zarejestrowano ponad 800 SRIR-ów. W Tabelach od 28 do 35 powyżej pokazano średnie wartości zmierzonych parametrów EDT, RT_{20} i RT_{30} dla wszystkich sal i wszystkich zmierzonych ustawień zmiennej akustyki. Analizując średnie wartości zmierzonych parametrów, należy uznać, że w 5 z 8 sal (63%, Sale 2, 4, 5, 7, 8) stwierdzono liniowy a w 3 z 8 (37%, Sale: 1, 3, 6) nieliniowy zanik energii

akustycznej. Dla sal z RES, lecz bez włączonego RES stwierdzono nieliniowy zanik energii akustycznej (zgodnie z kryterium przyjętym w tej pracy). Spośród 31 wariantów działania RES, 6 (19%) wariantów generuje liniowe, a 25 (81%) wariantów generuje nieliniowe zaniki energii akustycznej.

Dokładniejsza analiza wszystkich przeprowadzonych pomiarów wskazuje, że z 231 kombinacji zmierzonych w salach z wyłączonym RES, 117 pomiarów (51 %) okazało się być liniowych a 114 (49%) okazało się być nieliniowych. Spośród 815 kombinacji pomiarowych w salach z działającymi RES, 700 pomiarów (86%) kombinacji okazało się być nieliniowych, a 115 (14%) liniowych.

6.2.10 Analiza wpływu RES na jednorodność warunków akustycznych w salach z RES

W większości sal (Sala1, Sala 4, Sala 7 i Sala 8) system RES pogarsza jednorodność akustyczną, co widoczne jest we wzroście wartości odchyłeń standardowych, szczególnie dla parametrów EDT, RT20, RT30 i Ts. W wielu przypadkach wartości SD przekraczają progi JND co oznacza, że różnice te są zauważalne percepcyjnie i wpływają na odbiór wrażeń akustycznych w zależności od lokalizacji słuchacza.

Dla parametrów D oraz STI we wszystkich salach uzyskano stabilne, niskie wartości SD, niezależnie od działania systemu RES. Świadczy to o braku wpływu systemu na jednorodność parametrów związanych z bezpośredniością dźwięku i zrozumiałością mowy.

W przypadku parametrów klarowności (C50 i C80) wpływ RES na jednorodność jest na ogół niewielki, co potwierdzają obserwacje w salach 2, 3 i 4, gdzie zmiany SD były minimalne. Na tym tle wyróżniają się dwa przypadki pozytywne. W sali 5 zastosowanie RES przyczyniło się do wyraźnego zmniejszenia SD dla parametrów klarowności (spadek nawet o 0,8), co wskazuje na zwiększenie jednorodności percepcji dźwięku. Również w sali 8 (wariant 4) zaobserwowano jednoczesne zwiększenie klarowności oraz obniżenie wartości SD, co stanowi przykład sytuacji, w której dobrze zaprojektowany system RES może nie tylko wydłużyć czas pogłosu, ale także poprawić jednorodność rozkładu energii akustycznej.

Na jednorodność pola pogłosowego wpływa również skala i przeznaczenie pomieszczenia. Sala 7, będąca niewielkim pomieszczeniem demonstracyjnym, wykazuje znacznie większe wartości SD już w stanie wyjściowym, a zastosowanie RES dodatkowo pogłębia tę nierównomierność. Ze względu na swoje nietypowe właściwości nie powinna być traktowana jako reprezentatywny przykład dla typowych sal koncertowych.

Podsumowując, w większości analizowanych przypadków systemy RES zmniejszają jednorodność pola pogłosowego, co przejawia się wzrostem odchyłeń standardowych parametrów akustycznych, szczególnie dla wczesnego i późnego pogłosu. Tylko w nielicznych przypadkach (sala 5 i częściowo sala 8) zastosowanie systemu RES może skutkować poprawą jednorodności, głównie w zakresie parametrów klarowności.

6.2.11 Analiza wpływu RES na korelację pomiędzy zmierzonymi parametrami

Dla każdej z sal i każdego wariantu obliczono współczynniki korelacji pomiędzy poszczególnymi parametrami akustycznymi (Rho Spearmana) oraz istotność statystyczną otrzymanych wyników (wartość p). W Tabelach 36 i 37 pokazano wyniki korelacji dla zbioru danych zawierającego wszystkie pomiary przeprowadzone w salach z RES. Tabela 36 zawiera wyniki pomiarów w salach z wyłączonymi RES, a Tabela 37 dla wszystkich wariantów RES. Dla obydwu zbiorów oraz wszystkich korelacji uzyskano wyniki istotnie statystycznie ($p < 0,05$), wartości o korelacji silnej lub bardzo silnej zaznaczono pogrubioną czcionką.

Tabela 36: Wartości korelacji dla wszystkich sal bez działających RES. Silne i bardzo silne korelacje zaznaczono pogrubioną czcionką.

RT20	0,934						
RT30	0,923	0,992					
C50	-0,785	-0,736	-0,715				
C80	-0,88	-0,85	-0,829	0,947			
D50	-0,662	-0,653	-0,665	0,736	0,712		
Ts	0,886	0,882	0,869	-0,941	-0,979	-0,743	
STI	-0,878	-0,851	-0,825	0,82	0,87	0,649	-0,863
	EDT	RT20	RT30	C50	C80	D50	Ts

Tabela 37: Wartości korelacji dla wszystkich sal i działających wariantów RES. Silne i bardzo silne korelacje zaznaczono pogrubioną czcionką.

RT20	0,757						
RT30	0,568	0,929					
C50	-0,853	-0,659	-0,459				
C80	-0,918	-0,71	-0,505	0,969			
D50	-0,86	-0,672	-0,477	0,985	0,962		
Ts	0,902	0,762	0,571	-0,966	-0,982	-0,957	
STI	-0,911	-0,698	-0,505	0,891	0,922	0,899	-0,9
	EDT	RT20	RT30	C50	C80	D50	Ts

Uzyskane wartości oraz kierunki korelacji są zgodne z wynikami dotychczas opisywanymi w literaturze (Barron, 1993; Jiménez-Dianderas, Recuero López, 2010), wykazano istotne dodatnie korelacje pomiędzy parametrami EDT, RT20 i RT30 oraz Ts. Najstabilniejsze korelacje uzyskano dla parametrów C50 i D co jest zgodne z oczekiwaniami, ponieważ wartości tych parametrów ściśle zależą od siebie nawzajem, oraz dla parametrów C50 i C80 co również

jest wartością oczekiwaną, ponieważ parametry te opisują podobną zależność. Stabilne, ujemne zależności uzyskano również dla korelacji Ts z parametrami C50, C80 i D (od -0,88 do -0,96) co również jest zgodne z oczekiwaniami – wydłużenie wartości Ts prowadzi do zmniejszenia klarowności. Wykorzystanie RES zazwyczaj wzmacnia korelacje pomiędzy STI a pozostałymi analizowanymi parametrami, np. z C50 - od wartości nieistotnych statystycznie do wartości istotnych i $Rho = 0,93$ w sali 1, czy podobnej zmianie w sali 2 – z wartości nieistotnej do istotnej i z $Rho = 0,63$. Działający RES zazwyczaj osłabia korelacje pomiędzy parametrami EDT, RT20 i RT30. W większości przypadków C80 koreluje wyżej z STI niż C50, korelacje C50 z C80 i D50 pozostają silne bez względu na działanie lub brak RES.

Wartości i kierunki korelacji są zgodne z wynikami dotyczącymi sal koncertowych spotykanymi w literaturze (Beranek 1996, Barron 1993), w przypadku sal z wyłączonymi RES uzyskano silne lub bardzo silne korelacje pomiędzy wszystkimi parametrami ($Rho > 0,6$). Dla pomiarów z włączonymi RES uzyskano wyniki świadczące o spadku siły korelacji parametru RT30 ze wszystkimi pozostałymi parametrami. Wykorzystanie RES wzmacnia korelacje pomiędzy STI a EDT, C50 i C80, oraz pomiędzy EDT i C50, C80, D oraz Ts. Zgodnie z uzyskanymi wynikami, STI koreluje wyżej z wartością C80 niż z wartością C50, co świadczy o możliwości wykorzystania C80 nie tylko jako parametru określającego klarowność dla muzyki, ale również dla mowy i jednocześnie obniża przydatność parametru C50.

6.2.12 Podsumowanie wyników uzyskanych na drodze pomiarów obiektywnych parametrów akustycznych w salach z RES

W niniejszym rozdziale przeanalizowano wpływ RES na akustykę ośmiu sal koncertowych i wielofunkcyjnych, w łącznej liczbie 31 wariantów działania systemów RES. Analiza objęła zarówno podstawowe parametry obiektywne (RT30, EDT, Ts, C50, C80, D i STI), jak i ich przestrzenny rozkład w salach z wykorzystaniem SD jako metryki jednorodności.

6.2.12.1 Powtarzalne schematy działania systemu RES

We wszystkich analizowanych salach wykazano, że RES pozwala na wydłużenie czasu pogłosu w zakresie od kilkunastu do kilkuset procent (RT20 od +0,1 do + 2,2 s i RT30 od +0,1 do +3 s), zazwyczaj bez istotnego (w kontekście wartości SD) wpływu na parametry klarowności i zrozumiałości mowy.

Typowy i korzystny mechanizm działania RES polega na subtelny wydłużeniu późnej fazy pogłosu (RT20 i RT30), bez naruszenia wczesnej struktury energetycznej (EDT, D), co zapewnia utrzymanie zrozumiałości mowy. W kilku salach (Sala 1, Sala 2, Sala 7)

zaobserwowano wyraźną możliwość przejścia z charakterystyki sprzyjającej prezentacjom ustnym ($RT30 < 0,8$ s, $STI > 0,65$) do akustyki bardziej zbliżonej do warunków muzyki kameralnej ($RT30 > 1,2$ s, $T_s > 40$ ms), przy zachowaniu względnie stałej klarowności.

Dla działających RES, STI pozostaje bliski wartości dla sali bez włączonego RES, zmieniając się przeważnie w zakresie od 0,01 do 0,08, tylko w jednym przypadku wariantu 4 w sali 8 zmieniając się o -0,13. Działanie RES zazwyczaj nie wpływa na zmianę stopnia zrozumiałości mowy w danej sali zgodnie z klasyfikacją IEC 60268-16 (2020).

RES umożliwia uzyskanie bardzo długiego pogłosu ($RT30 > 2,5$ s) co wykazano w dwóch przypadkach, które zostały celowo przygotowane jako warianty demonstracyjne, czyli wariant 10 w sali 7 oraz wariant 4 w sali 8. Jednocześnie należy pamiętać, że dla tych wariantów zaobserwowano znaczny wzrost wartości SD dla parametrów określających czas pogłosu, przy równoczesnym pogorszeniu STI i wzroście T_s do ponad 100 ms. Tego typu zmiany prowadzą do nierównomiernego odbioru akustyki w różnych miejscach sali i znacząco pogarszają percepcyjną spójność dźwięku.

6.2.12.2 Uzasadnienie dla stosowania RES w salach wielofunkcyjnych

Wymagania akustyczne dla różnych funkcji sal są trudne do pogodzenia w przestrzeni o stałej geometrii. Zgodnie z wytycznymi ISO 3382-1 (2009), konferencje i prezentacje słowne wymagają $RT20$ rzędu 0,5–0,7 s, dla oper i teatrów bardziej odpowiedni jest zakres 1,2–1,5 s, a koncerty symfoniczne najlepiej brzmią przy $RT20$ w zakresie od 1,8 do 2,2 s. Analogicznie, wskaźnik STI powinien być wysoki ($\geq 0,65$) dla mowy, ale jest już mniej istotny w salach filharmonicznych.

System RES umożliwia płynne kształtowanie wartości czasu pogłosu, a przy odpowiednim doborze wariantu pozwala zachować wysoką klarowność oraz zrozumiałość mowy w zakresie dobrym lub bardzo dobrym. W niniejszym badaniu wykazano, że warianty umiarkowane oferują najbardziej korzystny kompromis pomiędzy efektem przestrzennym a spójnością percepcyjną. Pozwalają one na elastyczne dostosowanie akustyki bez fizycznych zmian w przestrzeni – co jest szczególnie istotne w salach wielofunkcyjnych, gdzie w ciągu jednego dnia mogą odbywać się zarówno koncerty symfoniczne, jak i sympozja naukowe.

6.2.12.3 Wpływ systemów RES na parametry obiektywne akustyki – podsumowanie wyników pomiarowych

Systemy RES stanowią użyteczne narzędzie w projektowaniu współczesnych przestrzeni akustycznych. Ich zastosowanie pozwala nie tylko na dostosowanie długości pogłosu do

charakteru wydarzenia, ale - przy odpowiedniej konfiguracji - także na poprawę równomierności warunków odsłuchowych. Wykorzystanie RES pozwala na uzyskanie odmiennych warunków akustycznych w pomieszczeniach stwarzając tym samym optymalne warunki pogłosowe dla wydarzeń artystycznych o różnym charakterze. Pozwala na organizację konferencji, spektakli teatralnych, koncertów kameralnych czy chóralnych, wystawiania oper czy organizacji koncertów symfonicznych w obrębie jednego obiektu. Jednocześnie wykorzystanie RES zazwyczaj prowadzi do pogorszenia jednorodności pola akustycznego. W Tabeli 38 przedstawiono zakresy zmian poszczególnych parametrów na skutek działania RES. Dla zwiększenia czytelności Tabeli zrezygnowano z prezentacji zmian wartości parametrów D, którego zmiany są niewielkie oraz RT30, którego wartości zmian są takie same lub nieznacznie większe niż RT20. Zauważalna zmiana wartości C50, C80, RT20 oraz brak lub niewielkie zmiany wartości EDT, D oraz STI świadczą o tym, że RES oddziałują głównie na późną frakcję energii akustycznej.

Tabela 38: Podsumowanie zmian wartości najważniejszych parametrów na skutek działania RES

Numer sali	Zakres zmian EDT [s]	Zakres zmian RT20 [s]	Zakres zmian C50 [dB]	Zakres zmian C80 [dB]	Zakres zmian Ts [ms]	Zakres zmian STI
1	0,74 → 0,99 (+0,25)	0,88 → 1,31 (+0,43)	4,2 → 3,3 (-0,9)	7,5 → 6,0 (-1,5)	42 → 54 (+12)	0,69 → 0,65 (-0,04)
2	0,82 → 1,24 (+0,42)	0,91 → 1,61 (+0,70)	1,3 → 0,1 (-1,2)	4,6 → 3,0 (-1,6)	60 → 80 (+20)	0,64 → 0,57 (-0,07)
3	0,65 → 0,87 (+0,22)	0,75 → 1,43 (+0,68)	5,0 → 3,8 (-1,2)	8,6 → 6,8 (-1,8)	36 → 49 (+13)	0,69 → 0,64 (-0,05)
4	0,44 → 0,63 (+0,19)	0,42 → 1,26 (+0,84)	8,4 → 5,2 (-3,2)	13,9 → 8,7 (-5,2)	21 → 39 (+18)	0,80 → 0,72 (-0,08)
5	1,07 → 1,11 (+0,04)	1,10 → 1,32 (+0,22)	0,3 → 0,3 (+0,0)	3,0 → 3,0 (+000)	76 → 74 (-2)	0,57 → 0,55 (-0,02)
6	1,32 → 1,38 (+0,06)	1,50 → 1,59 (+0,09)	0,5 → -0,6 (-1,1)	2,9 → 2,1 (-0,8)	85 → 91 (+6)	0,57 → 0,56 (-0,01)
7	0,56 → 0,75 (+0,19)	0,56 → 2,80 (+2,24)	5,7 → 4,8 (-0,9)	9,8 → 8,2 (-1,6)	32 → 51 (+19)	0,75 → 0,70 (-0,05)
8	0,92 → 1,55 (+0,63)	1,07 → 2,29 (+1,22)	3,8 → -1,2 (-5,0)	6,4 → 1,8 (-4,6)	56 → 107 (+51)	0,66 → 0,53 (-0,13)

6.3 Sale bez RES

W ramach badań warunków pogłosowych w salach o pasywnie regulowanej akustyce przeprowadzono pomiary parametrów pogłosowych w 14 obiektach kultury, z których większość charakteryzuje się ściśle określonym podstawowym sposobem użytkowania. Sześć z tych obiektów zostało zaprojektowanych jako klasyczne sale filharmoniczne (Sala 1 do Sala 6), trzy to sale wielofunkcyjne, których głównym przeznaczeniem są koncerty muzyki symfonicznej (Sala 7 do Sala 9), dwa kolejne to sale wielofunkcyjne z założeniem wykorzystywania ich do przedstawień operowych (Sala 10 i Sala 11), a kolejne wnętrza to teatr muzyczny i teatr dramatyczny (Sala 12 i Sala 13). Jeden obiekt został zaprojektowany jako sala

wielofunkcyjna do prezentacji koncertów muzyki rozrywkowej, kabaretów i konferencji z wykorzystaniem systemu nagłośnieniowego (Sala 14).

W Tabeli 39 przedstawiono podstawowe informacje o salach z pasywnymi rozwiązaniami regulacji akustyki, w których prowadzono pomiary i rejestrowano SRIR-y. W przypadkach, gdy dana sala została przewidziana do różnych sposobów użytkowania, w Tabeli przedstawiono wszystkie odpowiadające im warianty, rozdzielone ukośnikami.

Tabela 39: Podstawowe informacje o salach bez RES, w których prowadzono pomiary.

Numer sali	Liczba miejsc	Sposób wykorzystania	Kształt Sali	Widownia	Balkony
Sala 1	1069	Filharmonia	Prostopadłościan	Płaska	Tak
Sala 2	880	Filharmonia	Prostopadłościan	Pochylona	Nie
Sala 3	879	Filharmonia	Prostopadłościan	Płaska	Tak
Sala 4	797	Filharmonia	Wachlarz	Pochylona	Nie
Sala 5	518	Filharmonia	Wachlarz	Pochylona	Nie
Sala 6	378	Filharmonia - Sala kameralna	Prostopadłościan	Pochylona	Nie
Sala 7	1915	Filharmonia/ Wielofunkcyjna	Tarasowa	Pochylona	Tak
Sala 8	1000	Filharmonia/ Wielofunkcyjna	Podkowiasta	Pochylona	Tak
Sala 9	951	Filharmonia/ Wielofunkcyjna	Prostopadłościan	Płaska	Tak
Sala 10	1070	Opera/ Wielofunkcyjna	Wachlarz	Pochylona	Tak
Sala 11	917	Opera/ Wielofunkcyjna	Podkowiasta	Pochylona	Tak
Sala 12	967	Teatr muzyczny	Podkowiasta	Płaska	Tak
Sala 13	206	Teatr dramatyczny	Podkowiasta	Płaska	Tak
Sala 14	1500	Wielofunkcyjna	Prostopadłościan	Płaska	Tak

Wszystkie sale, dla których przewidziano działalność wielofunkcyjną (sale od 7 do 11 oraz sala 14 w Tabeli numer 39) wyposażono w banery akustyczne umożliwiające regulację wartości czasu pogłosu. We wszystkich salach wielofunkcyjnych za sceną znajduje się kotara wykorzystywana podczas niektórych wydarzeń, w przypadku sali 7 kotara ta pozostaje rozwieszona na stałe, niezależnie od sposobu użytkowania. Podczas pomiarów uwzględniono wszystkie dostępne konfiguracje ustawienia kurtyn oraz banerów akustycznych. W Tabeli 40 przedstawiono zestawienie materiałów wykorzystanych do produkcji kotar i banerów oraz powierzchnie poszczególnych rozwiązań zastosowane w poszczególnych salach.

Tabela 40: Powierzchnie i właściwości banerów i kurtyn zainstalowanych w poszczególnych salach.

Numer Sali	Kotary	Powierzchnia kotar [m2]	Właściwości kotar	Banery	Powierzchnia banerów [m2]	Właściwości banerów
Sala 2	Tak	130	Bawełna 0,3 kg/m2	Nie		
Sala 5	Tak	160	Bawełna 0,3 kg/m2	Nie		
Sala 7	Tak	b.d.	b.d.	Tak	900	Plusz, 0,42 kg/m2
Sala 8	Nie			Tak	950	Welur, 0,47 kg/m2
Sala 9	Tak	136	Włna, 0,55 kg/m2	Tak	403	Włna, 0,55 kg/m2
Sala 10	Tak	162	Włna 0,5 kg/m2	Nie		
Sala 11	Tak	182	Włna 0,6 kg/m2	Tak	504	Włna 0,60 kg/m2
Sala 14	Nie			Tak	150	Plusz, 0,42 kg/m2

W salach, w których nie korzystano z RES, przeprowadzono pomiary dla 27 różnych scenariuszy pomiarowych, rejestrując ponad 600 SRIR-ów. W Tabelach od 42 do 49 przedstawiono średnie wartości parametrów – wraz z odchyleniami standardowymi (SD) podanymi w nawiasach – dla wszystkich zmierzonych ustawień zmiennej akustyki dla sal, w których zastosowano kotary lub banery akustyczne. Dane te pokazują wpływ zastosowania pasywnych rozwiązań regulacji akustyki wewnątrz na wartości obiektywnych parametrów akustycznych w poszczególnych salach. W przypadku opisu wartości STI porównano je z poziomami zrozumiałości określonymi w normie (IEC 60268-16, 2020). Wszystkie pomiary wykonano bez udziału widowni.

W rozdziale 6.3.1 opisano wyniki pomiarów uzyskane w salach bez RES i bez regulacji akustyki, w kolejnych rozdziałach (od 6.3.2 do 6.3.9) opisano wyniki uzyskane w poszczególnych salach, w których zastosowano pasywne rozwiązania regulacji akustyki. Wyniki pomiarów uzyskane w salach bez systemu RES, w których nie stosuje się regulacji akustyki, zostały uwzględnione w niniejszej pracy, mimo że nie odnoszą się bezpośrednio do weryfikacji tezy głównej. Ich włączenie wynika z konstrukcji eksperymentów opisanych w Części C oraz z faktu, że liczba SRIR-ów zarejestrowanych w salach o zmiennej akustyce, lecz bez systemu RES, okazała się niewystarczająca do przeprowadzenia niektórych testów.

Dla przejrzystości pracy, wyniki wszystkich pomiarów zamieszczono w niniejszym rozdziale.

6.3.1 Sale bez RES i bez regulacji akustyki (Sale 1, 3, 4, 6, 12, 13)

W Tabeli 41 pokazano średnie wartości parametrów akustycznych zmierzonych w salach, w których nie wykorzystuje się RES ani innych metod regulacji pogłosu. W nawiasach okrągłych podano wartość odchylenia standardowego.

Tabela 41: Wartości parametrów EDT, RT20 i RT30 zmierzone w poszczególnych salach bez RES i bez wariantów zmiennej akustyki.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
1	Bez regulacji	2,11 (0,08)	2,21 (0,04)	2,25 (0,02)	-5,6 (1)	-2 (0,8)	23 (4)	165 (9)	0,47 (0,04)
3	Bez regulacji	1,76 (0,15)	1,81 (0,04)	1,82 (0,02)	-3,1 (1,7)	-0,4 (1,6)	34 (8)	135 (15)	0,5 (0,04)
4	Bez regulacji	1,21 (0,07)	1,32 (0,03)	1,32 (0,03)	1,6 (1,7)	3,6 (1,6)	58 (9)	78 (13)	0,6 (0,05)
6	Bez regulacji	1,31 (0,06)	1,42 (0,03)	1,43 (0,02)	-1,6 (1)	1,6 (0,8)	41 (5)	102 (7)	0,57 (0,02)
12	Bez regulacji	0,91 (0,15)	1,16 (0,05)	1,15 (0,07)	4 (1,9)	6,6 (1,5)	70 (8)	58 (11)	0,67 (0,04)
13	Bez regulacji	1,01 (0,13)	1,01 (0,05)	1,03 (0,04)	2,6 (1,2)	5,1 (1,1)	64 (6)	63 (8)	0,65 (0,03)

Spośród opisanych w tym podrozdziale sal, w sali 1 odnotowano najdłuższy czas pogłosu ($RT20 = 2,21$ s) oraz najniższe wartości klarowności ($C50 = -5,6$ dB). Dla sali 1 uzyskano wartość $STI = 0,47$, a więc wartość z dolnej części średniej zrozumiałości mowy. To sala filharmoniczna o dużej liczbie miejsc, niemniej uzyskane wyniki $RT20$ i Ts przekraczają wartości zalecane w literaturze dla tego typu sal. Zalecana wartość Ts nie powinna przekraczać 120 ms nawet w dużych salach koncertowych (Barron, 1993), średnia wartość Ts w książce Beranka (2004) to 110 ms, a w sali 1 Ts osiąga wartość 165 ms.

Sala 3, będąca również salą filharmoniczną charakteryzuje się wartościami czasu pogłosu o około 15% krótszymi niż w sali 1, oraz wyższą klarownością ($C50 = -3,1$ dB) oraz nieznacznie wyższą wartością $STI = 0,50$. Ts przyjmuje bardzo dużą wartość, przekraczającą wartości sugerowane w literaturze (135 ms). W sali 4 czas pogłosu jest wyraźnie krótszy ($RT20 = 1,32$), a klarowność $C50 = -1,6$ dB, co skutkuje lepszymi warunkami dla mowy ($STI = 0,6$). Tym razem wartości czasu pogłosu są nieznacznie za krótkie, ponieważ sala 4 również jest salą filharmoniczną. Sala 6 również wykazuje stosunkowo krótki czas pogłosu ($RT30 = 1,42$ s) i umiarkowaną klarowność oraz zrozumiałość ($STI = 0,57$). To filharmoniczna sala kameralna, na podstawie wartości zmierzonych parametrów należy uznać, że panują w niej właściwe warunki akustyczne. W sali 12 uzyskano czas pogłosu $EDT = 0,91$ s i $RT20 = 1,16$ s, wysoką klarowność $C50 = 4$ dB oraz najwyższy (spośród analizowanych w tym podrozdziale sal) wskaźnik zrozumiałości mowy ($STI = 0,67$). To sala będąca siedzibą teatru muzycznego

w którym wszystkie przedstawienia prezentowane są z wykorzystaniem systemu elektroakustycznego. Wyniki pomiarów wskazują na bardzo dobre warunki akustyczne, odpowiednie dla tego typu działalności. Sala 13 cechuje się parametrami zbliżonymi do sali 12 – z nieco niższą klarownością i STI (0,65) – przy zachowaniu korzystnych warunków akustycznych dla mowy. To teatr dramatyczny o niewielkiej widowni i jak wynika z pomiarów właściwych dla sposobu wykorzystania wartościach parametrów akustycznych.

W przypadku wszystkich parametrów pogłosowych i dla wszystkich opisywanych w tym podrozdziale sal uzyskano bardzo niskie wartości SD, co świadczy o dużej jednorodności parametrów w każdej z sal. Jedynie w salach 6, 12 i 13, wartość SD dla EDT przekracza próg JND co może spowodować różnice w odbiorze wczesnego zaniku energii. Dla klarowności i T_s uzyskano wyższe wartości SD, które wskazują na możliwość odmiennej percepcji klarowności i bliskości dźwięku w różnych punktach poszczególnych sal.

6.3.2 Sala 2 – bez RES

W Tabeli 42 pokazano średnie wartości parametrów akustycznych zmierzonych w sali 2 bez RES. W nawiasach okrągłych podano wartość odchylenia standardowego.

Tabela 42: Wartości parametrów zmierzone w sali 2 bez RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	T_s [ms] (SD)	STI (SD)
2	Bez regulacji	1,57 (0,09)	1,81 (0,03)	1,86 (0,03)	-1,6 (1,7)	1 (1,6)	42 (9)	113 (15)	0,48 (0,03)
	Wariant 1	1,46 (0,08)	1,71 (0,03)	1,78 (0,03)	-1,3 (1,4)	1,3 (1,5)	43 (7)	107 (13)	0,5 (0,03)

W sali 2 bez RES i dla wykorzystanie kotary znajdującej się w tylnej części sceny spowodowało nieznaczne skrócenie RT20 o 0,1 s (z 1,81 do 1,71 s) i podobne skrócenie EDT. Klarowność C80 i C50 wzrosły o 0,3 dB, a wskaźnik zrozumiałości STI nieznacznie wzrósł z 0,48 do 0,50, pozostając w górnym zakresie dostatecznej zrozumiałości. Środek ciężkości energii T_s osiągnął nieco niższą wartość (zmiana ze 113 na 107 ms). Wartości SD dla parametrów pogłosowych pozostają w niskim zakresie, poniżej progu JND co świadczy o ich dużej równomierności rozkładu, natomiast wartości SD dla klarowności przekraczają próg JND, co może powodować odmienną percepcją klarowności w różnych miejscach sali.

6.3.3 Sala 5 – bez RES

W Tabeli 43 pokazano średnie wartości parametrów akustycznych zmierzonych w sali 5 bez RES. W nawiasach okrągłych podano wartość odchylenia standardowego.

Tabela 43: Wartości parametrów zmierzone w sali 5 bez RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
5	Bez regulacji	1,49 (0,14)	1,63 (0,04)	1,63 (0,03)	-0,3 (1,6)	2,4 (1,3)	49 (8)	99 (14)	0,53 (0,03)
	Wariant 1	1,34 (0,13)	1,51 (0,03)	1,52 (0,02)	0,2 (1,4)	2,8 (1,2)	51 (8)	91 (11)	0,54 (0,02)

W sali 5 wykorzystanie kotary w tylnej części sceny zmieniło wartość RT20 o -0,12 s, EDT zmieniło w większym stopniu niż RT20, bo z wartości 1,49 s do 1,34 s. Klarowność wyrażona jako C80 zwiększyła się o 0,4 dB, a Ts przesunął się o 8 ms w stronę wcześniejszej energii. STI zmienił wartość z 0,53 do 0,54 (+0,01) a więc zrozumiałość pozostała w zakresie dostatecznej. Wartości SD świadczą o dużej jednorodności pogłosu (niskie wartości SD dla parametrów RT20 i RT30) i możliwie spostrzegalnych różnicach dla wczesnego zaniku wyrażonego jako EDT oraz klarowności (powyżej JND dla C50 i C80).

6.3.4 Sala 7 – bez RES

W Tabeli 44 pokazano średnie wartości parametrów akustycznych zmierzonych w sali 7 bez RES. W nawiasach okrągłych podano wartość odchylenia standardowego.

Tabela 44: Wartości parametrów zmierzone w sali 7 bez RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
7	Bez regulacji	1,54 (0,11)	1,6 (0,03)	1,62 (0,04)	-0,9 (1,1)	1,4 (0,9)	45 (6)	102 (13)	0,51 (0,04)
	Wariant 1	1,28 (0,1)	1,29 (0,03)	1,3 (0,02)	0,5 (1)	3,1 (0,9)	53 (6)	81 (11)	0,55 (0,04)

W sali 7 bez RES zastosowanie banerów akustycznych rozwijanych na ścianach otaczających widownię skróciło RT20 aż o 0,31 s (od 1,6 s do 1,29 s). Klarowność wzrosła o 1,7 dB (C80), a Ts zmniejszył wartość o 21 ms. STI poprawił się z 0,51 do 0,55 (+0,04), utrzymując się w zakresie dobrej zrozumiałości. Podobnie jak w innych salach opisywanych w tym podrozdziale, na podstawie wartości SD można wnioskować o jednorodnym czasie pogłosu i niejednorodnej klarowności.

6.3.5 Sala 8 – bez RES

W Tabeli 45 pokazano średnie wartości parametrów akustycznych zmierzonych w sali 8 bez RES. W nawiasach okrągłych podano wartość odchylenia standardowego.

Tabela 45: Wartości parametrów zmierzone w sali 8 bez RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
8	Bez regulacji	1,09 (0,13)	1,32 (0,04)	1,31 (0,03)	1,6 (2,5)	4,5 (2)	58 (12)	73 (16)	0,61 (0,04)
	Wariant 1	0,98 (0,11)	1,21 (0,03)	1,2 (0,02)	2 (2,4)	5,2 (1,8)	60 (11)	67 (14)	0,59 (0,04)
	Wariant 2	1,05 (0,12)	1,28 (0,04)	1,28 (0,02)	1,9 (2,2)	4,8 (1,9)	60 (10)	70 (15)	0,59 (0,05)
	Wariant 3	0,94 (0,12)	1,17 (0,03)	1,16 (0,02)	2,5 (2,2)	5,5 (1,8)	63 (10)	64 (13)	0,58 (0,05)

W sali 8 bez RES, będącej salą wielofunkcyjną, ale o pierwotnie planowanej funkcji sali filharmonicznej, $RT20 = 1,32$, która jest bliższa wartości sugerowanej dla sali kameralnej a nie koncertowej. Wartości klarowności ($C50 = 1,6$ i $C80 = 4,5$) świadczą o dobrej czytelności. STI o wartości 0,61 klasyfikuje salę jako obiekt o dobrej zrozumiałości mowy. Wariant 1, a więc rozwinięcie kotar na dolnym poziomie widowni spowodowało spadek wartości $RT20$ o 0,12 s (z 1,32 s do 1,21 s); wzrost $C80 +0,4$ dB; spadek T_s o 6 ms i spadek STI o 0,02. Rozwinięcie kotar tylko na górnym poziomie widowni (wariant 2) spowodowało mniejszy wpływ na zmiany wartości parametrów niż w przypadku rozwinięcia kotar na dolnym poziomie. $RT20$ zmniejszyło się o 0,04 s; $C80$ wzrosło o 0,3 dB; T_s zmalało o 2 ms; a STI o 0,02. Rozwinięcie wszystkich kotar (wariant 3) spowodowało największe zmiany wartości parametrów. Wartości poszczególnych parametrów zmieniły się w następujący sposób: $RT20 -0,17$ s; $C80 +1$ dB; $T_s -9$ ms; STI $-0,03$. Wartości SD dla parametrów pogłosowych są niskie i świadczą o dużej jednorodności pogłosu, natomiast wartości SD dla klarowności są wysokie (od 1,8 do 2,5) i wskazują na dużą nierównomierność ich rozkładu w przestrzeni Sali.

Wykorzystanie wszystkich kotar zapewnia zmiany wartości parametrów w większym stopniu niż wykorzystanie ich na poszczególnych poziomach widowni, co jest zgodnie z oczekiwaniami. Z wykorzystaniem wszystkich kotar uzyskano istotną zmianę wartości $RT20$ oraz praktycznie niezmienną wartość STI pozostającą blisko granicy pomiędzy dostateczną a dobrą zrozumiałością mowy.

6.3.6 Sala 9 – bez RES

W Tabeli 46 pokazano średnie wartości parametrów akustycznych zmierzonych w sali 9 bez RES. W nawiasach okrągłych podano wartość odchylenia standardowego.

Tabela 46: Wartości parametrów zmierzone w sali 9 bez RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
9	Bez regulacji	1,8	1,83	1,84	-1,5	0,9	42	120	0,48
		(0,05)	(0,03)	(0,02)	(1)	(0,9)	(5)	(10)	(0,03)
	Wariant 1	1,02	1,18	1,18	2,4	5	63	68	0,57
		(0,09)	(0,04)	(0,03)	(0,9)	(0,9)	(4)	(6)	(0,03)
	Wariant 2	1,17	1,28	1,27	1,2	3,7	57	78	0,56
		(0,11)	(0,03)	(0,01)	(1,3)	(1,1)	(7)	(10)	(0,02)
	Wariant 3	1,56	1,62	1,63	-0,2	2,3	49	100	0,51
		(0,06)	(0,03)	(0,02)	(1,3)	(1)	(6)	(11)	(0,03)

W sali 9 bez RES, będącej salą filharmoniczną uzyskano zalecane w literaturze wartości poszczególnych parametrów. RT20 = 1,783, EDT i RT30 bliskie RT20, C50 i C80 w zakresie od – 1,5 do 0,9. Wartości Ts to 120 ms, a więc wysoka, a wartość STI jest niska i równa 0,48.

W wariacie 1, a więc w sytuacji wykorzystania i banerów i kotary, zmiany wartości poszczególnych parametrów są największe i przedstawiają się następująco: RT20 –0,65 s; C80 +4,1 dB; Ts -52 ms; STI +0,11. Wykorzystanie tylko banerów rozwijanych wokół widowni (wariant 2) zmniejszyło RT20 o 0,55 s, zwiększyło C80 o 2,8 dB, zwiększyło Ts o 42 ms i STI o 0,08. Wykorzystanie kurtyny akustycznej, (wariant 3) umieszczonej na tylnej ścianie sceny spowodowało mniejsze zmiany niż w przypadku wykorzystania banerów, co jest rezultatem oczekiwanym, ponieważ powierzchnia banerów w sali 8 jest większa niż powierzchnia kurtyny. Wartości STI pozostają w zakresie dostatecznej zrozumiałości dla wszystkich wariantów. Wartości SD świadczą o dużej jednorodności czasu pogłosu i możliwie zauważalnych różnicach w odbiorze klarowności.

Wykorzystanie kotar i banerów w sali 8 działa stopniowo i przewidywalnie: im więcej tłumienia, tym krótszy pogłos i lepsza klarowność.

6.3.7 Sali 10 – bez RES

W Tabeli 47 pokazano średnie wartości parametrów akustycznych zmierzonych w sali 10 bez RES. W nawiasach okrągłych podano wartość odchylenia standardowego.

Tabela 47: Wartości parametrów zmierzone w sali 10 bez RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
10	Bez regulacji	1,47	1,44	1,49	1,2	3,3	57	86	0,56
		(0,09)	(0,06)	(0,06)	(1,8)	(1,6)	(9)	(13)	(0,04)
	Wariant 1	1,35	1,38	1,44	1,2	3,6	56	83	0,57
		(0,14)	(0,04)	(0,04)	(2)	(1,7)	(11)	(14)	(0,04)

W sali 10 bez RES rozwinięcie kotary w tylnej części sceny nieznacznie zmienia wartość RT20 (-0,06 s) natomiast bardziej zmienia wartość EDT (o -0,12). Klarowność C50 pozostała

bez zmian (1,2 dB), a C80 zmieniło się o +0,3 dB. STI wzrósł niezauważalnie (+0,01 przy SD równym 0,04). Wartości SD świadczą o podobnym charakterze jednorodności akustycznej jaką zaobserwowano w pozostałych salach opisywanych w tym rozdziale: wartości SD dla RT20 i RT30 świadczą o jednorodności późnej fazy zaniku, SD dla klarowności wskazują na możliwie zauważalne różnice klarowności w obrębie sali.

6.3.8 Sala 11 – bez RES

W Tabeli 48 pokazano średnie wartości parametrów akustycznych zmierzonych w sali 11 bez RES. W nawiasach okrągłych podano wartość odchylenia standardowego.

Tabela 48: Wartości parametrów zmierzone w sali 11 bez RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
11	Bez regulacji	1,28 (0,22)	1,69 (0,13)	1,82 (0,1)	3,3 (1,8)	5,1 (1,6)	67 (8)	72 (12)	0,62 (0,05)
	Wariant 1	1,24 (0,23)	1,64 (0,16)	1,79 (0,11)	4 (1,3)	5,6 (1,3)	70 (5)	66 (10)	0,63 (0,04)
	Wariant 2	0,72 (0,09)	1,29 (0,13)	1,49 (0,13)	5,4 (2)	8,2 (1,5)	75 (7)	52 (7)	0,68 (0,05)
	Wariant 3	0,82 (0,11)	1,35 (0,12)	1,52 (0,12)	4,5 (2,1)	7,1 (1,7)	72 (8)	57 (8)	0,65 (0,04)

Salę 11 bez RES zaprojektowano jako salę wielofunkcyjną z pierwszoplanową funkcją opery. Uwagę zwraca duża różnica wartości parametrów EDT i RT20 w wariacie bez kotar i banerów, która wynosi aż 0,41 s. Różnica ta utrzymuje się na podobnym poziomie dla wszystkich zmierzonych wariantów wykorzystania kotar i banerów akustycznych. Wykorzystanie banerów otaczających przestrzeń widowni (wariant 1) ma niewielki wpływ na zmianę wartości parametrów: RT20 skrócił się jedynie o 0,05 s; C50 wzrosło o 0,7 dB; C80 wzrosło o 0,5 dB. Ts w wariacie z banerami był krótszy o 6 ms, a STI wyższy o 0,01. Wariant 2, a więc wykorzystanie zarówno kotar jak i banerów spowodował zmianę RT20 o -0,4 s; C80 +2,1 dB; Ts o -20 ms. STI wzrósł z 0,62 do 0,68. Zastosowanie kotary w tylnej części sceny (wariant 3) powoduje największe zmiany wartości parametrów akustycznych spośród wszystkich przypadków użycia kotary zmierzonych w ramach niniejszej pracy. Zmiany te są też większe niż w przypadku zastosowania banerów w tej sali. Po rozwinięciu kotary, RT20 zmniejszył się o 0,34 s a klarowność C80 wzrosła o 2 dB. Ts był krótszy o 15 ms, a STI zwiększyło się o 0,03. Większy wpływ kotary umieszczonej w tylnej części sceny w porównaniu z banerami otaczającymi widownię na wartości parametrów akustycznych w sali 9 wynika z nierównomiernego rozkładu chłonności akustycznej w tym obiekcie. Sala zawiera dużą, słabo wytłumioną przestrzeń techniczną oraz mniejszą, ale bardziej chłonną przestrzeń widowni. W takiej konfiguracji oddzielenie akustyczne tych dwóch stref (poprzez zastosowanie kotary)

ma większy wpływ na zanik energii akustycznej niż dodatkowe zwiększanie chłonności w obszarze, który już charakteryzuje się relatywnie wysokim tłumieniem. Niskie wartości SD dla parametrów RT20 i RT30 występują jedynie w przypadku braku zastosowania kotar lub banerów. W konfiguracjach ze zmienną akustyką wartości SD dla wszystkich parametrów osiągają wartości zbliżone do progu JND lub go przekraczają.

6.3.9 Sala 14 – bez RES

W Tabeli 49 pokazano średnie wartości parametrów akustycznych zmierzonych w sali 14 bez RES. W nawiasach okrągłych podano wartość odchylenia standardowego.

Tabela 49: Wartości parametrów zmierzone w sali 14 bez RES.

Numer sali	Wariant zmiennej akustyki	EDT [s] (SD)	RT20 [s] (SD)	RT30 [s] (SD)	C50 [dB] (SD)	C80 [dB] (SD)	D [%] (SD)	Ts [ms] (SD)	STI (SD)
14	Bez regulacji	0,71 (0,04)	0,73 (0,02)	0,73 (0,02)	3,9 (1,2)	7 (0,9)	70 (5)	50 (7)	0,66 (0,02)
	Wariant 1	0,68 (0,04)	0,7 (0,02)	0,7 (0,02)	4,1 (1,1)	7,5 (0,9)	71 (5)	49 (6)	0,67 (0,02)

Sala 14 bez RES to sala wielofunkcyjna, w której wszystkie wydarzenia odbywają się z wykorzystaniem systemu nagłośnieniowego. W wariancie bazowym w sali zmierzono niskie wartości EDT, RT20 i RT30 (około 0,73 s), wysokie wartości klarowności (C50 = 3,9 i C80 = 7 dB) oraz wartość STI równą 0,66, a więc określającą dobrą zrozumiałość. W sali 14, wykorzystanie banerów akustycznych przyniosło kosmetyczne zmiany wartości poszczególnych parametrów: RT20 -0,03 s; C80 +0,2 dB; Ts -1 ms oraz wzrost wartości STI o 0,01. Biorąc pod uwagę wartości SD dla poszczególnych parametrów należy uznać, że zmiany te prawdopodobnie są niezauważalne dla słuchaczy.

6.3.10 Analiza wpływu rozwiązań pasywnych na jednorodność warunków akustycznych w salach bez RES

W zakresie odchylen standardowych (SD) nie obserwuje się istotnych wzrostów zmienności w wariantach regulowanych. Odchylenia dla czasów pogłosu pozostają w zakresie 0,01–0,08 s, dla klarowności 0,9–2 dB, dla Ts 5–15 ms, a dla STI 0,02–0,05. Świadczy to o wysokiej powtarzalności wyników pomiarów oraz o stabilnym działaniu zastosowanych rozwiązań regulacyjnych.

6.3.11 Analiza liniowości rozkładu energii akustycznej w salach bez RES

Analizując średnie wartości zmierzonych parametrów, należy uznać, że w 10 z 14 sal (71%, Sale 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 13, 14) stwierdzono liniowy a w 4 z 14 (29%, Sale: 2, 8, 11,12) sal bez

RES i bez wariantów zmiennej akustyki stwierdzono nieliniowy zanik energii akustycznej (zgodnie z kryterium przyjętym w tej pracy). Sala 4 znajduje się na pograniczu klasyfikacji jako sala o nieliniowych zanikach, ponieważ różnica średnich wartości EDT i RT20 osiągnęła progową wartość JND. Ponieważ uzyskany wynik nie przekracza wartości progowej zaliczono ją do sal o liniowym zaniku energii akustycznej. Wykorzystanie kotar zmieniło zanik energii akustycznej z liniowej na nieliniową dla jednej sali (Sala 5). Pozostałe sale zachowują ten sam charakter zaniku energii akustycznej bez względu na wykorzystanie kotar lub dźwiękochłonnych.

Dokładniejsza analiza wszystkich przeprowadzonych pomiarów wskazuje, że z 539 kombinacji pomiarowych w salach bez RES, 343 kombinacji zmierzono bez kotar czy banerów akustycznych, z czego 113 pomiary (33%) kombinacji okazało się być nieliniowych. W salach o średnich liniowych zanikach energii, spośród 263 zaników, 46 okazało się być nieliniowych (17%) a w salach o średnich nieliniowych zanikach, spośród 80 zaników, 67 (84%) okazało się być nieliniowych.

6.3.12 Analiza wpływu pasywnych rozwiązań regulacji akustyki na korelację pomiędzy zmierzonymi parametrami

Podobnie jak dla sal z RES, dla sal bez RES również obliczono współczynniki korelacji (Rho Spearmana) pomiędzy poszczególnymi parametrami akustycznymi oraz istotność statystyczną otrzymanych wyników (wartość p).

W Tabelach 50 i 52 pokazano wyniki korelacji dla zbioru danych zawierającego wszystkie pomiary przeprowadzone w salach bez RES. Tabela 50 zawiera wyniki pomiarów w salach bez zastosowania banerów czy kotar, a Tabela 51 dla wszystkich wariantów pasywnie regulowanej akustyki. Dla obydwu zbiorów oraz wszystkich korelacji uzyskano wyniki istotnie statystycznie ($p < 0,05$), wartości o korelacji silnej lub bardzo silnej zaznaczono pogrubioną czcionką.

Tabela 50: Wartości korelacji dla parametrów zmierzonych w salach bez RES oraz bez pasywnej regulacji akustyki. Silne i bardzo silne korelacje zaznaczono pogrubioną czcionką.

RT20	0,911						
RT30	0,897	0,981					
C50	-0,813	-0,752	-0,721				
C80	-0,876	-0,796	-0,771	0,97			
D50	-0,81	-0,75	-0,718	0,999	0,971		
Ts	0,906	0,856	0,826	-0,945	-0,965	-0,946	
STI	-0,838	-0,815	-0,79	0,769	0,804	0,767	-0,822
EDT	RT20	RT30	C50	C80	D50	Ts	

Tabela 51: Wartości korelacji dla parametrów zmierzonych w salach bez RES z wykorzystaniem pasywnej regulacji akustyki. Silne i bardzo silne korelacje zaznaczono pogrubioną czcionką.

RT20	0,672						
RT30	0,541	0,935					
C50	-0,709	-0,341	-0,215				
C80	-0,834	-0,472	-0,335	0,951			
D50	-0,71	-0,341	-0,216	0,999	0,952		
Ts	0,845	0,545	0,417	-0,938	-0,976	-0,939	
STI	-0,681	-0,392	-0,237	0,734	0,743	0,733	-0,7
EDT	RT20	RT30	C50	C80	D50	Ts	

Wartości i kierunki korelacji są zgodne z oczekiwaniami. Parametry RT20 i RT30 korelują dodatnio i silnie, STI koreluje ujemnie i silnie z zarówno z EDT, RT20 jak i RT30, oraz silnie i dodatnio z C50, C80 i D50. Korelacja D50 i C50 jest bliska 1, co jest zgodne z oczekiwaniami, ponieważ wartości tych parametrów z definicji są zależne od siebie. Dla parametrów C80 i STI uzyskano wyższe wartości korelacji niż dla C50 i STI. Wynik ten świadczy o przydatności parametru C80 w ocenie zrozumiałości mowy i o możliwości wykorzystania C80 nie tylko jako parametru określającego klarowność dla muzyki, ale również dla mowy i jednocześnie obniża przydatność parametru C50. Wykorzystanie pasywnych rozwiązań do regulacji akustyki osłabia siłę korelacji parametrów RT20 i RT30 z pozostałymi zmierzonymi parametrami obiektywnej oceny akustyki wnętrz, jednak kierunki korelacji pozostają niezmienione.

W analizach korelacji przeprowadzonych oddzielnie dla poszczególnych sal bez systemu RES oraz ich wariantów regulacji akustyki stwierdzono niewiele korelacji istotnych statystycznie. Najczęściej pojawiające się istotne statystycznie korelacje dotyczyły następujących par parametrów EDT i RT20, RT20 i RT30, EDT i C50, C50 i C80, C50 i D oraz C80 i D. Tylko dwukrotnie otrzymano istotną statystycznie korelację pomiędzy C50 a STI a 4-krotnie dla pary STI i C80. W 9 przypadkach uzyskano umiarkowane, lecz istotne ujemne korelacje w parach EDT z RT20 lub EDT z RT30. Ujemne korelacje między wartościami EDT i RT nie są odnotowywane w literaturze. Warto przy tym zauważyć, że w badaniach zazwyczaj wykorzystuje się średnie wartości parametrów, natomiast analizy przestrzennego rozkładu tych wartości oraz ich wzajemnych korelacji są prowadzone niezwykle rzadko.

6.3.13 Wpływ kotar i banerów akustycznych na parametry pogłosowe – podsumowanie wyników pomiarowych

Na podstawie analizy wszystkich wariantów zmiennej akustyki można stwierdzić, że parametry RT20 i RT30 zmieniają się nieznacznie lub pozostają stabilne w przypadku zastosowania kotar z tyłu sceny, zmiany te rzadko przekraczają 0,02 s, co świadczy o tym, że

kotary wpływają głównie na strukturę wczesnych odbić, bez istotnego oddziaływania na późny pogłos. Nieznacznie bardziej zmieniają się wartości EDT (maksymalnie o wartość 0,12 s w sali 5).

W przypadku zastosowania banerów akustycznych zmiany wartości RT są większe i sięgają nawet o 0,55 sekundy (w sali 9). W niemal wszystkich przypadkach obserwuje się wzrost wartości parametrów klarowności C50 i C80 w porównaniu do wariantu „Bez regulacji”. Wskazuje to na zwiększenie udziału energii wczesnych odbić, co przekłada się na poprawę czytelności dźwięku – zarówno mowy, jak i muzyki. Wartości wskaźnika STI, odpowiadającego za zrozumiałość mowy, również ulegają niewielkiemu wzrostowi. We wszystkich salach największe zmiany wartości parametrów przynosi łączne zastosowanie kotar i banerów.

Podsumowując, zastosowanie pasywnych elementów regulacji akustyki prowadzi do zmian w strukturze czasowej odbić, czego efektem jest poprawa klarowności, wzrost STI oraz przesunięcie Ts w stronę późniejszych odbić, przy jednoczesnym zachowaniu stabilności parametrów pogłosowych oraz niewielkiej zmienności między pomiarami. Tabela 52 przedstawia zmiany wartości poszczególnych parametrów zanotowane w salach z pasywnymi systemami regulacji akustyki.

Tabela 52: Zakresy zmian wartości poszczególnych parametrów zanotowane w salach z pasywnymi systemami regulacji akustyki.

Numer Sali	Zakres zmian EDT [s]	Zakres zmian RT20 [s]	Zakres zmian C50 [dB]	Zakres zmian C80 [dB]	Zakres zmian Ts [ms]	Zakres zmian STI
2	1,57 → 1,46 (-0,11)	1,81 → 1,71 (-0,10)	-1,6 → -1,3 (+0,3)	1,0 → 1,3 (+0,3)	113 → 107 (-6)	0,48 → 0,50 (+0,02)
5	1,49 → 1,34 (-0,15)	1,63 → 1,51 (-0,12)	-0,3 → 0,2 (+0,5)	2,4 → 2,8 (+0,4)	99 → 91 (-8)	0,53 → 0,54 (+0,01)
7	1,54 → 1,28 (-0,26)	1,60 → 1,29 (-0,31)	-0,9 → 0,5 (+1,4)	1,4 → 3,1 (+1,7)	102 → 81 (-21)	0,51 → 0,55 (+0,04)
8	1,09 → 0,94 (-0,15)	1,32 → 1,17 (-0,15)	1,6 → 2,5 (+0,9)	4,5 → 5,5 (+1,0)	73 → 64 (-9)	0,61 → 0,58 (-0,03)
9	1,80 → 1,02 (-0,78)	1,83 → 1,18 (-0,65)	-1,5 → 2,4 (+3,9)	0,9 → 5,0 (+4,1)	120 → 68 (-52)	0,48 → 0,57 (+0,09)
10	1,47 → 1,35 (-0,12)	1,44 → 1,38 (-0,06)	1,2 → 1,2 (+0,0)	3,3 → 3,6 (+0,3)	86 → 83 (-3)	0,56 → 0,57 (+0,01)
11	1,28 → 0,72 (-0,56)	1,69 → 1,29 (-0,40)	3,3 → 5,4 (+2,1)	5,1 → 8,2 (+3,1)	72 → 52 (-20)	0,62 → 0,68 (+0,06)
14	0,71 → 0,68 (-0,03)	0,73 → 0,70 (-0,03)	3,9 → 4,1 (+0,2)	7,0 → 7,5 (+0,5)	50 → 49 (-1)	0,66 → 0,67 (+0,01)

6.4 Porównanie wpływu RES i pasywnych rozwiązań do regulacji akustyki na wartości parametrów pogłosowych (EDT, RT20, RT30) oraz na charakter zaniku energii akustycznej

Zarówno zastosowanie systemów RES, jak i użycie kotar czy banerów dźwiękochłonnych umożliwia kształtowanie warunków akustycznych odmiennych od stanu wyjściowego, co pozwala na organizację wydarzeń o zróżnicowanym charakterze przy zachowaniu optymalnej akustyki dla każdego z nich. Wykorzystanie zarówno aktywnych, jak i pasywnych narzędzi do regulacji akustyki stanowi istotną zaletę, sprzyjającą efektywnemu wykorzystaniu sali oraz podnoszącą jakość odbywających się w niej wydarzeń.

Zastosowanie kotar lub banerów skutkuje skróceniem czasu pogłosu. W analizowanych salach wartość EDT zmniejszyła się maksymalnie o 0,7 s, a średnio o 0,2 s; natomiast RT20 spadło maksymalnie o 0,6 s i średnio również o 0,2 s. Klarowność mowy, wyrażona parametrami C50 i C80, wzrosła odpowiednio maksymalnie o 3,9 dB i 4,1 dB, a średnio o 1,1 dB i 1,3 dB. Wartość wskaźnika STI pozostała zasadniczo niezmienną, z wyjątkiem sali 11 w wariancie 3, gdzie odnotowano spadek o 0,09. Zastosowanie kotar lub banerów dźwiękochłonnych zwiększa tym samym wielofunkcyjność sali, umożliwiając uzyskanie warunków odpowiednich dla różnych typów wydarzeń o zbliżonych wymaganiach akustycznych – to znaczy takich, dla których optymalne wartości parametrów mieszczą się w zakresie zmian możliwych do osiągnięcia za pomocą pasywnych rozwiązań.

Zastosowanie systemów RES prowadzi do zmian wartości parametrów akustycznych, w szczególności RT20, w znacznie szerszym zakresie niż w przypadku rozwiązań pasywnych, a kierunek tych zmian jest odwrotny. Rozwiązania pasywne skracają czas pogłosu i zwiększają klarowność, natomiast systemy RES wydłużają pogłos i obniżają klarowność.

Spośród zmierzonych sal i wariantów z włączonym RES, wartość EDT zmieniła się maksymalnie o 0,7 s, a średnio o 0,2 s. W przypadku RT20 odnotowano zmiany sięgające maksymalnie 2,2 s i średnio 0,5 s. Parametr C50 zmienił się maksymalnie o 3,3 dB, a C80 – maksymalnie o 5,2 dB. Zmiany wartości wskaźnika STI nie są proporcjonalne do zmian RT20 – maksymalny spadek STI w wyniku działania systemu RES wyniósł 0,1.

Systemy RES umożliwiają płynną modulację czasu pogłosu w bardzo szerokim zakresie, oferując możliwość uzyskania zupełnie odmiennych warunków akustycznych bez konieczności fizycznych zmian w przestrzeni sali. Zmiany wartości RT20 osiągane dzięki RES mogą być kilkukrotnie większe niż te uzyskiwane za pomocą rozwiązań pasywnych. Co istotne, wydłużenie czasu pogłosu za pomocą systemów RES nie wpływa znacząco na zrozumiałość mowy – wartość STI pozostaje na poziomie zbliżonym do tego, który występuje w danej sali przy wyłączonym systemie.

W niektórych przypadkach, modyfikacja wartości czasu pogłosu zmienia również charakter zaniku energii akustycznej z liniowej na nieliniową. Spośród sal analizowanych w tym rozdziale sal z RES i dla wyłączonego RES nieliniowy zanik stwierdzono w 3 z 8 (38%) sal. Dla sal z pasywnymi rozwiązaniami regulacji akustyki, lecz bez ich zastosowania, nieliniowy zanik stwierdzono w 4 z 14 sal (29%). Spośród 31 zmierzonych wariantów pracy systemu RES aż 26 (84%) wykazywało nieliniowy charakter zaniku. Jedynie w sali 5 z RES włączenie systemu nie spowodowało przejścia z zaniku liniowego na nieliniowy. W przypadku 13 zmierzonych wariantów zastosowania kotar i banerów w salach bez RES, 8 (62%) wykazywało nieliniowy zanik. Pasywne rozwiązania regulacyjne zmieniły charakter zaniku tylko w jednej z analizowanych sal.

W salach z systemem RES odnotowano wyraźny wzrost liczby nieliniowych odpowiedzi po jego włączeniu: przy wyłączonym RES odsetek liniowych i nieliniowych SRIR-ów był zbliżony (50%), natomiast po włączeniu aż 86% uznano za nieliniowe, a jedynie 14% za liniowe. W salach z możliwością zastosowania kotar i banerów akustycznych również odnotowano zmiany: bez ustrojów 67% SRIR-ów miało charakter liniowy, natomiast przy rozwiniętych kotarach odsetek ten spadł do 40%, a nieliniowych wzrósł do 60%. Spośród 31 zmierzonych wariantów pracy RES aż 26 (84%) wykazuje nieliniowy charakter zaniku. Wykorzystanie systemu nie zmieniło kształtu zaniku z liniowego na nieliniowy jedynie w sali 5 z RES, we wszystkich pozostałych przypadkach, średnie wartości parametrów pogłosowych wskazywał na nieliniowy zanik energii. Spośród 13 zmierzonych wariantów zastosowania kotar i banerów w salach bez RES, 8 z nich (62%) wykazuje nieliniowy charakter zaniku. Zastosowanie pasywnych rozwiązań regulacyjnych zmieniło charakter zaniku tylko w jednej z analizowanych sal.

Podsumowując, zarówno wykorzystanie RES jak i kotar w istotny sposób wpływa na kształt odpowiedzi impulsowej, zwiększając nieliniowość zaniku dźwięku. W Tabeli 53 przedstawiono zestawienie klasyfikacji charakterystyk SRIR w zależności od kształtu krzywej zaniku energii akustycznej, z uwzględnieniem kryteriów opartych na wartościach JND oraz z podziałem na próbki zarejestrowane w salach wyposażonych w systemy RES i w salach pozbawionych takiego systemu.

Tabela 53: Liczba SRIR-ów z określoną liniowością zaniku energii akustycznej.

Typ sali	Liczba SRIR-ów	Liniowe	Nieliniowe	Liniowe w %	Nieliniowe w %
Z wyłączonym RES	253	126	127	50%	50%
Z włączonym RES	833	115	700	14%	86%
Bez RES bez kotar	343	230	113	67%	33%
Bez RES z kotarami	271	108	163	40%	60%
Łącznie	1682	579	1103		

6.5 Zanik energii akustycznej w przestrzeniach zamkniętych – podsumowanie danych literaturowych i wyników pomiarów w kontekście planowanych eksperymentów psychoakustycznych

6.5.1 Analiza danych literaturowych oraz własnych wyników pomiarów

W kontekście hipotezy badawczej postawionej w niniejszej dysertacji celem analizy było porównanie wyników własnych pomiarów, wykonanych w salach z systemem RES i bez niego, z danymi literaturowymi, w szczególności z obszernym zbiorem opublikowanym przez Beranka (2004). Celem tej analizy było określenie, jak powszechne są przypadki nieliniowego zaniku energii akustycznej (rozpoznawalnego, zgodnie z założeniami niniejszej dysertacji, na podstawie różnicy między parametrami RT20 i EDT przekraczającej próg JND), a także jaki wpływ na przebieg zaniku energii ma obecność widowni.

Analiza danych Beranka (2004) wskazuje, że obecność widowni skraca RT20 średnio o 0,32 s (SD = 0,37), a parametr EDT o 0,31 (SD = 0,23) s. Średnie wartości skrócenia obu parametrów są zatem bardzo zbliżone, a rozkład zmian w poszczególnych salach nie wykazuje istotnej przewagi jednego z parametrów nad drugim. W zestawie 5, obejmującym pomiary RT20 i EDT zarówno bez, jak i z widownią, w siedmiu salach większą zmianę zanotowano dla RT20, w siedmiu dla EDT, a w jednej różnica była identyczna. Przeczy to opinii Beranka wyrażonej wcześniej (1999), jakoby wpływ obecności publiczności był znaczący jedynie dla RT, a marginalny dla EDT.

Na podstawie danych pomiarowych Beranka należy uznać, że obecność widowni wpływa w podobnym stopniu na oba parametr. Należy podkreślić, że pojawienie się publiczności zwiększa prawdopodobieństwo powstania nieliniowych zaników energii akustycznej, a zatem dane z pomiarów bez widzów nie mogą być uznane za reprezentatywne dla warunków rzeczywistych.

Spośród 81 sal (zestaw 2), dla których dostępne są wartości RT20 i EDT zmierzone bez udziału widowni, w 22 przypadkach (27%) różnica między tymi parametrami przekraczała

górny próg JND, co pozwala klasyfikować zanik energii jako nieliniowy. Spośród 15 sal (zestaw 5), dla których zmierzono parametry z udziałem widowni i bez niej, dla 13% sal stwierdzono nieliniowy zanik bez udziału publiczności a dla 27% nieliniowy zanik z publicznością.

W kontekście wyników przedstawionych przez Beranka można stwierdzić, że podobne wyniki uzyskano w ramach własnych badań opisanych w niniejszej dysertacji: spośród 14 sal bez systemu RES, 4 (29%) miały nieliniowy zanik dla wariantów bez kotar lub banerów akustycznych. W 8 salach wyposażonych w systemy RES, w pomiarach z wyłączonym systemem RES, 3 sale (38%) wykazały nieliniowy zanik, a więc nieznacznie więcej niż w salach bez RES. Oznacza to, że nieliniowy przebieg zaniku dźwięku nie jest wyjątkiem, lecz powszechnie występującym zjawiskiem akustycznym. Dodatkowo, zarówno wykorzystanie aktywnych jak i pasywnych systemów regulacji pogłosu zwiększa częstość występowania zaników nieliniowych, w przypadku sal z RES z 50% do 86% a w przypadku sal bez RES z 33% do 60%.

Zbieżność tych wartości niezależnie od źródła danych, typu obiektu czy systemu regulacji akustyki, prowadzi do następujących wniosków:

- proporcja sal z liniowym i nieliniowym przebiegiem zaniku energii jest względnie stała w rzeczywistych warunkach,
- w salach o średnich liniowych zanikach energii powszechnie występują nieliniowe zaniki,
- wykorzystanie rozwiązań regulujących czas pogłosu znaczenie zwiększa występowanie nieliniowych zaników energii akustycznej
- udział publiczności zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia nieliniowych zaników energii akustycznej,
- wpływ obecności widowni na wartości EDT i RT20 jest zbliżony.

6.5.2 Wnioski z wyników pomiarów w kontekście planowanych eksperymentów psychoakustycznych

W świetle wyników pomiarów analizowanych w Rozdziale 5, badania prowadzone z wykorzystaniem próbek dźwiękowych stworzonych przy pomocy SRIR-ów nagranych w salach bez widowni, z nieliniowymi zanikami energii akustycznej, mają pełne uzasadnienie – opisują bowiem zjawiska typowe dla rzeczywistych przestrzeni koncertowych. Wprawdzie w książce Beranka (2004) nie podano wyników pojedynczych pomiarów, jednak podobne proporcje sal z liniowym i nieliniowym zanikiem energii pomiędzy zestawieniem dokonanym

przez Beranka a wynikami własnych badań pozwalają na przyjęcie założenia, że również w salach, które na podstawie wartości średnich parametrów EDT i RT20 można klasyfikowanych jako liniowe, występuje istotna liczba przypadków pomiarowych charakteryzujących się nieliniowym przebiegiem zaniku energii. Ponieważ wpływ obecności widowni na wartości parametrów RT20 i EDT jest zbliżony - to znaczy, że obie te charakterystyki ulegają porównywalnemu skróceniu po wprowadzeniu publiczności do sali - można założyć, że charakter zaniku energii akustycznej w pomieszczeniu pozostaje jakościowo taki sam, niezależnie od obecności widzów. W związku z tym nagrania SRIR-ów wykonane w pustych salach, bez udziału publiczności, mogą być traktowane jako reprezentatywne również dla warunków z pełną widownią, przynajmniej w kontekście celu niniejszej dysertacji, która - poprzez analizę różnic w percepcji między salami z systemem RES a bez niego - niejako automatycznie obejmuje przypadki nieliniowych zaników energii akustycznej charakterystycznych dla obiektów z RES. Można bowiem założyć, że wszelkie zależności dotyczące percepcji pogłosu i kształtu zaniku energii, które zostaną ujawnione w testach psychoakustycznych przeprowadzanych na podstawie tych nagrań, powinny odpowiadać wynikom, jakie uzyskano by w warunkach z udziałem widowni. Takie założenie uzasadnia wykorzystanie danych pomiarowych z pustych sal w badaniach subiektywnych i zwiększa ich wiarygodność w odniesieniu do realnych warunków odsłuchowych.

O ile powyższe rozważania odnoszą się bezpośrednio do analizy danych przedstawionych przez Beranka (2004), o tyle wnioski dotyczące spójności warunków pomiarowych i odsłuchowych mają szerszy charakter. Uwagi te odnoszą się również do wielu innych badań opisanych we wcześniejszych częściach niniejszej pracy, w których zastosowane podejścia metodologiczne w mniejszym stopniu zapewniają kontrolę nad zmiennymi akustycznymi niż rozwiązanie przyjęte w prezentowanych w tej pracy eksperymentach.

Sposób prowadzenia eksperymentów psychoakustycznych z wykorzystaniem nagrań i pomiarów wykonanych w salach bez publiczności ma istotną przewagę nad podejściem alternatywnym, w którym odsłuch materiału dźwiękowego odbywa się w salach z widownią, a pomiary parametrów akustycznych prowadzone są w pustych salach. Powoduje to, że materiał odsłuchowy i dane pomiarowe pochodzą z różnych warunków akustycznych, co wprowadza dodatkową zmienną mogącą obniżać wiarygodność porównań. W eksperymentach opisanych w niniejszej dysertacji zarówno materiał odsłuchowy, jak i odpowiadające mu parametry akustyczne pochodzą z tych samych warunków (sale bez publiczności), co pozwoliło wyeliminować ten potencjalny czynnik zakłócający.

Dlatego, pomimo że żadne z podejść nie jest wolne od ograniczeń, za bardziej kontrolowane i metodycznie spójne należy uznać rozwiązanie polegające na analizie odsluchowej SRIR-ów zarejestrowanych w pustej sali. Zapewnia ono jednoznaczność między warunkami rejestracji a późniejszą oceną percepcyjną oraz umożliwia powtarzalność i dokładniejsze odwzorowanie relacji akustycznych między próbkami.

W związku z powyższym, wszystkie eksperymenty opisane w Części C niniejszej pracy zostały zaprojektowane w oparciu o nagrania wykonane w pustych salach, tak aby zapewnić pełną spójność między warunkami pomiaru a warunkami odsluchu w testach psychoakustycznych.

C. Wpływ regulacji warunków akustycznych na subiektywny odbiór pogłosu – badania eksperymentalne

7 Percepcja długości pogłosu w salach z aktywną regulacją akustyki w porównaniu z salami bez regulacji lub z pasywną adaptacją pogłosową

W części B niniejszej rozprawy zweryfikowano wpływ aktywnych systemów wspomaganie pogłosu (RES) oraz pasywnych rozwiązań regulacji akustyki na warunki akustyczne w salach koncertowych i wielofunkcyjnych. Analiza uzyskanych wyników wykazała, że zastosowanie zarówno rozwiązań pasywnych, jak i aktywnych umożliwia kształtowanie zróżnicowanych warunków akustycznych, dostosowanych do wymagań różnych typów wydarzeń. Badane konfiguracje spełniały obiektywne kryteria akustyczne dla funkcji takich jak: sala konferencyjna, teatr dramatyczny, sala koncertowa z nagłośnieniem, sala kameralna, sala chóralna, opera oraz filharmonia – zgodnie z optymalnymi wartościami parametrów podawanymi w literaturze. Wykorzystanie różnych ustawień systemów wspomaganie akustyki umożliwia realizację różnych rodzajów przedstawień w jednym pomieszczeniu, co znacząco obniża koszty w porównaniu z koniecznością budowy odrębnych sal do poszczególnych zastosowań (Błasiński, 2022). Należy podkreślić, że systemy RES pozwalają na regulację czasu pogłosu w znacznie szerszym zakresie niż rozwiązania pasywne, takie jak kotary czy banery dźwiękochłonne.

Jednocześnie, wyniki pomiarów zaprezentowane w części B niniejszej pracy wskazują, że w przestrzeniach z zainstalowanymi systemami RES wartości parametru EDT zmieniają się w znacznie mniejszym zakresie niż wartości RT20 lub RT30. Skutkuje to tym, że stosunek EDT do RT odbiega od proporcji uznawanych w literaturze za optymalne (Beranek, 2004). Przykładowo, średni stosunek EDT/RT20 dla odpowiedzi impulsowych zarejestrowanych w salach z systemem RES opisanych przez Błasińskiego (2022) wynosi 0,69 (SD = 0,16), a stosunek EDT/RT30 – 0,66 (SD = 0,19). Dla porównania, średni stosunek EDT/RT20 zmierzony dla 17 brytyjskich sal koncertowych opisanych przez Barrona (1995) wynosił 0,91, z SD = 0,12.

Z drugiej strony należy pamiętać o tym, że w literaturze specjalistycznej dominuje przekonanie, że zmiana wartości EDT najlepiej odzwierciedla subiektywne wrażenie długości pogłosu. Stanowisko to znajduje potwierdzenie zarówno w klasycznych badaniach z drugiej połowy XX wieku (Schroeder, 1965; Schroeder i in., 1974), jak i w późniejszych analizach

(Barron, 1995; Soulodre i Bradley, 1995), a także w najnowszych publikacjach (del Solar Dorrego i Vigeant, 2022). W tym kontekście niewielkie zmiany EDT przy jednoczesnych znaczących zmianach RT, obserwowane w przestrzeniach z RES, nie spełniają wytycznych dotyczących ich wzajemnych proporcji, uznawanych za optymalne.

Dlatego też szczególnie istotne jest ustalenie, które z powszechnie wykorzystywanych parametrów akustycznych rzeczywiście odpowiadają za zmiany percypowane przez słuchaczy oraz czy dotychczasowe metody oceny jakości sal koncertowych, opracowane w odniesieniu do przestrzeni pasywnych (np. metoda Beranka, Ando itp.), pozostają adekwatne w przypadku sal z zainstalowanymi systemami aktywnego wspomaganie akustyki.

Ponieważ analizowane konfiguracje spełniają obowiązujące kryteria jakości akustycznej dla różnych funkcji użytkowych, a systemy typu RES oferują znacznie szerszy zakres regulacji parametrów niż rozwiązania pasywne, kluczowe staje się zrozumienie percepcyjnych konsekwencji wprowadzanych zmian. Potrzeba prowadzenia badań w tym obszarze wynika również z rosnącego trendu instalowania aktywnych systemów wspomaganie akustyki w salach koncertowych i wielofunkcyjnych, przy jednoczesnym braku opracowań oceniających skuteczność tych rozwiązań z perspektywy subiektywnych wrażeń słuchaczy.

Dotychczasowe publikacje koncentrują się głównie na technicznych aspektach działania systemów RES lub ich praktycznych zastosowaniach (Gade, 1997; Poletti, 2010; Watanabe & Ikeda, 2011; Bakker, 2012; Watanabe i in., 2013; De Bortoli i in., 2014; Błasiński, 2022; Ellison, Schwenke, 2023). Natomiast kwestie związane z rzeczywistym zakresem modyfikacji warunków akustycznych oraz ich percepcyjną skutecznością pozostają słabo udokumentowane. Brakuje także systematycznych porównań parametrów akustycznych osiąganych przy użyciu RES w różnych konfiguracjach oraz analiz wpływu tych parametrów na subiektywne wrażenia słuchowe.

Prowadzenie takich badań znajduje zatem uzasadnienie zarówno poznawcze – poprzez pogłębienie wiedzy o percepcji akustycznej zaniku energii w pomieszczeniu, przede wszystkim w nowym kontekście technologicznym – jak i praktyczne, umożliwiając bardziej świadome projektowanie i konfigurację sal wielofunkcyjnych z systemami regulacji akustyki. W obliczu dynamicznie rosnącej liczby obiektów wyposażanych w tego typu rozwiązania, opracowanie narzędzi oceny ich skuteczności z perspektywy odbiorców dźwięku wydaje się niezbędne dla dalszego rozwoju tej technologii.

Należy jednak podkreślić szerszy i bardziej fundamentalny kontekst naukowych opisanych w niniejszej dysertacji badań. Na podstawie najnowszych badań (Błasiński

i in., 2024) można jednoznacznie stwierdzić, że istnieje potrzeba ponownej weryfikacji powszechnie przyjmowanego założenia, iż to zmiany wartości EDT w największym stopniu determinują percepcję długości pogłosu. Wyniki pomiarów akustycznych przeprowadzonych w przestrzeniach wyposażonych w systemy elektronicznego wspomaganie pogłosu ujawniają bowiem istotne rozbieżności między wartością EDT a subiektywnie odbieraną długością pogłosu. Zjawisko to sugeruje, że mechanizmy percepcji pogłosu w warunkach wspomaganie elektronicznego mogą znacząco różnić się od tych, które występują w tradycyjnych, pasywnych przestrzeniach akustycznych.

W związku z powyższym, główna hipoteza prowadzonych badań brzmi:

Percepcja długości pogłosu w salach z zastosowanymi systemami elektronicznego wspomaganie akustyki (RES) wykazuje odmienny charakter niż w przestrzeniach, w których nie stosuje się regulacji pogłosu, lub w których kontrola pogłosu oparta jest wyłącznie na pasywnych rozwiązaniach akustycznych.

Aby zweryfikować tę naczelną hipotezę przeprowadzono szereg eksperymentów psychofizycznych, dla których sformułowano szczegółowe cząstkowe hipotezy badawcze. Hipotezy te wraz z określeniem celów badawczych, zostały przedstawione w opisach poszczególnych badań zawartych w kolejnych podrozdziałach niniejszej pracy.

8 Weryfikacja głównej hipotezy badawczej - eksperymenty psychofizyczne

W niniejszym rozdziale przedstawiono opis i wyniki eksperymentów zaprojektowanych w celu analizy sposobu, w jaki warunki akustyczne w pomieszczeniach wyposażonych w system aktywnego wspomagania akustyki (RES) są odbierane przez słuchaczy. Głównym celem było ustalenie, czy subiektywna percepcja pogłosowości w takich przestrzeniach odpowiada wrażeniom odbieranym w salach, w których warunki akustyczne zostały ukształtowane wyłącznie za pomocą pasywnych środków, bez udziału systemów elektronicznych.

Już na wstępie należy zauważyć, że porównanie wyników dotyczących percepcji pogłosu w salach wyposażonych w RES, uzyskanych w eksperymentach opisanych w niniejszym rozdziale, z danymi z literatury dotyczącymi sal pozbawionych takich systemów, przedstawionymi w rozdziale 4, okazało się trudne. Trudności te wynikały między innymi z niejednoznacznych rezultatów wcześniejszych badań, różnic w stosowanych metodach eksperymentalnych, a także - jak wykazano w rozdziale 4.2.10 – z potencjalnego wpływu sposobu prowadzenia niektórych eksperymentów na uzyskiwane wyniki. Ze względu na brak możliwości odniesienia się do odpowiednich danych w literaturze oraz w celu zapewnienia rzetelnego porównania wyników eksperymentów prowadzonych w salach z RES, podjęto decyzję o przeprowadzeniu bliźniaczych eksperymentów w salach, w których nie stosuje się aktywnych systemów wspomagania akustyki.

Weryfikacja zgodności wyników jest kluczowa zarówno z punktu widzenia ich wartości poznawczej, jak i dla praktycznej oceny skuteczności systemów RES oraz dalszego rozwoju metod projektowania akustycznego, uwzględniających integrację technologii aktywnych z tradycyjnymi rozwiązaniami pasywnymi. Zagadnienie to jest istotne również z punktu widzenia współczesnej praktyki projektowania sal koncertowych i wielofunkcyjnych, gdzie systemy RES są coraz częściej stosowane jako elastyczne narzędzie kształtowania akustyki.

Eksperymenty opisane w tym rozdziale dostarczają danych empirycznych, które pozwalają na ocenę zbieżności między percepcją warunków akustycznych w przestrzeniach z i bez RES. Należy tu więc podkreślić, że **uzyskane wyniki stanowią novum i wkład w poszerzenie wiedzy dotyczącej percepcji pogłosu zarówno w kontekście sal wyposażonych w systemy RES, jak i w szerszym ujęciu ogólnych mechanizmów percepcji zjawiska pogłosu**. Szczególną wartość mają one w świetle analizy zależności między subiektywnym odbiorem długości pogłosu a wartościami parametrów akustycznych innych niż tradycyjnie stosowane parametry czasowe, takie jak EDT, RT10, RT20 czy RT30. Znajomość tych relacji

jest niezwykle istotna w zakresie praktycznego zastosowania uzyskanych wyników tych systemów w nowoczesnej akustyce wnętrz. **Wyniki te poszerzają dotychczasowe rozumienie wpływu wybranych charakterystyk akustycznych na percepcję słuchową i mogą stanowić podstawę dla dalszych badań nad alternatywnymi wskaźnikami pogłosowości.**

Jako pierwsze przeprowadzono trzy eksperymenty dotyczące percepcji pogłosu w salach z RES, oraz eksperyment związany ze zrozumiałością mowy w salach z RES. Poszczególne badania były realizowane w związku z wynikami uzyskiwanymi w kolejnych etapach i stanowią naturalny ciąg kolejnych wynikających z siebie badań. Eksperymenty w salach pozbawionych aktywnych systemów wspomagania akustyki rozpoczęto po zakończeniu badań w salach z RES ze względu na wspomniany już brak referencyjnych badań w literaturze problemu. Decyzje o konstrukcji kolejnych, poszczególnych eksperymentów podejmowano na podstawie wstępnej analizy statystycznej uzyskanych wyników. Szczegółową analizę korelacyjną wykonano po przeprowadzeniu wszystkich eksperymentów.

Badania przedstawione w tym rozdziale koncentrują się na analizie relacji pomiędzy wartościami liczbowymi uzyskanymi w pomiarach obiektywnych z subiektywnie postrzeganą długością pogłosu. Dane pomiarowe, uzyskane zgodnie z obowiązującymi normami (ISO 3382-1, 2009; ISO 3382-2, 2008), porównano z subiektywnymi ocenami słuchaczy, zgodnie z powszechnie przyjętą w akustyce wnętrz i badaniach psychofizycznych praktyką bezpośredniego zestawiania wyników obiektywnych i subiektywnych. Sale z systemami RES oraz sale z kotarami i banerami akustycznymi analizowane są jako odrębne grupy, zgodnie z założeniem, że zostały one zaprojektowane z myślą o wykorzystaniu odpowiednio aktywnych lub pasywnych metod regulacji akustyki, co uzasadnia takie rozróżnienie na poziomie koncepcyjnym i funkcjonalnym. Analiza została przeprowadzona z pominięciem wpływu kształtu sali i jej naturalnych właściwości akustycznych. Przyjęcie takiego podejścia redukuje liczbę zmiennych, co pozwala na uzyskanie ogólnych wniosków dotyczących percepcji pogłosu oraz stworzenie spójnych warunków do prowadzenia eksperymentów. Uzyskane wyniki przyczyniają się do lepszego zrozumienia percepcji pogłosu w salach koncertowych i wielofunkcyjnych, a także stanowią cenne źródło informacji dla projektantów rozwiązań akustycznych - zarówno pasywnych, jak i aktywnych systemów umożliwiających regulację parametrów akustycznych.

8.1 Metodyka badań

Wspólnym celem wszystkich badań była analiza zależności pomiędzy wybranymi obiektywnymi parametrami akustycznymi a subiektywną percepcją warunków pogłosowych. Poszczególne badania różniły się pod względem stawianych szczegółowych hipotez badawczych oraz założeń metodologicznych, jednak łączy je wspólna baza eksperymentalna – wszystkie zostały opracowane na podstawie pomiarów i analiz prowadzonych w tych samych salach koncertowych oraz z wykorzystaniem próbek dźwiękowych przygotowanych według tej samej procedury. Cechy różnicujące poszczególne eksperymenty – wynikające ze specyfiki ich konstrukcji oraz szczegółowych celów badawczych – omówiono w podrozdziałach (9.1 do 9.11), z których każdy poświęcony jest jednemu konkretnemu badaniu.

Ze względu na istotny zakres elementów wspólnych – obejmujących m.in. ogólne zasady przeprowadzania pomiarów parametrów akustycznych, sposób przygotowania materiału odsłuchowego czy też sposób ankietowania słuchaczy – pierwsza część niniejszego rozdziału poświęcona została omówieniu wspólnych założeń metodologicznych. Takie podejście służy zwiększeniu przejrzystości opisu, uniknięciu zbędnych powtórzeń oraz podkreśleniu spójności przyjętych procedur badawczych w ramach całego cyklu eksperymentalnego.

8.1.1 Analizowane parametry

W ramach poszczególnych eksperymentów analizowano wartości obiektywnych wskaźników długości pogłosu (EDT, RT10, RT20, RT30) oraz innych parametrów akustycznych. Dla wskaźników pogłosowych uwzględniono wartości uśrednione w całym zakresie częstotliwości (125 Hz – 8 kHz), w pasmach oktaowych oraz w dwóch wybranych zakresach: 250 Hz – 2 kHz i 500 Hz – 4 kHz. Dla pozostałych parametrów akustycznych (z wyłączeniem wskaźników zrozumiałości mowy) analizowano wartości uśrednione w zakresie od 125 Hz do 8 kHz. Wskaźniki zrozumiałości mowy analizowano zgodnie z metodami przypisanymi każdemu z tych parametrów, zgodnie z obowiązującymi standardami ich obliczania. Tabela 54 przedstawia nazwy parametrów akustycznych innych niż wskaźniki czasu pogłosu, które analizowano w poszczególnych eksperymentach. W sumie uwzględniono 55 parametrów lub wariantów ich wartości, z których część została obliczona dla całego zakresu częstotliwości, a pozostałe – dla wybranych pasm oktaowych lub określonych przedziałów częstotliwości. Aby dostosować testy do najnowszych ustaleń badawczych w tej dziedzinie (Lokki i in., 2010), w eksperymentach uwzględniono dwa tryby percepcji pogłosu: „pogłos bieżący” oraz „wybrzmiewanie pogłosu”. Pogłos bieżący (ang. *running reverberation*) odnosi się do sytuacji, w której słuchacz odbiera pogłos w trakcie

trwania sygnału dźwiękowego, przez co nie słyszy jego wybrzmiewania. Z kolei wybrzmiewanie pogłosu (ang. *stop-chord*) to określenie właściwe dla sytuacji, w której możliwe jest pełne usłyszenie brzmienia pogłosu, na przykład na zakończenie utworu lub w pauzach pomiędzy dźwiękami.

Tabela 54: Parametry akustyczne inne niż wskaźniki długości pogłosu analizowane w eksperymentach.

Parametr	Nazwa polska	Opis parametru
C7	Klarowność dla granicy 7 ms	Stosunek energii przed i po 7 ms – używany do oceny bardzo wczesnych odbić
C35	Klarowność dla granicy 35 ms	Stosunek energii przed i po 35 ms – używany do oceny wczesnych odbić
C50	Klarowność mowy	Wskaźnik zrozumiałości mowy – energia <50 ms / energia >50 ms
C80	Klarowność muzyki	Wskaźnik artykulacji muzyki – energia <80 ms / energia >80 ms
D	Wyrazistość (Definicja dźwięku)	Energia <50 ms w stosunku do całkowitej energii – wyrażona w %
L7	Energia do 7 ms	Suma energii akustycznej w pierwszych 7 ms
L35	Energia do 35 ms	Suma energii akustycznej w pierwszych 35 ms
L50	Energia do 50 ms	Suma energii akustycznej w pierwszych 50 ms
L80	Energia do 80 ms	Suma energii akustycznej w pierwszych 80 ms
Ltotal	Całkowita energia	Suma energii w całym czasie trwania IR
Ts	Czas centralny	Czas, w którym energia sygnału osiąga swój punkt równowagi czasowej (Czasowy środek echogramu)
STI Male	STI – głos męski	Wskaźnik zrozumiałości mowy (męski głos)
STI Female	STI – głos żeński	Wskaźnik zrozumiałości mowy (żeński głos)
ALCons	ALCons – utrata artykulacji	Procentowo oszacowany % utraconych spółgłosek w mowie

Wybór przedstawionych w Tabeli 54 parametrów wynika z ich powszechnego zastosowania w literaturze przedmiotu jako podstawowych mierników akustycznych właściwości pomieszczeń. Parametry te są szeroko wykorzystywane m.in. w klasycznych opracowaniach Beranka (2004) oraz Barona (1978, 1988, 2006), a także w dokumentach normalizacyjnych, co czyni je punktem odniesienia w porównaniach i interpretacjach wyników pomiarowych. W analizie uwzględniono zestaw różnych okresów pomiarowych – z granicami na poziomie 7, 35, 50 i 80 ms – zarówno dla parametrów związanych z poziomem dźwięku jak i dla klarowności, aby umożliwić identyfikację charakterystycznych cech sygnału, które mogą mieć znaczenie dla percepcji długości pogłosu. Ponieważ wiele parametrów akustycznych wiąże się bezpośrednio lub pośrednio z rozkładem energii w czasie, takie podejście pozwala na spójną analizę możliwych zależności między czasową strukturą sygnału a subiektywnym wrażeniem pogłosowości. Niektóre badania (Khale, Jullien, 1994) wskazują, że percepcja długości pogłosu może być w istotnym stopniu determinowana przez właściwości pierwszej fazy zaniku energii akustycznej, zależnie od analizowanego odcinka czasowego, co uzasadnia zastosowanie zróżnicowanych przedziałów pomiarowych właśnie w początkowej części odpowiedzi impulsowej.

8.1.2 Próbkı dźwiękowe – informacje ogólne

Znajomość wartości obiektywnych parametrów akustycznych sal koncertowych traci znaczenie, jeśli nie można ich powiązać z percepcyjnymi wrażeniami słuchowymi odbieranymi przez słuchaczy. Z tego względu przeprowadzanie testów odsłuchowych z wykorzystaniem próbek dźwiękowych stanowi kluczowe narzędzie umożliwiające integrację pomiędzy sferą pomiarów a subiektywną percepcją akustyki. W testach użyto wyłącznie stereofonicznych próbek dźwiękowych (splot SRIR-ów z bezechowymi nagraniami instrumentów solowych), odzwierciedlających przestrzenny charakter pogłosu i binauralny sposób percepcji dźwięku przez człowieka (Warusfel i in., 1993).

W Tabeli 55 przedstawiono zestawienie nagrań bezechowych wykorzystanych jako materiał źródłowy w eksperymentach odsłuchowych. Uwzględniono zarówno fragmenty o ciągłej fakturze dźwiękowej (bez zauważalnych początków, zakończeń i pauz), jak i fragmenty zawierające przerwy, co umożliwiało ocenę wpływu struktury czasowej materiału muzycznego na percepcję długości pogłosu. Wszystkie próbki miały długość nieprzekraczającą 20 sekund. Bodźce dźwiękowe, uzyskane w wyniku splotu z odpowiednimi SRIR, zostały poddane jedynie normalizacji do wartości szczytowej (z wykorzystaniem funkcji „*normalize peak value*” w programie Pro Tools), bez dalszych modyfikacji czasowych ani widmowych. W badaniach nad percepcją pogłosu normalizacja szczytowa jest optymalnym rozwiązaniem, ponieważ pozwala ona wyrównać poziomy bodźców bez ingerencji w ich średnią głośność, dzięki czemu zachowane zostają naturalne różnice energetyczne i czasowe wybrzmiewania, istotne dla oceny pogłosu (Arend i in., 2021). W celu zapewnienia wysokiej jakości prezentowanych bodźców, prezentowane próbki zapisano w formacie WAV, z rozdzielczością 24 bitów i częstotliwością próbkowania 48 kHz.

Tabela 55: Bodźce dźwiękowe wykorzystane w eksperymentach.

Nr Instrument	Typ fragmentu	Zastosowanie	Pauzy w nagraniu	Długość maks.
1 Flügelhorn	Melodia bez słyszalnego początku, zakończenia i pauz	Próbki w trybie running	Nie	do 20 s
2 Werbel	Pojedyncze uderzenia	Próbki w trybie stop-chord	Nie	do 20 s
3 Flügelhorn	Melodia z wyraźnymi pauzami i zakończeniem	Próbki w trybie running	Tak	do 20 s
4 Fortepian	Fragment utworu z przerwami	Próbki w trybie stop-chord	Tak	do 20 s

W badaniach percepcyjnych opartych na porównywaniu par próbek dźwiękowych kluczowe znaczenie ma odpowiedni dobór parametrów akustycznych tak, aby różnice między próbkami były dla słuchaczy możliwe do zauważenia, a jednocześnie ograniczały wpływ

czynników zakłócających. Dlatego podczas konstruowania bodźców odsłuchowych stosowano podejście oparte na wartościach zaledwie spostrzeganej różnicy (ang. *Just Noticeable Difference* - JND), polegające na tym, że wybierano do porównania próbki tak, aby tylko jeden badany parametr przekraczał w stopniu wystarczającym ustaloną wartość progową (np. 1,5 JND), podczas gdy pozostałe parametry utrzymywały się na zbliżonym (niezauważalnym przez słuchacza w kontekście ich różnicy) poziomie (różnice nieprzekraczające 0,5 JND). Takie podejście umożliwiło wyizolowanie wpływu pojedynczego parametru na percepcję i zwiększyło wiarygodność uzyskanych wyników, ponieważ ograniczyło ryzyko, że słuchacze reagowali na przypadkowe różnice w innych cechach sygnału. Wartości progów JND wykorzystane do konstrukcji eksperymentów w niniejszej pracy ustalono na podstawie literatury (Barron, 1988; Kuhl, 1954a; Soulodre & Bradley, 1995), której autorzy zgodnie wskazują, że próg słyszalności zmian czasu pogłosu mieści się w zakresie od 5 do 10% jego wartości.

8.2 Pomiary parametrów obiektywnych pomieszczeń oraz rejestracja odpowiedzi impulsowych

W eksperymentach psychakustycznych często wykorzystuje się układ sztucznej głowy, jednak w eksperymencie (Neal, Vigeant, 2013) wykazano, że dopasowanie kształtu funkcji przeniesienia głowy (ang. *Head Related Transfer Function, HRTF*) słuchacza wpływa na ocenę pogłosowości, otoczenia dźwiękowego i preferencji słuchaczy. W innym badaniu (Armstrong i in. 2018) wykazano, że HRTF-y, pochodzące z manekinów KU100 i KEMAR, były preferowane przez niektórych uczestników ze względu na ich neutralną barwę, mimo że nie były one dopasowane indywidualnie. Wyniki badania (Iida i in., 2014) wskazują, że odsłuch próbek dźwiękowych z wykorzystaniem niedopasowanego kształtu HRTF znacząco wpływa na percepcję. Nagranie sygnałów testowych z wykorzystaniem sztucznej głowy z definicji obciążone jest kształtem HRTF, co, jak wykazano w przytoczonych artykułach, wpływa na percepcję zjawisk akustycznych. Z tego względu nagrania oparto na wykorzystaniu systemu M/S. System mikrofonowy M/S (ang. *Mid/Side*) to technika stereofonicznego nagrywania dźwięku wykorzystująca dwa mikrofony: *Mid*, skierowany bezpośrednio na źródło dźwięku (najczęściej o charakterystyce kardoidalnej), oraz *Side*, o charakterystyce ósemkowej, ustawiony osią swojej najmniejszej czułości prostopadle do źródła dźwięku. Mikrofon *Mid* rejestruje sygnał centralny, natomiast mikrofon *Side* – różnice przestrzenne między lewą a prawą stroną. Aby uzyskać sygnał stereofoniczny, sygnały z mikrofonów M i S są przetwarzane w procesie matrycowania: kanał lewy to suma $M + S$, a prawy to różnica $M - S$.

System M/S zapewnia wysoką zgodność z odtwarzaniem monofonicznym i dużą elastyczność w post produkcji, dlatego znajduje zastosowanie m.in. w nagraniach ambientowych, koncertowych i filmowych. W przeciwieństwie do nagrań binauralnych wykonywanych przy użyciu sztucznej głowy, system mikrofonów M/S nie zawiera indywidualnych cech HRTF. Dzięki temu oferuje neutralny zapis sceny dźwiękowej, odpowiedni do odtwarzania różnym słuchaczom. Unikając artefaktów wynikających z niedopasowania HRTF, nagrania wykonane w ten sposób zapewniają większą kontrolę nad percepcyjną oceną parametrów akustycznych, między innymi długość pogłosu.

W związku z powyższym, aby możliwie wiernie odwzorować warunki akustyczne panujące w salach koncertowych oraz umożliwić obliczenie parametrów akustycznych, zdecydowano o rejestracji stereofonicznych odpowiedzi impulsowych SRIR-ów za pomocą mikrofonów AKG 414 C B-ULS w konfiguracji M/S. Układ składał się z mikrofonu o charakterystyce kardiodalnej oraz mikrofonu o charakterystyce ósemkowej. Zastosowanie wielu jednocześnie rozmieszczonych, układów M/S umożliwiło przeprowadzenie pomiarów w wielu punktach pomieszczenia w identycznych warunkach akustycznych, co byłoby niemożliwe w przypadku konieczności wielokrotnego przestawiania sztucznej głowy, ze względu na czasochłonność oraz ryzyko zmienności warunków pomiarowych

Podczas nagrań przestrzegano wymagań norm (ISO 3382-1,2, 2008, 2009) dotyczących metodyki pomiarów, zastosowanego sprzętu, dopuszczalnych poziomów szumu tła oraz minimalnego stosunku sygnału do szumu (SNR). Do wzbudzenia pomieszczeń użyto dookólnego źródła dźwięku generującego sygnał sinusoidalny o przebiegu logarytmicznym w paśmie od 60 Hz do 12 kHz i czasie trwania 5,9 s. Do rejestracji SRIR-ów i obliczania wartości wszystkich parametrów wykorzystanych w tych eksperymentach wykorzystano oprogramowania EASERA Pro v. 1,2. Oprogramowanie to oblicza wartości parametrów na podstawie ekstrapolacji liniowej spadku poziomu charakterystycznego dla poszczególnych parametrów, co jest zgodne z wymaganiami norm (ISO 3382-1, 2009, ISO 3382-2, 2008).

W celu weryfikacji czy wyniki pomiaru parametrów akustycznych uzyskane przy użyciu systemu mikrofonowego M/S są zgodne z wynikami otrzymanymi za pomocą mikrofonów dookólnych, w trzech pierwszych salach dokonano pomiarów obiektywnych z wykorzystaniem obu systemów. Średnie wartości uzyskane dla każdego z nich mieściły się w zakresie odchylenia standardowego dla poszczególnych pasm oktaowych, a wartości pojedynczych pomiarów w tych samych punktach różniły się nieznacznie, co wskazuje, że zastosowanie systemu M/S nie miało negatywnego wpływu na dokładność wyników pomiarowych.

8.2.1 Sale koncertowe

Sal w których prowadzono rejestrację SRIR-ów na potrzeby prowadzenia badań psychoakustycznych zostały opisane w części B niniejszej pracy. W części tej przedstawiono również wartości parametrów obiektywnych oraz przedstawiono analizę liniowości zaniku energii akustycznej w salach z RES oraz salach, w których wykorzystuje się pasywne rozwiązania dotyczące regulacji czasu pogłosu. Biorąc pod uwagę założenia eksperymentów, szczegółowe informacje wykraczające poza część B – np. dotyczące kształtu sal, ich wykończenia, akustyki naturalnej, typów RES czy rodzajów kotar – mają drugorzędne znaczenie. Ponieważ badania opisywane w niniejszej pracy porównują wyłącznie warunki akustyczne wytwarzane przez RES lub – w eksperymentach porównawczych – warunki uzyskiwane dzięki zastosowaniu materiałów dźwiękochłonnych, skoncentrowano się na analizie zmian parametrów akustycznych wynikających z działania rozwiązań regulujących akustykę sal koncertowych.

8.3 Procedura testowa

8.3.1 Testy dotyczące percepcji pogłosu – informacje ogólne

Eksperymenty dotyczące percepcji pogłosu przeprowadzono w izolowanych akustycznie salach konferencyjnych oraz w pracowniach audiometrycznych lub pomieszczeniach laboratoryjnych uczelni. Zdecydowana większość ankiet została zebrana w czasie trwania konferencji dla realizatorów dźwięku, muzyków i producentów muzycznych. Część ankiet została wypełniona przez studentów reżyserii dźwięku prowadzonych na Wydziale Fizyki i Astronomii UAM lub studentów Wydziału Jazzu i Muzyki rozrywkowej Akademii Muzycznej w Katowicach. Do prezentacji próbek dźwiękowych oraz zbierania odpowiedzi uczestników wykorzystano interfejs w postaci strony internetowej. Udział w testach był dobrowolny. Za każdy wypełniony test uczestnicy otrzymywali wynagrodzenie w wysokości 20 PLN. Wypełniali również ankietę zawierającą pytania dotyczące wieku, doświadczenia zawodowego związanego z realizacją dźwięku oraz stanu słuchu. Istniała również możliwość pozostawienia komentarza po zakończeniu badania, wyrażenia zgody na kontakt w sprawach związanych z testami psychoakustycznymi oraz podania adresu e-mail do dalszej korespondencji. Wygląd ankiety pokazano na Rysunku 26.

Imię i nazwisko (lub pseudonim)

Lukus

Wiek

☐ 10-19
☐ 20-29
☒ 30-39
☐ 40-49
☐ 50-59
☐ 60-...

Jak oceniasz swój słuch?

☒ Nie mam problemów ze słuchem.
☐ Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szumy uszne itp.
☐ Mam uszkodzony słuch.

Aktywność zawodowa

☒ profesjonalny studyjny reżyser/realizator dźwięku
☒ profesjonalny reżyser/realizator dźwięku live
☒ profesjonalny muzyk
☐ reżyser/realizator dźwięku
☐ muzyk

☐ student kierunku reżyseria dźwięku/realizacja dźwięku lub pokrewne
☐ student kierunku akustyka/ inżynieria
☐ akustyczna/elektronika i telekomunikacja i pokrewne
☐ student kierunku innego niż wyżej wymienione
☐ audiofil

Cofnij 2 % Dalej

Rysunek 26: Ankieta wypełniana przez uczestników testów pogłosowych.

Po wypełnieniu ankiety słuchacze przechodzili do pytań dotyczących odczuwanej długości pogłosu. Interfejs wykorzystywany do prezentowania par próbek dźwiękowych i zbierania odpowiedzi pokazano na Rysunku 27. W przypadku, w którym słuchacze porównywali dwie próbki w odniesieniu do próbki wzorcowej, interfejs zawierał jeszcze jeden odtwarzacz z próbką wzorcową, co pokazano na Rysunku 28.

PYTANIE 1/40

W KTÓREJ PRÓBCE POGŁOS JEST DŁUŻSZY?

Pierwsza Próbką

0:3 0:5

Druga Próbką

0:2 0:5

☐ W pierwszej próbce.
 ☒ W drugiej próbce.

Cofnij 7 % Dalej

Rysunek 27: Wygląd interfejsu do zbierania odpowiedzi w czasie testów percepcji pogłosu – porównanie dwóch próbek.

Pytanie 20/24

PYTANIE 20/24

W PRÓBKACH A I B POGŁOS JEST DŁUŻSZY NIŻ W PRÓBCE BAZOWEJ. W KTÓREJ Z PRÓBEK, W A CZY W B POGŁOS WYDŁUŻYŁ SIĘ BARDZIEJ?

Baza

0:0

Próbka A

0:0

Próbka B

0:0

☐ W próbce A.
☐ W próbce B.

Cofnij 14 % Dalej

Rysunek 28: Wygląd interfejsu do zbierania odpowiedzi w czasie testów percepcji pogłosu – porównanie dwóch próbek z próbką wzorcową opisaną jako „Baza”.

W ramach testów prowadzonych w czasie konferencji dla realizatorów i producentów, dźwięk odtwarzany był z komputera osobistego (PC) wyposażonego w interfejs audio MOTU M2, umożliwiający sprzętową regulację poziomu głośności. Uczestnicy mieli możliwość ustawienia optymalnej ich zdaniem głośności przed rozpoczęciem testu oraz możliwość regulacji głośności w trakcie testu, jednak nie przeprowadzano indywidualnej kalibracji słuchawek. Do odsłuchu bodźców zastosowano słuchawki Focal Listen Pro – zamknięte, nauszne, zapewniające wysoki komfort użytkowania oraz bardzo dobrą izolację od dźwięków otoczenia. Niewielki odsetek uczestników (mniej niż 10%) używał podczas testów własnych słuchawek, zweryfikowanych i zatwierdzonych pod względem jakości odtwarzania sygnałów akustycznych.

Prezentacja stereofonicznych bodźców dźwiękowych w eksperymentach psychoakustycznych stanowi powszechnie stosowaną procedurę, której skuteczność została wielokrotnie potwierdzona w literaturze (Moore, 2013). Dodatkowo, stereofoniczne skonstruowane jako splot stereofonicznej odpowiedzi impulsowej z nagraniem bezechowym instrumentów pozwala na zaprezentowanie słuchaczowi nie tylko struktury czasowej i pasmowej, ale również struktury przestrzennej analizowanych pogłosów.

Ponadto, prowadzenie testów słuchowych w warunkach laboratoryjnych, z wykorzystaniem krótkich próbek dźwiękowych uwalnia od ograniczeń związanych z krótką pamięcią akustyczną, brakiem separacji pomiędzy kanałami, czyli elementami, które były wyraźnymi mankamentami niektórych badań opisanych wcześniej w rozdziale 4.

Aby zapewnić wiarygodność i powtarzalność wyników, istotne było ograniczenie wpływu zmiennych niezależnych na wyniki badania. Dlatego przed rozpoczęciem eksperymentu uczestników instruowano, aby koncentrowali się wyłącznie na tym aspekcie, którego dotyczył konkretny eksperyment. Aby zminimalizować wpływ efektu uczenia się oraz efektu zmęczenia, w badaniach zastosowano losową kolejność prezentacji próbek dźwiękowych. Oba zjawiska mogą bowiem istotnie zaburzać wyniki eksperymentów percepcyjnych. Efekt uczenia się polega na tym, że uczestnicy, nabywając doświadczenia w trakcie badania, z czasem zaczynają trafniej rozpoznawać lub oceniać prezentowane bodźce. W konsekwencji pierwsze próby mogą być oceniane mniej precyzyjnie niż kolejne, mimo że różnice między próbkami są obiektywnie takie same. Z kolei efekt zmęczenia dotyczy stopniowej utraty koncentracji i zaangażowania przez uczestników w miarę postępu badania. Zjawisko to jest szczególnie istotne w przypadku długotrwałych sesji odsłuchowych lub dużej liczby prezentowanych bodźców. Może ono prowadzić do wzrostu przypadkowości odpowiedzi lub zaniżania ocen

w końcowej fazie eksperymentu. Zastosowanie losowej kolejności prezentacji próbek pozwala na ograniczenie wpływu pozycji bodźców w ciągu testowym i zwiększa wiarygodność uzyskanych wyników (Scharer, Buchholz, 2007; Bech, Zacharov 2006). Liczbę par próbek dźwiękowych ograniczano w taki sposób, aby żaden z testów nie trwał dłużej niż 20 minut, co miało na celu zminimalizowanie ryzyka ewentualnego zmęczenia słuchaczy (Brachmański, Dobrucki, 2021).

8.3.2 Analiza statystyczna uzyskanych wyników

Dane z eksperymentów zostały poddane wielostopniowej procedurze analizy statystycznej, mającej na celu ocenę spójności i trafności odpowiedzi słuchaczy oraz identyfikację relacji między wskazaniami a różnicami parametrów akustycznych. Procedura obejmowała: kodowanie odpowiedzi, analizę rzetelności uczestników, ocenę percepcyjnej rozróżnialności bodźców (test dwumianowy), analizę korelacyjną oraz modelowanie regresyjne.

8.3.2.1 Test dwumianowy

W celu oceny, które pary bodźców były faktycznie rozróżniane przez słuchaczy, dla każdego z eksperymentów przeprowadzono test dwumianowy. Celem tego testu było sprawdzenie czy różnice między bodźcami były zauważalne, niezależnie od indywidualnych wskazań uczestników. Analizowano odsetek odpowiedzi zgodnych z kierunkiem zmiany danego parametru akustycznego (zazwyczaj: dłuższy czas pogłosu) względem wartości oczekiwanej przy losowym wyborze, tj. 0,5. Dla każdej pary bodźców test sprawdzał, czy proporcja wskazań przewyższała poziom losowości w sposób istotny statystycznie. Testy dwumianowe stanowią jedynie ogólne ujęcie problemu – tzn. odpowiadają na pytanie czy całościowo w grupie badanych dana para próbek była rozróżniana czy też nie. Z tego względu, aby dokładniej przeanalizować możliwe relacje pomiędzy zmiennymi niezależnymi (takimi jak np. parametry pogłosowe danej próbki) a odpowiedziami słuchaczy, wykonano szereg innych analiz statystycznych.

8.3.2.2 Analiza statystyczna zależności między odpowiedziami słuchaczy a różnicami wartości parametrów akustycznych

W celu określenia zależności pomiędzy odpowiedziami słuchaczy a wartościami poszczególnych parametrów akustycznych przeprowadzono następującą procedurę:

8.3.2.2.1 Kodowanie odpowiedzi i obliczanie różnicy parametrów

W każdej próbie porównawczej odpowiedź wskazująca bodziec pierwszy (A) została zakodowana jako 1, natomiast wybór bodźca drugiego (B) – jako 0. Uśrednione wartości

odpowiedzi (w zakresie 0–1) wskazują zatem, w jakim stopniu dany bodziec był preferowany: im bliżej 1, tym częstszy wybór próbki A; im bliżej 0, tym częstszy wybór próbki B. Równolegle obliczano wartość różnicy parametru akustycznego pomiędzy próbkami A i B, jako wartość parametru dla A minus wartość dla B. Dodatnia wartość różnicy oznacza, że parametr był wyższy w próbce A, a ujemna – że wyższy w próbce B.

8.3.2.2.2 Weryfikacja rzetelności odpowiedzi

Ze względu na dychotomiczny charakter zmiennej zależnej (0–1), ocenę rzetelności przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzi dostosowanych do tego typu danych:

- **Współczynnik korelacji ϕ (phi):** analizowano korelację odpowiedzi każdego uczestnika z odpowiedziami pozostałych. Obliczano średnią wartość korelacji dla każdej osoby.
- **Współczynnik Kappa Fleissa:** określał zgodność ocen pomiędzy poszczególnymi słuchaczami, a więc ujawnia, czy usunięcie danego słuchacza zwiększa lub zmniejsza grupową zgodność odpowiedzi.
- **Współczynnik Intraclass Correlation (ICC), typ 3:** mierzono zgodność ocen między uczestnikami z zastosowaniem metody „one-item dropped”. „One item dropped”, to wariant analizy, w którym każdy raz pomija się jednego uczestnika, a następnie oblicza się wybrany współczynnik (np. ICC) na podstawie pozostałych danych. Czynność tę powtarza się dla każdego uczestnika osobno. Dzięki niej można sprawdzić, jak bardzo odpowiedzi każdego słuchacza pasują do wzorca odpowiedzi grupy.

Na podstawie tych trzech niezależnych wskaźników wyłoniono uczestników o niskiej spójności ocen. Wszystkie trzy testy dawały spójne ze sobą wyniki, tzn. osoba o niskich wskaźnikach w jednym teście, otrzymywała również niskie wskaźniki w pozostałych dwóch. Z tego względu uznano, że próg włączenia danego uczestnika do końcowej puli analizowanych wyników wystarczy określić dla jednego z testów. Do dalszych analiz zakwalifikowano osoby, dla których średni współczynnik ϕ był nie mniejszy niż 0,05.

8.3.2.2.3 Uśrednianie i korelacja ze zmiennymi akustycznymi

Odpowiedzi zostały następnie uśrednione po wszystkich słuchaczach dla każdej pary lub trójki bodźców. Później analizowano zależności między tymi wartościami a różnicami parametrów akustycznych. Z uwagi na różne zakresy wartości analizowanych parametrów, zastosowano rangową korelację Spearmana (ρ - Rho).

Dla korelacji istotnych statystycznie przeprowadzono dodatkowe analizy regresji:

- regresję liniową,
- regresję kwadratową (wielomian 2. stopnia),
- regresję sześcienną (wielomian 3. stopnia).

Każdy model został poddany ocenie statystycznej:

- test Durbina-Watsona – analiza reszt,
- test Harveya-Coliera – sprawdzenie liniowości modelu.

8.3.2.2.4 Interpretacja siły efektu (wg Rea i Parkera, 1992)

Dla korelacji Spearmana przyjęto następującą interpretację wartości bezwzględnych współczynnika ρ (Rho):

Tabela 56: Interpretacja siły efektu w zależności od wartości parametru Rho.

Wartość ρ (Rho)	Interpretacja siły efektu
0,00–0,10	Znikoma
0,10–0,20	Słaba
0,20–0,40	Umiarkowana
0,40–0,60	Dość silna
0,60–0,80	Silna
0,80–1,00	Bardzo silna

8.3.2.3 Analiza porównawcza wyników uzyskanych w różnych eksperymentach

Przeprowadzone badania można sklasyfikować w dwóch zasadniczych kategoriach. Pierwszą z nich stanowią pary eksperymentów powiązanych logicznie i metodycznie, które realizują zbliżone cele badawcze, przy czym różnice między nimi wynikają z zastosowania odmiennych warunków akustycznych (np. pochodzenie odpowiedzi impulsowych – z sal wyposażonych w RES lub z sal bez takich systemów) bądź zróżnicowanego materiału dźwiękowego. Drugą kategorię tworzą eksperymenty niezależne, ukierunkowane na analizę pojedynczych zagadnień, niepowiązanych bezpośrednio z pozostałymi elementami badań.

Struktura ta, oparta na podobieństwach i kontrastach pomiędzy poszczególnymi eksperymentami, uzasadnia potrzebę przeprowadzenia pogłębionej analizy porównawczej uzyskanych wyników. Interpretacja tych danych w odniesieniu do rzeczywistych warunków akustycznych umożliwia pełniejsze zrozumienie badanych zjawisk. Wyniki analizy porównawczej zostały przedstawione w niniejszym rozdziale, bezpośrednio po omówieniu odpowiednich par eksperymentów.

9 Eksperymenty percepcyjne – szczegółowa analiza wyników

W niniejszym rozdziale opisano w szczególności eksperymenty dotyczące percepcji w salach z RES oraz bliźniacze eksperymenty, które wykonano w salach bez systemów wspomagania akustyki w celu bezpośredniego porównania wyników między badaniami prowadzonymi z wykorzystaniem tych samych metod badawczych i przy właściwej liczbie słuchaczy.

9.1 Eksperyment E1 - Ocena trafności parametrów pogłosowych jako predyktorów percepcji długości pogłosu w przestrzeniach z systemami RES.

9.1.1 Założenia E1 i sformułowanie hipotezy badawczej

Pierwszy z eksperymentów (E1) został **zaprojektowany w celu określenia, który z obiektywnych parametrów długości pogłosu najlepiej koreluje z percepcją pogłosowości w przestrzeniach wyposażonych w RES.** Eksperyment ten powstał w odpowiedzi na wątpliwości dotyczące trafności powszechnie przyjmowanego założenia, że to zmiany wartości parametru EDT najpełniej odzwierciedlają subiektywnie postrzeganą długość pogłosu.

Założenie o dominującej roli EDT może być nieadekwatne w przypadku sal z RES, w których obserwuje się wyraźne różnice w percepcji pogłosowości mimo nieistotnych zmian wartości tego parametru. Brak jednoznacznych wyników w literaturze dotyczących zależności pomiędzy parametrami akustycznymi a percepcją długości pogłosu w takich przestrzeniach stanowi uzasadnienie dla porównania skuteczności różnych wskaźników obiektywnych.

Hipoteza sformułowana na potrzeby tego eksperymentu brzmi: **Dotychczasowe przypisywanie parametrowi EDT kluczowej roli w opisie subiektywnej długości pogłosu może być nieadekwatne w salach z RES, ponieważ w takich przestrzeniach silniejszą korelację z percepcją długości pogłosu mogą wykazywać inne parametry pogłosowe np. RT10, RT20 lub RT30.**

W ramach E1 przeprowadzono cztery odrębne eksperymenty częściowe, z których każdy zaprojektowano tak, aby umożliwić izolowaną ocenę jednego wybranego parametru pogłosowego. Próbkę dźwiękową wykorzystane w testach odsłuchowych zostały wygenerowane na podstawie SRIR-ów zarejestrowanych w salach wyposażonych w RES. Próbkę dobrano tak, aby w każdej parze porównywanych próbek trzy z czterech podstawowych parametrów pogłosowych (EDT, RT10, RT20, RT30) miały zbliżone wartości – to znaczy, różnice między nimi nie przekraczały dolnego progu wartości JND dla danego parametru –

natomiast wartość czwartego parametru przekraczała górny próg JND. Zgodnie z literaturą, wartość progu JND dla RT20 mieści się w przedziale od 5 do 10% (Barron, 1988; Kuhl, 1954a; Soulodre & Bradley, 1995). Tak zaprojektowany eksperyment umożliwił analizę percepcyjnej wrażliwości słuchaczy na selektywne modyfikacje poszczególnych cech pogłosu.

Jak wykazano w badaniach Luizarda i in. (2015a), percepcja długości pogłosu w trybie *stop-chord* jest silniej powiązana z późną częścią odpowiedzi impulsowej, natomiast w trybie *running* większe znaczenie dla oceny pogłosowości ma parametr EDT. Z kolei Lokki i in. (2010) udowodnili, że wybór fragmentu muzycznego użytego w odsłuchu może prowadzić do istotnych różnic w subiektywnej ocenie długości pogłosu. Na tej podstawie stwierdzono, że pojedynczy parametr – taki jak EDT – nie jest wystarczający do przewidywania percepcyjnych różnic pogłosowości w różnych kontekstach odsłuchowych.

W związku z powyższym, w przeprowadzonym eksperymencie zastosowano dwa tryby odsłuchu: *running reverberation* oraz *stop-chord reverberation*. Tryb *running* odpowiada sytuacji, w której pogłos odbierany jest równocześnie z trwającym sygnałem testowym, co uniemożliwia słuchaczowi usłyszenie pełnego wybrzmienia dźwięku. Z kolei tryb *stop-chord* odnosi się do sytuacji, w której dźwięk testowy zostaje zatrzymany, a słuchacz ma możliwość usłyszenia pogłosu w jego pełnym brzmieniu – jak ma to miejsce na zakończeniu utworu lub w pauzach pomiędzy dźwiękami.

9.1.1.1 SRIR-y i próbki dźwiękowe w E1

SRIR-y wykorzystane do wygenerowania próbek audio na potrzeby testu odsłuchowego w E1 zostały zarejestrowane w salach z RES.

W E1 wykorzystano bezechowe nagrania stanowiące krótkie fragmenty utworów instrumentalnych o długości 15–20 sekund. Materiał dźwiękowy obejmował solo flugelhornu wykonującego linię melodyczną, reprezentując pogłos w trybie „bieżącym” oraz regularne uderzenia werbla, odpowiadające trybowi „akordowemu”. Nagrania bezechowe zostały następnie splecione z odpowiedziami impulsowymi (SRIR) w celu wygenerowania bodźców do testu odsłuchowego.

W próbkach z werblem słuchacze mogli usłyszeć zarówno narastanie, jak i wybrzmiewanie pogłosu, co umożliwiało pełną percepcję jego przebiegu w czasie. W przypadku flugelhornu początek i koniec próbek zostały wyciszone, aby uniemożliwić rozpoznanie fazy narastania i zanikania pogłosu. Melodia była ciągła i pozbawiona pauz, co odpowiadało charakterystyce pogłosu „bieżącego”. Próbki nie były edytowane spektralnie ani czasowo; jedynymi

modyfikacjami było wyrównanie poziomu głośności w obrębie każdej porównywanej pary próbek oraz zastosowanie wyciszenia w nagraniach flugelhornu.

W E1 przygotowano cztery zestawy próbek dźwiękowych, w których uwzględniono średnie wartości czterech parametrów pogłosowych: EDT, RT10, RT20 i RT30. Wartości średnie zostały obliczone jako arytmetyczna średnia wartości parametrów wyznaczonych w pasmach oktaowych o częstotliwościach środkowych od 125 do 8000 Hz. Wszystkie wybrane pary spełniają kryterium różnic wartości dla poszczególnych parametrów w oparciu o wartości JND opisane w rozdziale 8.1.2.

9.1.1.2 Różne wartości EDT, zbliżone wartości RT10, RT20 i RT30 w E1

Tabela 57 przedstawia wartości parametrów obiektywnych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E1, którego celem było zbadanie wpływu zmian wartości EDT na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości EDT pomiędzy próbkami przekraczają 0,15 s, natomiast różnice w pozostałych parametrach - RT10, RT20 i RT30 - nie przekraczają 0,03 s. W Tabeli 57 zestawiono wartości poszczególnych próbek A i B w parach porównawczych, oznaczonych kolejno numerami od 1 do 5.

Tabela 57: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E1 i różnych wartościach EDT.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	1,08	1,19	1,20	1,20
	B	0,91	1,20	1,20	1,19
2	A	1,19	1,16	1,22	1,22
	B	0,97	1,15	1,24	1,24
3	A	0,65	0,80	0,85	0,87
	B	0,82	0,79	0,85	0,88
4	A	1,01	1,08	1,24	1,24
	B	0,65	1,10	1,24	1,24
5	A	1,25	1,28	1,42	1,40
	B	0,85	1,28	1,42	1,42

9.1.1.3 Różne wartości RT10, zbliżone wartości EDT, RT20 i RT30 w E1

Tabela 58 zawiera wartości parametrów obiektywnych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E1, którego celem było zbadanie wpływu zmian wartości RT10 na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości RT10 pomiędzy próbkami przekraczają 0,15 s, natomiast różnice w pozostałych parametrach - EDT, RT20 i RT30 - są mniejsze niż 0,06 s. W Tabeli 58 przedstawiono wartości poszczególnych próbek A i B w parach porównawczych, oznaczonych kolejno numerami od 1 do 5.

Tabela 58: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E1 i różnych wartościach RT10.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	0,98	1,14	1,27	1,31
	B	1,02	1,30	1,32	1,31
2	A	1,13	1,31	1,30	1,28
	B	1,08	1,07	1,25	1,26
3	A	0,71	1,04	1,12	1,15
	B	0,68	0,86	1,07	1,19
4	A	0,81	1,05	1,41	1,41
	B	0,85	1,28	1,42	1,42
5	A	0,59	0,90	1,18	1,34
	B	0,55	0,73	1,17	1,34

9.1.1.4 Różne wartości RT20, zbliżone wartości EDT i RT10 w E1

Tabela 59 przedstawia wartości parametrów obiektywnych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E1, którego celem było zbadanie wpływu zmian wartości RT20 na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości RT20 pomiędzy próbkami przekraczają 0,15 s, natomiast różnice w pozostałych parametrach - EDT i RT10 - nie przekraczają 0,02 s. W parach próbek o nieliniowym charakterze zaniku, przy zbliżonych wartościach EDT i RT10, znaczne różnice w RT20 zwykle wiążą się z jeszcze większymi różnicami w RT30, co wynika z nieliniowego przebiegu odpowiedzi impulsowej. W związku z tym, przy wyborze par nie uwzględniono wartości RT30. W Tabeli 59 zestawiono wartości poszczególnych próbek A i B w parach porównawczych, oznaczonych numerami od 1 do 5.

Tabela 59: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E1 i różnych wartościach RT20.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]
1	A	0,67	0,79	1,08
	B	0,67	0,80	0,85
2	A	0,63	0,89	1,11
	B	0,63	0,88	1,37
3	A	0,65	0,93	1,14
	B	0,66	0,92	1,37
4	A	0,64	0,77	0,79
	B	0,63	0,78	0,98
5	A	0,71	1,04	1,12
	B	0,70	1,03	1,38

9.1.1.5 Różne wartości RT30, zbliżone wartości EDT, RT10 i RT20 w E1

Tabela 60 przedstawia wartości parametrów obiektywnych próbek dźwiękowych wykorzystanych w czwartym wariancie Eksperymentu numer 1, którego celem było zbadanie wpływu zmian wartości RT30 na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości RT30 pomiędzy próbkami przekraczają 0,15 s, natomiast różnice w pozostałych parametrach - EDT, RT10 i RT20 - są mniejsze niż 0,06 s.

Tabela 60: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E1 i różnych wartościach RT30.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	0,21	0,48	0,67	0,77
	B	0,20	0,48	0,67	0,96
2	A	0,76	1,05	1,30	1,35
	B	0,73	1,06	1,32	1,55
3	A	0,63	0,79	1,23	1,32
	B	0,63	0,82	1,26	1,49
4	A	0,72	1,13	1,53	1,68
	B	0,76	1,15	1,49	1,52
5	A	0,69	1,01	1,32	1,32
	B	0,65	0,96	1,31	1,81

9.1.2 Słuchacze w E1

Eksperyment E1 został przeprowadzony podczas konferencji branżowej dla realizatorów dźwięku oraz producentów muzycznych. W związku z tym wszystkich uczestników uznano za osoby posiadające doświadczenie w ocenie długości pogłosu oraz zdolność rozpoznawania subtelnych cech jego struktury. E1 przeprowadzono z udziałem 105 uczestników. Z wyjątkiem 3 uczestników, pozostali uczestnicy mieli normalny słuch zgodnie z wynikami audiometrii tonów czystych przeprowadzonej dla każdego słuchacza w dniu badania (WHO, 2021). Na podstawie wyniku audiometrii ankietowani wskazywali odpowiednią kategorię dotyczącą jakości słuchu w ankiecie opisanej w punkcie 8.3.1. Odpowiedzi osób, u których stwierdzono wadę słuchu zostały wyłączone z dalszej analizy wyników. W Tabeli 61 przedstawiono liczbę słuchaczy wraz z odpowiadającymi im deklarowanymi właściwościami słuchu.

Tabela 61: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E1.

Deklaracja stanu słuchu	Liczba słuchaczy
Nie mam problemów ze słuchem	83
Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szumy uszne itp.	19
Mam uszkodzony słuch	3

W Tabeli 62 przedstawiono liczbę uczestników E1 w poszczególnych grupach wiekowych.

Tabela 62: Liczba uczestników E1 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.

Liczba uczestników	<20 lat	20 – 29 lat	30 – 39 lat	40 – 49 lat	≥50 lat
102	8	45	19	25	5

Ankietowani deklarowali również swoją aktualną pozycję zawodową. Tabela 63 pokazuje liczbę słuchaczy deklarujących przynależność do poszczególnych grup. Ponieważ konferencja, w czasie której prowadzono badania cieszy się dużym zainteresowaniem studentów ze względu na dużą liczbę szkoleń i warsztatów, w ankiecie uwzględniono także różne kierunki studiów. Ankietowani mogli zaznaczyć kilka z zaproponowanych opcji, dlatego wyniki uzyskane w tej części ankiety przekraczają liczbę uczestników badania. Słowo „profesjonalny” pojawiające się przy opisach wykonywanych zawodów, intencjonalnie odnosiło się do osób, dla których wykonywanie danego zawodu jest podstawowym źródłem utrzymania. Osoby prowadzące badania informowały o tym uczestników badania.

Tabela 63: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E1.

Deklaracja dotycząca profesji	Liczba słuchaczy
Profesjonalny studyjny reżyser/ realizator dźwięku	23
Profesjonalny reżyser/ realizator dźwięku live	20
Profesjonalny muzyk	21
Reżyser/ realizator dźwięku	60
Muzyk	48
Student kierunku reżyseria dźwięku/ realizacja dźwięku lub kierunki pokrewne	34
Student kierunku akustyka/ inżynieria akustyczna/ elektronika i telekomunikacja lub kierunki pokrewne	19
Student kierunku innego niż wyżej wymienione	11
Audiofil	27

Analiza przeprowadzona po przeprowadzeniu testu wykazała, że w celu uzyskania wiarygodnych wyników, liczba osób w tak skonstruowanym teście musi być większa niż 26. Zakładając, że dane uzyskane od niektórych słuchaczy należy odrzucić, na przykład ze względu na stan słuchu ustalono, że w kolejnych eksperymentach należy uzyskać odpowiedzi od co najmniej 35 słuchaczy.

9.1.3 Procedura testowa w E1

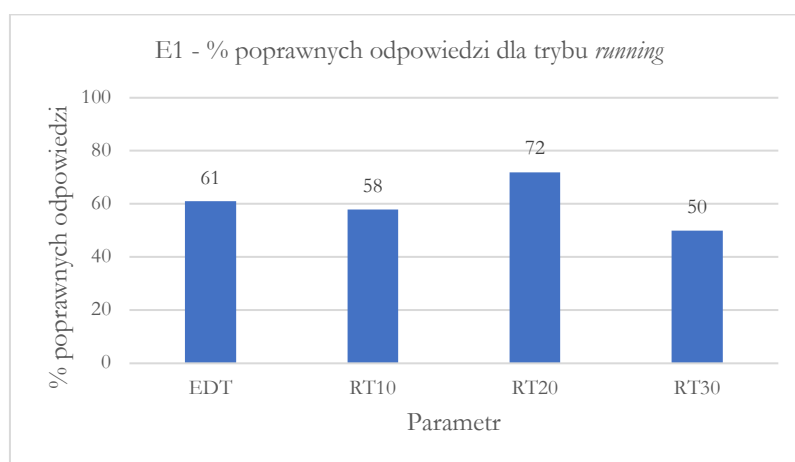
Ogólna procedurę testu opisano w 8.3.1 W eksperymencie E1 uczestnikom zaprezentowano pary próbek dźwiękowych, w których trzy z czterech parametrów czasu pogłosu (EDT, RT10, RT20, RT30) miały stałe wartości, natomiast czwarty – badany w danym

zestawie – był zmienny. Dla każdego z analizowanych parametrów przygotowano pięć par próbek w trybie *stop-chord* oraz pięć par w trybie *running*. Uczestnicy mieli możliwość wielokrotnego odsłuchania każdej próbki z pary przed udzieleniem odpowiedzi. Zadaniem uczestników było wskazanie, która z próbek w parze miała ich zdaniem dłuższy pogłos. Za odpowiedź poprawną uznawano taką, w której uczestnik wskazał zmianę długości pogłosu zgodną z faktyczną zmianą wartości badanego parametru. Jeśli natomiast uczestnik uznał próbkę o mniejszej wartości parametru za dłuższą, odpowiedź była traktowana jako błędna.

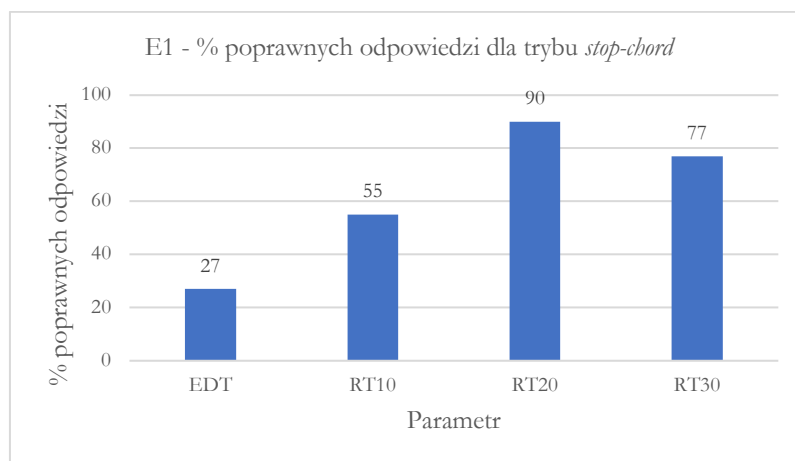
Na podstawie analizy wskaźników spójności odpowiedzi, wyniki trzech słuchaczy zostały wykluczone z dalszej analizy.

9.1.4 Wyniki uzyskane w E1

Rysunek 29 przedstawia odsetek odpowiedzi zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru dla próbek pogłosu typu *running*, natomiast Rysunek 30 przedstawia odsetek odpowiedzi zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru obiektywnego dla próbek pogłosu typu *stop-chord* uzyskane w E1.



Rysunek 29: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu *running* w E1



Rysunek 30: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu *stop-chord* w E1

Przedstawione wartości procentowe odpowiadają udziałowi odpowiedzi zgodnych ze zmianą badanego parametru, uwzględniając wszystkie prezentacje oraz wszystkich uczestników eksperymentu.

9.1.5 Dyskusja wyników uzyskanych w E1

Aby ocenić, czy odpowiedzi udzielone przez słuchaczy miały charakter losowy, wykorzystano test dwumianowy, porównując odsetek odpowiedzi zgodnych z kierunkiem zmiany parametru do wartości 0,5. Wyniki wykazały istotność statystyczną ($p < 0,05$) w niemal wszystkich przypadkach, z wyjątkiem odpowiedzi dla parametru RT30 i pogłosu typu *running*, w którym liczba odpowiedzi była niemal równa (254 i 256). Tabela 64 przedstawia wartości istotności statystycznej dla wyników uzyskanych dla poszczególnych parametrów i typów pogłosu.

Tabela 64: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E1. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.

Typ pogłosu	Parametr	% poprawnych odpowiedzi	Wartość p
<i>Running</i>	EDT	61	<0,0001
	RT10	58	0,0003
	RT20	72	<0,0001
	RT30	50	1,0000
<i>Stop-chord</i>	EDT	27	<0,0001
	RT10	55	0,0973
	RT20	90	<0,0001
	RT30	77	<0,0001

Analiza statystyczna wyników wykazała wyraźne różnice w zgodności między zmianami wartości poszczególnych parametrów pogłosowych a odpowiedziami słuchaczy, zależne zarówno od trybu pogłosu, jak i rodzaju parametru. W trybie *stop-chord* najwyższą trafność uzyskano dla parametru RT20 – aż 90% uczestników poprawnie zidentyfikowało kierunek zmiany tego parametru ($p < 0,0001$). Wysoką zgodność zaobserwowano również dla RT30 (77%, $p < 0,0001$). Parametr RT10 osiągnął 55% trafności, ale bez istotności statystycznej, natomiast EDT jedynie 27%, co sugeruje odwrotną interpretację zmian – uczestnicy często uznawali próbkę z wyższym EDT za krótszą pod względem pogłosu. W trybie *running* również najwyższą zgodność osiągnięto dla RT20 (72%, $p < 0,0001$), natomiast pozostałe parametry miały niższe wskaźniki: 61% dla EDT, 58% dla RT10 i dokładnie 50% dla RT30. Spośród wszystkich analizowanych parametrów, to właśnie RT20 okazał się najczęściej zgodny z percepcyjnie odczuwaną zmianą długości pogłosu, niezależnie od trybu jego prezentacji.

W analizie korelacji wartości poszczególnych parametrów z odpowiedziami słuchaczy szczególną uwagę zwraca rozbieżność wyników dla parametru EDT między trybami. W trybie *running* był on identyfikowany z 61% skutecznością, co jest istotnym wynikiem ($p < 0,0001$), natomiast w trybie *stop-chord* skuteczność ta spadła do zaledwie 27%, również istotnie różnej od losowej ($p < 0,0001$), co może wskazywać na dezorientację słuchaczy lub odwrotną interpretację wpływu zmian EDT. Taki wynik nie oznacza, że parametr EDT jest nieistotny w ocenie pogłosu, ale bardzo interesujące jest uzyskanie percepcji odwrotnej do kierunku zmian wartości parametru. Warto też zauważyć, że RT10 był poprawnie identyfikowany przez 55% słuchaczy w trybie *stop-chord*, lecz wynik ten nie osiągnął poziomu istotności ($p = 0,0973$), co sugeruje jego marginalne znaczenie percepcyjne w tym trybie.

Zgodnie z procedurą opisaną w 8.3.2 przeanalizowano również zależności pomiędzy wartościami parametrów opisanych w 8.1.1 a odpowiedziami słuchaczy. Nazwy poszczególnych parametrów oraz tryby pogłosu dla których uzyskano wyniki istotnie statystycznie (wartość $p < 0,05$) dla E1 RES pokazano w Tabeli numer 65. Tabela zawiera wskazanie typu pogłosu, nazwę parametru, pasmo częstotliwości dla danego parametru, wartość Rho oraz wartość p. W kolumnie „Parametr testowany” umieszczono nazwę parametru, którego wartość zmieniała się w poszczególnych próbkach E1, a w kolumnie „Parametr korelowany” umieszczono nazwę parametru, dla którego obliczono korelację. Zgodnie z tą logiką, w ostatnim wierszu Tabeli znajduje się wartość korelacji (Rho = 1, $p = 0,0167$) dla parametru RT10 w paśmie 500 Hz i trybu *stop-chord* w eksperymencie, w którym w poszczególnych parach zmieniała się wartość parametru RT30, a wartości pozostałych parametrów pozostawały zbliżone do siebie. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany. Uzyskanie takiej korelacji świadczy o istotności danego parametru z punktu widzenia percepcji – czyli o wrażliwości słuchaczy na zmianę kształtu części odpowiedzi impulsowej, opisywanej właśnie przez ten parametr.

Tabela 65: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E1. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.

Typ pogłosu	Parametr korelowany	Pasmo	Rho	Wartość p	Parametr testowany
Running	EDT	1000 Hz	1	0,0167	EDT
Running	RT10	500 Hz - 4 kHz	1	0,0167	EDT
Running	RT30	2000 Hz	1	0,0167	EDT
Running	RT30	250 Hz	-1	0,0167	RT10
Running	RT10	500 Hz - 4 kHz	1	0,0167	RT10

Running	RT20	125 Hz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Running</i>	RT30	125 Hz	0,9750	0,0048	RT20
Running	RT20	125 Hz - 8 kHz	0,9470	0,0144	RT20
<i>Running</i>	RT10	500 Hz	1	0,0167	RT30
<i>Stop-chord</i>	RT10	250 Hz	1	0,0167	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT20	250 Hz	1	0,0167	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT20	1000 Hz	1	0,0167	RT10
Stop-chord	RT20	125 Hz - 8 kHz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT10	500 Hz	1	0,0167	RT30

W celu lepszego zrozumienia zależności między cechami akustycznymi a percepcją pogłosu przeprowadzono analizę korelacji pomiędzy wartościami obiektywnych parametrów a subiektywnymi odpowiedziami słuchaczy. Z punktu widzenia konstrukcji eksperymentu najistotniejsze są korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru w pełnym paśmie a wynikami w tej części eksperymentu, w której ten parametr jest bezpośrednio testowany. Wyniki analizy korelacji wykazały, że najbardziej spójne i silne związki występowały dla RT20, zarówno w trybie *stop-chord* jak i *running*. RT20 to jedyny parametr, który dla którego uzyskano istotną statystycznie korelację pomiędzy zmianą wartości tego parametru w pełnym paśmie a odpowiedziami słuchaczy w obydwu trybach pogłosu. W trybie *running* uzyskano istotne korelacje dla wszystkich testowanych parametrów, przy czym tylko dla EDT, RT10 i RT20 uzyskano istotne korelacje pomiędzy zmianami wartości tych parametrów w poszczególnych pasmach a odpowiedziami słuchaczy. Dla EDT uzyskano zgodność ze zmianą wartości EDT jedynie w paśmie 1000 Hz, natomiast dla RT10 uzyskano zgodność ze zmianą wartości RT10 w paśmie 500 Hz – 4 kHz. Dla testowanego parametru RT30 nie uzyskano zgodności ze zmianą wartości RT30 w jakimkolwiek paśmie. W trybie *stop-chord* nie uzyskano istotnych korelacji pomiędzy percepcją słuchaczy a zmianami wartości parametrów EDT, RT10 i RT30.

9.1.6 Wnioski z E1

Wyniki analiz wskazują jednoznacznie, że w salach z RES, RT20 jest najbardziej stabilnym i konsekwentnym wskaźnikiem percepcyjnych różnic w obu trybach prezentacji.

Interesującym wynikiem jest uzyskanie tylko 27% poprawnych odpowiedzi dla parametru EDT i trybu *stop-chord* i uzyskanej dla tego wyniku wysokiej istotności statystycznej. Podobny wynik, a więc percepcję przeciwną do wzrostu wartości EDT zaobserwowano również w pracy węgierskich akustyków (Kotchy i in., 1974). Należy pamiętać, że w E1 próbki były przygotowane wyłącznie w oparciu o średnie wartości parametrów, bez uwzględniania ich wartości w pasmach częstotliwości. Oznacza to, że para próbek mogła mieć podobne lub nawet odwrotne wartości badanego parametru w poszczególnych pasmach, co mogło

wprowadzać percepcyjną niejednoznaczność. Szczególnie w przypadku takich parametrów jak RT10 czy EDT, które mogą być bardziej wrażliwe na zmienność w niższych pasmach, różnice lokalne mogły maskować rzeczywisty efekt. Zaobserwowane zależności odbiegają od wyników wcześniejszych badań prowadzonych w pomieszczeniach pozbawionych systemów RES (Jordan, 1970; Soulodre, Bradley, 1995). Rozbieżność ta sugeruje, że percepcja pogłosu w przypadku charakterystyk impulsowych o nieliniowym przebiegu zaniku energii różni się od percepcji pogłosu o liniowym charakterze. Wyniki eksperymentu E1 potwierdzają, że rodzaj prezentowanego sygnału (impulsowy lub ciągły) wpływa na ocenę długości pogłosu, co pozostaje w zgodzie z wcześniejszymi ustaleniami literaturowymi (Lokki i in., 2010).

W E1 potwierdzono hipotezę badawczą. Wykazano, że to nie EDT, a RT20 jest najlepszym predyktorem długości pogłosu w sytuacji, w której posługujemy się średnimi wartościami parametrów w salach z RES.

W E1 potwierdzono wynik uzyskany w pracy Luizarda i in. (2015a), mówiący o tym, że percepcja długości pogłosu w trybie *stop-chord* jest silniej powiązana z późną częścią odpowiedzi impulsowej, natomiast nie potwierdzono wyniku uzyskanego w pracy Lokki i in. (2010), że w trybie *running* większe znaczenie dla oceny pogłosowości ma parametr EDT.

Uzyskane wyniki pozostają w sprzeczności z rezultatami badań Jeonga i Hoo (2013, 2017), w których to parametr RT10 okazał się mieć dominujące znaczenie dla percepcji pogłosu w przypadku nieliniowych zaników energii. Warto podkreślić, że ich badania opierały się na numerycznych symulacjach pomieszczeń, a nie na nagraniach wykonanych w rzeczywistych salach koncertowych.

Należy zauważyć, że ze względu na niewielką zmienność wartości EDT wynikającą z działania systemu RES, dominujący wpływ innego niż EDT parametru na ocenę długości pogłosu był zjawiskiem oczekiwanym. Konstrukcja eksperymentu E1 umożliwiła identyfikację, który z pozostałych parametrów odgrywa istotną rolę w percepcji pogłosu.

9.2 Eksperyment E2 - Ocena trafności parametrów pogłosowych jako predyktorów percepcji długości pogłosu w przestrzeniach bez RES.

9.2.1 Cel E2, hipoteza i uzasadnienie metodologiczne

Założenie o dominującej roli EDT w ocenie pogłosowości może być niewłaściwe w przypadku sal, w których obserwujemy nieliniowe zaniki energii akustycznej. Powszechnie spotykane w literaturze przekonanie o kluczowej roli EDT w percepcji długości pogłosu opiera się głównie na wynikach eksperymentów prowadzonych w salach koncertowych lub z użyciem

sztucznych przebiegów pogłosu dla których nie określono liniowego lub nieliniowego charakteru zaniku. Jednocześnie w literaturze dotyczącej projektowania sal sugeruje się konieczność uzyskania zbliżonych wartości EDT i RT jako korzystnych do uzyskania sali o dobrej jakości akustycznej (Beranek, 1993; Long, 2006). Jak wykazano w pracy (Błasiński, 2022) charakter spadku energii akustycznej w salach z RES jest nieliniowy, co może mieć wpływ na percepcję. Istniejąca literatura dotycząca percepcji pogłosu w salach koncentruje się raczej na znalezieniu nowych wskaźników oceny pogłosu niż na próbie odnalezienia relacji ze wskaźnikami aktualnie wykorzystywanymi w akustyce pomieszczeń. Proponowane w literaturze nowe parametry dotyczące oceny nie są jednak powszechnie stosowane w badaniach, z tego względu zbadano zależności pomiędzy percepcją a wartościami parametrów powszechnie wykorzystywanych w praktyce pomiarowej, co pozwoli na porównanie wyników z E1 oraz literaturą.

Z tego powodu Eksperyment E2 wykonano i skonstruowano głównie **w celu porównania wyników uzyskanych w E1 z wynikami dotyczącymi sal bez RES**. Aby móc w pełni porównać wyniki z E1 zdecydowano o wykorzystaniu – zarejestrowanych w salach bez RES – nieliniowych zaników energii akustycznej. Dodatkowym atutem jest możliwość skorelowania wartości parametrów akustycznych z percepcją słuchaczy w salach, w których nie stosuje się systemów RES, a jednocześnie występują nieliniowe zaniki energii akustycznej.

W związku z powyższym postawiono następującą **hipotezę** badawczą: **Istnieje inny parametr pogłosowy np. RT10, RT20, RT30, który silniej koreluje z percepcją długości pogłosu niż EDT w przestrzeniach, w których mamy do czynienia z nieliniowymi zanikami energii.**

Eksperyment E2 został zaprojektowany w oparciu o te same założenia metodologiczne co eksperyment E1, z tą różnicą, że wykorzystano próbki dźwiękowe wygenerowane na podstawie SRIR-ów zarejestrowanych w salach bez systemów RES. Podobnie jak w E1, w każdej parze porównywanych bodźców trzy z czterech parametrów pogłosowych (EDT, RT10, RT20, RT30) mieściły się poniżej progu JND, natomiast wartość czwartego przekraczała jego górny próg, co umożliwiało izolowaną ocenę danego wskaźnika. Podobnie jak w E1, zastosowano dwa tryby odsłuchu – *running* oraz *stop-chord* – co pozwoliło na analizę percepcyjnych różnic w zależności od momentu ekspozycji pogłosu względem sygnału dźwiękowego. Zgodnie z przyjętą w niniejszej pracy konwencją, za nieliniowe uznano te zaniki, w których zarówno RT20, jak i RT30 przekraczały wartość EDT o więcej niż wartość JND. Na tej podstawie 276 SRIR-ów zakwalifikowano jako posiadające nieliniowy charakter zaniku.

9.2.2 SRIR-y i próbki dźwiękowe w E2

Do stworzenia próbek dźwiękowych w E2 wykorzystano te same bezechowe nagrania werbla i flegelhornu co w E1. Tak samo jak w E1 przygotowano cztery zestawy próbek dźwiękowych, w których uwzględniono średnie wartości czterech parametrów pogłosowych: EDT, RT10, RT20 i RT30 obliczone jako średnia arytmetyczna w zakresie od 125 Hz do 8000 Hz. Tak samo jak w E1 wybrane SRIR-y spełniają kryteria dotyczące podobieństwa i różnic wartości poszczególnych parametrów w oparciu o wartości JND.

9.2.2.1 Różne wartości EDT, podobne wartości RT10, RT20 i RT30 w E2

Tabela 66 przedstawia wartości parametrów obiektywnych dla próbek dźwiękowych wykorzystanych w eksperymencie E2, którego celem było zbadanie wpływu zróżnicowanych wartości EDT na percepcję długości pogłosu. Różnica wartości EDT między próbkami wynosi co najmniej 0,17 s, podczas gdy różnice w wartościach RT10, RT20 i RT30 są mniejsze niż 0,01 s. W Tabeli 66 zaprezentowano wartości poszczególnych próbek A i B, zestawionych w pary porównawcze, ponumerowane od 1 do 5.

Tabela 66: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach EDT.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	1,71	1,58	1,67	1,73
	B	1,54	1,59	1,67	1,72
2	A	1,39	1,54	1,53	1,52
	B	1,21	1,53	1,53	1,52
3	A	1,68	1,74	1,72	1,72
	B	1,49	1,73	1,71	1,73
4	A	1,25	1,48	1,49	1,51
	B	1,45	1,48	1,48	1,51
5	A	1,37	1,27	1,33	1,37
	B	1,16	1,26	1,33	1,36

9.2.2.2 Różne wartości RT10, zbliżone wartości EDT, RT20 i RT30 w E2

Tabela 67 przedstawia wartości parametrów obiektywnych dla próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2, którego celem było zbadanie wpływu zmiany wartości RT10 na percepcję długości pogłosu. Różnica wartości RT10 między próbkami w jednej parze przekracza 0,16 s, natomiast różnice w wartościach EDT, RT20 i RT30 są mniejsze niż 0,03 s. W Tabeli 67 zaprezentowano wartości poszczególnych próbek A i B, zestawionych w pary do analizy porównawczej, ponumerowane od 1 do 5.

Tabela 67: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT10.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	1,39	1,38	1,54	1,55
	B	1,39	1,54	1,53	1,52
2	A	1,00	1,33	1,23	1,21
	B	1,02	1,17	1,22	1,24
3	A	1,26	1,55	1,42	1,41
	B	1,29	1,39	1,39	1,41
4	A	0,99	0,97	1,07	1,10
	B	0,98	1,14	1,08	1,09
5	A	1,15	1,30	1,18	1,18
	B	1,17	1,13	1,18	1,18

9.2.2.3 Różne wartości RT20, podobne wartości EDT i RT10 w E2

Tabela 68 przedstawia wartości parametrów obiektywnych dla próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2, którego celem było zbadanie wpływu zmiany wartości RT20 na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości RT20 między próbkami przekraczają 0,16 s, podczas gdy różnice w wartościach EDT i RT10 są mniejsze niż 0,02 s. W parach próbek o nieliniowym charakterze zaniku, podobnych wartościach EDT i RT10, różnice w RT20 wiążą się z jeszcze większymi różnicami w RT30, co wynika z nieliniowego przebiegu odpowiedzi impulsowej. Z tego powodu, podobnie jak w E1 przy wyborze par dla tej części eksperymentu nie uwzględniono wartości RT30. Tabela 68 zawiera wartości poszczególnych próbek A i B, zestawionych w pary porównawcze, ponumerowane od 1 do 5.

Tabela 68: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT20.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]
1	A	0,97	1,16	1,23
	B	0,98	1,14	1,07
2	A	1,38	1,53	1,59
	B	1,36	1,52	1,42
3	A	0,92	0,96	1,16
	B	0,93	0,96	0,99
4	A	1,13	1,34	1,40
	B	1,12	1,36	1,23
5	A	0,95	1,20	1,17
	B	0,94	1,21	1,35

9.2.2.4 Różne wartości RT30, podobne wartości EDT, RT10 i RT20 w E2

Tabela 69 przedstawia wartości parametrów obiektywnych dla próbek dźwiękowych analizowanych w E2, którego celem było zbadanie wpływu zmiany wartości RT30 na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości RT30 między próbkami przekraczają co najmniej 0,16 s, natomiast zmienność wartości EDT, RT10 i RT20 jest mniejsza niż 0,05 s.

Tabela 69: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT30.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	0,92	1,11	1,13	1,28
	B	0,88	1,09	1,14	1,12
2	A	0,90	1,10	1,10	1,08
	B	0,88	1,12	1,13	1,26
3	A	0,71	1,01	1,02	1,22
	B	0,72	1,03	1,01	1,04
4	A	0,92	1,11	1,13	1,28
	B	0,93	1,14	1,10	1,09
5	A	1,03	1,19	1,25	1,46
	B	1,07	1,14	1,23	1,26

9.2.3 Słuchacze w E2

Podobnie jak E1, E2 został przeprowadzony podczas konferencji dla realizatorów dźwięku oraz producentów muzycznych. E2 przeprowadzono z udziałem 37 uczestników. Z wyjątkiem jednego uczestnika, którego odpowiedzi wykluczono z analizy, wszyscy badani mieli prawidłowy słuch potwierdzony audiometrią tonalną w dniu eksperymentu (WHO, 2021). Odpowiedzi osób z wykrytą wadą słuchu nie były uwzględniane w dalszej analizie. W Tabeli 70 przedstawiono liczbę słuchaczy wraz z odpowiadającymi im deklarowanymi właściwościami słuchu.

Tabela 70: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E2.

Deklaracja stanu słuchu	Liczba słuchaczy
Nie mam problemów ze słuchem	31
Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szumy uszne itp.	5
Mam uszkodzony słuch	1

Tabela 71 okazuje podział słuchaczy na poszczególne grupy wiekowe w E2.

Tabela 71: Liczba uczestników E2 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.

Liczba uczestników	<20 lat	20 – 29 lat	30 – 39 lat	40 – 49 lat	≥50 lat
36	6	9	11	10	0

Podobnie jak w E1, w E2 ankietowani deklarowali swoją aktualną pozycję zawodową. Tabela 72 pokazuje liczbę słuchaczy deklarujących przynależność do poszczególnych grup.

Tabela 72: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E2.

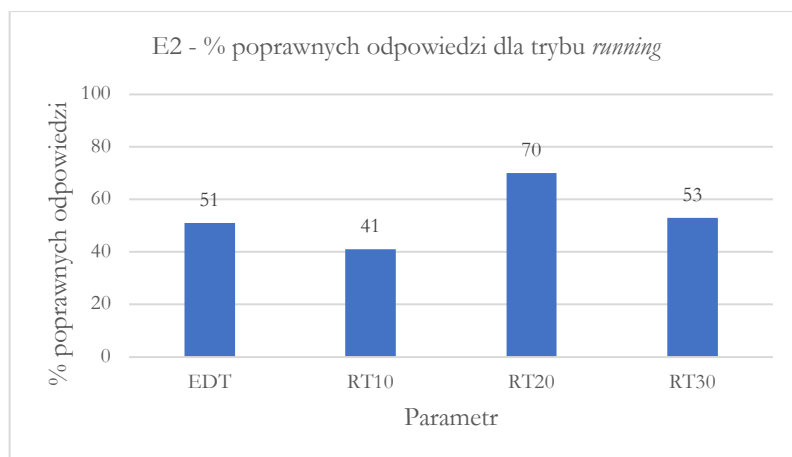
Deklaracja dotycząca profesji	Liczba słuchaczy
Profesjonalny studyjny reżyser/ realizator dźwięku	4
Profesjonalny reżyser/ realizator dźwięku live	2
Profesjonalny muzyk	5
Reżyser/ realizator dźwięku	10
Muzyk	10
Student kierunku reżyseria dźwięku/ realizacja dźwięku lub kierunki pokrewne	4
Student kierunku akustyka/ inżynieria akustyczna/ elektronika i telekomunikacja lub kierunki pokrewne	1
Student kierunku innego niż wyżej wymienione	2
Audiofil	3

9.2.4 Procedura testowa w E2

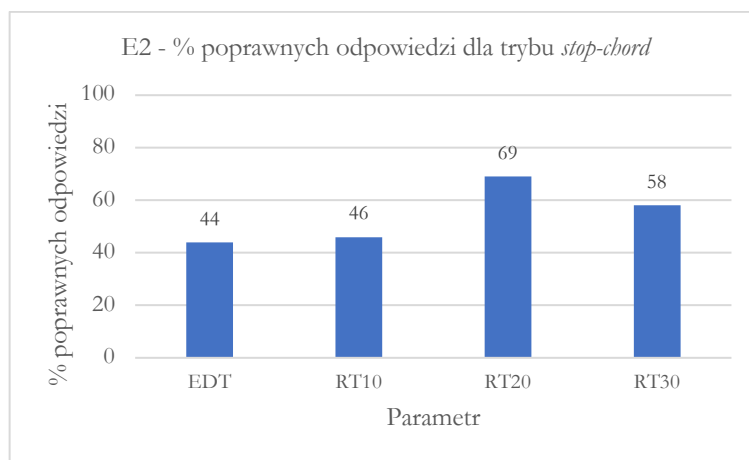
Procedura w E2 była identyczna jak w E1 (rozdział 9.1.3). Uczestnikom prezentowano pary próbek dźwiękowych, w których trzy z czterech parametrów czasu pogłosu (EDT, RT10, RT20, RT30) miały stałe wartości, a czwarty – badany – był zmienny. Dla każdego parametru przygotowano po pięć par próbek w trybie *stop-chord* i *running*. Uczestnicy mogli wielokrotnie odsłuchiwać próbki przed wskazaniem tej z dłuższym pogłosem. Odpowiedź uznawano za poprawną, gdy wybór odpowiadał rzeczywistej zmianie badanego parametru, w przeciwnym razie za błędną. Na podstawie analizy wskaźników spójności odpowiedzi, wyniki czterech słuchaczy zostały wykluczone z dalszej analizy.

9.2.5 Wyniki uzyskane w E2

Rysunek 31 przedstawia odsetek odpowiedzi zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru dla próbek pogłosu typu *running* uzyskane w E2, a Rysunek 32 przedstawia odsetek odpowiedzi zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru dla próbek pogłosu typu *stop-chord* w E2.



Rysunek 31: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu *running* w E2



Rysunek 32: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu *stop-chord* w E2

9.2.6 Dyskusja wyników uzyskanych w E2

Podobnie jak w E1, przeprowadzono test dwumianowy, aby sprawdzić, czy odpowiedzi uczestników były losowe, czy też odzwierciedlały faktyczne zmiany parametrów akustycznych. Wartości istotności statystycznej uzyskanych dla poszczególnych parametrów i typów pogłosu pokazano w Tabeli 73.

Tabela 73: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E2. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.

Typ pogłosu	Parametr	% poprawnych odpowiedzi	Wartość p
Running	EDT	51	0,7884
	RT10	41	0,0157
	RT20	70	<0,0001
	RT30	53	0,4208
Stop-chord	EDT	44	0,1074
	RT10	46	0,2831
	RT20	69	<0,0001
	RT30	58	0,0318

W trybie *running* istotność statystyczną uzyskano jedynie dla parametru RT20 ($p < 0,0001$), co oznacza, że uczestnicy w sposób znaczący identyfikowali zmiany tego parametru. Odpowiedzi dla RT10 w trybie *running* ($p = 0,0157$) również były statystycznie istotne, ale wskazywały na niższą niż losowa skuteczność odpowiedzi (41% poprawnych), co sugeruje trudność w percepcji zmian tego parametru. W trybie *stop-chord* także tylko RT20 ($p < 0,0001$) oraz RT30 ($p = 0,0318$) wykazały istotność statystyczną, co oznacza, że zmiany tych parametrów były zauważalne dla słuchaczy. Dla pozostałych parametrów, a więc EDT i RT10 i trybu *stop-chord* nie zaobserwowano istotnych efektów.

Zgodnie z tą samą co w E1 procedurą przeprowadzono analizę zależności pomiędzy wartościami parametrów a odpowiedziami słuchaczy. Tabela 74 zawiera nazwy poszczególnych parametrów oraz tryby pogłosu dla których uzyskano wyniki istotnie statystycznie (wartość $p < 0,05$) w E2. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany. Uzyskanie takiej korelacji świadczy o istotności danego parametru z punktu widzenia percepcji – czyli o wrażliwości słuchaczy na zmianę kształtu części odpowiedzi impulsowej, opisywanej właśnie przez ten parametr.

Tabela 74: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E2. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.

Typ pogłosu	Parametr korelowany	Pasmo	Rho	Wartość p	Parametr testowany
<i>Running</i>	C35	125 Hz - 8 kHz	-1	0,0167	EDT
<i>Running</i>	EDT	250 Hz	1	0,0167	RT10
<i>Running</i>	EDT	500 Hz	1	0,0167	RT10
<i>Running</i>	EDT	250 Hz - 2 kHz	1	0,0167	RT10
<i>Running</i>	EDT	500 Hz - 4 kHz	1	0,0167	RT10
<i>Running</i>	L80	125 Hz - 8 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	EDT	500 Hz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	EDT	1000 Hz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT10	500 Hz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT10	2000 Hz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT10	4000 Hz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT10	250 Hz - 2 kHz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT10	500 Hz - 4 kHz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT20	500 Hz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT20	2000 Hz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT20	4000 Hz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT20	250 Hz - 2 kHz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT20	500 Hz - 4 kHz	0,975	0,0048	EDT

<i>Stop-chord</i>	RT30	500 Hz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT30	2000 Hz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT30	4000 Hz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT30	250 Hz - 2 kHz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT30	500 Hz - 4 kHz	0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT30	125 Hz - 8 kHz	0,947	0,0144	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT30	250 Hz - 2 kHz	0,975	0,0048	RT10
<i>Stop-chord</i>	RT10	1000 Hz	1	0,0167	RT10
<i>Stop-chord</i>	RT20	1000 Hz	1	0,0167	RT10
<i>Stop-chord</i>	Ltotal	125 Hz - 8 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT20	8000 kHz	0,975	0,0048	RT30
<i>Stop-chord</i>	RT30	250 Hz	-0,975	0,0048	RT30

Analiza korelacji (współczynnik Spearman’a Rho) pomiędzy wartościami parametrów a odpowiedziami słuchaczy ujawniła wiele istotnych statystycznie zależności. Z punktu widzenia eksperymentu najistotniejsze są korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru w pełnym paśmie a wynikami w tym eksperymencie, w którym ten parametr jest bezpośrednio testowany. W E2 nie uzyskano takiej korelacji dla żadnego z trybów ani żadnego analizowanego parametru. Dla trybu *running* i testowanego parametru EDT uzyskano istotną korelację ze spadkiem wartości C35 w zakresie całego pasma ($Rho = -1$, $p = 0,0167$). Dla tego samego trybu pogłosu i parametru RT10 uzyskano korelację ze zmianą wartości parametru EDT w paśmie 250 Hz – 2 kHz oraz w poszczególnych pasmach 250 Hz i 500 Hz, uzyskując dla wszystkich przypadków wartość $Rho = 1$, $p = 0,0167$. Dla RT20 w trybie *running* uzyskano korelację pomiędzy odpowiedziami słuchaczy a zmianą wartości L80 w pełnym paśmie ($Rho = 1$, $p = 0,0167$). Dla trybu *stop-chord* i poszczególnych testowanych parametrów uzyskano następujące korelacje: dla EDT uzyskano korelację ze zmianą wartości EDT w pasmach 500 Hz i 1000 Hz (w obydwu przypadkach $Rho = 0,975$, $p = 0,0048$) oraz liczne korelacje związane ze zmianami parametrów RT10, RT20 i RT30. Dla każdego z RT, uzyskano korelację odpowiedzi słuchaczy ze zmianami parametrów w następujących pasmach: 500 Hz, 2 kHz, 4 kHz oraz dla wartości uśrednionych z pasm 250 Hz – 2 kHz oraz 500 Hz – 4 kHz. To ciekawy wynik, ponieważ średnie wartości wszystkich RT (a więc uśrednionych w paśmie 125 Hz - 8 kHz) w poszczególnych testowanych próbkach nie różnią się od siebie o bardziej niż o 0,01 s. Dla trybu *stop-chord* i parametru RT10 uzyskano korelację ze zmianą wartości RT10 i RT20 w paśmie 1000 Hz (dla obydwu przypadków $Rho = 1$, $p = 0,0167$). Dla RT20 uzyskano korelację ze zmianą wartości energii w pełnym paśmie (Ltotal, $Rho = 1$, $p = 0,0167$), a dla RT30 uzyskano korelację ze zmianą wartości RT20 w paśmie 8 kHz ($Rho = 0,975$, $p = 0,048$) oraz ujemną korelację ze zmianą wartości RT30 w paśmie 250Hz ($Rho = -0,975$, $p = 0,048$).

9.2.7 Wnioski z E2

Analiza wyników wykazała, że spośród badanych parametrów pogłosu RT20 charakteryzuje się najwyższą czułością percepcyjną, wykazując silne korelacje z odpowiedziami słuchaczy oraz wysokie odsetki poprawnych wskazań w obu trybach pogłosu (*running* i *stop-chord*). To jedyny parametr, dla którego uzyskano istotnie statystyczne odpowiedzi dla obydwu trybów pogłosu – zarówno *running* jak i *stop-chord*. Analiza korelacji nie potwierdziła wyników uzyskanych dla grupy słuchaczy. W analizie korelacji nie uzyskano istotnych statystycznie zależności pomiędzy zmianą wartości RT20 a odpowiedziami słuchaczy. Dla EDT i trybu *stop-chord* uzyskano korelację dla pasm 500 Hz i 1000 Hz, co jest zgodne ze stwierdzeniem Beranka (2004), że „Wartości w paśmie średnich częstotliwości, czyli 500 i 1000 Hz, są uznawane za najważniejsze i zazwyczaj wystarczają do scharakteryzowania jakości akustycznej sali.” Dla EDT i trybu *stop-chord* uzyskano także wiele korelacji z wartościami parametrów RT w różnych pasmach, w tym w szerokich pasmach 250 Hz – 2 kHz i 500 Hz – 4 kHz. Wartości średnie tych parametrów w porównywanych parach (a więc w paśmie 125 Hz - 8 kHz) nie różnią się od siebie o więcej niż 0,1 co wskazuje na duży wpływ wartości w paśmie 125 Hz na wartość średnią parametrów RT i niewielki wpływ tego pasma na percepcję słuchaczy. Taki wynik wskazuje również, że ocena długości pogłosu w trybie *stop-chord* nie jest związana jedynie z pierwszą częścią zaniku energii określanej wartością parametru EDT.

W E2 potwierdzono hipotezę badawczą. W analizie odpowiedzi grupowych wykazano, że RT20 jest najlepszym predyktorem długości pogłosu w sytuacji, w której posługujemy się średnimi wartościami parametrów w salach bez RES. RT20 to jedyny parametr, który w obydwu trybach osiągnął istotność statystyczną i wysoki procentowy wynik odpowiedzi zgodnych ze zmianą wartości parametru (70% i 69%). Należy stwierdzić, że w analizie korelacji nie uzyskano wyraźnej przewagi dla któregośkolwiek z parametrów, aczkolwiek dla trybu *stop-chord* i parametru EDT uzyskano korelację dla pasm 500 Hz i 1000 Hz. Należy też zauważyć, że zależności pomiędzy parametrami (wysokie Rho) nie gwarantują wysokiej trafności percepcyjnej; kluczowe jest, który parametr wprowadza największy, łatwo słyszalny kontrast – w E2 taki wynik uzyskano dla RT20. Wyniki eksperymentu E2 potwierdzają, że rodzaj prezentowanego sygnału (impulsowy lub ciągły) istotnie wpływa na ocenę długości pogłosu, co pozostaje w zgodzie z wcześniejszymi ustaleniami literaturowymi (Lokki i in., 2010).

9.2.8 Analiza porównawcza wyników E1 i E2 w kontekście hipotezy głównej dysertacji

Porównanie wyników eksperymentów E1 (sale z RES) i E2 (sale bez RES) pozwala ocenić zasadność hipotezy głównej dysertacji, zakładającą odmienny charakter percepcji pogłosu w przestrzeniach z systemami RES i bez nich. Analiza ujawniła istotne różnice w zależnościach między subiektywnymi ocenami długości pogłosu a wartościami poszczególnych parametrów akustycznych. Zestawienie wyników E1 i E2 przedstawiono w Tabeli 75.

Tabela 75: Porównanie E1 i E2 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Parametr	Tryb <i>Running</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Tryb <i>Stop-chord</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Ogólne wnioski
EDT	E1 61 % ($p < 0,05$) E2 51 % (brak istotności)	E1 27 % ($p < 0,05$) E2 44 % (brak istotności)	Zmienne wyniki; w E1 <i>stop-chord</i> słuchacze systematycznie „mylili” kierunek różnicy
RT10	E1 58 % ($p < 0,05$) E2 41 % ($p < 0,05$)	E1 55 % ($p < 0,05$) E2 46 % (brak)	Wrażliwość umiarkowana i niestala; w E2 wyraźnie słabsza
RT20	E1 72 % ($p < 0,05$) E2 70 % ($p < 0,05$)	E1 90 % ($p < 0,05$) E2 69 % ($p < 0,05$)	Najbardziej stabilny predyktor w obu trybach i obu eksperymentach
RT30	E1 50 % (brak istotności) E2 53 % (brak istotności)	E1 77 % ($p < 0,05$) E2 58 % ($p < 0,05$)	Przydatny tylko w trybie <i>stop-chord</i> ; skuteczność spadła w E2

Wyniki eksperymentów E1 i E2 wykazują, że spośród analizowanych parametrów jedynie RT20 utrzymał wysoką trafność i istotność statystyczną we wszystkich warunkach. RT30 okazał się przydatny jedynie w przypadku sygnałów typu *stop-chord*, jednak jego skuteczność spadła z 77% w eksperymencie E1 do 58% w E2. Natomiast RT10 i EDT cechowały się dużą niestabilnością – ich wyniki różniły się w zależności od trybu, a w eksperymencie E2 były wyraźnie słabsze niż w E1. W analizie korelacji w eksperymencie E1 najwyższe wartości współczynnika Rho (w zakresie 0,95–1,00) dotyczyły przede wszystkim parametru RT20 w paśmie 125 Hz – 8 kHz, co dodatkowo potwierdza jego rolę jako najlepszego predyktora subiektywnej długości pogłosu. W eksperymencie E2 zaobserwowano silną korelację ($Rho = 1$ lub 0,975) pomiędzy EDT a parametrami RT10, RT20 i RT30 w wielu pasmach, jednak nie towarzyszył temu wzrost trafności odpowiedzi. Sugeruje to, że sama korelacja między parametrami nie wystarcza, by przewidzieć percepcyjne odczucie długości pogłosu.

Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że percepcja długości pogłosu w salach wyposażonych w systemy elektronicznego wspomagania pogłosu (RES) w pewnych aspektach różni się od percepcji w salach bez takich systemów, choć niektóre prawidłowości pozostają wspólne. Szczególnie istotnym podobieństwem jest to, że w obu typach sal parametr RT20 okazał się najbardziej stabilnym i trafnym predyktorem subiektywnej oceny długości pogłosu. Wskaźnik ten korelował istotnie z odpowiedziami słuchaczy niezależnie od trybu prezentacji (*running* czy *stop-chord*) oraz niezależnie od obecności systemu RES, co sugeruje, że **RT20 stanowi uniwersalną miarę odnoszącą się do percepcyjnej długości pogłosu** w różnych warunkach akustycznych.

Różnice pomiędzy salami z RES a salami bez RES ujawniają się jednak wyraźniej przy analizie pozostałych parametrów. W przypadku RT30 skuteczność predykcji była znacznie wyższa w salach z RES (77% trafnych odpowiedzi w trybie *stop-chord*) niż w salach bez RES (58%), przy czym w trybie *running* żaden z wyników nie osiągnął istotności. Może to świadczyć o tym, że dłuższy czas pogłosu (RT30) jest percepcyjnie bardziej uchwytny w warunkach z pogłosem generowanym przez RES, który cechuje się większą regularnością i jednorodnością czasową niż pogłos naturalny. Podobny kontrast wystąpił w przypadku RT10, gdzie w salach z RES uzyskano umiarkowane, ale istotne wyniki, natomiast w salach bez RES trafność odpowiedzi była wyraźnie niższa, a wyniki mniej spójne. Wskazuje to, że parametry pogłosowe oparte na krótszych zakresach czasu mogą być skuteczniejsze w przewidywaniu percepcji pogłosu w środowiskach z aktywnym wspomaganie, niż w salach pozbawionych takiego systemu. Największe różnice między typami sal zaobserwowano w odniesieniu do EDT. W salach z RES parametr ten w trybie *running* osiągnął umiarkowaną trafność (61%), natomiast w trybie *stop-chord* słuchacze wykazywali systematyczną odwrotną interpretację kierunku różnicy (trafność 27%, ale istotna statystycznie). W salach bez RES zarówno w trybie *running*, jak i *stop-chord*, EDT nie był predyktorem istotnym statystycznie. Może to sugerować, że obecność RES zniekształca percepcyjne przyporządkowanie długości pogłosu na podstawie wartości EDT.

Aby określić, na których parametrach akustycznych słuchacze opierali swoje oceny percepcyjnej długości pogłosu, szczegółowo przeanalizowano przypadki, w których zarówno parametr korelowany, jak i parametr testowany były tożsame. Takie zależności mają szczególne znaczenie, ponieważ wskazują, że dany parametr był bezpośrednią podstawą percepcyjnej decyzji słuchacza. Dla sal bez RES zaobserwowano szereg istotnych statystycznie, silnych korelacji tego typu. Dotyczyły one parametrów EDT (w pasmach 500 Hz i 1000 Hz), RT10 (w paśmie 1000 Hz), RT20 (w pasmach 1000 Hz i 8000 Hz), RT30 (w pasmach 250 Hz i 8000

Hz) oraz L_{total} w zakresie pełnego pasma (125 Hz – 8 kHz). Wartości korelacji (Rho) dla tych przypadków wynosiły od 0,975 do 1, co przy niskich wartościach p ($p \leq 0,0167$) wskazuje na bardzo silne i statystycznie istotne powiązania. Oznacza to, że w środowisku akustycznym bez wspomaganie elektronicznego percepcja pogłosu była spójna z wartością pojedynczych parametrów – szczególnie długości pogłosu oraz poziomu dźwięku. Może to świadczyć o przewidywalnej, naturalnej strukturze pogłosu, która ułatwiała subiektywną ocenę. Dla sal z systemami RES liczba spójnych korelacji była wyraźnie mniejsza. Istotne powiązania uzyskano jedynie dla parametru EDT (w paśmie 1000 Hz), RT10 (w paśmie od 500 Hz do 4 kHz), RT20 (w paśmie 125 Hz) oraz RT30 (w paśmie 250 Hz). Choć wartości współczynników korelacji były wysokie ($Rho = 0,975-1$), to występowały one tylko w wybranych pasmach i nie tworzyły tak konsekwentnego wzorca, jak w przypadku sal bez RES. Może to wskazywać, że obecność systemu elektronicznego wspomaganie pogłosu wprowadza większą złożoność czasową i przestrzenną sygnału, przez co słuchacze nie opierają się jednoznacznie na jednym parametrze, lecz mogą kierować się wrażeniami bardziej złożonymi lub mieszanymi.

Podsumowując, wyniki analizy wskazują, że percepcja długości pogłosu przebiega inaczej w salach z systemem elektronicznego wspomaganie (RES) niż w salach bez takiego systemu. W warunkach naturalnych (bez RES) oceny słuchaczy są bardziej jednoznacznie związane z wartością konkretnych parametrów akustycznych, co przejawia się w licznych, silnych i spójnych korelacjach pomiędzy oceną a wartością tego samego wskaźnika. Taka zgodność występuje m.in. dla RT10, RT20, RT30, EDT oraz L_{total} , co świadczy o przewidywalnej i naturalnej strukturze pogłosu sprzyjającej percepcyjnej interpretacji.

Z kolei w salach z systemem RES zależności te są mniej jednoznaczne: spójnych korelacji jest mniej, są rozproszone w zakresie pasm i parametrów, a dominujące predyktory trudniejsze do jednoznacznego wyodrębnienia. Może to wynikać z odmienności sztucznie generowanej struktury czasowej odpowiedzi impulsowej względem mechanizmów percepcji dźwięku przez człowieka. Jednocześnie jednak należy podkreślić, że parametr RT20 pozostaje najtrafniejszym i najbardziej stabilnym predyktorem percepcji długości pogłosu w obu typach sal, niezależnie od obecności systemu RES. Inne parametry wykazują większą skuteczność i spójność w salach z RES, co może wynikać z bardziej regularnego przebiegu pogłosu elektronicznego. Z drugiej strony, niektóre wskaźniki – jak EDT – w warunkach z aktywnym systemem mogą prowadzić do błędnych ocen kierunku różnicy, co dodatkowo podkreśla odmienną percepcję w tego rodzaju środowiskach akustycznych.

9.3 Eksperyment E3 - Ocena trafności parametrów pogłosowych EDT, RT10, RT20 i RT30 jako predyktorów percepcji długości pogłosu w przestrzeniach z RES z uwzględnieniem wartości parametrów w poszczególnych pasmach częstotliwości.

Wyniki eksperymentu E1, które nie potwierdziły powszechnie przyjmowanego poglądu, że to parametr EDT najsilniej koreluje z percepcją długości pogłosu, skłoniły autora do pogłębionej analizy parametrów obiektywnych uzyskanych w pomiarach sal wyposażonych w system RES. Pomiary przeprowadzone w salach z RES (Błasiński, 2022) wykazały istotną zależność czasu pogłosu od częstotliwości, co stało się podstawą decyzji o przeprowadzeniu kolejnego eksperymentu. W E2 uwzględniono więc nie tylko wartości średnie poszczególnych parametrów, lecz również ich wartości w poszczególnych pasmach oktaowych, co jest istotne, biorąc pod uwagę, że wiele parametrów akustycznych wykazuje silną zmienność w funkcji częstotliwości.

9.3.1 Cel eksperymentu E3

W związku z silną zależnością wartości parametrów pogłosowych od częstotliwości, E3 skonstruowano **w celu sprawdzenia czy posługiwanie się średnią wartością parametrów EDT, RT10, RT20 i RT30 jest właściwe w przypadku sal z RES w kontekście subiektywnej oceny długości pogłosu.**

W związku z tym sformułowano następującą **hipotezę badawczą: Wartości parametrów EDT, RT10, RT20 i RT30 w poszczególnych pasmach mają wpływ na korelacje z percepcją długości pogłosu w salach z RES.**

9.3.2 SRIR-y i próbki dźwiękowe w E3

Próbki dźwiękowe wykorzystane w eksperymencie E3 przygotowano analogicznie do tych z eksperymentu E1, zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 9.1.1.1. Różnica w sposobie doboru SRIR-ów w eksperymencie E2 w porównaniu do E1 polegała na tym, że podczas analizy uwzględniono nie tylko średnie wartości poszczególnych parametrów akustycznych (jak w E1), lecz także ich wartości w poszczególnych pasmach częstotliwości. Analiza została przeprowadzona dla pasm oktaowych o częstotliwościach środkowych: od 125 Hz do 8000 Hz. W szczególności poszukiwano takich par, w których różnice wartości badanego parametru przekraczały wartość JND nie tylko dla wartości średniej, lecz również w każdym z analizowanych pasm. Pomimo przeanalizowania ponad 400 odpowiedzi impulsowych, identyfikacja par próbek spełniających przyjęte kryteria różnic okazała się trudna. Ostatecznie,

przyjęto kryterium, zgodnie z którym wartość średnia musi przekraczać górny próg JND danego parametru, natomiast wartości tego parametru w poszczególnych pasmach musiały być konsekwentnie wyższe w tej próbce, która charakteryzowała się wyższą wartością średnią. Dla zachowania czytelności, w tabelach przedstawiono jedynie wartości średnie poszczególnych parametrów. Tabela 76 przedstawia przykład doboru par na podstawie pierwszej pary i parametru EDT – pokazano w niej średnią wartość EDT oraz wartości w poszczególnych pasmach częstotliwości. Średnia wartość EDT w próbce A jest o 0,22 s wyższa niż w próbce B, co przekracza próg JND dla tego parametru, a dodatkowo wartości EDT w każdym paśmie są wyższe w próbce A niż w B. Ten sam mechanizm doboru zastosowano we wszystkich parach we wszystkich częściach E3.

Tabela 76: Przykładowa para próbek AB i różnice w wartościach parametrów EDT w poszczególnych pasmach częstotliwości w E3.

Próbka	EDT [s]							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	Średnia
A	0,84	0,85	0,96	1,11	1,21	1,14	0,94	1,01
B	0,83	0,66	0,68	0,65	0,63	0,57	0,50	0,66

9.3.2.1 Różne wartości EDT, zbliżone wartości RT10, RT20 i RT30 w E3

Tabela 77 przedstawia obiektywne parametry próbek dźwiękowych wykorzystanych w eksperymencie, którego celem było zbadanie wpływu zróżnicowanych wartości EDT na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości EDT pomiędzy poszczególnymi próbkami przekraczają 0,15 s, podczas gdy różnice w parametrach RT10, RT20 i RT30 nie przekraczają 0,03 s. W Tabeli 77 zaprezentowano porównywane pary próbek A i B, ponumerowane od 1 do 5.

Tabela 77: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach EDT.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	1,01	1,08	1,24	1,24
	B	0,65	1,10	1,24	1,24
2	A	1,25	1,28	1,42	1,40
	B	0,85	1,28	1,42	1,42
3	A	0,65	0,70	0,72	0,72
	B	0,39	0,68	0,72	0,75
4	A	0,63	0,78	0,98	1,06
	B	0,45	0,80	0,99	1,07
5	A	0,66	0,73	0,72	0,76
	B	0,50	0,73	0,73	0,75

9.3.2.2 Różne wartości RT10, podobne wartości EDT, RT20 i RT30 w E3

Tabela 78 zawiera zestawienie obiektywnych wartości parametrów próbek dźwiękowych wykorzystanych w eksperymencie, którego celem było zbadanie wpływu zmian wartości RT10 na percepcję długości pogłosu. Różnice w wartościach RT10 pomiędzy próbkami przekraczają 0,15 s, podczas gdy różnice w EDT, RT20 i RT30 nie przekraczają 0,04 s. W Tabeli 78 przedstawiono porównywane pary próbek A i B, ponumerowane od 1 do 5.

Tabela 78: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT10.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	0,67	0,79	1,08	1,19
	B	0,71	0,98	1,13	1,23
2	A	0,60	0,86	1,05	1,13
	B	0,63	1,02	1,03	1,14
3	A	0,62	0,80	1,06	1,20
	B	0,63	1,02	1,03	1,14
4	A	0,71	1,04	1,12	1,15
	B	0,68	0,86	1,07	1,19
5	A	0,65	0,80	1,01	1,16
	B	0,63	1,02	1,03	1,14

9.3.2.3 Różne wartości RT20, podobne wartości EDT i RT10 w E3

Tabela 79 przedstawia wartości parametrów obiektywnych próbek dźwiękowych wykorzystanych w eksperymencie, którego celem było zbadanie wpływu zmian wartości RT20 na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości RT20 między próbkami przekraczają 0,15 s, podczas gdy różnice w EDT i RT10 są mniejsze niż 0,02 s. W parach próbek, które charakteryzują się nieliniowym zanikiem oraz zbliżonymi wartościami EDT i RT10, znaczne różnice w RT20 zazwyczaj wiążą się – podobnie jak w E1 (rozdział 9.1) – z jeszcze większymi różnicami w RT30. W Tabeli 79 zestawiono wartości poszczególnych próbek A i B w parach porównawczych, ponumerowanych od 1 do 5.

Tabela 79: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT20.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]
1	A	0,67	0,79	1,08
	B	0,67	0,80	0,85
2	A	0,69	1,01	1,32
	B	0,70	1,03	1,14
3	A	0,62	0,78	0,84
	B	0,62	0,80	1,06
4	A	0,66	0,95	1,41
	B	0,68	0,94	1,03
5	A	0,22	0,50	0,80
	B	0,24	0,49	0,63

9.3.2.4 Różne wartości RT30, podobne wartości EDT, RT10 i RT20 w E3

Tabela 80 przedstawia wartości parametrów obiektywnych próbek dźwiękowych wykorzystanych w eksperymencie 2, którego celem było zbadanie wpływu zmian wartości RT30 na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości RT30 pomiędzy próbkami przekraczają 0,15 s, natomiast różnice w pozostałych parametrach – EDT, RT10 i RT20 – nie przekraczają 0,08 s.

Tabela 80: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT30.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	0,63	0,89	1,11	1,14
	B	0,59	0,90	1,18	1,34
2	A	0,63	0,78	0,85	0,90
	B	0,68	0,82	0,91	1,06
3	A	0,20	0,48	0,69	0,78
	B	0,20	0,48	0,67	0,96
4	A	0,60	0,85	1,00	1,12
	B	0,52	0,92	0,93	0,95
5	A	1,48	1,52	1,74	1,94
	B	1,48	1,59	1,66	1,67

9.3.3 Słuchacze w E3

Eksperyment E3 przeprowadzono z udziałem 48 uczestników. Podobnie jak w E1 wszyscy uczestnicy mieli przebadania słuch za pomocą audiometrii tonalnej przeprowadzonej dla każdego słuchacza w dniu badania (WHO, 2021). W Tabeli 81 pokazano wyniki dotyczące stanu słuchu uczestników E3. Eksperyment E3 został przeprowadzony podczas konferencji

branżowej dla realizatorów dźwięku i producentów muzycznych, dlatego też wszystkich uczestników uznano za doświadczonych w ocenie długości pogłosu i posiadających umiejętność dostrzegania subtelnych struktur pogłosu.

Tabela 81: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E3.

Deklaracja stanu słuchu	Liczba słuchaczy
Nie mam problemów ze słuchem	42
Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szумы uszne itp.	5
Mam uszkodzony słuch	1

Ze względu na wadę słuchu wyniki uzyskane od jednego ze słuchaczy zostały usunięte z dalszej analizy. W Tabeli 82 pokazano podział pozostałych słuchaczy na poszczególne grupy wiekowe.

Tabela 82: Liczba uczestników E3 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.

Liczba uczestników	<20 lat	20 – 29 lat	30 – 39 lat	40 – 49 lat	≥50 lat
47	7	11	14	12	3

Podobnie jak w E1 i E2 ankietowani deklarowali swoją aktualną pozycję zawodową. Tabela 83 pokazuje liczbę słuchaczy deklarujących przynależność do poszczególnych grup.

Tabela 83: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E3.

Deklaracja dotycząca profesji	Liczba słuchaczy
Profesjonalny studyjny reżyser/ realizator dźwięku	10
Profesjonalny reżyser/ realizator dźwięku live	10
Profesjonalny muzyk	0
Reżyser/ realizator dźwięku	24
Muzyk	17
Student kierunku reżyseria dźwięku/ realizacja dźwięku lub kierunki pokrewne	8
Student kierunku akustyka/ inżynieria akustyczna/ elektronika i telekomunikacja lub kierunki pokrewne	4
Student kierunku innego niż wyżej wymienione	3
Audiofil	3

9.3.4 Procedura testowa w E3

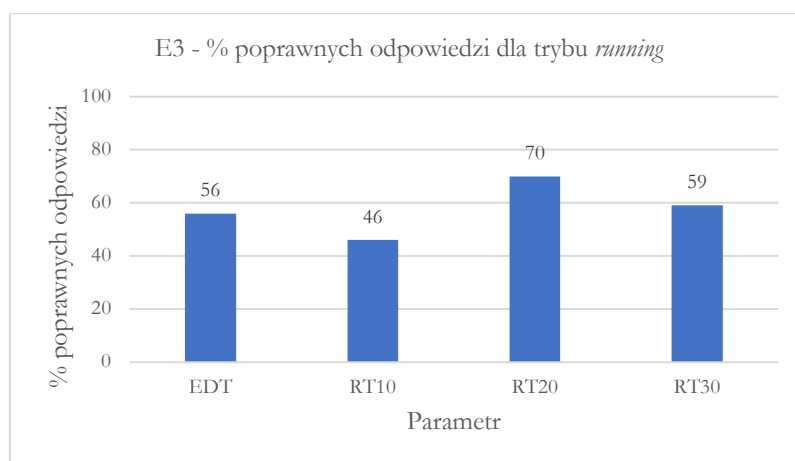
W eksperymencie E3, podobnie jak w E1 i E2 uczestnikom zaprezentowano pary próbek dźwiękowych, w których trzy z czterech parametrów czasu pogłosu (EDT, RT10, RT20, RT30) miały stałe wartości, natomiast czwarty – badany w danym zestawie – był zmienny. Dla każdego z analizowanych parametrów przygotowano po pięć par próbek w trybie *stop-chord* oraz pięć par w trybie *running*. Uczestnicy mieli możliwość wielokrotnego odsłuchania każdej próbki z pary przed udzieleniem odpowiedzi. Zadaniem uczestników było wskazanie, która z próbek w parze miała ich zdaniem dłuższy pogłos.

Identycznie jak w E1 i E2 za odpowiedź poprawną uznawano taką, w której wskazana przez uczestnika zmiana długości pogłosu była zgodna z rzeczywistą zmianą wartości badanego parametru. W przeciwnym przypadku – gdy uczestnik wybrał próbkę o krótszym pogłosie mimo wzrostu badanego parametru – odpowiedź uznawano za błędną.

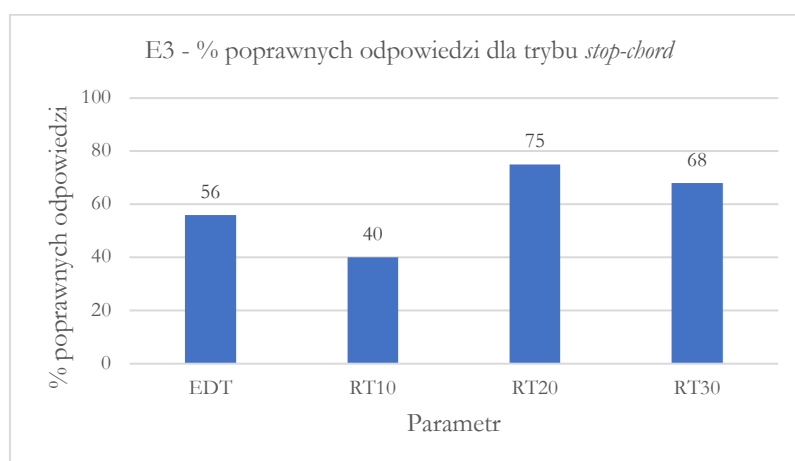
Na podstawie analizy wskaźników spójności odpowiedzi, wyniki sześciu słuchaczy zostały wykluczone z dalszej analizy.

9.3.5 Wyniki uzyskane w E3

Rysunek 33 przedstawia odsetek odpowiedzi zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru dla próbek pogłosu typu *running*, natomiast Rysunek 34 przedstawia odsetek odpowiedzi zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru obiektywnego dla próbek pogłosu typu *stop-chord* uzyskane w E3.



Rysunek 33: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu *running* w E3



Rysunek 34: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu *stop-chord* w E3

9.3.6 Dyskusja wyników uzyskanych w E3

Podobnie jak w eksperymentach E1 i E2, w E3 przeprowadzono test dwumianowy, aby sprawdzić, czy odpowiedzi słuchaczy miały charakter losowy. W Tabeli 84 przedstawiono wyniki testu rozpoznawania różnic w długości pogłosu dla dwóch trybów prezentacji dźwięku – *running* i *stop-chord*.

Tabela 84: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E3. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.

Typ pogłosu	Parametr	% poprawnych odpowiedzi	Wartość p
<i>Running</i>	EDT	56	0,0446
	RT10	46	0,2250
	RT20	70	<0,0001
	RT30	59	0,0020
	EDT	56	0,0446
<i>Stop-chord</i>	RT10	40	0,0047
	RT20	75	<0,0001
	RT30	68	<0,0001

W próbkach z pogłosem typu *running* odsetek odpowiedzi zgodnych ze zmianą badanego parametru wyniósł: 56% dla EDT, 46% dla RT10, 70% dla RT20 oraz 59% dla RT30. W przypadku pogłosu *stop-chord* wartości te były odpowiednio: 56% (EDT), 40% (RT10), 75% (RT20) i 68% (RT30). Testy istotności statystycznej wykazały, że dla pogłosu *running* istotne różnice wystąpiły dla EDT ($p = 0,0446$), RT20 ($p < 0,0001$) i RT30 ($p = 0,0020$), natomiast RT10 nie był istotny ($p = 0,2250$). Dla pogłosu *stop-chord* wyniki były jeszcze wyraźniejsze – RT20 i RT30 osiągnęły bardzo wysokie poziomy istotności ($p < 0,0001$), RT10 uzyskał wynik poniżej poziomu losowego (40%, $p = 0,0047$), a EDT – podobnie jak w trybie *running* – wykazał umiarkowaną, lecz istotną zgodność z percepcją długości pogłosu (56%, $p = 0,0446$). Największą zgodność między zmianą parametru a oceną długości pogłosu odnotowano dla RT20, niezależnie od rodzaju pogłosu, co jest spójne z wynikiem osiągniętym w E1. W eksperymencie E3 zauważalna była również większa niż w E1 zgodność percepcji długości pogłosu z wartością parametru EDT.

Tabela 85 prezentuje korelacje (współczynniki Rho) pomiędzy parametrami czasowymi (RT20 i RT30) a ocenami percepcyjnymi w różnych pasmach częstotliwości. Pogrubioną czcionką zaznaczono silne lub bardzo silne korelacje uzyskane dla odpowiedzi słuchaczy i zmian wartości badanego parametru. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany. Uzyskanie takiej korelacji świadczy o istotności danego parametru

z punktu widzenia percepcji – czyli o wrażliwości słuchaczy na zmianę kształtu części odpowiedzi impulsowej, opisywanej właśnie przez ten parametr.

Tabela 85: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E3. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelację pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.

Typ pogłosu	Parametr korelowany	Pasmo	Rho	Wartość p	Parametr testowany
<i>Running</i>	EDT	250 Hz - 2 kHz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Running</i>	RT20	250 Hz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Running</i>	RT20	4000 Hz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Running</i>	RT20	500 Hz	1	0,0167	RT20
<i>Running</i>	RT20	1000 Hz	1	0,0167	RT20
<i>Running</i>	RT20	250 Hz - 2 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Running</i>	RT20	500 - 4 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Running</i>	RT20	125 Hz - 8 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Running</i>	RT30	500 Hz	1	0,0167	RT20
<i>Running</i>	RT30	1000 Hz	1	0,0167	RT20
<i>Running</i>	RT30	250 Hz - 2 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Running</i>	RT30	500 Hz - 4 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Running</i>	RT30	125 Hz - 8 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Running</i>	EDT	250 Hz	-1	0,0167	RT30
<i>Stop-chord</i>	RT10	500 Hz - 4 kHz	-1	0,0167	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT30	250 Hz	1	0,0167	EDT
<i>Stop-chord</i>	L35	125 Hz - 8 kHz	1	0,0167	EDT
<i>Stop-chord</i>	EDT	250 Hz - 2 kHz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT20	250 Hz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT20	4000 Hz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT20	500 Hz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT20	1000 Hz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT20	250 Hz - 2 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT20	500 Hz - 4 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT20	125 Hz - 8 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	500 Hz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	1000 Hz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	250 Hz - 2 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	500 Hz - 4 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	125 Hz - 8 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	EDT	250 Hz	-0,9750	0,0048	RT30

W analizie korelacji przeprowadzonej na wynikach uzyskanych w E3 i trybu *running* nie stwierdzono żadnych istotnie statystycznych korelacji pomiędzy parametrami EDT i RT10 a odpowiedziami słuchaczy. Uzyskano natomiast szereg istotnych korelacji pomiędzy odpowiedziami słuchaczy a zmianami wartości RT20 w poszczególnych pasmach oraz zmian

wartości średnich dla wszystkich badanych uśrednień. Dla testowanego RT20 uzyskano również korelację ze zmianami wartości parametru RT30, również w szerokim zakresie częstotliwości. Dla prawie wszystkich pasm, z wyjątkiem 4000 Hz, dla którego uzyskano $Rho = 0,975$, $p = 0,0048$, uzyskano wartości $Rho = 1$, $p = 0,0167$. Dla testowanego parametru RT30 uzyskano istotną ujemną korelację ze zmianą wartości parametru EDT w paśmie 250 Hz ($Rho = -1$, $p = 0,0167$).

W trybie *stop-chord* nie uzyskano istotnych korelacji pomiędzy odpowiedziami zmianą wartości badanego parametru dla żadnego z parametrów z wyjątkiem RT20, dla którego podobnie jak w trybie *running* uzyskano szereg istotnych zależności. Dla RT20 uzyskano korelację ze zmianą wartości większości analizowanych pasm oraz wszystkich analizowanych uśrednień ($Rho > 0,975$ i $p < 0,0167$). Podobnie jak w trybie *running* dla RT20 uzyskano szereg istotnych korelacji ze zmianami wartości RT30, w tym dla wszystkich uśrednień ($Rho = 1$, $p = 0,0167$). Dla EDT uzyskano ujemną korelację ze zmianą wartości RT10 w paśmie 500 Hz – 4 kHz ($Rho = -1$, $p = 0,0167$) oraz dodatnie korelacje ze zmianami wartości RT30 w paśmie 250 Hz oraz L35 w pełnym paśmie częstotliwości (dla obydwu parametrów $Rho = 1$ i $p = 0,0167$). Dla badanego RT30 uzyskano ujemną korelację z wartością EDT w paśmie 250 Hz ($Rho = -0,9750$, $p = 0,0048$).

9.3.7 Wnioski z E3

Podsumowując, można stwierdzić, że **hipoteza badawcza zakładająca istotny wpływ wartości parametrów EDT, RT10, RT20 i RT30 w poszczególnych pasmach częstotliwości na percepcję długości pogłosu została potwierdzona**. Dla wszystkich parametrów z wyjątkiem RT10 uzyskano zgodność odpowiedzi słuchaczy ze zmianą wartości poszczególnych parametrów.

W obu trybach pogłosu wykazano dominującą rolę parametru RT20 w ocenie jego długości, co dodatkowo umacnia jego pozycję jako najlepszego predyktora percepcyjnej długości pogłosu – w świetle wyników eksperymentów E1 – E3.

9.3.8 Analiza porównawcza wyników E1 i E3 w kontekście hipotezy głównej dysertacji

Porównanie wyników E1 (sale z RES – analizowane wartości średnie parametrów pogłosowych) i E3 (sale z RES – analizowane wartości średnie oraz w poszczególnych pasmach częstotliwości) pozwala ocenić, jaki wpływ na percepcję pogłosu ma analiza średnich

wartości parametrów (E1) i wartości w pasmach (E3) w salach z RES. W Tabeli 86 przedstawiono porównanie E1 i E3 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Tabela 86: Porównanie E1 i E3 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Parametr	Tryb <i>Running</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Tryb <i>Stop-chord</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Ogólne wnioski
EDT	E1: 61% ($p < 0,05$) E3: 56% ($p = 0,0446$)	E1: 27% ($p < 0,05$) E3: 56% ($p = 0,0446$)	W E1 błędna interpretacja w stop-chord; w E3 trafność umiarkowana i dodatnia w obu trybach
RT10	E1: 58% ($p < 0,05$) E3: 46% (brak istotności)	E1: 55% ($p \approx 0,097$) E3: 40% ($p < 0,05$)	W E1 skuteczność umiarkowana, w E3 wyraźnie słabsza i niestabilna
RT20	E1: 72% ($p < 0,05$) E3: 70% ($p < 0,05$)	E1: 90% ($p < 0,05$) E3: 75% ($p < 0,05$)	Najbardziej stabilny i powtarzalny predyktor w obu eksperymentach i trybach
RT30	E1: 50% (brak istotności) E3: 59% ($p < 0,05$)	E1: 77% ($p < 0,05$) E3: 68% ($p < 0,05$)	Przydatny głównie w stop-chord; w E3 skuteczniejszy także w trybie running

Eksperymenty E1 i E3 wykazują szereg podobieństw w zakresie wpływu poszczególnych parametrów pogłosowych na percepcję długości pogłosu. Zbieżność wyników jest szczególnie widoczna w przypadku parametru RT20, który w zarówno w E1 jak i w E3 okazał się najbardziej stabilnym i konsekwentnym wskaźnikiem różnic percepcyjnych. W obydwu eksperymentach (w E1 i w E3), RT20 osiągnął najwyższe wskaźniki trafności odpowiedzi w obu trybach, z bardzo wysokim poziomem istotności statystycznej. W E3, RT30 uzyskał większą niż w E1 zgodność w trybie *running* – z 50% poprawnych odpowiedzi i braku istotności w E1 do 59% zgodnych odpowiedzi i istotności statystycznej tego wyniku w E3. Dla parametrów RT10 i EDT nie uzyskano stabilnych wyników, chociaż w E3 dla trybu *stop-chord* EDT przełamał „efekt odwrotnego wskazania” podnosząc poziom ponad losową przewagę i uzyskał istotność statystyczną. Dla wszystkich parametrów z wyjątkiem RT10 i trybu *running* w E3 uzyskano istotnie statystyczne odpowiedzi zgodne ze zmianą wartości badanego parametru przekraczające 50%. W analizie korelacji dla eksperymentu E3 zaobserwowano większą liczbę statystycznie istotnych zależności pomiędzy zmianami wartości parametrów a odpowiedziami słuchaczy niż w E1. Wskazuje to na istotny wpływ uwzględnienia rozkładu wartości parametrów w poszczególnych pasmach częstotliwości na wyniki eksperymentu.

9.4 Eksperyment E4 – Ocena trafności parametrów pogłosowych EDT, RT10, RT20 i RT30 jako predyktorów percepcji długości pogłosu w przestrzeniach bez RES z uwzględnieniem wartości parametrów w poszczególnych pasmach częstotliwości.

9.4.1 Cel eksperymentu E4

W związku z silną zależnością wartości parametrów pogłosowych od częstotliwości posługiwanie się średnią wartością parametrów EDT, RT10, RT20 i RT30 jest niewłaściwe w przypadku sal w których stwierdzono nieliniowe zaniki energii w procedurze subiektywnej ocenie długości pogłosu, co wykazano w E2. Dlatego podstawowym **celem skonstruowania E4 była konieczność porównania wyników tego eksperymentu z wynikami uzyskanymi w E3, a więc stwierdzenie, czy percepcja długości pogłosu w salach z RES jest podobna do percepcji w salach, w których nie wykorzystuje się RES, dla tej samej konstrukcji eksperymentu, a więc dla nieliniowych kształtów zaników energii oraz uwzględnieniu nie tylko średnich wartości parametrów, ale również ich wartości w poszczególnych pasmach.**

Wyniki uzyskane w E4 można również porównać z E2 na tej samej zasadzie co E3 do E1, a więc porównać wpływ uwzględnienia wartości parametrów w poszczególnych pasmach na percepcję długości pogłosu w salach bez RES.

Hipoteza sformułowana na potrzeby tego eksperymentu brzmi: **Wartości parametrów EDT, RT10, RT20 i RT30 w poszczególnych pasmach mają wpływ na korelacje z percepcją długości pogłosu w salach bez RES, w których mamy do czynienia z nieliniowymi zanikami energii.**

9.4.2 SRIR-y i próbki dźwiękowe w E4

Podobnie jak w E2, w niniejszym badaniu uwzględniono cztery zestawy próbek, biorąc pod uwagę nie tylko średnie wartości każdego parametru, lecz także ich wartości w poszczególnych pasmach częstotliwości. Analiza obejmowała wartości w pasmach oktaowych o częstotliwościach środkowych od 125 Hz do 8000 Hz. Podobnie jak w E2, w E4 przyjęto, że średnia wartość parametru musi przekraczać wartość górnego progu JND, a wartości w każdym paśmie muszą być wyższe w próbce badanego parametru niż w odpowiadającym jej paśmie drugiej próbki w parze. Tabela 87 przedstawia przykład doboru par na podstawie parametru EDT – pokazano w niej średnią wartość EDT oraz wartości w poszczególnych pasmach częstotliwości. Średnia wartość EDT w próbce B jest o 0,22 s

wyższa niż w próbce A, co przekracza próg JND dla tego parametru, a dodatkowo wartości EDT w każdym paśmie są wyższe w próbce B niż w A. Ten sam mechanizm doboru zastosowano we wszystkich parach we wszystkich częściach E4.

Tabela 87: Przykładowa para próbek AB i różnice w wartościach parametrów EDT w poszczególnych pasmach częstotliwości w E4.

Próbka	EDT [s]							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	Średnia
A	1,29	1,09	1,17	0,93	1,07	0,78	0,59	0,99
B	1,48	1,28	1,19	1,30	1,39	1,12	0,71	1,21

9.4.2.1 Różne wartości EDT, zbliżone wartości RT10, RT20 i RT30 w E4

Tabela 88 przedstawia wartości parametrów obiektywnych dla próbek dźwiękowych wykorzystanych w E4, którego celem było zbadanie wpływu zróżnicowanych wartości EDT na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości EDT między próbkami przekraczają 0,19 s, natomiast różnice wartości RT10, RT20 i RT30 mieszczą się w zakresie 0,01 s. W Tabeli 88 zaprezentowano wartości poszczególnych próbek A i B zestawionych w pary do analizy porównawczej, ponumerowane kolejno od 1 do 5.

Tabela 88: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E4 i różnych wartościach EDT.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	0,99	1,24	1,21	1,22
	B	1,21	1,24	1,20	1,23
2	A	0,93	1,14	1,10	1,09
	B	0,74	1,15	1,10	1,08
3	A	1,22	1,24	1,21	1,22
	B	0,98	1,25	1,22	1,23
4	A	0,99	1,24	1,21	1,22
	B	1,22	1,24	1,21	1,22
5	A	0,87	1,03	0,98	1,01
	B	1,11	1,02	0,99	1,02

9.4.2.2 Różne wartości RT10, zbliżone wartości EDT, RT20 i RT30 w E4

Tabela 89 przedstawia wartości parametrów obiektywnych dla próbek dźwiękowych wykorzystanych w E4, którego celem było zbadanie wpływu zróżnicowanych wartości RT10 na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości RT10 między próbkami przekraczają 0,22 s, natomiast różnice wartości EDT, RT20 i RT30 mieszczą się w zakresie 0,02 s. W Tabeli 89 zaprezentowano wartości poszczególnych próbek A i B, zestawionych w pary do analizy porównawczej, ponumerowane kolejno od 1 do 5.

Tabela 89: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E4 i różnych wartościach RT10.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	0,85	0,79	0,96	1,00
	B	0,83	0,95	0,94	0,98
2	A	0,68	0,85	1,02	1,06
	B	0,70	1,07	1,03	1,08
3	A	0,87	1,03	0,98	1,01
	B	0,85	0,79	0,96	1,00
4	A	0,75	0,98	1,05	1,06
	B	0,76	1,15	1,05	1,03
5	A	1,39	1,54	1,53	1,52
	B	1,39	1,38	1,54	1,55

9.4.2.3 Różne wartości RT20, zbliżone wartości EDT i RT10 w E4

Tabela 90 przedstawia wartości parametrów obiektywnych dla próbek dźwiękowych wykorzystanych w E4, którego celem było zbadanie wpływu zmiany wartości RT20 na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości RT20 między próbkami przekraczają 0,20 s, natomiast zmienność wartości EDT i RT10 jest mniejsza niż 0,02 s. Podobnie jak w E1 do E3 i z tego samego powodu, dla wariantu eksperymentu dotyczącego parametru RT20, w tej części E4 pominięto wartości parametru RT30. W Tabeli 90 zaprezentowano wartości poszczególnych próbek A i B, zestawionych w pary do porównań, ponumerowane od 1 do 5.

Tabela 90: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E4 i różnych wartościach RT20.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]
1	A	0,71	0,97	1,04
	B	0,70	0,98	1,24
2	A	0,90	1,12	1,07
	B	0,89	1,14	1,27
3	A	0,92	0,96	1,16
	B	0,91	0,95	0,96
4	A	0,71	1,10	1,26
	B	0,73	1,09	1,04
5	A	1,60	1,58	1,54
	B	1,59	1,59	1,75

9.4.2.4 Różne wartości RT30, zbliżone wartości EDT, RT10 i RT20 w E4

Tabela 91 przedstawia wartości parametrów obiektywnych dla próbek dźwiękowych analizowanych w E4, którego celem było zbadanie wpływu zmiany wartości RT30 na percepcję długości pogłosu. Różnice wartości RT30 między próbkami przekraczają 0,17 s, natomiast różnice wartości EDT, RT10 i RT20 są mniejsze niż 0,05 s. W Tabeli 91 zaprezentowano wartości poszczególnych próbek A i B, zestawionych w pary do porównań, ponumerowane od 1 do 5.

Tabela 91: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E4 i różnych wartościach RT30.

Para	Próbka	EDT [s]	RT10 [s]	RT20 [s]	RT30 [s]
1	A	0,88	1,12	1,13	1,26
	B	0,93	1,14	1,10	1,09
2	A	0,80	0,94	1,07	1,23
	B	0,75	0,98	1,05	1,06
3	A	0,92	1,11	1,13	1,28
	B	0,88	1,09	1,11	1,11
4	A	1,27	1,50	1,53	1,51
	B	1,29	1,48	1,57	1,70
5	A	0,97	1,16	1,23	1,21
	B	0,98	1,14	1,27	1,46

9.4.3 Słuchacze w E4

E4 przeprowadzono z udziałem 56 słuchaczy. Tabela 92 pokazuje liczbę słuchaczy i zadeklarowany przez nich stan słuchu.

Tabela 92: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E4.

Deklaracja dotycząca stanu słuchu	Liczba słuchaczy
Nie mam problemów ze słuchem	53
Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szumy uszne itp.	2
Mam uszkodzony słuch	1

W związku z zadeklarowaną przez jednego z uczestników wadą słuchu, wyniki wskazane przez tego słuchacza zostały usunięte z dalszej analizy. Tabela 93 pokazuje liczbę uczestników w poszczególnych grupach wiekowych.

Tabela 93: Liczba uczestników E4 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.

Liczba uczestników	<20 lat	20 – 29 lat	30 – 39 lat	40 – 49 lat	≥50 lat
55	11	31	13	0	0

Identycznie jak w badaniach od E1 do E3, w E4 słuchacze deklarowali przynależność do różnych grup zawodowych, kierunków studiów lub innych związków z muzyką. Liczbę osób deklarujących przynależność do poszczególnych grup pokazano w Tabeli 94.

Tabela 94: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E4.

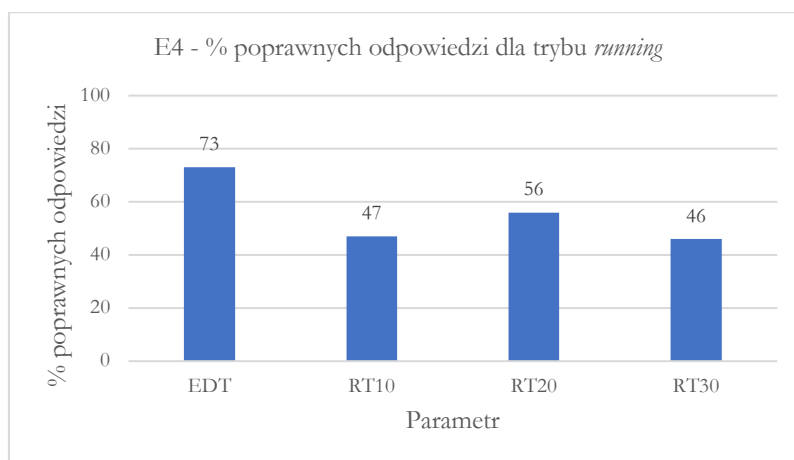
Deklaracja dotycząca profesji	Liczba słuchaczy
Profesjonalny studyjny reżyser/ realizator dźwięku	9
Profesjonalny reżyser/ realizator dźwięku live	14
Profesjonalny muzyk	3
Reżyser/ realizator dźwięku	26
Muzyk	12
Student kierunku reżyseria dźwięku/ realizacja dźwięku lub kierunki pokrewne	16
Student kierunku akustyka/ inżynieria akustyczna/ elektronika i telekomunikacja lub kierunki pokrewne	12
Student kierunku innego niż wyżej wymienione	4
Audiofil	6

9.4.4 Procedura testowa w E4

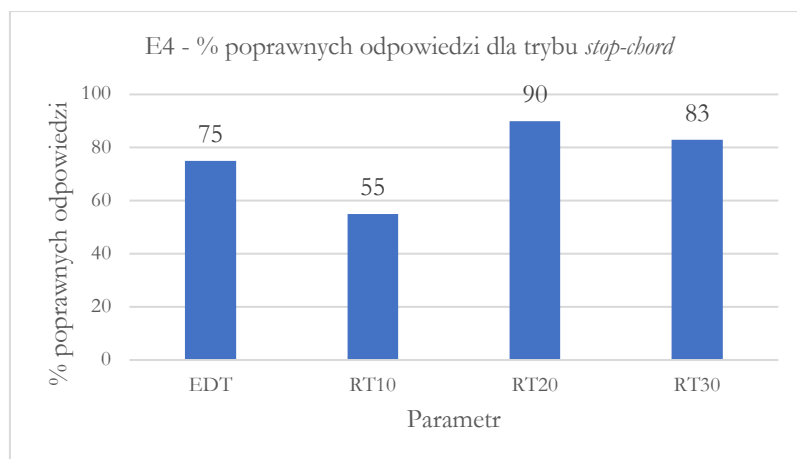
Procedura testowa E4 była identyczna jak procedura stosowana w badaniach od E1 do E3. Na podstawie analizy wskaźników spójności odpowiedzi, wyniki jednego z słuchaczy zostały wykluczone z dalszej analizy.

9.4.5 Wyniki uzyskane w E4

Rysunek 35 przedstawia procentowy wynik poprawnych odpowiedzi, zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru dla pogłosu typu *running*, natomiast Rysunek 36 przedstawia procentowy wynik poprawnych odpowiedzi, zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru dla pogłosu typu *stop-chord* uzyskanych w E4.



Rysunek 35: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu *running* w E4



Rysunek 36: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu stop-chord w E4

9.4.6 Dyskusja wyników uzyskanych w E4

W E4, identycznie jak w badaniach od E1 do E3 sprawdzono, czy odpowiedzi uczestników były statystycznie istotne względem poziomu losowego (0,5). Tabela 95 zawiera wartości p dla odpowiedzi słuchaczy w odniesieniu do analizowanych parametrów akustycznych i obu trybów prezentacji pogłosu.

Tabela 95: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E4. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.

Typ pogłosu	Parametr	% poprawnych odpowiedzi	Wartość p
<i>Running</i>	EDT	73	<0,0001
	RT10	47	0,3197
	RT20	56	0,0466
	RT30	46	0,1846
<i>Stop-chord</i>	EDT	75	<0,0001
	RT10	55	0,0973
	RT20	90	<0,0001
	RT30	83	<0,0001

W trybie *running* parametr EDT uzyskał wyraźnie istotny statystycznie wynik (73% poprawnych odpowiedzi, $p < 0,0001$), co wskazuje na dobrą rozpoznawalność zmian tego parametru. Parametr RT20 również przekroczył próg istotności (56%, $p = 0,0466$), choć efekt był znacznie słabszy. Natomiast RT10 i RT30 nie osiągnęły poziomu istotności (47% i 46% poprawnych odpowiedzi), co sugeruje ich niską percepcyjną rozróżnialność w tym trybie. W trybie *stop-chord* sytuacja wygląda inaczej: zarówno EDT, jak i parametry RT20 i RT30 uzyskały bardzo wysokie odsetki poprawnych odpowiedzi (odpowiednio 75%, 90% i 83%) oraz istotność statystyczną na poziomie $p < 0,0001$. Tylko RT10 nie przekroczył progu istotności (55%, $p = 0,0973$). W Tabeli 96 pokazano wyniki dla pozostałych analizowanych parametrów, dla których uzyskano wynik istotny statystycznie w E4. Pogrubioną czcionką

zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany. Uzyskanie takiej korelacji świadczy o istotności danego parametru z punktu widzenia percepcji – czyli o wrażliwości słuchaczy na zmianę kształtu części odpowiedzi impulsowej, opisywanej właśnie przez ten parametr.

Tabela 96: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E4. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.

Typ pogłosu	Parametr korelowany	Pasma	Rho	Wartość p	Parametr testowany
<i>Running</i>	C50	125 Hz - 8 kHz	-1	0,0167	EDT
<i>Running</i>	C80	125 Hz - 8 kHz	-1	0,0167	EDT
<i>Running</i>	D	125 Hz - 8 kHz	-1	0,0167	EDT
<i>Running</i>	Ts	125 Hz - 8 kHz	1	0,0167	EDT
<i>Running</i>	ALCons	125 Hz - 8 kHz	1	0,0167	EDT
<i>Running</i>	EDT	125 Hz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Running</i>	RT20	500 Hz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Running</i>	RT30	500 Hz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Running</i>	RT30	250 Hz - 2 kHz	0,9750	0,0048	RT20
<i>Running</i>	RT30	2000 Hz	1	0,0167	RT30
<i>Stop-chord</i>	EDT	500 Hz	0,9750	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	EDT	1000 Hz	0,9750	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	EDT	2000 Hz	0,9750	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	EDT	4000 Hz	0,9750	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	EDT	250 Hz - 2 kHz	0,9750	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	EDT	500 Hz - 4 kHz	0,9750	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	EDT	125 Hz - 8 kHz	0,9750	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	C35	125 Hz - 8 kHz	-0,9750	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	STI Męski	125 Hz - 8 kHz	-0,9750	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	STI Żeński	125 Hz - 8 kHz	-0,9750	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	EDT	8000 Hz	0,9470	0,0144	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT20	500 Hz - 4 kHz	-0,9750	0,0048	RT10
<i>Stop-chord</i>	EDT	4000 Hz	-0,8950	0,0403	RT10
<i>Stop-chord</i>	EDT	125 Hz - 8 kHz	0,9750	0,0048	RT30
<i>Stop-chord</i>	EDT	500Hz	0,8950	0,0403	RT30

W trybie *running* uzyskano szereg korelacji dla EDT i klarowności (zarówno C50 jak i C80), wyrazistości, czasu centralnego oraz parametru określającego zrozumiałość mowy (ALCons). Dla wszystkich parametrów uzyskano $Rho = +/- 1$, $p = 0,0167$. Kierunki korelacji odpowiadają kierunkom oczekiwanym, związanym z wydłużaniem pogłosu. Dla parametru RT20 uzyskano korelację ze zmianą wartości dla RT20 w paśmie 500 Hz ($Rho = 0,975$, $p = 0,0048$), oraz zmian wartości EDT w paśmie 125 Hz, RT30 w paśmie 500 Hz, oraz uśrednionej w paśmie 250 Hz – 2 kHz wartości RT30 (dla wszystkich zależności $Rho = 0,975$,

$p = 0,0048$). Dla RT30 uzyskano korelację ze zmianą wartości RT30 w paśmie 2 kHz ($Rho = 1$, $p = 0,0167$).

W trybie *stop-chord* dla testowanego parametru EDT uzyskano szereg korelacji związanych ze zmianą wartości tego parametru. Dla wszystkich zmian wartości uśrednień oraz wartości w poszczególnych pasmach od 500 Hz do 8 kHz uzyskano $Rho = 0,975$, $p = 0,048$. Dla EDT uzyskano również korelację z klarownością w granicy 35 ms (C35) oraz współczynnikami zrozumiałości mowy (STI dla głosu żeńskiego i męskiego) z wartościami $Rho = -0,975$ oraz $p = 0,0048$. Ujemne kierunki korelacji dla tych parametrów są kierunkami oczekiwanymi, związanymi z wydłużaniem pogłosu. Dla parametru RT10 uzyskano ujemne korelacje z wartością RT20 uśrednioną w zakresie 500 Hz – 4 kHz oraz z wartości EDT w paśmie 4 kHz (odpowiednio $Rho = -0,975$ i $p = 0,0048$ oraz $Rho = -0,895$, $p = 0,0403$). Dla RT30 uzyskano korelację z wartościami parametrów EDT w zakresie uśrednionych częstotliwości w paśmie 125 Hz - 8 kHz ($Rho = 0,975$, $p = 0,0048$).

9.4.7 Wnioski z E4

W E4 potwierdzono hipotezę badawczą. Wartości parametrów EDT, RT10, RT20 i RT30 w poszczególnych pasmach mają wpływ na korelacje z percepcją długości pogłosu w salach bez RES, w których mamy do czynienia z nieliniowymi zanikami energii. Jednocześnie stwierdzono przydatność parametrów EDT jak i RT20 w ocenie długości pogłosu. Zarówno dla trybu *running* jak i *stop-chord* EDT uzyskał istotnie statystyczne wyniki dla odpowiedzi słuchaczy (odpowiednio 73 % i 75%, $p < 0,05$). Wprawdzie RT20 również uzyskał istotnie statystyczne wyniki w oby trybach ($p < 0,05$) i w trybie *stop-chord* wynik wyższy od EDT, bo aż 90% zgodność zmiany wartości z odpowiedziami słuchaczy, to w analizie korelacji dla trybu *stop-chord* zdecydowanie najwięcej korelacji uzyskano dla parametru EDT. Wyniki E4 potwierdzają więc, że percepcja zależy nie tylko od wartości średnich poszczególnych parametrów, ale również od wartości tych parametrów w poszczególnych pasmach.

W świetle uzyskanych wyników należy uznać, że słuchacze trafnie rozpoznają zmianę długości pogłosu zarówno dla zmiany wartości EDT jak i RT20.

9.4.8 Analiza porównawcza wyników E3 i E4 w kontekście hipotezy głównej dysertacji

Porównanie wyników E3 i E4 pozwala ocenić wpływ obecności systemów wspomagania akustyki (RES) na percepcję długości pogłosu w warunkach, w których analizowano

zmienność parametrów nie tylko dla wartości średnich poszczególnych parametrów, ale również wartości w poszczególnych pasmach częstotliwości. Analiza ta jest więc szczególnie istotna ze względu na główną hipotezę postawioną w niniejszej rozprawie, dlatego porównanie E3 z E4 zostanie przedstawione jako pierwsze. W Tabeli 97 przedstawiono porównanie E3 i E4 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Tabela 97: Porównanie E3 i E4 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Parametr	Tryb <i>Running</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Tryb <i>Stop-chord</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Ogólne wnioski
EDT	E3: 56% ($p = 0,0446$) E4: 73% ($p < 0,0001$)	E3: 56% ($p = 0,0446$) E4: 75% ($p < 0,0001$)	W E4 EDT jest silnym i stabilnym predyktorem; w E3 trafność tylko umiarkowana
RT10	E3: 46% (brak istotności) E4: 47% (brak istotności)	E3: 40% ($p < 0,05$) E4: 55% ($p \approx 0,097$)	W obu eksperymentach niska i niestabilna trafność; RT10 ma ograniczoną użyteczność
RT20	E3: 70% ($p < 0,0001$) E4: 56% ($p = 0,0466$)	E3: 75% ($p < 0,0001$) E4: 90% ($p < 0,0001$)	W E3 i E4 potwierdzona skuteczność RT20, szczególnie w trybie <i>stop-chord</i>
RT30	E3: 59% ($p < 0,01$) E4: 46% (brak istotności)	E3: 68% ($p < 0,0001$) E4: 83% ($p < 0,0001$)	RT30 użyteczny głównie w trybie <i>stop-chord</i> , w E4 wyjątkowo silna trafność

W eksperymencie E3 najtrafniejszymi wskaźnikami percepcyjnej długości pogłosu były klasyczne czasy zaniku: RT20 i RT30. Dla bodźców typu *running* najwyższy odsetek poprawnych odpowiedzi osiągnięto dla parametru RT20 (70%, $p < 0,0001$), a dla bodźców *stop-chord* – zarówno dla RT20 (75%, $p < 0,0001$), jak i RT30 (68%, $p < 0,0001$). Mimo że EDT również osiągał istotność statystyczną (56%, $p = 0,0446$), jego znaczenie było mniejsze. Korelacje wykazały, że percepcja długości pogłosu była silnie dodatnio związana z wartościami RT20 i RT30 w szerokim zakresie pasm częstotliwości.

W eksperymencie E4 nastąpiło przesunięcie punktu ciężkości w stronę parametrów opisujących wczesną energię. W przypadku bodźca typu *running* dominującym parametrem percepcyjnym stał się EDT (73%, $p < 0,0001$), który korelował istotnie z parametrami takimi jak C50, C80, D (ujemnie), oraz Ts i %ALCons (dodatnio). Oznacza to, że słuchacze oceniali długość pogłosu nie tylko na podstawie jego bezwzględnego czasu zaniku, lecz także proporcji energii wczesnej do późnej i rozkładu czasowego odbić – zgodnie z obserwacjami dotyczącymi wpływu klarowności na percepcję pogłosu (Bradley i in., 1999; Barron, 1971).

Dla bodźca *stop-chord* w E4 nadal dominowały klasyczne parametry RT20 (90%, $p < 0,0001$) i RT30 (83%, $p < 0,0001$), lecz pojawiły się również istotne korelacje z parametrami zrozumiałości mowy (STI męski i żeński) oraz wskaźnikiem C35. Może to wskazywać, że w ocenie krótkich sygnałów impulsowych długość pogłosu jest również powiązana z wrażeniem wyrazistości brzmienia i czytelności. E4 jest pierwszym eksperymentem (opisywanym w tej pracy), w którym potwierdzono, że w trybie *stop-chord* zmiany wartości EDT wykazują najwyższą zgodność z percepcją długości pogłosu, co jest zgodne z wynikami często przytaczanymi w literaturze (Beranek, 2004; Soulodre, Bradley, 1995). Należy jednak zauważyć, że opinia ta odnosi się one zazwyczaj do trybu *running*, gdzie preferencja dla EDT tłumaczona jest efektem maskowania pogłosu przez trwający dźwięk muzyki.

Warto zauważyć, że RT10 – mimo że opisuje początkowy etap zaniku energii – nie uzyskał istotności w żadnym z warunków w E4 i był słabo rozpoznawany również w E3. Wskazuje to, że parametr ten jest mało użyteczny jako predyktor percepcyjnej długości pogłosu, co jest spójne z wynikami wcześniejszych badań wykazujących jego ograniczoną korelację z subiektywnym wrażeniem pogłosu (Lehmann, 1976). Wynik ten jest z kolei niezgodny z badaniami (Jeong, Joo, 2013), którzy przypisali parametrowi RT10 najwyższą wagę w ocenie długości pogłosu o nieliniowym charakterze zaniku.

Podsumowując, wyniki wskazują na różnicę w percepcji: o ile w E3 bezpośrednie czasy zaniku (RT20, RT30) dominowały w rozpoznawaniu długości pogłosu przez, to w E4 coraz większą rolę odgrywały parametry opisujące strukturę czasową odbić (EDT, C50, Ts). Różnice te zależały również od typu bodźca – dla sygnałów *stop-chord* długość pogłosu nadal najtrafniej odzwierciedlały klasyczne parametry RT, natomiast przy dźwiękach ciągłych odbiorcy chętniej korzystali z bardziej złożonych wskaźników opisujących proporcję energii i klarowność pola dźwiękowego. Uzyskany wynik wspiera główną hipotezę badawczą sformułowaną w niniejszej pracy, zgodnie z którą percepcja długości pogłosu w salach wyposażonych w systemy RES przebiega odmiennie niż w salach pozbawionych takiego systemu.

9.4.9 Analiza porównawcza wyników E2 i E4 w kontekście ogólnej wiedzy o percepcji pogłosu

Podstawowym zakresem niniejszej rozprawy jest analiza wpływu RES na percepcję pogłosu, jednak uzyskane w różnych eksperymentach wyniki pozwalają na dokładniejsze przyjrzenie się percepcji pogłosu w ogólności. Porównanie wyników E2 i E4 pozwala ocenić, jaki wpływ na percepcję pogłosu ma analiza średnich wartości parametrów (E2) i wartości

w pasmach (E4) w salach w których stwierdzono nieliniowe zaniki energii, a w których nie wykorzystuje się RES. W Tabeli 98 przedstawiono porównanie E2 i E4 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Tabela 98: Porównanie E2 i E4 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Parametr	Tryb <i>Running</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Tryb <i>Stop-chord</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Ogólne wnioski
EDT	E2: 51% (brak istotności) E4: 73% ($p < 0,0001$)	E2: 44% (brak istotności) E4: 75% ($p < 0,0001$)	EDT w E4 to silny predyktor w obu trybach; w E2 nie wykazuje istotnych zależności
RT10	E2: 41% ($p < 0,05$) E4: 47% (brak istotności)	E2: 46% (brak istotności) E4: 55% ($p \approx 0,097$)	Niska trafność i brak spójności w obu eksperymentach; RT10 ma ograniczoną wartość predykcijną
RT20	E2: 70% ($p < 0,05$) E4: 56% ($p = 0,0466$)	E2: 69% ($p < 0,05$) E4: 90% ($p < 0,0001$)	RT20 stabilny w obu eksperymentach, w E4 silniejszy w trybie stop-chord
RT30	E2: 53% (brak istotności) E4: 46% (brak istotności)	E2: 58% ($p < 0,05$) E4: 83% ($p < 0,0001$)	RT30 przydatny jedynie w stop-chord; w E4 jego skuteczność znacznie wyższa niż w E2

W eksperymencie E2 najwyższą skuteczność rozpoznawania długości pogłosu uzyskano dla parametru RT20 zarówno w warunku *running* (70% trafnych odpowiedzi, $p < 0,0001$), jak i *stop-chord* (69%, $p < 0,0001$). Wskaźnik EDT okazał się nieistotny statystycznie w obu przypadkach, osiągając odpowiednio 51% i 44% trafień. Interesujący wynik pojawił się dla RT10 dla trybu *running* - mimo niskiej trafności (41%), parametr ten osiągnął istotność ($p = 0,0157$), co może wynikać z silnych korelacji z EDT w zakresie od 250 Hz do 4 kHz ($Rho = 1$, $p = 0,0167$). Na podstawie tych danych można przypuszczać, że percepcja długości pogłosu w E2 opierała się głównie na długości późnego zaniku, a wpływ wczesnej energii był ograniczony.

W eksperymencie E4 nastąpiło wyraźne przesunięcie w kierunku parametru EDT, który osiągnął najwyższą skuteczność dla trybu *running* (73%, $p < 0,0001$) oraz bardzo wysoką trafność również dla trybu *stop-chord* (75%, $p < 0,0001$). Jednocześnie trafność rozpoznawania długości pogłosu na podstawie RT20 w warunku *running* spadła w E4 do 56% ($p = 0,0466$), co potwierdza zmianę percepcyjnego punktu odniesienia. Dla trybu *stop-chord* w E4, parametry RT20 i RT30 zyskały jeszcze większe znaczenie niż w E2, osiągając odpowiednio 90% i 83% trafnych odpowiedzi ($p < 0,0001$ w obu przypadkach). RT20 jest jedynym parametrem, który

w obu eksperymentach (E2 i E4), niezależnie od trybu pogłosu, uzyskał zarówno statystycznie istotne wyniki, jak i wysoki odsetek poprawnych odpowiedzi, zgodnych ze zmianami jego wartości.

Analiza korelacji wspiera tę interpretację. W E4, dla bodźców *running*, percepcja długości pogłosu była silnie związana z wskaźnikami klarowności: C50, C80, D (ujemnie), Ts i %ALCons (dodatnio), co wskazuje na dominujący wpływ struktury wczesnych odbić i rozkładu energii w czasie. Takich zależności nie obserwowano w E2. Dla bodźców *stop-chord* korelacje z klasycznymi czasami pogłosu (RT20 i RT30) pozostały silne, ale pojawiły się także istotne związki z parametrami zrozumiałości mowy (STI męski i żeński) oraz wskaźnikiem C35, co sugeruje szerszy wachlarz czynników wpływających na ocenę pogłosu przy sygnałach impulsowych.

Parametr RT10 w E2 uzyskał statystyczną istotność dla trybu *running*, natomiast w E4 nie był już istotny w żadnym z warunków. Potwierdza to ograniczoną przydatność RT10 jako niezależnego predyktora w ocenie długości pogłosu.

Podsumowując, wyniki eksperymentu E2 wskazują na dominującą rolę RT20 jako predyktora subiektywnej długości pogłosu, natomiast w E4 obserwujemy przesunięcie w stronę EDT oraz parametrów opisujących proporcję i strukturę energii wczesnej. Przy bodźcu ciągłym EDT staje się głównym wskaźnikiem, podczas gdy dla sygnału impulsowego utrzymuje się dominacja RT20 i RT30, wzbogacona jednak o komponenty związane z klarownością i zrozumiałością. Wyniki te podkreślają znaczenie odpowiedniego zaprojektowania zakresu zmienności parametrów (zarówno globalnie, jak i w pasmach) w eksperymentach percepcyjnych i potwierdzają, że strategia oceny długości pogłosu jest również silnie zależna od rodzaju bodźca.

9.5 Eksperyment E5 – Analiza porównawcza percepcyjnej istotności EDT i RT20 w salach z RES

9.5.1 Cel eksperymentu E5

Analiza wyników eksperymentów E1–E4 wykazała, że najistotniejszym parametrem w ocenie długości pogłosu jest RT20, choć statystycznie istotne rezultaty uzyskano również dla EDT. Parametr RT10 nie okazał się użyteczny w kontekście percepcyjnej oceny długości pogłosu, a RT30 nie wykazał wyższej skuteczności niż RT20. Na podstawie uzyskanych wyników oraz **w celu określenia, który z parametrów – EDT, reprezentujący wczesną fazę zaniku energii, czy RT20, odzwierciedlający jego późniejszą część – wywiera**

dominujący wpływ na percepcję długości pogłosu w salach z systemem RES, podjęto decyzję o przeprowadzeniu kolejnego eksperymentu.

Eksperyment E5 zaprojektowano tak, aby odpowiedzieć na pytanie, czy subiektywne odczucie wydłużenia pogłosu jest silniej powiązane ze zmianą wartości EDT, czy RT20 w stosunku do próbki odniesienia. Postawiona hipoteza badawcza zakłada, że **RT20 koreluje silniej ze zmianą percepcji długości pogłosu niż EDT**.

9.5.2 SRIR-y i próbki dźwiękowe w E5

Na potrzeby przeprowadzenia E5 przygotowano 24 zestawy próbek, z których każdy składał się z jednej próbki wzorcowej i dwóch próbek testowych pochodzących z zestawu SRIR-ów zarejestrowanych w salach z RES. Próbkę dobrano tak, aby w jednej próbce testowej wartość EDT była bliska wartości w próbce wzorcowej (różnica mniejsza niż dolny próg JND), natomiast wartość RT była od niej zauważalnie większa (różnica większa niż górny próg JND). W drugiej próbce testowej sytuacja była odwrotna: wartość RT20 była zbliżona do wartości w próbce wzorcowej, a wartość EDT zmieniała się zauważalnie. Dodatkowo, próbki dobrano tak, aby zmiana wartości EDT i RT20 była taka sama (z tolerancją mniejszą niż dolny próg JND). Wartości parametrów obliczano jako średnie arytmetyczne z pasm 125 Hz - 8000 Hz. Zakres wartości EDT w próbkach wykorzystanych w E5 wynosił od 0,62 do 1,37 s, a RT20 wynosił od 1,13 do 1,67 s. Tabela 99 przedstawia dwa przykładowe zestawy próbek wykorzystane w eksperymencie.

Tabela 99: Wartości parametrów EDT i RT20 dla dwóch przykładowych zestawów próbek wykorzystanych w E5.

Numer zestawu	Rodzaj próbki	EDT [s]	RT20 [s]
Zestaw 1	Próbka wzorcową	0,65	1,14
	Próbka testowa A	0,98	1,15
	Próbka testowa B	0,65	1,31
Zestaw 2	Próbka wzorcową	0,68	1,14
	Próbka testowa A	1,00	1,14
	Próbka testowa B	0,69	1,32

9.5.3 Słuchacze w E5

Eksperyment E5 przeprowadzono z udziałem 81 uczestników. 39 Słuchaczy oceniło tryb *running* a 42 tryb *stop-chord*. W Tabeli 100 pokazano wyniki dotyczące deklarowanego stanu słuchu uczestników E5. Eksperyment E5, podobnie jak E1–E4, został częściowo zrealizowany podczas konferencji branżowej skierowanej do realizatorów dźwięku

i producentów muzycznych, a częściowo przeprowadzony wśród studentów Akademii Muzycznej w Katowicach.

Tabela 100: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E5.

Deklaracja stanu słuchu	Liczba słuchaczy tryb running	Liczba słuchaczy tryb stop-chord
Nie mam problemów ze słuchem	36	40
Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szumy uszne itp.	3	2
Mam uszkodzony słuch	0	0

Wszyscy słuchacze zadeklarowali słuch normalny lub czasowo występujący obniżony komfort słyszenia, więc w dalszych badaniach uwzględniono wszystkie uzyskane wyniki. W Tabeli 101 pokazano podział pozostałych słuchaczy na poszczególne grupy wiekowe.

Tabela 101: Liczba uczestników E5 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.

Typ pogłosu	Wszyscy uczestnicy	<20 lat	20 – 29 lat	30 – 39 lat	40 – 49 lat	≥50 lat
<i>Running</i>	39	13	10	11	4	1
<i>Stop-chord</i>	42	13	12	11	5	1

Podobnie jak w E1-E4 ankietowani deklarowali swoją aktualną pozycję zawodową. Tabela 102 pokazuje liczbę słuchaczy deklarujących przynależność do poszczególnych grup.

Tabela 102: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E5.

Deklaracja dotycząca profesji	Liczba słuchaczy tryb running	Liczba słuchaczy tryb stop-chord
Profesjonalny studyjny reżyser/ realizator dźwięku	4	5
Profesjonalny reżyser/ realizator dźwięku live	7	9
Profesjonalny muzyk	0	2
Reżyser/ realizator dźwięku	15	19
Muzyk	15	14
Student kierunku reżyseria dźwięku/ realizacja dźwięku lub kierunki pokrewne	3	5
Student kierunku akustyka/ inżynieria akustyczna/ elektronika i telekomunikacja lub kierunki pokrewne	3	4
Student kierunku innego niż wyżej wymienione	2	2
Audiofil	7	7

9.5.4 Procedura testowa w E5

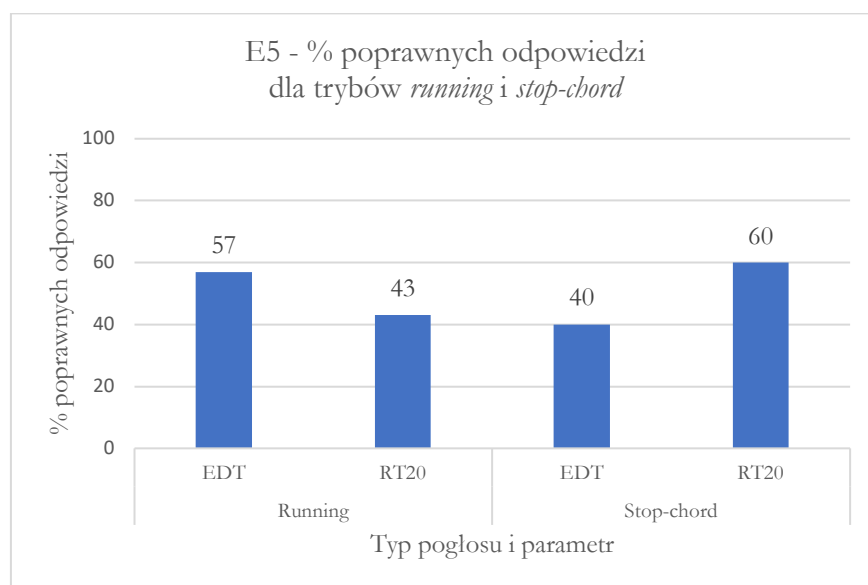
Podobnie jak w badaniach E1–E4, do zbierania odpowiedzi słuchaczy wykorzystano platformę opartą na interfejsie strony internetowej. Słuchaczom prezentowano wzorcową

próbkę dźwiękową oraz dwie próbki testowe. Zadaniem słuchacza było wskazanie, w której z próbek testowych, w porównaniu do próbki wzorcowej pogłos wydłużył się bardziej. Aby zwiększyć szanse na uzyskanie istotności statystycznej otrzymanych wyników, szczególnie w kontekście szczegółowej analizy indywidualnych odpowiedzi słuchaczy z wartościami poszczególnych mierzonych parametrów zdecydowano o zwiększeniu (w porównaniu do eksperymentów od E1 do E4) liczby par porównywanych przez uczestników. Aby test nie trwał zbyt długo, osobne grupy słuchaczy oceniały tryb *running* a osobne tryb *stop-chord*.

Na podstawie analizy wskaźników spójności odpowiedzi, wyniki dwudziestu słuchaczy dla trybu *running* i siedemnastu słuchaczy dla trybu *stop-chord* zostały wykluczone z dalszej analizy.

9.5.5 Wyniki uzyskane w E5

Rysunek 37 przedstawia procentowy wynik poprawnych odpowiedzi, zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru dla pogłosów typu *running* i *stop-chord* uzyskanych w E5.



Rysunek 37: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu *running* i *stop-chord* w E5

9.5.6 Dyskusja wyników uzyskanych w E5

Tabela 103 z wynikami testu dwumianowego przedstawia, który z parametrów – EDT czy RT20 – był częściej wskazywany przez słuchaczy jako bardziej związany z odczuciem długości pogłosu, przy założeniu, że drugi parametr w parze pozostawał niezmienny.

Tabela 103: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E5. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką. Pogrubioną czcionką zaznaczono silne i bardzo silne korelacje.

Typ pogłosu	Parametr	% poprawnych odpowiedzi	Wartość p
<i>Running</i>	EDT	57	0,00002
	RT20	43	0,00002
<i>Stop-chord</i>	EDT	40	<0,00001
	RT20	60	<0,00001

W eksperymencie E5 wyniki znacząco różniły się w zależności od zastosowanego trybu pogłosu. W trybie *stop-chord* słuchacze trafnie identyfikowali próbki z wyższą wartością RT20 jako dłuższe pogłosowo (60% trafności, $p < 0,00001$), natomiast w trybie *running* sytuacja była odwrotna: słuchacze częściej wskazywali próbki z większym EDT jako dłuższe (57% trafności, $p = 0,00002$), mimo że zmiana RT20 była również istotna statystycznie. To pierwszy ze zrealizowanych na potrzeby tej pracy eksperymentów, w których słuchacze uznali, że EDT bardziej niż RT20 koreluje ze zmianą długości pogłosu.

W Tabeli 104 pokazano wyniki pozostałych analizowanych parametrów, opisanych w 8.1.1, dla których uzyskano wyniki istotne statystycznie w E5. Pogrubiono te korelacje, które dotyczą bezpośredniego związku między testowanym parametrem a odpowiedziami słuchaczy, ponieważ mogą one świadczyć o wrażliwości percepcyjnej na zmiany opisywane przez ten parametr.

Tabela 104: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E5.

Typ pogłosu	Parametr korelowany	Pasmo	Rho	Wartość p	Parametr testowany
<i>Stop-chord</i>	RT10	500 Hz - 4 kHz	0,8760	0,0020	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT10	250 Hz - 2 kHz	0,8380	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT10	1000 Hz	0,8340	0,0052	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT30	1000 Hz	-0,8040	0,0091	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT30	500 Hz - 4 kHz	-0,8040	0,0091	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT30	500 Hz - 4 kHz	0,9370	0,0001	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	125 Hz - 8 kHz	0,8940	0,0005	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	250 Hz - 2 kHz	0,8140	0,0042	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT20	250 Hz - 2 kHz	0,7830	0,0074	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	2000 Hz	0,7600	0,0107	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	500 Hz	0,6650	0,0360	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	250 Hz	0,6570	0,0389	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT20	500 Hz - 4 kHz	0,6400	0,0463	RT20

W analizie korelacji dla trybu *running* nie wykryto żadnych istotnych statystycznej zależności pomiędzy parametrem testowanym a zmianą wartości któregośkolwiek ze zmierzonych parametrów. W trybie *stop-chord* i sytuacji, kiedy słuchacze wskazali EDT jako parametr

dominujący w ocenie długości pogłosu ujawniono korelację pomiędzy wskazaniem a zmianami wartości RT10 w szerokim paśmie częstotliwości (łącznie w paśmie 250 Hz – 4 kHz, wartościami $Rho > 0,83$ i $p < 0,005$) oraz korelację ujemną z wartością RT30 w paśmie 1000 Hz ($Rho = -0,804$, $p = 0,0091$) oraz ujemną korelację ze zmianą wartości RT30 uśrednionej w paśmie 500 Hz – 4 kHz ($Rho = -0,804$, $p = 0,0091$). W tym samym trybie (*stop-chord*) uzyskano istotne korelacje pomiędzy zmianami wartości RT20 w pasmach uśrednionych 250 Hz – 2 kHz ($Rho = 0,783$, $p = 0,0074$) oraz 500 Hz – 4 kHz ($Rho = 0,65$, $p = 0,0463$) a wskazaniem słuchaczy, którzy częściej wybierali próbki z wyższym RT20 jako te, w których pogłos uległ większemu wydłużeniu w porównywanych parach. Dla RT20 wykryto również korelacje ze zmianami wartości RT30, zarówno dla pojedynczych pasm 250 Hz, 500 Hz i 2000 Hz, jak i dla wartości średnich w paśmie 250 Hz – 4 kHz oraz pełnym paśmie częstotliwości.

9.5.7 Wnioski z E5

W eksperymencie E5 nie potwierdzono postawionej hipotezy badawczej o dominującej roli parametru RT20 w percepcji długości pogłosu w salach z systemami RES i dla przyjętej konstrukcji eksperymentu. Wprawdzie dla trybu *stop-chord* i parametru RT20 uzyskano wyraźną przewagę zarówno w procentowych wskazaniach słuchaczy jak i analizie korelacji, jednak dla trybu *running* dominujący okazał się wpływ EDT. Należy podkreślić, że w przypadku RT20 i trybu *stop-chord* wskazania słuchaczy potwierdzono w analizie korelacji, a dla trybu *running* i większej procentowej liczbie trafnych wskazań nie wykazano żadnych zależności statystycznych. Taki wynik sugeruje przewagę parametru RT20 w ocenie długości pogłosu przy konstrukcji eksperymentu zastosowanej w E5. Nie uzyskano jednak tak jednoznacznego rezultatu na korzyść RT20, jak miało to miejsce w E1, gdzie parametr ten był dominujący w ocenie długości pogłosu w obu trybach.

Ze względu na odmienną konstrukcję eksperymentu E5, bezpośrednie porównanie jego wyników z rezultatami uzyskanymi w eksperymentach E1–E4 nie jest możliwe.

9.6 Eksperyment E6 – Analiza porównawcza percepcyjnej istotności EDT i RT20 w przestrzeniach bez RES

9.6.1 Cel eksperymentu E6

Podstawowym celem E6 było porównanie wyników z E5, a więc sprawdzenie jak kształtuje się percepcja pogłosu w salach z RES w porównaniu do sal bez RES, co jest podstawowym celem niniejszej pracy. W E5 uzyskano ciekawy wynik w analizie

odpowiedzi grup słuchaczy. Dla trybu *running*, więcej poprawnych wskazań uzyskano dla EDT (57%) a w trybie *stop-chord* dla parametru RT20 (60%). W analizie korelacji wykazano istotnie statystyczne korelacje odpowiedzi słuchaczy ze zmianami wartości RT20 w różnych pasmach, a nie wykazano żadnych korelacji dla trybu *running* ani dla parametru RT20 ani dla parametru EDT. Z badawczego punktu widzenia interesujące jest, czy podobny wynik zostanie uzyskany w eksperymencie z SRIR-ami pochodzącymi z sal bez RES. Ponieważ jednak wyniki eksperymentów (E1 - E4) wskazywały, że RT20 jest najlepszym predyktorem długości pogłosu, więc hipoteza przyjęta w E6 brzmi: **RT20 jest lepszym niż EDT predyktorem odczuwanej długości pogłosu w salach o nieliniowym zaniku energii akustycznej.**

9.6.2 SRIR-y i próbki dźwiękowe w E6

Podobnie do E5, na potrzeby przeprowadzenia E6 przygotowano 24 zestawy próbek, z których każdy składał się z jednej próbki odniesienia i dwóch próbek testowych. Próbki dobrano zgodnie z tą samą zasadą co w E5: w jednej z próbek testowych wartość EDT była zbliżona do próbki wzorcowej, natomiast wartość RT20 była od niej zauważalnie większa. W drugiej próbce testowej sytuacja była odwrotna – RT20 pozostawało zbliżone do wartości wzorcowej, a EDT ulegało zauważalnej zmianie. Tak samo jak w E5 próbki dobrano tak, aby zmiana wartości EDT i RT20 była taka sama (z tolerancją mniejszą niż dolny próg JND). Zakres wartości EDT w próbkach wykorzystanych w E6 wynosił od 0,72 do 1,6 s, a RT20 wynosił od 0,72 do 1,71 s. Tabela 105 przedstawia dwa przykładowe zestawy próbek wykorzystane w eksperymencie.

Tabela 105: Wartości parametrów EDT i RT20 dla dwóch przykładowych zestawów próbek wykorzystanych w E6.

Numer zestawu	Rodzaj próbki	EDT [s]	RT20 [s]
Zestaw 1	Próbka wzorcową	0,72	1,10
	Próbka testowa A	0,90	1,10
	Próbka testowa B	0,72	1,28
Zestaw 2	Próbka wzorcową	1,03	1,24
	Próbka testowa A	1,03	1,40
	Próbka testowa B	1,19	1,24

9.6.3 Słuchacze w E6

Ekspierymencie E6 przeprowadzono z udziałem 140 uczestników. 60 Słuchaczy oceniło tryb *running* a 80 tryb *stop-chord*. W Tabeli 106 pokazano wyniki dotyczące deklarowanego stanu słuchu uczestników E5. Ekspierymencie E6 podobnie jak E5, został częściowo zrealizowany podczas konferencji branżowej skierowanej do realizatorów dźwięku i producentów

muzycznych, a częściowo przeprowadzony wśród studentów Akademii Muzycznej w Katowicach.

Tabela 106: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E6.

Deklaracja stanu słuchu	Liczba słuchaczy tryb running	Liczba słuchaczy tryb stop-chord
Nie mam problemów ze słuchem	51	71
Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szumy uszne itp.	9	9
Mam uszkodzony słuch	0	0

Wszyscy słuchacze zadeklarowali słuch normalny lub czasowo występujący obniżony komfort słyszenia, więc w dalszych badaniach uwzględniono wyniki uzyskane od wszystkich uczestników. W Tabeli 107 pokazano podział pozostałych słuchaczy na poszczególne grupy wiekowe.

Tabela 107: Liczba uczestników E6 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.

Typ pogłosu	Wszyscy uczestnicy	<20 lat	20 – 29 lat	30 – 39 lat	40 – 49 lat	≥50 lat
<i>Running</i>	60	15	29	9	4	3
<i>Stop-chord</i>	80	16	42	11	5	6

Podobnie jak w E1-E5 ankietowani deklarowali swoją aktualną pozycję zawodową. Tabela 108 pokazuje liczbę słuchaczy deklarujących przynależność do poszczególnych grup.

Tabela 108: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E6.

Deklaracja dotycząca profesji	Liczba słuchaczy tryb running	Liczba słuchaczy tryb stop-chord
Profesjonalny studyjny reżyser/ realizator dźwięku	8	13
Profesjonalny reżyser/ realizator dźwięku live	9	19
Profesjonalny muzyk	2	6
Reżyser/ realizator dźwięku	16	38
Muzyk	21	31
Student kierunku reżyseria dźwięku/ realizacja dźwięku lub kierunki pokrewne	16	24
Student kierunku akustyka/ inżynieria akustyczna/ elektronika i telekomunikacja lub kierunki pokrewne	4	11
Student kierunku innego niż wyżej wymienione	2	4
Audiofil	5	8

9.6.4 Procedura testowa w E6

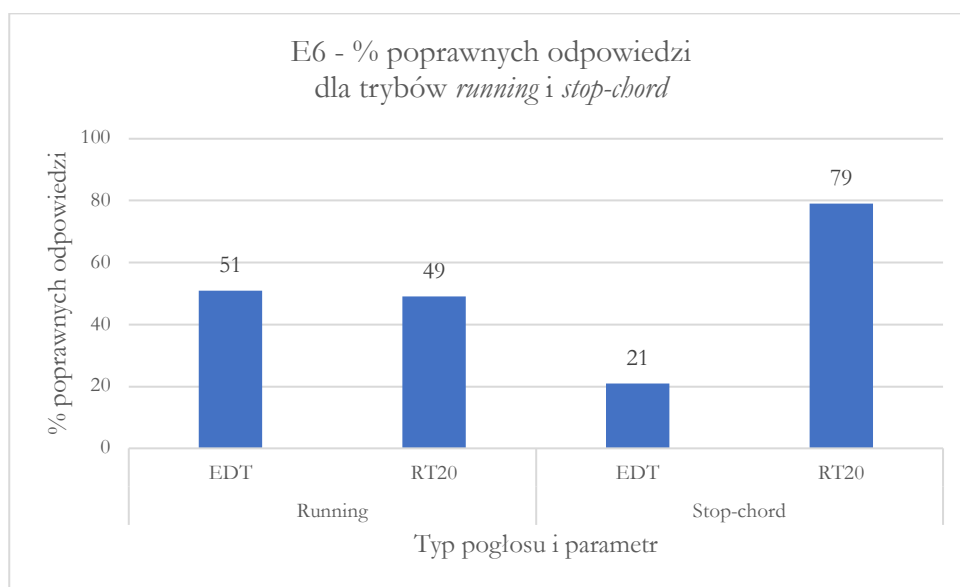
Podobnie jak w eksperymentach E1–E5, do zbierania odpowiedzi słuchaczy wykorzystano interfejs oparty na stronie internetowej. Uczestnikom prezentowano wzorcową próbkę

dźwiękową, w której wartości EDT i RT20 były do siebie zbliżone, oraz dwie próbki testowe. W jednej z nich zachowano wartość EDT identyczną jak we wzorcu, natomiast parametr RT20 uległ zauważalnej zmianie. W drugiej próbce testowej sytuacja była odwrotna – wartość RT20 pozostała niezmienną, a EDT różniło się w sposób wyraźny. Zadaniem słuchacza było wskazanie, w której z próbek testowych, w porównaniu do próbki wzorcowej, pogłos wydłużył się bardziej. Podobnie jak w E5 zwiększono liczbę porównywanych próbek i rozdzielono słuchaczy na dwie grupy, jedną oceniającą tryb *running* a drugą oceniającą tryb *stop-chord*.

Na podstawie analizy wskaźników spójności odpowiedzi, wyniki sześciu słuchaczy dla trybu *running* i pięciu słuchaczy dla trybu *stop-chord* zostały wykluczone z dalszej analizy.

9.6.5 Wyniki uzyskane w E6

Rysunek 38 przedstawia procentowy wynik poprawnych odpowiedzi, zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru dla pogłosów typu *running* i *stop-chord* uzyskanych w E6.



Rysunek 38: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu *running* i *stop-chord* w E6

9.6.6 Dyskusja wyników uzyskanych w E6

Tabela 109 z wynikami testu dwumianowego przedstawia, który z parametrów – EDT czy RT20 – był częściej wskazywany przez słuchaczy jako bardziej związany z odczuciem długości pogłosu, przy założeniu, że drugi parametr w parze pozostawał niezmiennym. W trybie *running* nie stwierdzono istotnych różnic w poprawności odpowiedzi – słuchacze wybierali EDT lub RT20 losowo, co sugeruje brak jednoznacznych wskazówek percepcyjnych w tym trybie. W trybie *stop-chord* uzyskano wyraźny wynik: 79% trafności dla RT20 i tylko 21% dla EDT

(przy wyraźnej istotności statystycznej), co silnie przemawia za tym, że słuchacze bardziej utożsamiali wydłużenie pogłosu ze zmianą RT20, a nie EDT.

Tabela 109: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E6. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.

Typ pogłosu	Parametr	% poprawnych odpowiedzi	Wartość p
<i>Running</i>	EDT	51	0,44788
	RT20	49	0,44788
<i>Stop-chord</i>	EDT	21	p<0,00001
	RT20	79	p<0,00001

W Tabeli 110 przedstawiono wyniki pozostałych analizowanych parametrów, istotnych statystycznie w E6. Pogrubiono korelacje $\geq 0,6$ (silne i bardzo silne), dotyczące bezpośredniego związku między testowanym parametrem a odpowiedziami słuchaczy, co może świadczyć o wrażliwości percepcyjnej na zmiany opisywane przez ten parametr.

Tabela 110: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E6. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.

Typ pogłosu	Parametr korelowany	Pasmo	Rho	Wartość p	Parametr testowany
<i>Stop-chord</i>	Ts	125 Hz - 8 kHz	0,6970	0,0171	EDT
<i>Stop-chord</i>	STI Żeński	125 Hz - 8 kHz	-0,6850	0,0200	EDT
<i>Stop-chord</i>	STI Męski	125 Hz - 8 kHz	-0,6270	0,0389	EDT
<i>Running</i>	RT10	500 Hz - 4 kHz	0,7820	0,0027	RT20
<i>Running</i>	RT10	1000 Hz	0,7590	0,0042	RT20
Running	RT20	1000 Hz	0,7320	0,0068	RT20
Running	RT20	250 Hz - 2 kHz	0,6420	0,0244	RT20
Running	RT20	125 Hz - 8 kHz	0,5830	0,0465	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	500 Hz	0,8540	0,0008	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	250 Hz - 2 kHz	0,8040	0,0029	RT20
Stop-chord	RT20	500 Hz	0,7850	0,0042	RT20
Stop-chord	RT20	250 Hz - 2 kHz	0,7750	0,0051	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT10	250 Hz	0,7570	0,0069	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	1000 Hz	0,7490	0,0079	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT10	500 Hz	0,7310	0,0107	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	250 Hz	0,7310	0,0107	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	125 Hz - 8 kHz	0,7300	0,0108	RT20
Stop-chord	RT20	125 Hz - 8 kHz	0,7180	0,0129	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	500 Hz - 4 kHz	0,6580	0,0279	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT10	250 Hz - 2 kHz	0,6500	0,0304	RT20
<i>Stop-chord</i>	RT30	4000 Hz	-0,6020	0,0499	RT20

W analizie korelacji dla trybu *running* i sytuacji, w której słuchacze wskazali RT20 jako dominujący w ocenie długości pogłosu ujawniono istotnie statystyczne korelacje pomiędzy

wskazaniami słuchaczy a zmianami wartości RT20 w szerokim zakresie częstotliwości. Zależności te dotyczą zarówno pasma 1000 Hz jak i uśrednionych wartości w paśmie 250 Hz – 2 kHz oraz wartości uśrednionych w całym badanym zakresie częstotliwości (odpowiednio $Rho = 0,732$, $p = 0,0068$, $Rho = 0,642$, $p = 0,0244$, $Rho = 0,5830$, $p = 0,0465$).

Dla trybu *stop-chord* wykazano wiele istotnych korelacji pomiędzy wskazaniem RT20 a RT10, RT20 i RT30 w różnych pasmach w sytuacji, w której słuchacze wskazali RT20 jako dominujący nad EDT w ocenie wydłużenia pogłosu. Najistotniejsze z punktu widzenia eksperymentu są korelacje uzyskane z RT20 w paśmie 500 Hz oraz uśrednione w paśmie 150 Hz – 2 kHz (odpowiednio $Rho = 0,785$ i $p = 0,0042$ oraz $Rho = 0,7750$ i $p = 0,0051$).

9.6.7 Wnioski z E6

Analiza korelacji potwierdziła, że parametr RT20 wykazuje najsilniejszy związek z percepcją długości pogłosu w obu trybach odsłuchu. Dla obydwu trybów wykazano korelację pomiędzy odpowiedziami słuchaczy a zmianą wartości RT20. Wprawdzie dla trybu *running* nie uzyskano przewagi odpowiedzi słuchaczy dla RT20 (49%), ale też nie osiągnięto istotności statystycznej ani dla tego wyniku ani dla wskazań na parametr EDT (51%). W analizie korelacji natomiast uzyskano szereg istotnych zależności pomiędzy wskazaniami słuchaczy a zmianami wartości RT20. Jednocześnie, w trybie *stop-chord*, gdy słuchacze wskazali na parametr EDT jako dominujący w ocenie długości pogłosu stwierdzono ujemne korelacje ze współczynnikami zrozumiałości mowy, co jest zgodne z oczekiwaniami, ponieważ wraz z wydłużaniem się pogłosu spada zrozumiałość mowy.

Uzyskane wyniki **potwierdzają hipotezę postawioną w eksperymencie E6: RT20 jest lepszym predyktorem percepcyjnej długości pogłosu niż EDT, zarówno w trybie ciągłym, jak i impulsowym.**

9.6.8 Analiza porównawcza wyników E5 i E6 w kontekście hipotezy głównej dysertacji

W eksperymentach E5 i E6 badano percepcję długości pogłosu w sytuacji, gdy słuchacze porównywali trzy próbki: jedną wzorcową i dwie testowe, różniące się albo wartością parametru EDT, albo RT20. Eksperyment E5 został przeprowadzony dla salach z systemami wspomagania akustyki (RES), natomiast E6 w salach bez takich systemów. Porównanie wyników tych dwóch eksperymentów pozwala określić, jak obecność systemu RES wpływa na strategie percepcyjne słuchaczy, co jest najważniejszym elementem tej pracy. W Tabeli 111 przedstawiono porównanie E3 i E4 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Tabela 111: Porównanie E5 i E6 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Parametr	Tryb <i>Running</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Tryb <i>Stop-chord</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Ogólne wnioski
EDT	E5: 57% (p = 0,00002)	E5: 40% (p < 0,00001)	W E5 EDT wykazuje istotność w obu trybach, choć w <i>stop-chord</i> trafność spada. W E6 tylko w <i>stop-chord</i> występuje istotność, ale przy bardzo niskiej trafności (błędna ocena).
	E6: 51% (p = 0,44788)	E6: 21% (p < 0,00001)	
RT20	E5: 43% (p = 0,00002)	E5: 60% (p < 0,00001)	W obu eksperymentach RT20 wykazuje istotność w <i>stop-chord</i> , z wyraźnie wyższą trafnością w E6. W trybie <i>running</i> wyniki poniżej 50%, istotność tylko w E5.
	E6: 49% (p = 0,44788)	E6: 79% (p < 0,00001)	

Wyniki testu dwumianowego pokazują wyraźne różnice między eksperymentami. W E5, w trybie *running*, słuchacze częściej wskazywali próbkę z dłuższym EDT (57% odpowiedzi), mimo że w drugiej próbce RT20 zmieniał się równie znacząco. Oznacza to, że w obecności systemu RES, EDT był częściej postrzegany jako parametr bardziej związany z długością pogłosu. W trybie *stop-chord* E5 uzyskano inny wynik – 60% słuchaczy trafnie wskazało próbkę z większym RT20, co oznacza, że w tym trybie RT20 miał już wyraźniejszy wpływ na ocenę długości pogłosu.

W analizie korelacji E5 potwierdzono skuteczność RT20 w trybie *stop-chord*, nie uzyskano natomiast żadnych korelacji dla trybu *running*. W E6 potwierdzono korelacje z odpowiedziami słuchaczy dla RT20 zarówno dla trybu *running* jak i *stop-chord* i jednocześnie nie uzyskano korelacji dla EDT związanych ze zmianą wartości tego parametru. W świetle wyników E5 i E6 i przy uwzględnieniu wyników otrzymanych w E1 do E 4 należy uznać, że RT20 pozostaje najlepszym predyktorem długości pogłosu, chociaż należy zaznaczyć, iż nie oznacza to automatycznie brak wrażliwości słuchaczy na wczesną część zaniku. Wyniki E5 i E6 pokazują, że uczestnicy potrafią odróżniać cechy wczesnej i późnej części zaniku, jednak subiektywne wydłużenie pogłosu najczęściej utożsamiają ze wzrostem wartości parametrów opisujących późniejszą fazę zaniku.

Podsumowując, w salach bez RES (E6) percepcja długości pogłosu jest bardziej jednoznacznie powiązana z parametrem RT20, zwłaszcza w trybie *stop-chord*. Słuchacze zdają się reagować konsekwentnie na zmianę długości pogłosu, odczytując ją w sposób zgodny z klasycznymi wskaźnikami akustycznymi. W salach z RES (E5) zależności te są mniej spójne. Choć zarówno EDT, jak i RT20 osiągają istotność statystyczną, trafność odpowiedzi jest niższa i mniej przewidywalna. Uzyskane wyniki mogą wskazywać, że modyfikacje wprowadzone przez RES zniekształcają percepcyjne przyporządkowanie długości pogłosu, zwłaszcza w przypadku parametrów takich jak EDT, opartych na wczesnym odcinku zaniku energii.

Analiza wyników eksperymentów E5 i E6 również wspiera główną hipotezę sformułowaną w niniejszej pracy, zgodnie z którą percepcja pogłosu w salach wyposażonych w system RES ma odmienny charakter niż w salach pozbawionych takiego systemu.

9.7 Eksperyment E7 - Analiza mechanizmów percepcji pogłosu w salach z systemem RES w fazie trwania i zaniku pogłosu

9.7.1 Cel eksperymentu E7

Na podstawie literatury (Lokki i in., 2010) oraz wyników eksperymentów E1–E6 wiadomo, że percepcja pogłosu różni się w zależności od trybu odsłuchu: *stop-chord* lub *running*. Skoro wykazano, że słuchacze inaczej postrzegają długość pogłosu w trakcie trwania materiału muzycznego, a inaczej w pauzach lub po zakończeniu dźwięku, interesującym zagadnieniem badawczym staje się ustalenie czy percepcja pogłosu w przypadku nagrań zawierających zarówno fragmenty ciągłe, jak i przerwy, jest bliższa percepcji w trybie *running* czy *stop-chord*. Intuicyjnie wydaje się, że możliwość usłyszenia pełnego wybrzmienia pogłosu, a więc tryb *stop-chord* sprzyja ocenie długości pogłosu, jednak wyniki wcześniejszych eksperymentów z zastosowaniem trybu *running* również wykazały istotne statystycznie korelacje pomiędzy ocenami słuchaczy a różnymi parametrami akustyki wnętrza.

Eksperyment 7 skonstruowano w celu sprawdzenia, czy dominująca w percepcji długości pogłosu jest ocena w trakcie trwania materiału muzycznego, czy w pauzach lub po zakończeniu poszczególnych części utworu, czyli w momentach, w których wyraźnie słyhać wybrzmienie pogłosu. Hipoteza postawiona w tym eksperymencie brzmi: Słuchacze oceniają długość pogłosu w pauzach i tych chwilach czasu, kiedy wybrzmienie pogłosu jest wyraźnie słyszalne.

9.7.2 SRIR-y i próbki dźwiękowe w E7

W eksperymencie E7 zastosowano te same charakterystyki SRIR co w E1, co umożliwia bezpośrednio porównanie wyników obu badań. Chociaż użycie terminów *running* i *stop-chord* nie jest w pełni adekwatne w kontekście konstrukcji eksperymentu E7, zdecydowano się zachować tę terminologię ze względu na jej spójność z eksperymentami E1–E6. Utrzymanie przyjętego nazewnictwa pozwala na łatwiejsze odniesienie i porównanie wyników pomiędzy badaniami, bez wprowadzania dodatkowej terminologii. Tryb *running* testowano z wykorzystaniem melodii zagranej na flugelhornie. Porównanie próbek w trybie *running* pomiędzy E1 a E7 jest możliwe dzięki temu, że do E7 wybrano dłuższą próbkę dźwiękową z tego samego nagrania, z którego pochodziły próbki dźwiękowe w E1.

Aby umożliwić porównanie próbek w trybie *stop-chord* między eksperymentami E1 i E7, brzmienie werbla zastąpiono dźwiękiem fortepianu. Zmiana ta była podyktowana koniecznością zachowania porównywalnego charakteru impulsu dźwiękowego przy jednoczesnym dostosowaniu materiału dźwiękowego do bardziej muzycznego kontekstu badania. Fortepian, mimo że kojarzony przede wszystkim z instrumentami melodycznymi, jednak należy do grupy chordofonów perkusyjnych, ponieważ dźwięk wytwarzany jest przez uderzenie młoteczków w struny (Drobner, 2004). Tym samym, podobnie jak werbel, generuje on sygnał impulsowy o stosunkowo krótkim ataku, co pozwala na analizę zaników pogłosu w podobnych warunkach. Jednocześnie wybór fortepianu zapewnia bardziej naturalny i muzyczny kontekst odsłuchu, co może sprzyjać zaangażowaniu słuchaczy i wiarygodności ich ocen w eksperymencie.

Zarówno próbki flugelhornu, jak i fortepianu zawierają ciągle fragmenty muzyczne, pauzy między dźwiękami oraz wyraźnie słyszalne zakończenie. Podobnie jak w eksperymencie E1 i z wykorzystaniem dokładnie tych samych SRIS-ów, przygotowano po pięć par do oceny wpływu każdego z parametrów - EDT, RT10, RT20 i RT30 - na percepcję długości pogłosu.

9.7.3 Słuchacze w E7

W E7 tryb *running* został oceniony przez 61 słuchaczy, natomiast tryb *stop-chord* przez 63 osoby. W Tabeli 112 pokazano wyniki dotyczące deklarowanego stanu słuchu uczestników E7. Eksperyment E7 został przeprowadzony podczas konferencji branżowej dla realizatorów dźwięku i producentów muzycznych, podobnie jak E1-E4.

Tabela 112: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E8.

Deklaracja stanu słuchu	Liczba słuchaczy tryb <i>running</i>	Liczba słuchaczy tryb <i>stop-chord</i>
Nie mam problemów ze słuchem	44	49
Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szumy uszne itp.	17	14
Mam uszkodzony słuch	0	0

W Tabeli 113 pokazano liczbę uczestników z podziałem na grupy wiekowe.

Tabela 113: Liczba uczestników E8 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.

Typ pogłosu	Wszyscy uczestnicy	<20 lat	20 – 29 lat	30 – 39 lat	40 – 49 lat	≥50 lat
<i>Running</i>	61	14	32	8	2	5
<i>Stop-chord</i>	63	13	34	6	6	4

Identycznie jak w E1 do E6, słuchacze deklarowali również swój zawód lub aktualny kierunek studiów. W Tabeli 114 pokazano udział poszczególnych grup wraz z liczbą osób, które zadeklarowały przynależność do nich.

Tabela 114: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E8.

Deklaracja dotycząca profesji	Liczba słuchaczy tryb <i>running</i>	Liczba słuchaczy tryb <i>stop-chord</i>
Profesjonalny studyjny reżyser/ realizator dźwięku	2	2
Profesjonalny reżyser/ realizator dźwięku live	4	7
Profesjonalny muzyk	3	5
Reżyser/ realizator dźwięku	24	28
Muzyk	26	26
Student kierunku reżyseria dźwięku/ realizacja dźwięku lub kierunki pokrewne	10	9
Student kierunku akustyka/ inżynieria akustyczna/ elektronika i telekomunikacja lub kierunki pokrewne	10	9
Student kierunku innego niż wyżej wymienione	6	6
Audiofil	6	6

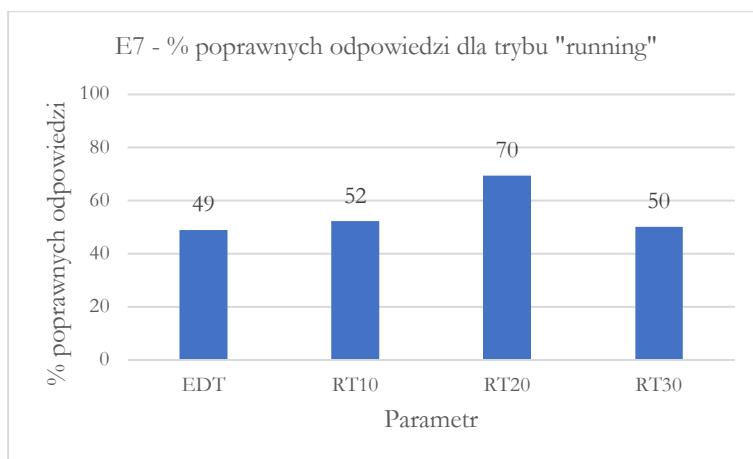
9.7.4 Procedura testowa w E7

W E7 zdecydowano o podzieleniu słuchaczy na dwie grupy. Jedna z grup wypełniała ankiety związane z próbkami w trybie “*running*” a druga w trybie “*stop-chord*”. Rozdzielenie testu na dwie części spowodowało skrócenie pojedynczego badania co miało skłonić słuchaczy uczestniczących w badaniach do wykonania większej liczby testów w czasie trwania konferencji, a w konsekwencji miało spowodować wypełnienie większej liczby wszystkich testów. Zwiększenie liczby uczestników każdego testu jest korzystne z punktu widzenia uzyskania wyższej istotności statystycznej odpowiedzi (większa reprezentatywność) oraz na zwiększenie mocy testu, czyli prawdopodobieństwo wykrycia efektu (jeśli on faktycznie istnieje). Zwiększenie liczby słuchaczy jest korzystniejsze niż zwiększenie liczby porównywanych par, które zwiększyłyby precyzję pomiaru dla jednego słuchacza, a więc redukowałyby wariancję wewnątrzsobniczą (Macmillan, Creelman, 2005). Do prezentacji próbek wykorzystano stosowaną od E1 do E6 platformę skonstruowaną z wykorzystaniem strony internetowej. Zbieranie danych odbywało się zgodnie z ogólną procedurą opisaną w rozdziale 8.3.1.

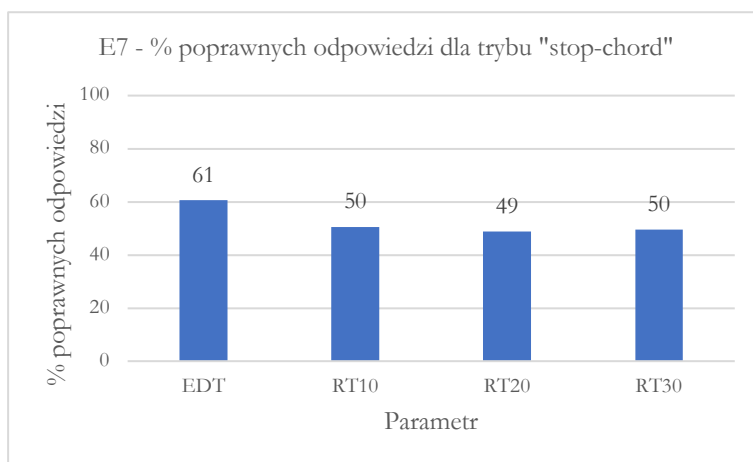
Na podstawie analizy wskaźników spójności odpowiedzi, wyniki dziewięciu słuchaczy zostały wykluczone z dalszej analizy.

9.7.5 Wyniki uzyskane w E7

Rysunek 39 przedstawia odsetek odpowiedzi zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru dla próbek pogłosu typu *running*, czyli próbek z melodią graną na flugelhornie uzyskane w E7, a Rysunek 40 dla próbek pogłosu typu *stop-chord*, czyli fragmentów muzyki granych na fortepianie.



Rysunek 39: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu running w E7



Rysunek 40: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu stop-chord w E7

9.7.6 Dyskusja wyników uzyskanych w E7

W E7, identycznie jak w badaniach od E1 do E6 sprawdzono, czy odpowiedzi uczestników były statystycznie istotne względem poziomu losowego (0,5). Tabela 115 zawiera wartości p dla odpowiedzi słuchaczy w odniesieniu do analizowanych parametrów akustycznych i obu trybów prezentacji pogłosu.

Tabela 115: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E7. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.

Typ pogłosu	Parametr	% poprawnych odpowiedzi	Wartość p
<i>Running</i>	EDT	49	0,7269
	RT10	52	0,4848
	RT20	70	<0,0001
	RT30	50	1,0000
<i>Stop-chord</i>	EDT	61	0,0001
	RT10	50	1,0000
	RT20	49	0,7226
	RT30	50	1,0000

Spośród ośmiu analizowanych kombinacji parametrów i typów pogłosu istotność statystyczną stwierdzono jedynie w dwóch przypadkach. W trybie *running* uzyskano wyraźny efekt percepcyjny dla RT20 (70% poprawnych odpowiedzi, $p < 0,0001$), co wskazuje na wysoką rozróżnialność długości pogłosu dla tego parametru. W trybie *stop-chord* istotną różnicę zaobserwowano jedynie dla EDT (61% poprawnych odpowiedzi, $p = 0,0001$). W pozostałych przypadkach – RT10 i RT30 w obu trybach, EDT w *running* oraz RT20 w *stop-chord* – wyniki były zbliżone do poziomu losowego (~50% poprawnych odpowiedzi) i statystycznie nieistotne, co oznacza, że uczestnicy nie byli w stanie konsekwentnie rozróżnić długości pogłosu wynikającej ze zmiany tych parametrów. Tabela 116 zawiera listę parametrów, dla których w E7 uzyskano istotność statystyczną. Pogrubiono korelacje wskazujące bezpośredni związek między testowanym parametrem a odpowiedziami słuchaczy, co może świadczyć o wrażliwości percepcyjnej na zmiany opisywane przez ten parametr.

Tabela 116: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E7. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.

Typ pogłosu	Parametr korelowany	Pasmo	Rho	Wartość p	Parametr testowany
Running	RT10	250 Hz - 2 kHz	1	0,0167	RT10
Running	RT20	125 Hz	0,975	0,0048	RT20
Running	RT30	125 Hz	0,975	0,0048	RT20
Running	RT10	8000 Hz	1	0,0167	RT30
Running	RT10	250 Hz - 2 kHz	1	0,0167	RT30
Running	RT10	500 Hz - 4 kHz	1	0,0167	RT30
Stop-chord	RT10	8000 Hz	0,975	0,0048	EDT
Stop-chord	EDT	2000 Hz	1	0,0167	EDT
Stop-chord	EDT	4000 Hz	1	0,0167	EDT
Stop-chord	EDT	8000 Hz	1	0,0167	EDT
Stop-chord	EDT	250 Hz - 2 kHz	1	0,0167	EDT
Stop-chord	EDT	500 Hz - 4 kHz	1	0,0167	EDT
Stop-chord	RT10	125 Hz	-1	0,0167	EDT
Stop-chord	RT10	2000 Hz	1	0,0167	EDT
Stop-chord	RT10	4000 Hz	1	0,0167	EDT
Stop-chord	RT20	2000 Hz	1	0,0167	EDT
Stop-chord	RT20	8000 Hz	1	0,0167	EDT
Stop-chord	RT30	8000 Hz	1	0,0167	EDT
Stop-chord	STI Męski	125 Hz - 8 kHz	-1	0,0167	EDT
Stop-chord	STI Żeński	125 Hz - 8 kHz	-1	0,0167	EDT
Stop-chord	ALCons	125 Hz - 8 kHz	1	0,0167	EDT
Stop-chord	EDT	8000 Hz	1	0,0167	RT30
Stop-chord	RT30	250 Hz	1	0,0167	RT30

Wyniki analizy korelacyjnej dla trybu *running* uzyskano korelację dla parametrów RT10 i RT20 związane ze zmianą ich wartości. Dla RT10 uzyskano zależność dla wartości uśrednionej w paśmie 250 Hz – 2 kHz ($Rho = 1$, $p = 0,0167$), a dla RT20 dla pasma 125 Hz ($Rho = 0,975$, $p = 0,0048$). Pozostałe korelacje uzyskane dla tego trybu są nieliczne i nie są związane ze zmianami wartości testowanych parametrów. Dla testowanego RT30 uzyskano korelację ze zmianami wartości RT10 w pasmie 250 Hz – 2 kHz i 500 Hz – 4 kHz ($Rho = 1$, $p = 0,0176$) co świadczy o wpływie stosunkowo wczesnej fazy zaniku reprezentowanej przez RT10 na charakter zaniku w dalszej części jego trwania.

Dla trybu *stop-chord* uzyskano istotnie statystyczne korelacje dla parametru EDT związane ze zmianą wartości tego parametru w pasmach powyżej 2 kHz, 4 kHz i 8 kHz oraz dla wartości uśrednionych w pasmach 250 Hz – 2 kHz i 500 Hz – 4 kHz (dla wszystkich przypadków $Rho = 1$, $p = 0,0167$). Pozostałe korelacje uzyskane dla EDT nie są związane ze zmianą wartości tego parametru, ale dotyczą wczesnej części zaniku energii akustycznej, bowiem związane są z parametrem RT10 w pasmach 2 kHz i 4 kHz ($Rho = 1$, $p = 0,0176$) oraz z wartościami współczynników zrozumiałości mowy. Dla STI korelacja z EDT jest ujemna a dla %ALCons dodatnia co sugeruje, że przy niskiej klarowności słuchacze mają tendencję do postrzegania pogłosu jako dłuższego – co jest spójne z intuicją psychoakustyczną. Dla EDT uzyskano ujemną korelację z wartością RT10 w pasmie 125 Hz, co jest kolejnym przykładem na niewielką wartość tego zakresu w ocenie długości pogłosu dla wczesnej części zaniku pogłosu. Dla EDT wykazano też korelację ze zmianą wartości RT20 i pasm 2 kHz i 8 kHz oraz RT30 w paśmie 8 kHz co potwierdza, że słuchacze są wrażliwi na zmiany pogłosu w wysokich częstotliwościach dla sygnałów o charakterze impulsowym.

9.7.7 Wnioski z E7

W analizie odpowiedzi słuchaczy uzyskano tylko dwa istotnie statystyczne parametry, RT20 dla trybu *running* (70%, $p < 0,05$) i EDT dla trybu *stop-chord* (61%, $p < 0,05$). E7 to pierwszy eksperyment, w którym uzyskano istotną korelację dla parametru RT10 związane ze zmianą wartości tego parametru w szerokim paśmie częstotliwości. Korelacje pomiędzy badanym parametrem RT30 a wartościami RT10 oraz korelacje uzyskane dla RT20 świadczą o tym, że postrzeganie długości pogłosu jest związane z późniejszą częścią zaniku w trybie *running*. W trybie *stop-chord*, uzyskano liczne, silne korelacje pomiędzy EDT a szerokim zakresem pasm częstotliwości - w tym 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz, a także pasmami uśrednionymi 250 Hz – 2 kHz oraz 500 Hz – 4 kHz. Sugeruje to, że EDT jest dominującym parametrem w tym trybie, a jego percepcja jest powiązana z informacją zawartą w szerokim paśmie sygnału.

Jednocześnie silne, ujemne korelacje EDT z parametrami zrozumiałości mowy (STI męski i żeński) oraz dodatnie z %ALCons potwierdzają, że długość pogłosu utożsamiana była z niską zrozumiałością i zmniejszoną klarownością sygnału. Podsumowując, dla trybu *running* percepcja długości pogłosu była najsilniej związana z wartością RT20, natomiast dla trybu *stop-chord* kluczowym parametrem był EDT. To odwrotność do często przyjmowanego schematu, w którym EDT dominuje w percepcji dźwięku ciągłego. Ponieważ weryfikacja hipotezy wymaga porównania wyników E1 i E7, przedstawiono ją w dalszej części pracy, w rozdziale 9.7.8.

9.7.8 Analiza porównawcza wyników E7 i E1 w kontekście ogólnej wiedzy o percepcji pogłosu w salach z RES

Eksperymenty E1 i E7 pozwalają porównać percepcję długości pogłosu w dwóch trybach: *running* i *stop-chord*, z zastosowaniem różnych materiałów muzycznych. W obu badaniach zastosowano flugelhorn jako źródło ciągle (tryb *running*), natomiast w trybie *stop-chord* użyto różnych instrumentów – werbla w E1 oraz fortepianu w E7. W E1 celem było sprawdzenie percepcji w zależności od trybu pogłosu, a celem E7 było sprawdzenie czy słuchacze oceniają zmiany długości pogłosu w przerwach między dźwiękami, czy podczas trwania muzyki. Ze względu na różnice metodologiczne, bezpośrednie porównanie wyników uzyskanych w E7 z eksperymentami innymi niż E1 jest niemożliwe. Porównanie wyników uzyskanych w eksperymentach E1 i E7 samo w sobie nie prowadzi bezpośrednio do weryfikacji głównej hipotezy badawczej sformułowanej w niniejszej pracy, jednak stanowi ważny z punktu widzenia całej pracy etap analizy, ponieważ umożliwia odniesienie do analogicznego porównania wyników zaplanowanych eksperymentów E2 i E8. W Tabeli 117 przedstawiono porównanie E1 i E7 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Tabela 117: Porównanie E1 i E7 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Parametr	Tryb <i>Running</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Tryb <i>Stop-chord</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Ogólne wnioski
EDT	E1: 61% ($p < 0,05$) E7: 49% ($p = 0,7269$)	E1: 27% ($p < 0,05$) E7: 61% ($p = 0,0001$)	W E1 EDT w trybie <i>stop-chord</i> prowadził do systematycznie błędnych ocen, w E7 – do trafnych i istotnych. Odwrócenie efektu.
RT10	E1: 58% ($p < 0,05$) E7: 52% ($p = 0,4848$)	E1: 55% ($p \approx 0,097$) E7: 50% ($p = 1,0000$)	W E1 umiarkowana skuteczność, w E7 brak istotnych wyników – wskazuje na niestabilność parametru

RT20	E1: 72% ($p < 0,05$) E7: 70% ($p < 0,0001$)	E1: 90% ($p < 0,05$) E7: 49% ($p = 0,7226$)	W E1 RT20 skuteczny w obu trybach, w E7 tylko w trybie <i>running</i> ; w <i>stop-chord</i> następuje utrata trafności
RT30	E1: 50% (brak istotności) E7: 50% ($p = 1,0000$)	E1: 77% ($p < 0,05$) E7: 50% ($p = 1,0000$)	W E1 RT30 użyteczny tylko w <i>stop-chord</i> , w E7 całkowicie nieprzydatny w obu trybach

W eksperymencie E1 wyniki wykazały bardzo wysoką trafność odpowiedzi dla parametrów RT20 i RT30 w trybie *stop-chord*, co wskazuje na skuteczną ocenę długości pogłosu na podstawie wybrzmiewania dźwięku po jego zakończeniu. W trybie *running* najwyższe wartości również uzyskał RT20 (72% trafnych odpowiedzi), a pozostałe parametry były rozpoznawane mniej skutecznie. Co istotne, RT30 nie osiągnął istotności statystycznej w tym trybie, mimo umiarkowanych korelacji w analizie pasmowej. W E7 uzyskano tylko dwa istotnie statystyczne parametry, RT20 dla trybu *running* (70%, $p < 0,05$) i EDT dla trybu *stop-chord* (61%, $p < 0,05$) co świadczy o tym, że percepcja długości pogłosu w trybie *running* pozostała niezmienna, a dla sygnałów impulsowych ciężar oceny długości pogłosu przesunął się w kierunku oceny wczesnej części zaniku dźwięku. **Taki wynik potwierdza różną percepcję pogłosu w sytuacji, w której słuchacz słyszy lub nie, pełne wybrzmienie pogłosu. Wynik ten wskazuje również, że przy szybko następujących po sobie dźwiękach uwaga słuchacza koncentruje się na pojawianiu się kolejnych zdarzeń dźwiękowych, co utrudnia percepcję zaniku energii dźwięku wcześniejszego. Z kolei dla dźwięków o charakterze ciągłym, pogłos percepcyjnie stapia się z brzmieniem instrumentu, stając się jego integralną częścią co ułatwia obserwację późniejszych etapów zaniku i tym samym sprzyja ocenie długości pogłosu na podstawie jego dalszej fazy.**

Na podstawie porównania wyników E1 i E7 należy stwierdzić, że w E7 nie potwierdzono hipotezy badawczej. Percepcja pogłosu jest złożona i zależy od trybu prezentacji. Wyniki uzyskane dla fragmentów muzycznych, w których słuchacze mieli możliwość usłyszenia pełnego wybrzmienia pogłosu dla fragmentów muzyki zagranych na fortepianie i flugelhornie, w których występują pauzy i wyraźnie słyszalne zakończenie frazy w E7 nie jest podobna do wyników uzyskanych w E1 w trybie *stop-chord*. W odniesieniu do pogłosów typu *running* percepcja nie zmieniła się, dominujący w E1 RT20 pozostał najważniejszym parametrem oceny również w E7. W odniesieniu do sygnałów typu *stop-chord* dominującym w E7 okazał się być parametr EDT, dla którego w E1 uzyskano ujemną istotną korelację.

9.8 Eksperyment E8 – Analiza mechanizmów percepcji pogłosu w salach bez systemów wspomagania akustyki w fazie trwania i zaniku pogłosu

9.8.1 Cel eksperymentu E8

Eksperyment 8 (E8) skonstruowano w celu porównania wyników z E7, a więc porównania percepcji w salach z jak i bez RES co jest zasadniczym elementem niniejszej pracy. Podobnie jak w konstrukcji E7 założono, że możliwość usłyszenia pełnego wybrzmienia pogłosu wydaje się być bardziej odpowiednią do oceny długości pogłosu. Hipoteza postawiona w tym eksperymencie brzmi: **Słuchacze oceniają długość pogłosu w pauzach i innych momentach, kiedy wybrzmienie pogłosu jest wyraźnie słyszalne.**

9.8.2 SRIR-y i próbki dźwiękowe w E8

W eksperymencie E8, analogicznie do E7, do stworzenia próbek dźwiękowych wykorzystano te same SRIR-y co we wcześniejszym badaniu – odpowiednio te użyte w E2 oraz w E1. Podobnie jak w E7 wykorzystano próbki flugelhornu i fortepianu, po 5 par dla każdego z parametrów EDT, RT10, RT20 i RT30.

9.8.3 Słuchacze w E8

E8 przeprowadzono z udziałem 112 osób. 46 Słuchaczy oceniło tryb *running* a 59 tryb *stop-chord*. W Tabeli 118 pokazano wyniki dotyczące deklarowanego stanu słuchu uczestników E8. Eksperyment E8 został przeprowadzony podczas konferencji branżowej dla realizatorów dźwięku i producentów muzycznych, podobnie jak E1-E4 oraz E7.

Tabela 118: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E8.

Deklaracja stanu słuchu	Liczba słuchaczy tryb running	Liczba słuchaczy tryb stop-chord
Nie mam problemów ze słuchem	38	46
Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szumy uszne itp.	8	13
Mam uszkodzony słuch	4	3

Ze względu na wadę słuchu wyniki uzyskane od siedmiu ze słuchaczy zostały usunięte z dalszej analizy. W Tabeli 119 pokazano podział pozostałych słuchaczy na poszczególne grupy wiekowe.

Tabela 119: Liczba uczestników E8 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.

Typ pogłosu	Wszyscy uczestnicy	<20 lat	20 – 29 lat	30 – 39 lat	40 – 49 lat	≥50 lat
<i>Running</i>	46	1	22	10	11	2
<i>Stop-chord</i>	59	4	25	16	11	3

Podobnie jak w eksperymentach od E1 do E7 ankietowani deklarowali swoją aktualną pozycję zawodową. Tabela 120 pokazuje liczbę słuchaczy deklarujących przynależność do poszczególnych grup.

Tabela 120: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E8.

Deklaracja dotycząca profesji	Liczba słuchaczy tryb <i>running</i>	Liczba słuchaczy tryb <i>stop-chord</i>
Profesjonalny studyjny reżyser/ realizator dźwięku	3	5
Profesjonalny reżyser/ realizator dźwięku live	9	14
Profesjonalny muzyk	16	12
Reżyser/ realizator dźwięku	22	29
Muzyk	29	28
Student kierunku reżyseria dźwięku/ realizacja dźwięku lub kierunki pokrewne	3	5
Student kierunku akustyka/ inżynieria akustyczna/ elektronika i telekomunikacja lub kierunki pokrewne	3	5
Student kierunku innego niż wyżej wymienione	5	7
Audiofil	6	10

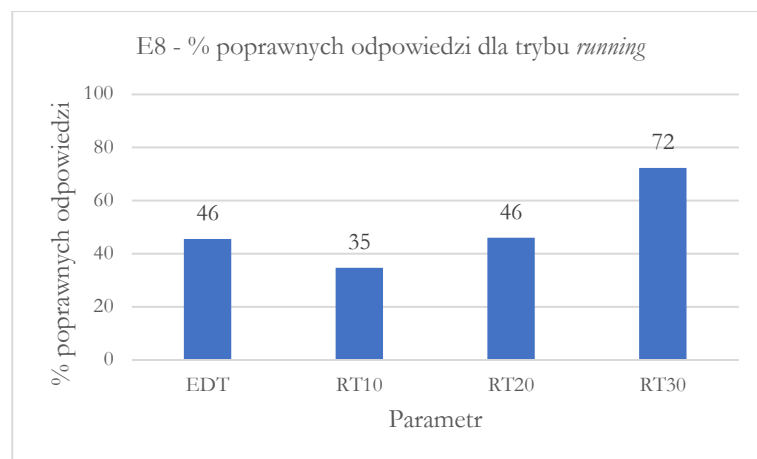
9.8.4 Procedura testowa w E8

W E8, podobnie jak E7 zdecydowano o podzieleniu słuchaczy na osobne grupy słuchaczy dla trybów *running* i *stop-chord*. Do prezentacji próbek wykorzystano stosowaną od E1 do E6 platformę skonstruowaną z wykorzystaniem strony internetowej. Zbieranie danych odbywało się zgodnie z ogólną procedurą opisaną w 8.3.1.

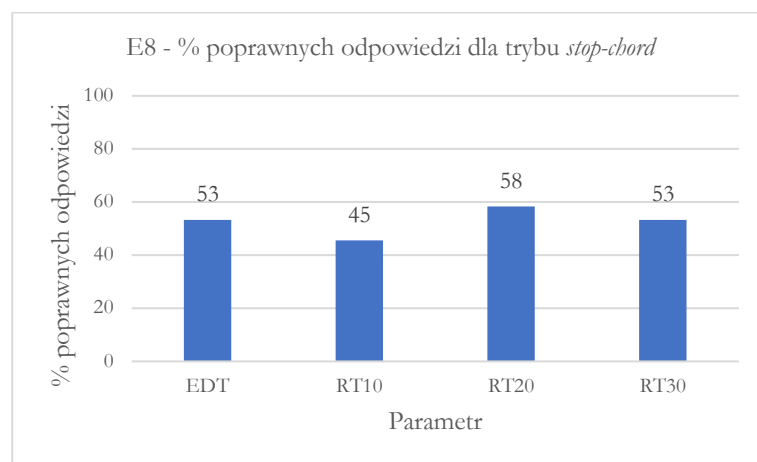
Na podstawie analizy wskaźników spójności odpowiedzi, wyniki dwóch słuchaczy dla trybu *running* i jedenastu słuchaczy dla trybu *stop-chord* zostały wykluczone z dalszej analizy.

9.8.5 Wyniki uzyskane w E8

Rysunek 41 przedstawia odsetek odpowiedzi zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru dla próbek pogłosu typu *running*, czyli próbek z melodią graną na flugelhornie uzyskane w E8. Rysunek 42 przedstawia odsetek odpowiedzi zgodnych z kierunkiem zmiany badanego parametru dla próbek pogłosu typu *stop-chord*, czyli próbek z fragmentem muzyki granym na fortepianie uzyskane w E8.



Rysunek 41: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu *running* w E8



Rysunek 42: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu *stop-chord* w E8

9.8.6 Dyskusja wyników uzyskanych w E8

W eksperymencie porównano percepcję długości pogłosu w zależności od rodzaju instrumentu muzycznego użytego do stworzenia próbek dźwiękowych – flugelhornu w trybie *running* oraz fortepianu w trybie *stop-chord*. Tabela 121 zawiera wartości p dla odpowiedzi słuchaczy w odniesieniu do analizowanych parametrów i obu trybów prezentacji pogłosu.

Tabela 121: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E8. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.

Typ pogłosu	Parametr	% poprawnych odpowiedzi	Wartość p
<i>Running</i>	EDT	46	0,2250
	RT10	35	<0,0001
	RT20	46	0,2250
	RT30	72	<0,0001
<i>Stop-chord</i>	EDT	53	0,3028
	RT10	45	0,0859
	RT20	58	0,0060
	RT30	53	0,3028

Dla trybu *running* jedynie parametr RT30 umożliwił uczestnikom rozpoznanie różnic z wysoką skutecznością (72% poprawnych odpowiedzi, $p < 0,0001$), podczas gdy pozostałe parametry – EDT, RT10 i RT20 – nie osiągnęły istotności statystycznej. Co więcej, RT10 przyniósł wynik istotnie poniżej poziomu losowego (35%, $p < 0,0001$), co może sugerować odwróconą interpretację różnic przez uczestników. W trybie *stop-chord* istotnie rozpoznawane różnice (58%, $p = 0,0060$) uzyskano jedynie dla parametru RT20. Pozostałe wskaźniki nie wykazały znaczącej skuteczności. Wyniki te sugerują, że percepcja długości pogłosu zależy nie tylko od samego parametru, ale również od charakteru bodźca testowego. W szczególności, czas pogłosu RT30 wydaje się być dominującym czynnikiem percepcyjnym w ciągłym dźwięku, natomiast dla dźwięków impulsowych jest to parametr RT20.

Tabela 122 zawiera listę parametrów, dla których uzyskano w E8 istotność statystyczną. Pogrubioną czcionką zaznaczono te korelacje, które dotyczą bezpośredniego związku między testowanym parametrem a odpowiedziami słuchaczy, ponieważ mogą one świadczyć o wrażliwości percepcyjnej na zmiany opisywane przez ten parametr.

Tabela 122: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E8. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.

Typ pogłosu	Parametr korelowany	Pasmo	Rho	Wartość p	Parametr testowany
<i>Running</i>	C35	125 Hz - 8 kHz	-1	0,0167	EDT
<i>Running</i>	RT30	250 Hz - 2 kHz	0,975	0,0048	RT10
<i>Running</i>	RT10	1000 Hz	1	0,0167	RT10
<i>Running</i>	RT20	1000 Hz	1	0,0167	RT10
<i>Running</i>	Ltotal	125 Hz - 8 kHz	1	0,0167	RT20
<i>Stop-chord</i>	C35	125 Hz - 8 kHz	-0,975	0,0048	EDT
<i>Stop-chord</i>	RT10	500 Hz - 4 kHz	1	0,0167	RT10
<i>Stop-chord</i>	EDT	500 Hz	-1	0,0167	RT30
<i>Stop-chord</i>	EDT	250 Hz - 2 kHz	-1	0,0167	RT30

Dla trybu *running* stwierdzono silną ujemną korelację pomiędzy wartością EDT a wskaźnikiem C35 ($Rho = -1$, $p = 0,0167$), co oznacza, że wzrost klarowności wczesnych odbić prowadzi do obniżenia EDT. Oznacza to, że przy większym udziale energii w pierwszych 35 ms, pogłos postrzegany jest jako krótszy, co jest zgodne z intuicyjnym znaczeniem EDT jako miary wczesnego zaniku. W tym samym trybie uzyskano również istotnie statystyczną korelację dla parametru RT10 związaną ze zmianą wartości tego parametru w paśmie 1 kHz ($Rho = 1$, $p = 0,0167$) oraz dodatnią korelację z RT30 ($Rho = 0,975$, $p = 0,0048$) w paśmie 250 Hz – 2 kHz, co może świadczyć o tym, że przebieg czasowy pogłosu zachowuje wysoką jednorodność w całym zakresie zaniku. Stwierdzono,

że RT20 wykazuje silną dodatnią korelację z parametrem L_{total} ($Rho = 1$, $p = 0,0167$), czyli całkowitym poziomem energii. To sugeruje, że im dłuższy średni czas zaniku, tym większa ilość energii skumulowanej w późnym polu pogłosowym, co z kolei może wpływać na subiektywne wydłużenie pogłosu.

W trybie *stop-chord* również zarejestrowano silną ujemną korelację pomiędzy EDT a C35 ($Rho = -0,975$, $p = 0,0048$), co oznacza, że w obu trybach wyższa klarowność wiąże się z krótszym początkowym zanikiem. Potwierdza to znaczenie C35 jako wskaźnika percepcyjnej przejrzystości pola akustycznego również w przypadku krótkich bodźców. Dla parametru RT10 i trybu *stop-chord* ujawniono korelację ze średnią wartością tego parametru w paśmie 500 Hz – 4 kHz ($Rho = 1$, $p = 0,0167$), co wskazuje na jego wpływ na subiektywną ocenę w impulsach dźwiękowych. Dla parametru RT30 zaobserwowano silne ujemne korelacje z EDT w pasmach 500 Hz i 250 Hz – 2 kHz ($Rho = -1$, $p = 0,0167$). Zależność ta sugeruje, że dłuższy czas późnego zaniku (RT30) związany jest z krótszą wartością EDT. W kontekście percepcji może to oznaczać, że subiektywnie długi pogłos w sygnałach impulsowych opiera się na kontraście między szybszym zanikiem wczesnym (krótszy EDT) a powolnym wybrzmiewaniem późnym (dłuższy RT30).

9.8.7 Wnioski z E8

Zarówno w trybie *running*, jak i *stop-chord*, wyższa klarowność (C35) wiąże się z obniżeniem EDT, co potwierdza jego silną zależność od proporcji energii wczesnej i późnej. Dla sygnałów ciągłych percepcja długości pogłosu opiera się na spójnym przebiegu RT10–RT30 oraz całkowitej energii (L_{total}). Natomiast w sygnałach impulsowych subiektywna długość pogłosu może być kształtowana przez kontrast między krótkim EDT a wydłużonym RT30, czyli szybkim zanikiem wczesnej energii a długotrwałym wybrzmiewaniem późnego pola pogłosowego.

Dla obu trybów pogłosu w E8 zaobserwowano zgodność percepcji ze zmianami RT10: w trybie *running* w paśmie 1000 Hz, a w trybie *stop-chord* dla wartości średniej w zakresie 500 Hz–4 kHz. W analizie poprawnych odpowiedzi dla trybu *running* i RT10 uzyskano wynik istotny statystycznie, choć poprawne rozpoznanie dotyczyło tylko 35% przypadków. We wcześniejszych eksperymentach (E1–E7) RT10 rzadko osiągał istotność statystyczną lub nie wykazywał istotnych korelacji z percepcją. Wyniki E8 ponownie wskazują, że parametr ten nie wnosi istotnej wartości w ocenie długości pogłosu. Warto podkreślić, że dominujący charakter RT10 w ocenie pogłosu odnotowali Jeong i Joo (2013) w eksperymencie opartym na odpowiedziach impulsowych pochodzących z modelowania komputerowego. W świetle

niniejszych badań, opartych na SRIR-ach zarejestrowanych w salach koncertowych, wyników tych nie udało się potwierdzić.

Dla parametru RT20 uzyskano korelację z wartością całkowitej energii w pełnym paśmie pomiarowym ($Rho = 1$, $p = 0,0176$) a więc zależność, jaką obserwowano również we wcześniejszych eksperymentach E7 i E2. Ponieważ weryfikacja hipotezy wymaga porównania wyników E2 i E8, przedstawiono ją w dalszej części pracy w rozdziale 9.8.9.

9.8.8 Analiza porównawcza E8 i E7 w kontekście hipotezy głównej dysertacji

Porównanie wyników eksperymentów E7 (w salach z RES) i E8 (w salach bez RES) ujawnia istotne różnice zarówno w skuteczności poszczególnych parametrów czasowych w ocenie długości pogłosu, jak i w sile ich powiązań z percepcją słuchaczy – zarówno wtedy, gdy słuchacze oceniają grę na flugelhornie (tryb *running*) czy fortepianie (tryb *stop-chord*). Porównanie wyników tych eksperymentów jest istotne w kontekście weryfikacji głównej hipotezy badawczej postawionej w tej pracy, a więc weryfikacji, czy percepcja pogłosu w salach z RES jest odmienna od percepcji pogłosu w salach bez RES. Ze względu na różnice metodologiczne, bezpośrednie porównanie wyników uzyskanych w E8 z eksperymentami innymi niż E7 i E2 jest niemożliwe. Porównanie E8 i E2 przedstawiono w kolejnym podrozdziale tej pracy. Tabela 123 przedstawiono porównanie E7 i E7 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Tabela 123: Porównanie E7 i E8 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Parametr	Tryb <i>Running</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Tryb <i>Stop-chord</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Ogólne wnioski
EDT	E7: 49% ($p = 0,7269$) E8: 46% ($p = 0,2250$)	E7: 61% ($p = 0,0001$) E8: 53% ($p = 0,3028$)	W E7 EDT istotny tylko dla trybu <i>stop-chord</i> w E8 nieistotny w obu trybach
RT10	E7: 52% ($p = 0,4848$) E8: 35% ($p < 0,0001$)	E7: 50% ($p = 1,0000$) E8: 45% ($p = 0,0859$)	W E7 RT10 całkowicie nieistotny, w E8 istotność tylko w trybie <i>running</i> , mimo bardzo niskiej trafności – błędna ocena kierunku
RT20	E7: 70% ($p < 0,0001$) E8: 46% ($p = 0,2250$)	E7: 49% ($p = 0,7226$) E8: 58% ($p = 0,0060$)	W E7 RT20 skuteczny tylko w trybie <i>running</i> , w E8 tylko w <i>stop-chord</i> – efekt odwrotny, brak spójności między eksperymentami
RT30	E7: 50% ($p = 1,0000$) E8: 72% ($p < 0,0001$)	E7: 50% ($p = 1,0000$) E8: 53% ($p = 0,3028$)	W E7 RT30 nieprzydatny w obu trybach, w E8 bardzo skuteczny tylko w <i>running</i>

W trybie *running*, w eksperymencie E7 istotny wynik uzyskano wyłącznie dla parametru RT20 (70% poprawnych odpowiedzi, $p < 0,0001$), podczas gdy zmiana pozostałych parametrów – EDT, RT10 i RT30 – nie pozwalała uczestnikom skutecznie rozpoznawać dłuższego pogłosu. W eksperymencie E8 sytuacja była odwrotna: to RT30 okazał się parametrem najlepiej różnicującym bodźce (72% poprawnych odpowiedzi, $p < 0,0001$), natomiast RT10 przyniósł wynik odwrotny do oczekiwanego – jedynie 35% poprawnych odpowiedzi ($p < 0,0001$), co wskazuje na systematyczne mylenie kierunku zmiany długości pogłosu. Parametry EDT i RT20 w E8 nie osiągnęły istotności statystycznej.

W trybie *stop-chord*, w eksperymencie E7 jedynie EDT pozwolił na trafne rozpoznanie różnic w długości pogłosu (61% poprawnych odpowiedzi, $p = 0,0001$), natomiast RT10, RT20 i RT30 dały wyniki nieistotne statystycznie. W eksperymencie E8 z kolei istotne znaczenie miał parametr RT20 (58% poprawnych odpowiedzi, $p = 0,0060$), natomiast EDT i RT30 nie przyniosły istotnych wyników. RT10 był bliski istotności, ale nie przekroczył ustalonego progu ($p = 0,0859$).

W analizie korelacji wykazano, że w trybie *running* występuje spójny wzorzec silnych dodatnich korelacji pomiędzy RT10, RT20 i RT30. W E7 odnotowano m.in. korelację RT20 – RT30 w paśmie 125 Hz ($Rho = 0,975$, $p = 0,0048$) oraz silną zależność RT10 – RT30 w zakresie 250 – 8000 Hz. Podobny układ pojawił się w E8, gdzie RT10 korelował dodatnio z RT20 i RT30 (1000 Hz, 250 Hz – 2 kHz) oraz z L_{total} w całym paśmie 125 – 8000 Hz. Wyniki te potwierdzają, że w percepcji pogłosu ciągłego słuchacze traktują zanik jako jednorodny w czasie. Istotną różnicą jest pojawienie się w E8 korelacji EDT – C35 ($Rho = -1$), wskazującej na uwzględnianie klarowności początkowych odbić, czego nie stwierdzono w E7.

W trybie *stop-chord* różnice między eksperymentami były bardziej wyraźne. W E7 parametr EDT korelował z parametrami RT10, RT20 i RT30 w wyższych pasmach (od 2000 Hz do 8000 Hz), a także z %ALCons, natomiast ujemnie z indeksami zrozumiałości mowy (STI męski i żeński). Oznacza to, że pogłos dla dźwięków o charakterze impulsowym w E7 był postrzegany przez pryzmat zarówno czasu wybrzmiewania, jak i przejrzystości dźwięku.

W E8 wykazano zdecydowanie mniej istotnych zależności. EDT wykazywał silną ujemną korelację z parametrem C35 ($Rho = -0,975$), a także z RT30 ($Rho = -1$ w paśmie 500 Hz i 250 Hz - 2 kHz). Tym samym, percepcja długości pogłosu w E8 była oparta przede wszystkim na kontrastach w energetycznej strukturze sygnału - im większy udział późnej energii, tym dłuższy pogłos, a im wyraźniejsza faza początkowa (wysokie C35), tym krótsze wrażenie pogłosowe.

Dla parametru RT10 w E8 i trybie *running* ujawniono sprzeczność pomiędzy wynikiem procentowego poprawnego wskazania a analizą korelacyjną, co budzi wątpliwość co do użyteczności wykorzystania tego parametru w ocenie długości pogłosu.

Porównanie wyników E7 i E8 ujawnia różnice w percepcji pogłosu w salach z RES i bez RES. W eksperymencie E7 (sale z RES) percepcja długości pogłosu była kształtowana przez złożoną strukturę związaną z czasami zaniku oraz przejrzystością sygnału, szczególnie w trybie *stop-chord*. EDT stanowił tu parametr centralny, korelujący z wieloma parametrami akustycznymi. W E8 (sale bez RES) zależności mają mniej skomplikowany charakter, kluczowymi zmiennymi były jednorodność zaniku (RT10–RT30) w trybie *running* oraz relacja EDT - klarowność (C35) w trybie *stop-chord*.

9.8.9 Analiza porównawcza E8 i E2 w kontekście ogólnej wiedzy o percepcji pogłosu w salach z nieliniowym zanikiem energii akustycznej

Eksperymenty E8 i E2 przeprowadzono w salach bez RES, z wykorzystaniem identycznych odpowiedzi impulsowych oraz tych samych bodźców muzycznych: melodii na flugelhornie (*running*) i fragmentów fortepianowych (*stop-chord*). Choć porównanie wyników nie weryfikuje bezpośrednio głównej hipotezy niniejszej tezy, poszerza ogólną wiedzę o percepcji pogłosu. Tabela 124 przedstawia porównanie E8 i E2 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Tabela 124: Porównanie E8 i E2 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.

Parametr	Tryb <i>Running</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Tryb <i>Stop-chord</i> % trafnych odpowiedzi, wartość p	Ogólne wnioski
EDT	E2: 51% (p = 0,7884) E8: 46% (p = 0,2250)	E2: 44% (p = 0,1074) E8: 53% (p = 0,3028)	W obu eksperymentach EDT nie wykazuje istotnych ani stabilnych wyników – nieprzydatny jako predyktor percepcji pogłosu
RT10	E2: 41% (p = 0,0157) E8: 35% (p < 0,0001)	E2: 46% (p = 0,2831) E8: 45% (p = 0,0859)	W obu przypadkach niska trafność i/lub odwrotne oceny kierunku – RT10 generuje wyniki mylące, mimo czasem istotnych wartości p
RT20	E2: 70% (p < 0,0001) E8: 46% (p = 0,2250)	E2: 69% (p < 0,0001) E8: 58% (p = 0,0060)	W E2 RT20 wyraźnie skuteczny w obu trybach; w E8 skuteczność wyraźnie słabsza, szczególnie w trybie <i>running</i>
RT30	E2: 53% (p = 0,4208) E8: 72% (p < 0,0001)	E2: 58% (p = 0,0318) E8: 53% (p = 0,3028)	W E2 RT30 umiarkowanie użyteczny w trybie <i>stop-chord</i> ; w E8 odwrotnie – wyraźna skuteczność tylko w <i>running</i>

W obu eksperymentach przeprowadzonych w trybie *running* istotną percepcyjną rozróżnialność długości pogłosu zaobserwowano jedynie dla parametru RT10. Jednocześnie, należy zauważyć, że w obydwu eksperymentach słuchacze wskazywali kierunek zmian odwrotny do kierunku zmian wartości RT10. Dla parametru RT20, w E2 odsetek poprawnych odpowiedzi wyniósł 70% ($p < 0,0001$), co wskazuje na silny i jednoznaczny efekt percepcyjny. W E8 poprawność wyniosła 46% i nie osiągnęła istotności statystycznej, co sugeruje mniejszą wrażliwość uczestników na zmiany tego parametru w danym materiale dźwiękowym. EDT nie osiągnęła istotności statystycznej w trybie *running* w żadnym z eksperymentów. RT30 był istotny statystycznie w E8 (72%, $p < 0,05$).

W trybie *stop-chord* istotne rozróżnienie uzyskano dla RT20 w obu eksperymentach (E2: 69%, $p < 0,0001$; E8: 58%, $p = 0,0060$), RT30 był istotny w E2 (58%, $p = 0,0318$) natomiast pozostałe parametry nie przyniosły rezultatów znacząco różnych od poziomu losowego. Na podstawie tych wyników można uznać, że percepcja długości pogłosu jest oparta o późną część zaniku energii akustycznej.

W analizie korelacji ujawniono wiele korelacji pomiędzy parametrem EDT a wieloma różnymi wartościami parametrów RT10, RT20 i RT30 mimo, że średnie wartości tych parametrów w poszczególnych parach były zbliżone, różnica ich wartości była mniejsza niż próg JND, co świadczy o istotności wartości poszczególnych parametrów w poszczególnych pasmach w ocenie długości pogłosu, co wykazano również w E3 i E4.

Analizując wyniki uzyskane w E8 w porównaniu do wyników w E2 należy stwierdzić, że hipoteza badawcza nie została potwierdzona. Wyniki E8 w żadnym z trybów pogłosu nie pokrywają się z wynikami E2 dla trybu *stop-chord* co pozwalałoby stwierdzić, że słuchacze analizują długość pogłosu jedynie wtedy, kiedy wybrzmienie pogłosu jest wyraźnie słyszalne.

9.9 Eksperyment E9 - Percepcja pogłosu przy nieliniowym zaniku energii i stałych parametrach czasowych w salach z systemem RES

9.9.1 Cel eksperymentu E9

W rozdziale 4.2 tej pracy opisano badania nad percepcją pogłosów nieliniowych. W literaturze eksperymentalnej badano percepcję pogłosów o przebiegach odbiegających od klasycznego zaniku liniowego. W pracy (Luizard i in., 2015a) stwierdzono, że stosowanie tradycyjnych parametrów czasowych takich jak EDT, czy RT jest niewłaściwe w odniesieniu do nieliniowych zaników energii, ponieważ słuchacze różnie interpretują długość pogłosu

w zależności od proporcji pomiędzy wczesnym a późnym zanikiem energii. Jednocześnie badania te prowadzone były głównie dla porównań par, w których jedna z próbek miała liniowy a druga nieliniowy zanik (Frissen i in., 2009), lub par próbek o tej samej wartości ostatecznego zaniku i różnych proporcjach pomiędzy wczesną a późną częścią zaniku energii (Picard, 2003). W ramach badań proponowano również nowe miary dla nieliniowych zaników energii, które jak na razie nie przyjęły się w metodyce badawczej (Luizard i in., 2015a). Percepcja pogłosu o przebiegu z dwoma (lub więcej) nachyleniami była więc badana zarówno pod kątem samej odpowiedzi impulsowej, jak i związanych z nią metryk. Zauważono, że zmiany w całkowitej energii zaniku mogą stanowić wskazówkę percepcyjną. Słaba zgodność między odpowiedzią przewidywaną a teoretyczną, jak również zmienność pozycji słuchacza i wczesne odbicia wynikające z konkretnej geometrii pomieszczenia, zostały uznane za potencjalnie problematyczne czynniki. Wnioski płynące z tych badań skłoniły do przeprowadzenia eksperymentu, który **ma na celu sprawdzenie czy słuchacze potrafią rozpoznać różnice w długości pogłosu pomiędzy próbkami o nieliniowym zaniku, dla których wartości parametrów czasowych są takie same, a więc proporcje pomiędzy wczesną a późną częścią zaniku, wyrażone jako EDT, RT20 i RT30 są stałe.** Analiza odpowiedzi i wartości innych parametrów niż parametry czasowe pozwoli na określenie, które z pozostałych parametrów akustycznych mają wpływ na percepcję długości pogłosu.

Hipoteza postawiona w tym eksperymencie brzmi: **w salach wyposażonych w systemy pogłosowe (RES) słuchacze mogą odmiennie postrzegać długość pogłosu, nawet w przypadku próbek dźwiękowych charakteryzujących się zbliżonymi wartościami klasycznych parametrów czasowych, takich jak EDT, RT20 czy RT30.** Subiektywne odczucia mogą w takich warunkach wykazywać silniejsze powiązania z innymi wskaźnikami akustycznymi – zwłaszcza z tymi, które lepiej oddają proporcje między wczesną a późną energią akustyczną.

9.9.2 SRIR-y i próbki dźwiękowe w E9

Przygotowano 15 par próbek dla trybu *running* oraz 15 par dla trybu *stop-chord*. W trybie *running* wykorzystano melodię graną na flugelhornie, natomiast próbki *stop-chord* zawierały kilkukrotne uderzenia w werbel. Nagrania instrumentów wykonane w warunkach bezechowych poddano splotowi z SRIR-ami pochodzącymi z sal wyposażonych w systemy wzmacniania pogłosu (RES). Probki w każdej parze dobrano tak, aby wartości tych samych parametrów czasowych były do siebie zbliżone. Ponieważ zaniki pogłosu w salach z RES są w zdecydowanej większości nieliniowe, zadbano o to, aby dla każdej próbki różnica między

wartością RT20 lub RT30 a wartością EDT przekraczała próg JND. We wszystkich próbkach słuchacze mogli ocenić zarówno fazę narastania, jak i wybrzmiewania pogłosu. W Tabeli 125 przedstawiono wartości dla trzech przykładowych par próbek, które wykorzystano w E9.

Tabela 125: Wartości parametrów czasowych dla przykładowych par próbek wykorzystanych w E9.

Para	Próbka	EDT	RT20	RT30
1	A	0,68	1,14	1,16
	B	0,68	1,15	1,21
2	A	0,74	1,45	1,57
	B	0,75	1,40	1,58
3	A	0,55	1,17	1,34
	B	0,57	1,17	1,38

9.9.3 Słuchacze w E9

Eksperyment E9 przeprowadzono z udziałem 51 uczestników. W Tabeli 126 pokazano deklaracje stanu słuchu uczestników. Eksperyment E9 został częściowo przeprowadzony podczas konferencji branżowej dla realizatorów dźwięku i producentów muzycznych, dlatego też wszystkich uczestników uznano za doświadczonych w ocenie długości pogłosu i posiadających umiejętność dostrzegania subtelnych struktur pogłosu. Część ankiet została wypełniona przez studentów reżyserii dźwięku prowadzonych na Wydziale Fizyki i Astronomii UAM lub studentów Wydziału Jazzu i Muzyki rozrywkowej Akademii Muzycznej w Katowicach.

Tabela 126: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E9.

Deklaracja stanu słuchu	Liczba słuchaczy
Nie mam problemów ze słuchem	40
Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szумы uszne itp.	11
Mam uszkodzony słuch	0

W Tabeli 127 zaprezentowano klasyfikację uczestników według grup wiekowych.

Tabela 127: Liczba uczestników E10 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.

Wszyscy uczestnicy	<20 lat	20 – 29 lat	30 – 39 lat	40 – 49 lat	≥50 lat
51	14	24	5	3	5

Podobnie jak w eksperymentach od E1 do E8, uczestnicy zadeklarowali swoją aktualną pozycję zawodową. Tabela 128 przedstawia liczebność poszczególnych grup zawodowych.

Tabela 128: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E10.

Deklaracja dotycząca profesji	Liczba słuchaczy
Profesjonalny studyjny reżyser/ realizator dźwięku	3
Profesjonalny reżyser/ realizator dźwięku live	6
Profesjonalny muzyk	5
Reżyser/ realizator dźwięku	19
Muzyk	26
Student kierunku reżyseria dźwięku/ realizacja dźwięku lub kierunki pokrewne	2
Student kierunku akustyka/ inżynieria akustyczna/ elektronika i telekomunikacja lub kierunki pokrewne	2
Student kierunku innego niż wyżej wymienione	5
Audiofil	4

9.9.4 Procedura testowa w E9

W eksperymencie E9 uczestnikom zaprezentowano pary próbek dźwiękowych, w których wszystkie trzy parametry czasu pogłosu (EDT, RT20, RT30) miały zbliżone wartości w poszczególnych parach. Uczestnicy mieli możliwość wielokrotnego odsłuchania każdej próbki z pary przed udzieleniem odpowiedzi. Zadaniem uczestników było wskazanie, która z próbek w parze miała ich zdaniem dłuższy pogłos.

Na podstawie analizy wskaźników spójności odpowiedzi, wyniki siedmiu słuchaczy zostały wykluczone z dalszej analizy.

9.9.5 Wyniki uzyskane w E9

Z punktu widzenia konstrukcji eksperymentu, ważnym wynikiem jest uzyskanie istotności statystycznej dla wskazań słuchaczy. Uzyskanie istotności świadczy bowiem o tym, że słuchacze byli w stanie konsekwentnie rozpoznać próbki o dłuższym i krótszym pogłosie, mimo zbliżonych wartości parametrów czasowych tych próbek. Istotność statystyczną ($p < 0,05$) uzyskano w 4 parach dla trybu *running* oraz w 12 parach dla trybu *stop-chord*. Łącznie w 12 parach stwierdzono istotność w co najmniej jednym z trybów, natomiast jednoczesną istotność dla obu trybów zaobserwowano w 4 parach. W Tabeli 129 przedstawiono wartości p dla poszczególnych par i trybów, dla których prowadzono E9.

Tabela 129: Wartości istotności statystycznej dla poszczególnych par i trybów pogłosu w E9. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.

Numer pary	Wartość p dla trybu Running	Wartość p dla trybu Stop-chord
1	0,3270	0,0013
2	0,8430	<0,0001
3	0,0357	<0,0001
4	0,6744	0,0002
5	0,0687	<0,0001
6	0,0005	<0,0001
7	0,0357	<0,0001
8	0,1235	0,0013
9	0,0005	<0,0001
10	0,1235	0,6744
11	0,6744	0,3270
12	0,4838	0,0033
13	0,1235	<0,0001
14	0,2076	0,0002
15	0,3270	0,4838

9.9.6 Dyskusja wyników uzyskanych w E9

W przeprowadzonym eksperymencie porównywano pary próbek dźwiękowych, w których wartości klasycznych parametrów czasu pogłosu (EDT, RT20, RT30) były zbliżone. Mimo braku różnic w rzeczywistej długości zaniku dźwięku, uczestnicy eksperymentu byli w stanie konsekwentnie wskazywać, która z próbek miała ich zdaniem dłuższy pogłos. Tabela 130 zawiera spis analizowanych parametrów, dla których uzyskano w E9 istotność statystyczną. Parametry, dla których uzyskano silną bądź bardzo silną korelację zaznaczono pogrubioną czcionką.

Tabela 130: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E9. Pogrubioną czcionką zaznaczono silne i bardzo silne korelacje.

Typ pogłosu	Parametr	Pasma częstotliwości	Wartość Rho	Wartość p
Running	RT20	125 Hz - 8 kHz	0,61	0,0158
Running	RT10	125 Hz - 8 kHz	0,582	0,0229
Running	EDT	1000 Hz	-0,56	0,0301
Running	RT10	500 Hz	0,528	0,0432
Stop-chord	RT20	500 Hz	0,772	0,0007
Stop-chord	RT20	2000 Hz	-0,713	0,0029
Stop-chord	RT30	250 Hz	0,677	0,0056
Stop-chord	RT10	500 Hz	0,666	0,0067
Stop-chord	RT30	125 Hz	0,655	0,0080
Stop-chord	RT20	125 Hz	0,652	0,0085

<i>Stop-chord</i>	RT10	125 Hz - 8 kHz	0,624	0,0130
<i>Stop-chord</i>	RT30	2000 Hz	-0,615	0,0146
<i>Stop-chord</i>	EDT	1000 Hz	-0,604	0,0172
<i>Stop-chord</i>	RT20	250 Hz	0,603	0,0173
<i>Stop-chord</i>	RT20	125 Hz - 8 kHz	0,6	0,0180
<i>Stop-chord</i>	RT30	500 Hz	0,565	0,0283
<i>Stop-chord</i>	RT30	250 Hz - 2 kHz	0,555	0,0316
<i>Stop-chord</i>	RT30	125 Hz - 8 kHz	0,533	0,0410

Analiza korelacyjna wykazała, że słuchacze rozpoznawali różnice w długości pogłosu na podstawie wartości parametrów w poszczególnych pasmach częstotliwości. Jedyny parametr, dla którego uzyskano istotne korelacje dla obydwu trybów i jego uśrednionej wartości to RT20 uśredniony dla pasma 125 Hz - 8 kHz (*running* Rho = 0,61, $p = 0,0158$, *stop-chord* Rho = 0,6, $p = 0,0180$). W analizie wykazano kilkanaście korelacji parametrów RT10, RT20 i RT30. W poszczególnych pasmach, przy czym niektóre z tych korelacji mają wartości ujemne, co jest odmienne od wyniku oczekiwanego.

W analizie korelacji ujawniono wiele korelacji pomiędzy parametrem EDT a wieloma różnymi wartościami parametrów RT10, RT20 i RT30 mimo, że średnie wartości tych parametrów w poszczególnych parach były zbliżone, różnica ich wartości była mniejsza niż próg JND, co świadczy o istotności wartości poszczególnych parametrów w poszczególnych pasmach w ocenie długości pogłosu. RT20 to jedyny parametr, dla którego uzyskano korelację w pełnym paśmie i obydwu trybach pogłosu.

9.9.7 Wnioski z E9

Hipoteza postawiona w E9 nie została potwierdzona. Rozpoznanie przez słuchaczy próbek z dłuższym pogłosem korelowało ze zmianami wartości parametrów RT10, RT20 i RT30 w poszczególnych pasmach częstotliwości a nie z wartościami innych parametrów akustycznych, co świadczy to o wysokiej czułości słuchaczy na różnice w strukturze częstotliwościowej sygnałów, a więc barwie wybrzmiewającego pogłosu. Wpływ wartości parametrów pogłosowych w poszczególnych pasmach na percepcję długości pogłosu wykazano również w E3 i E4.

Ujemne korelacje między zmianami wartości parametrów w poszczególnych pasmach dla par o zbliżonych średnich wartościach sugerują, że długości pogłosu nie należy oceniać na podstawie pojedynczych pasm częstotliwości. Percepcja pogłosu zależy bowiem nie tylko od bezpośredniej zmiany wartości parametru w danym paśmie, lecz także od szerszego kontekstu

zmian w całym widmie. Postrzeganie długości pogłosu związane jest również z kontrastem pomiędzy wczesną a późną energią co wykazano również w E7 i E8.

Stwierdzona w E9 korelacja pomiędzy oceną długości pogłosu a wartością RT20 w obu trybach potwierdza wcześniejsze obserwacje dotyczące dominującej roli tego parametru w subiektywnej ocenie czasu pogłosu.

9.10 Eksperyment E10 - Percepcja pogłosu przy nieliniowym zaniku energii i stałych parametrach czasowych w salach bez systemów wspomagania akustyki

9.10.1 Cel eksperymentu E10

Eksperyment E10 przeprowadzono głównie **w celu porównania wyników z eksperymentem E9**, a także w celu poszerzenia wiedzy na temat ogólnych mechanizmów percepcji pogłosu. Eksperymenty miały prawie identyczną konstrukcję, jedyna różnica pomiędzy nimi dotyczyła wyłącznie pochodzenia SRIR-ów wykorzystanych do przygotowania próbek dźwiękowych: w E9 zastosowano pogłosy uzyskane w salach wyposażonych w system RES, natomiast w E10 – w salach pozbawionych takiego systemu. Oprócz porównania wyników E10 z E9, interesujące z badawczego punktu widzenia jest sprawdzenie czy hipoteza przyjęta w E9, znajdzie swoje potwierdzenie w sytuacji, w której zbadano SRIR-y zarejestrowane w salach bez RES. Zidentyfikowanie parametrów akustycznych innych niż EDT, RT20 czy RT30, które wpływają na percepcję długości pogłosu, może być kluczowe dla wyjaśnienia, dlaczego słuchacze odbierają różnice w długości pogłosu w różnych punktach tej samej sali koncertowej, mimo że klasyczne parametry czasowe pozostają tam niezmiennie. Eksperymenty E9 i E10 przeprowadzono równolegle, dlatego w przypadku E10 przyjęto hipotezę niemal identyczną z tą sformułowaną dla E9: **w salach o nieliniowych zanikach energii słuchacze mogą różnie postrzegać długość pogłosu w próbkach dźwiękowych o zbliżonych wartościach klasycznych parametrów czasowych, a ich subiektywne odczucia mogą korelować z innymi parametrami akustycznymi.**

9.10.2 SRIR-y i próbki dźwiękowe w E10

Przygotowano 15 par dla trybu *running* i 15 par dla trybu *stop-chord*. Do próbek *running* wykorzystano melodię graną na flugelhornie, próbki *stop-chord* zawierały uderzenia kilkukrotne uderzenie w werbel. Bezechowe nagrania instrumentów spleciono z SRIR-ami nagrami w salach bez RES. Próbki w parach dobrano tak, aby wartości tych samych parametrów były bliskie sobie. Aby zachować nieliniowy charakter zaniku, wartość RT20 lub RT30 w wybranych próbkach była różna o więcej niż próg JND od wartości EDT. We wszystkich próbkach

sluchacze mogli ocenić zarówno narastanie jak i wybrzmiewanie pogłosu. W Tabeli 131 przedstawiono wartości dla trzech przykładowych par próbek, które wykorzystano w E10.

Tabela 131: Wartości parametrów czasowych dla przykładowych par próbek wykorzystanych w E10.

Para	Próbka	EDT	RT20	RT30
1	A	0,88	1,18	1,16
	B	0,88	1,22	1,19
2	A	0,93	1,18	1,24
	B	0,93	1,21	1,24
3	A	1,13	1,37	1,41
	B	1,13	1,4	1,41

9.10.3 Słuchacze w E10

Eksperyment E9 przeprowadzono z udziałem 49 uczestników. Deklarowany stan słuchu badanych przedstawiono w Tabeli 132. Eksperyment został częściowo zrealizowany podczas konferencji branżowej skierowanej do realizatorów dźwięku i producentów muzycznych, w związku z czym wszystkich uczestników uznano za osoby doświadczone w ocenie długości pogłosu oraz posiadające umiejętność rozpoznawania subtelnych różnic w jego strukturze. Część ankiet została wypełniona przez studentów reżyserii dźwięku prowadzonych na Wydziale Fizyki i Astronomii UAM lub studentów Wydziału Jazzu i Muzyki rozrywkowej Akademii Muzycznej w Katowicach.

Tabela 132: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E10.

Deklaracja stanu słuchu	Liczba słuchaczy
Nie mam problemów ze słuchem	36
Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szumy uszne itp.	13
Mam uszkodzony słuch	0

W Tabeli 133 pokazano podział słuchaczy na poszczególne grupy wiekowe.

Tabela 133: Liczba uczestników E10 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.

Wszyscy uczestnicy	<20 lat	20 – 29 lat	30 – 39 lat	40 – 49 lat	≥50 lat
49	15	24	5	1	4

Zgodnie z procedurą zastosowaną w Eksperymentach od E1 do E9, uczestnicy określili swoją obecną sytuację zawodową. W Tabeli 134 zestawiono liczby osób należących do poszczególnych grup.

Tabela 134: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E10.

Deklaracja dotycząca profesji	Liczba słuchaczy
Profesjonalny studyjny reżyser/ realizator dźwięku	3
Profesjonalny reżyser/ realizator dźwięku live	4
Profesjonalny muzyk	1
Reżyser/ realizator dźwięku	14
Muzyk	19
Student kierunku reżyseria dźwięku/ realizacja dźwięku lub kierunki pokrewne	7
Student kierunku akustyka/ inżynieria akustyczna/ elektronika i telekomunikacja lub kierunki pokrewne	7
Student kierunku innego niż wyżej wymienione	1
Audiofil	3

9.10.4 Procedura testowa w E10

W eksperymencie E10 uczestnikom przedstawiono pary próbek dźwiękowych, w których wszystkie trzy parametry czasu pogłosu - EDT, RT20 i RT30 - miały zbliżone wartości w obrębie każdej pary. Przed udzieleniem odpowiedzi uczestnicy mogli wielokrotnie odsłuchiwać obie próbki. Ich zadaniem było wskazanie, która z nich, ich zdaniem, charakteryzowała się dłuższym pogłosem.

Na podstawie analizy wskaźników spójności odpowiedzi, wyniki sześciu słuchaczy zostały wykluczone z dalszej analizy.

9.10.5 Wyniki uzyskane w E10

Identycznie jak w E9, w E10 ważne jest ustalenie, że słuchacze są w stanie konsekwentnie rozpoznać próbki o dłuższym i krótszym pogłosie, mimo zbliżonych wartości parametrów czasowych tych próbek. W E9 istotność statystyczną ($p < 0,05$) uzyskano w 9 parach dla trybu *running* oraz w 7 parach dla trybu *stop-chord*. Łącznie w 12 parach stwierdzono istotność w co najmniej jednym z trybów, natomiast jednoczesną istotność dla obu trybów zaobserwowano w 4 parach. W Tabeli 135 przedstawiono wartości p dla poszczególnych par i trybów, dla których prowadzono E10, wartości $p < 0,05$ zaznaczono pogrubioną czcionką.

Tabela 135: Wartości istotności statystycznej dla poszczególnych par i trybów pogłosu w E10. Wartości istotnie statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.

Numer pary	Wartość p dla trybu Running	Wartość p dla trybu Stop-chord
1	0,3173	<0,0001
2	0,0263	0,0001
3	0,6682	0,8864
4	0,0321	0,6682
5	<0,0001	<0,0001

6	0,8864	0,8864
7	0,1161	0,3173
8	0,0066	0,4751
9	0,0001	0,1161
10	0,3173	<0,0001
11	<0,0001	<0,0001
12	0,3173	0,0004
13	0,0027	0,3173
14	0,0004	0,0001
15	0,0152	0,1985

9.10.6 Dyskusja wyników uzyskanych w E10

W eksperymencie E10 porównywano pary próbek dźwiękowych, w których średnie wartości klasycznych parametrów czasu pogłosu (EDT, RT20, RT30) były do siebie zbliżone. Pomimo braku różnic w czasowych parametrach obiektywnych, uczestnicy potrafili konsekwentnie wskazać próbkę, która – ich zdaniem – miała dłuższy pogłos. Tabela 136 zawiera spis analizowanych parametrów, dla których uzyskano w E9 istotność statystyczną. Parametry, dla których uzyskano silną bądź bardzo silną korelację zaznaczono pogrubioną czcionką.

Tabela 136: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E10. Pogrubioną czcionką zaznaczono silne i bardzo silne korelacje.

Typ pogłosu	Parametr	Pasma częstotliwości	Wartość Rho	Wartość p
<i>Running</i>	C50	125 Hz - 8 kHz	-0,763	0,0009
<i>Running</i>	D	125 Hz - 8 kHz	-0,751	0,0012
<i>Running</i>	C80	125 Hz - 8 kHz	-0,735	0,0018
<i>Running</i>	EDT	4 kHz	-0,716	0,0027
<i>Running</i>	Ts	125 Hz - 8 kHz	0,713	0,0029
<i>Running</i>	C35	125 Hz - 8 kHz	-0,698	0,0038
<i>Running</i>	STI Męski	125 Hz - 8 kHz	-0,647	0,0092
<i>Running</i>	C7	125 Hz - 8 kHz	-0,621	0,0134
<i>Running</i>	ALCons	125 Hz - 8 kHz	0,614	0,0150
<i>Running</i>	STI Żeński	125 Hz - 8 kHz	-0,6	0,0180
<i>Running</i>	Ltotal	125 Hz - 8 kHz	0,596	0,0190
<i>Running</i>	CIS	125 Hz - 8 kHz	-0,564	0,0284
<i>Running</i>	L7	125 Hz - 8 kHz	-0,527	0,0433
<i>Stop-chord</i>	EDT	250 Hz - 2 kHz	0,532	0,0413

Wyniki korelacji z eksperymentu E10 pokazują silne i istotne statystycznie zależności między percepcyjną oceną długości pogłosu a klasycznymi wskaźnikami przejrzystości i zrozumiałości mowy w trybie *running*. Najsilniejsze ujemne korelacje uzyskano dla

parametrów C50 ($\text{Rho} = -0,763$, $p = 0,0009$), D ($\text{Rho} = -0,751$, $p = 0,0012$), C80 ($\text{Rho} = -0,735$, $p = 0,0018$). Oznacza to, że im wyższe były wartości parametrów wskazujących na większą przejrzystość dźwięku i krótsze wybrzmiewanie w początkowej fazie pogłosu, tym krótszy był subiektywnie odczuwany pogłos. Silna dodatnia korelacja z parametrem T_s ($\text{Rho} = 0,713$, $p = 0,0029$) potwierdza, że długość trwania centrum energii dźwięku miała wyraźny wpływ na postrzeganą długość pogłosu – im dłuższe T_s , tym dłuższy pogłos odczuwali słuchacze. Inne parametry wykazujące istotne zależności to m.in. C35, C7, STI (dla głosu męskiego i żeńskiego), %ALCons oraz L_{total} – wszystkie związane z przejrzystością i zrozumiałością mowy oraz rozkładem energii dźwięku w czasie. Ich kierunki korelacji są spójne z intuicyjną interpretacją: parametry wspierające zrozumiałość i wczesny odbiór (np. STI, C7) korelują ujemnie z długością pogłosu, natomiast parametry związane z późniejszym wybrzmiewaniem (T_s , L_{total}) korelują dodatnio. Ujemna korelacja dla EDT w paśmie 4000 Hz ($\text{Rho} = -0,716$, $p = 0,0027$), przeciwna do spodziewanej, świadczy o tym, że percepcja długości pogłosu jako zjawiska nie opiera się wyłącznie na analizie zmian w parametrach czasowych szczególnie, jeśli zmiany te dotyczą wysokich pasm częstotliwości.

W trybie *running* zaobserwowano istotne statystycznie korelacje między oceną długości pogłosu a parametrami opisującymi rozkład energii w czasie. Wysoka dodatnia korelacja z parametrem L_{total} ($\text{Rho} = 0,596$, $p = 0,0190$) sugeruje, że próbki o większej całkowitej energii odbitej były postrzegane jako mające dłuższy pogłos. Jednocześnie parametr L7 ($\text{Rho} = -0,527$, $p = 0,0433$), związany z wczesną energią odbić, wykazywały istotne ujemne korelacje. Oznacza to, że próbki o mniejszej energii w ciągu pierwszych 7 ms (niższe wartości L7) były częściej postrzegane jako bardziej pogłosowe. Kierunki korelacji w trybie *running* są zgodne z oczekiwaniami – wraz ze wzrostem odczuwanej długości pogłosu wartości wymienionych parametrów ulegają obniżeniu.

Dla trybu *stop-chord* ujawniono tylko jedną istotnie statystyczną korelację ze średnią wartością parametru EDT w paśmie 250 Hz – 2 kHz ($\text{Rho} = 0,532$, $p = 0,0413$).

9.10.7 Wnioski z E10

W eksperymencie E10 tryb *running* ujawnił silne i spójne korelacje między percepcją długości pogłosu a parametrami związanymi z przejrzystością i wczesną energią sygnału. W trybie *stop-chord* wpływ tych parametrów był znacznie mniej wyraźny, co może wynikać z innego charakteru bodźca oraz braku dalszego kontekstu muzycznego po zakończeniu dźwięku.

Uczestnicy eksperymentu podejmowali decyzje na podstawie wrażeń subiektywnych, które odzwierciedlały takie cechy sygnału jak rozmycie, ciągłość, rozległość brzmienia oraz obniżona klarowność artykulacyjna, a nie tylko zmiana wartości różnych RT w poszczególnych pasmach. Wyniki te nie podważają wprawdzie prostej identyfikacji percepcyjnej długości pogłosu z wykorzystaniem klasycznych parametrów, ale sugerują konieczność szerszego ujęcia zjawiska, uwzględniającego kompleksowe aspekty struktury czasowo-energetycznej sygnału.

W E10 potwierdzono hipotezę badawczą – słuchacze potrafią istotnie statystycznie odróżnić próbki o zbliżonych wartościach parametrów czasowych pogłosu, a ich odpowiedzi korelują z innymi parametrami akustyki wewnątrz.

9.10.8 Analiza porównawcza E9 i E10 w kontekście hipotezy głównej dysertacji

W obu eksperymentach (E9 i E10) badano percepcję długości pogłosu w parach próbek, które miały bardzo zbliżone, niższe niż JND średnie wartości klasycznych parametrów czasowych (EDT, RT20, RT30). W E9 wykorzystano próbki dźwiękowe pochodzące z sal. Z RES, a w E10 z sal bez RES. Mimo niewielkich różnic w wartościach tych parametrach, uczestnicy byli w stanie trafnie i konsekwentnie rozpoznawać różnice w długości pogłosu, co potwierdza, że subiektywna percepcja nie opiera się wyłącznie na średnich wartościach tradycyjnych miar pogłosu.

W eksperymencie E9 istotność statystyczną ($p < 0,05$) uzyskano w 4 parach w trybie *running* i w 12 parach w trybie *stop-chord*, co łącznie dało 12 par z istotnością w co najmniej jednym trybie oraz 4 pary z istotnością w obu trybach. Natomiast w E10 istotność uzyskano w 9 parach w trybie *running* i w 7 parach w trybie *stop-chord* (również 12 par istotnych w co najmniej jednym trybie oraz 3 pary w obu trybach).

W analizie korelacji uzyskano odmienne wyniki w E9 i E10. W E9 wykazano szereg korelacji z wartościami RT10, RT20 i RT30 w poszczególnych pasmach, z czego niektóre z tych korelacji niespodziewanie przyjmowały ujemne wartości co świadczy o tym, że długości pogłosu nie należy oceniać tylko na podstawie wartości parametrów w pojedynczych pasmach częstotliwości.

Warto również odnotować, że w E10 zidentyfikowano istotne różnice pomiędzy subiektywną oceną a wartościami klasycznych parametrów pogłosowych – sugerując, że percepcja długości pogłosu opiera się na szerszym zbiorze cech sygnału niż tylko EDT, RT20 i RT30. W E10, dla próbek o tych samych średnich wartościach parametrów uzyskano szereg korelacji z klarownością (C7, C50, C80) oraz współczynnikami określającymi zrozumiałość

mowy. Brak takich zależności w E9 może wynikać z faktu, iż pogłosy generowane przez RES są bardziej zależne od częstotliwości niż pogłosy w salach bez RES. **Na podstawie wyników uzyskanych w E9 i E10 należy stwierdzić, że percepcja pogłosów w salach z RES i bez RES opiera się na korelacjach z innymi parametrami akustycznymi co potwierdza hipotezę główną niniejszej rozprawy.**

9.11 Eksperyment E11 - Percepcja pogłosów dla próbek o takich samych wartościach parametrów w salach bez RES – zaniki liniowe

9.11.1 Cel eksperymentu E11

Wyniki eksperymentów E9 i E10 wykazały, że słuchacze potrafili rozróżnić długość pogłosu w próbkach o zbliżonych wartościach klasycznych parametrów czasowych, mierzonych w różnych zakresach zaniku energii akustycznej (EDT, RT20, RT30). O ile w przypadku E9 (dla sal z RES) uzyskano wiele korelacji z parametrami EDT, RT20 i RT30, o tyle w E10 (dla sal bez RES) uzyskano głównie korelacje z innymi parametrami akustyki wewnątrz niż EDT, RT20 i RT30. Taki wynik sugeruje, że percepcja długości pogłosu zależy nie tylko od samych wartości tych parametrów, ale również od kształtu przebiegu zaniku energii. W związku z tym zasadna wydaje się również analiza próbek o liniowym zaniku, gdzie – przy założeniu stałości relacji między EDT a RT20 – wpływ samego kształtu przebiegu zostaje ograniczony. W kontekście percepcji w rzeczywistych wnętrzach, takich jak sale koncertowe, za główny parametr odpowiedzialny za różnice w postrzeganiu długości pogłosu często uznaje się EDT, którego zmienność w obrębie jednego pomieszczenia może przekraczać próg słyszalności (JND). **Celem eksperymentu E11 było określenie, czy słuchacze potrafią rozróżnić próbki dźwiękowe o zbliżonych wartościach parametrów czasowych (EDT, RT20 i RT30), a także identyfikacja innych parametrów akustycznych, które mogą korelować z percepcją długości pogłosu w przypadku liniowego zaniku energii.** W świetle wyników z E9 i E10, mówiących o tym, że słuchacze potrafią istotnie statystycznie odróżnić próbki o różnej długości pogłosu mimo tych samych wartości parametrów czasowych, hipoteza przyjęta w E11 brzmi: **słuchacze mogą różnie postrzegać długość pogłosu w próbkach dźwiękowych o zbliżonych wartościach klasycznych parametrów czasowych, a ich subiektywne oceny wykazują korelacje z innymi parametrami akustycznymi.**

9.11.2 SRIR-y i próbki dźwiękowe w E11

W E11 przygotowano taki sam zestaw próbek jak w E9 i E10: 15 par w trybie *running* i 15 par w trybie *stop-chord*. Do splotów nagrań bezdechowych wybrano SRIR-y, których wartości parametrów EDT, RT20 i RT30 są zbliżone zarówno w każdej próbce z osobna, jak i między próbkami w obrębie każdej pary. Dzięki temu spełniono kryterium liniowości, definiowane jako zgodność między tymi trzema czasami pogłosu.

We wszystkich próbkach słuchacze mogli ocenić zarówno narastanie jak i wybrzmiewanie pogłosu. W Tabeli 137 przedstawiono wartości dla trzech przykładowych par próbek, które wykorzystano w E11.

Tabela 137: Wartości parametrów czasowych dla przykładowych par próbek wykorzystanych w E11.

Para	Próbka	EDT	RT20	RT30
1	A	1,00	1,01	1,00
	B	1,00	0,96	0,97
2	A	1,16	1,19	1,20
	B	1,17	1,18	1,18
3	A	1,42	1,40	1,41
	B	1,45	1,41	1,44

9.11.3 Słuchacze w E11

Eksperyment E11 przeprowadzono z udziałem 48 uczestników. Deklarowany stan słuchu badanych przedstawiono w Tabeli 138. Eksperyment został zrealizowany podczas konferencji branżowej skierowanej do realizatorów dźwięku i producentów muzycznych, w związku z czym wszystkich uczestników uznano za osoby doświadczone w ocenie długości pogłosu oraz posiadające umiejętność rozpoznawania subtelnych różnic w jego strukturze.

Tabela 138: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E11.

Deklaracja stanu słuchu	Liczba słuchaczy
Nie mam problemów ze słuchem	41
Miewam okresowe problemy ze słuchem: czasowe obniżenie komfortu słyszenia, szumy uszne itp.	16
Mam uszkodzony słuch	1

Ze względu na wadę słuchu wyniki uzyskane od jednego ze słuchaczy zostały usunięte z dalszej analizy. W Tabeli 139 pokazano podział pozostałych słuchaczy na poszczególne grupy wiekowe.

Tabela 139: Liczba uczestników E11 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.

Wszyscy uczestnicy	<20 lat	20 – 29 lat	30 – 39 lat	40 – 49 lat	≥50 lat
57	16	28	8	0	5

Podobnie jak w eksperymentach od E1 do E10, uczestnicy deklarowali swoją obecną pozycję zawodową. W Tabeli 140 przedstawiono liczbę słuchaczy przypisanych do poszczególnych grup.

Tabela 140: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E11.

Deklaracja dotycząca profesji	Liczba słuchaczy
Profesjonalny studyjny reżyser/ realizator dźwięku	3
Profesjonalny reżyser/ realizator dźwięku live	4
Profesjonalny muzyk	4
Reżyser/ realizator dźwięku	17
Muzyk	24
Student kierunku reżyseria dźwięku/ realizacja dźwięku lub kierunki pokrewne	9
Student kierunku akustyka/ inżynieria akustyczna/ elektronika i telekomunikacja lub kierunki pokrewne	9
Student kierunku innego niż wyżej wymienione	6
Audiofil	4

9.11.4 Procedura testowa w E11

Podobnie jak w eksperymentach E9 i E10, w E11 uczestnikom przedstawiano pary próbek dźwiękowych, w których wszystkie trzy parametry czasu pogłosu - EDT, RT20 i RT30 - miały zbliżone wartości w obrębie każdej pary. Przed udzieleniem odpowiedzi uczestnicy mogli wielokrotnie odsłuchiwać próbki, a ich zadaniem było wskazanie tej, która ich zdaniem miała dłuższy pogłos.

Na podstawie analizy wskaźników spójności odpowiedzi, wyniki dziewięciu słuchaczy zostały wykluczone z dalszej analizy.

9.11.5 Wyniki uzyskane w E11

Identycznie jak w E9 i E10 ważne jest ustalenie, że słuchacze byli w stanie konsekwentnie rozpoznać próbki o dłuższym i krótszym pogłosie, mimo zbliżonych wartości parametrów czasowych tych próbek. W E11 istotność statystyczną uzyskano w 8 parach dla trybu *running* oraz w 7 parach dla trybu *stop-chord*. Łącznie w 10 parach stwierdzono istotność w co najmniej jednym z trybów, natomiast jednoczesną istotność dla obu trybów zaobserwowano w 5 parach. W Tabeli 141 przedstawiono wartości p dla poszczególnych par i trybów, dla których prowadzono E11, wartości $p < 0,05$ zaznaczono pogrubioną czcionką.

Tabela 141: Wartości istotności statystycznej dla poszczególnych par i trybów pogłosu w E11. Wartości istotnie statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.

Numer pary	Wartość p dla trybu Running	Wartość p dla trybu Stop-chord
1	0,4503	0,0901
2	0,8800	<0,0001
3	0,0103	<0,0001
4	0,0967	0,0901
5	<0,0001	<0,0001
6	0,0005	0,0004
7	0,8800	0,6439
8	0,0497	<0,0001
9	<0,0001	<0,0001
10	0,6506	0,1655
11	0,6506	<0,0001
12	0,0015	0,4411
13	0,0235	0,0901
14	0,8800	0,0901
15	0,0235	0,1655

9.11.6 Dyskusja wyników uzyskanych w E11

Tabela 1442 zawiera spis analizowanych parametrów, dla których uzyskano w E11 istotność statystyczną. Parametry, dla których uzyskano silną bądź bardzo silną korelację zaznaczono pogrubioną czcionką.

Tabela 142: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E11. Pogrubioną czcionką zaznaczono silne i bardzo silne korelacje.

Typ pogłosu	Parametr	Pasmo częstotliwości	Wartość Rho	Wartość p
<i>Running</i>	RT10	4 kHz	-0,768	0,0013
<i>Running</i>	Ts	125 Hz - 8 kHz	0,689	0,0058
<i>Running</i>	C80	125 Hz - 8 kHz	-0,675	0,0073
<i>Running</i>	C7	125 Hz - 8 kHz	-0,668	0,0081
<i>Running</i>	RT30	4 kHz	-0,642	0,0099
<i>Running</i>	RT20	500 Hz	0,62	0,0136
<i>Running</i>	RT10	8 kHz	-0,613	0,0151
<i>Running</i>	RT30	500 Hz	0,567	0,0277
<i>Running</i>	RT20	4 kHz	-0,563	0,0288
<i>Running</i>	ALCons	125 Hz - 8 kHz	0,546	0,0377
<i>Running</i>	L50	125 Hz - 8 kHz	0,538	0,0386
<i>Running</i>	L80	125 Hz - 8 kHz	0,539	0,0407
<i>Running</i>	D	125 Hz - 8 kHz	-0,532	0,0438
<i>Stop-chord</i>	L50	125 Hz - 8 kHz	0,608	0,0161
<i>Stop-chord</i>	RT30	8 kHz	0,606	0,0167

<i>Stop-chord</i>	Ltotal	125 Hz - 8 kHz	0,605	0,0169
<i>Stop-chord</i>	L80	125 Hz - 8 kHz	0,6	0,0181
<i>Stop-chord</i>	L35	125 Hz - 8 kHz	0,515	0,0493

Analiza korelacji przeprowadzona na danych z E11, podobnie jak w E10 potwierdza, że percepcja wydłużenia pogłosu była silnie związana z parametrami innymi niż tylko czas pogłosu. W trybie *running*, wskazanie przez uczestników dłuższego pogłosu korelowało dodatnio z wartościami Ts (Rho = 0,689, p = 0,0058), Ltotal (Rho = 0,601, p = 0,0179), %ALCons (Rho = 0,546, p = 0,0377), L50 (Rho = 0,538, p = 0,0386) i L80 (Rho = 0,539, p = 0,0407). Wskazuje to, że rozciągnięcie sygnału w czasie, wzrost energii odbitej i spadek wyrazistości artykulacyjnej były interpretowane jako oznaki dłuższego pogłosu.

Jednocześnie za wydłużony pogłos uznawano te próbki, dla których występowały niższe wartości C80 (Rho = -0,675, p = 0,0073), C7 (Rho = -0,668, p = 0,0081) oraz dla D (Rho = -0,532, p = 0,0438). Negatywne korelacje tych parametrów z odpowiedziami uczestników wskazują, że mniejsza klarowność i mniej wyrazista struktura czasowa dźwięku skutkowały silniejszym wrażeniem pogłosowości, co jest obserwacją zgodną z oczekiwaniami. Odpowiedzi słuchaczy korelowały również istotnie statystycznie ze zmianami wartości parametrów czasowych w poszczególnych pasmach: RT10 dla 4 kHz (Rho = -0,768, p = 0,0013) oraz 8 kHz (Rho = -0,613, p = 0,0151) natomiast korelacje te przyjmują wartości ujemne. Choć korelacje dla RT10 w wysokich pasmach (4 i 8 kHz, odpowiednio Rho = -0,768, p = 0,0013 oraz Rho = -0,613, p = 0,0151) są istotne statystycznie ich ujemny kierunek, jest trudny do pogodzenia z fizyczną interpretacją zmiany czasu pogłosu. Wskazuje to, że mimo pozornej istotności, parametry te nie odzwierciedlają rzeczywistego mechanizmu percepcyjnego i powinny być ostrożnie traktowane jako wiarygodne wskaźniki wydłużenia pogłosu. To również wskazanie, że dla próbek o zbliżonych wartościach parametrów czasowych, wartości parametrów C czy D w pełnym paśmie częstotliwości są ważniejsze w ocenie niż zmiany wartości RT10 czy RT30 dla pasm o wysokich częstotliwościach.

W trybie *stop-chord* znaczące dodatnie korelacje uzyskano dla L50 (Rho = 0,608, p = 0,0161), RT30 przy 8 kHz (Rho = 0,606, p = 0,0167), Ltotal (Rho = 0,605, p = 0,0169), L80 (Rho = 0,600, p = 0,0181) oraz L35 (Rho = 0,515, p = 0,0493), co wskazuje na znaczenie rozkładu energii w czasie oraz całkowitej masywności brzmienia w percepcji pogłosu.

9.11.7 Wnioski z E11

Uzyskane wyniki wskazują, że nawet przy braku różnic w klasycznych parametrach czasu pogłosu uczestnicy systematycznie wskazywali niektóre próbki jako bardziej pogłosowe.

Percepcyjna długość pogłosu wynikała w tym przypadku z takich cech jak spadek klarowności, wydłużenie sygnału w czasie oraz zwiększona energia pogłosu. Pokazuje to złożoność zjawiska percepcji pogłosu oraz konieczność uwzględnienia szerszego zestawu parametrów w analizie subiektywnych wrażeń pogłosowych. **Hipoteza postawiona w E11 – tożsama z założeniami eksperymentów E9 i E10 została potwierdzona. Słuchacze byli w stanie różnicować długość pogłosu w próbkach o zbliżonych wartościach klasycznych parametrów czasowych, a ich subiektywne oceny wykazywały istotne korelacje z innymi parametrami akustycznymi.**

9.11.8 Analiza porównawcza E10 i E11 w kontekście ogólnej wiedzy o percepcji pogłosu

Porównanie wyników eksperymentów E10 (nieliniowe zaniki energii akustycznej) i E11 (liniowe zaniki) wykazało, że w obu przypadkach istotne statystycznie korelacje z ocenami percepcyjnymi uzyskiwały te same parametry: %ALCons, C7, C80, D i Ltotal. Kierunek zależności w obu eksperymentach był identyczny: %ALCons i Ltotal korelowały dodatnio, natomiast C7, C80 i D ujemnie z ocenianą długością pogłosu. W E10 wszystkie te zależności wystąpiły w trybie *running*, podczas gdy w E11 Ltotal był istotny w trybie *stop-chord*. Wartości siły efektu (Rho) były wyższe w E10, co wskazuje na silniejsze powiązania między parametrami a percepcją w warunkach nieliniowego zaniku energii; wyjątkiem był parametr C7, którego korelacja była nieco silniejsza w E11. Ponadto poziom istotności (p) był w E10 zazwyczaj niższy, co sugeruje większą spójność odpowiedzi słuchaczy w warunkach nieliniowych.

Podsumowując, w obu eksperymentach (E10 – nieliniowe zaniki, E11 – liniowe zaniki) te same pięć parametrów (%ALCons, C7, C80, D, Ltotal) wykazało istotne i zgodne kierunkowo korelacje z percepcją długości pogłosu, co świadczy o tym, że nieliniowość zaniku energii akustycznej może wzmacniać związek pomiędzy parametrami akustycznymi a subiektywną oceną długości pogłosu, prowadząc do bardziej spójnych odpowiedzi słuchaczy. Wyniki wspierają hipotezę, że nawet przy zbliżonych wartościach klasycznych parametrów czasowych (EDT, RT20, RT30) słuchacze potrafią rozróżniać długość pogłosu, opierając się na innych cechach sygnału — w tym na parametrach takich jak ALCons, C7, C80, D czy Ltotal.

10 Podsumowanie

Niniejsza praca stanowi analizę wpływu regulacji akustyki wewnątrz – zarówno w postaci rozwiązań pasywnych, jak i aktywnych systemów elektronicznego wspomagania pogłosu (RES) – na właściwości pogłosowe oraz percepcję akustyki pomieszczeń, ze szczególnym uwzględnieniem sal koncertowych i obiektów wielofunkcyjnych. Opracowanie obejmuje trzy komplementarne perspektywy badawcze:

A - krytyczny przegląd literatury przedmiotu oraz aktualnego stanu wiedzy,

B - pomiary obiektywnych parametrów akustycznych w rzeczywistych salach,

C - eksperymenty psychoakustyczne oparte na zarejestrowanych przestrzennych odpowiedziach impulsowych.

Głównym celem pracy była nie tylko identyfikacja zmian parametrów pogłosowych spowodowanych zastosowaniem różnych metod regulacji, lecz przede wszystkim określenie, w jakim stopniu zmiany te przekładają się na percepcję słuchową odbiorców. **Główna teza badawcza postawiona w niniejszej dysertacji zakłada, że percepcja długości pogłosu w salach wyposażonych w systemy RES różni się od percepcji w przestrzeniach pozbawionych regulacji akustyki lub wykorzystujących jedynie rozwiązania pasywne.** Weryfikacja tej hipotezy stanowiła kluczowy element przeprowadzonych badań, determinując zarówno dobór metod, jak i sposób interpretacji uzyskanych wyników.

Część A stanowi obszerny przegląd teoretycznych i empirycznych podstaw akustyki pomieszczeń, prowadzący od rysu historycznego dyscypliny po aktualne kierunki badań oraz wyzwania praktyczne. W pierwszej kolejności omówiono rozwój akustyki sal koncertowych i wielofunkcyjnych, przedstawiając definicje, metody pomiaru oraz znaczenie kluczowych parametrów obiektywnych wraz z ich optymalnymi wartościami dla różnych typów pomieszczeń. Uwzględniono również parametry dodatkowe oraz metody oceny zrozumiałości mowy, w tym C50, STI i %ALCons, a także zagadnienie najmniejszej zauważalnej różnicy (JND) dla poszczególnych wskaźników. W dalszej części przedstawiono parametry subiektywne i wielowymiarowe metody oceny akustyki sal, oparte na badaniach wybitnych autorów, takich jak Beranek, Barron, Ando czy Lokki. Rozdziały poświęcone salom o regulowanej akustyce omawiają zarówno pasywne rozwiązania architektoniczne (np. banery, kotary, komory pogłosowe), jak i aktywne systemy elektroniczne (np. Ambiophony, ACS, systemy regeneratywne i hybrydowe), uzupełnione o analizę ich wpływu na właściwości akustyczne. Zwieńczeniem części A jest omówienie badań nad percepcją pogłosu w kontekście

subiektywnej oceny akustyki – zarówno w salach tradycyjnych, jak i w pomieszczeniach sprzężonych akustycznie lub z systemami RES – oraz analiza danych z publikacji Beranka (2004) pod kątem kształtu zaniku energii akustycznej i wpływu obecności widowni na parametry RT20 i EDT.

Część B prezentuje wyniki kompleksowych pomiarów obiektywnych parametrów akustycznych, przeprowadzonych w celu oceny wpływu zarówno aktywnych systemów wspomagania pogłosu (RES), jak i rozwiązań pasywnych, na charakterystyki pogłosowe sal koncertowych oraz na kształt zaniku energii akustycznej. Badania objęły 21 sal koncertowych: osiem wyposażonych w systemy RES oraz czternaście pozbawionych takich instalacji, a także jedno pomieszczenie demonstracyjne. Łącznie zarejestrowano 67 wariantów akustycznych: 39 scenariuszy w salach z RES oraz 28 w salach bez RES. Szczegółowo omówiono metodykę pomiarów, indywidualne charakterystyki poszczególnych obiektów oraz analizy obejmujące ocenę przestrzennej dystrybucji parametrów akustycznych, badanie jednorodności warunków akustycznych z wykorzystaniem odchylenia standardowego (SD) jako miary zmienności, identyfikację zależności korelacyjnych pomiędzy wskaźnikami pogłosowymi oraz ocenę kształtu zaniku energii akustycznej (liniowego bądź nieliniowego) na podstawie relacji pomiędzy wartościami EDT i RT20, z uwzględnieniem progów JND przyjętych w niniejszej pracy. W przypadku sal z RES przedstawiono powtarzalne schematy działania systemów, ich wpływ na parametry EDT, RT20 i RT30 oraz uzasadnienie stosowania tych rozwiązań w obiektach wielofunkcyjnych. Analogiczne analizy wykonano dla sal bez RES, w tym z pasywnymi elementami regulacji akustyki, uwzględniając wpływ kotar i banerów na parametry pogłosowe. Końcowe podrozdziały zawierają porównanie skuteczności regulacji aktywnej i pasywnej oraz zestawienie wyników pomiarów z danymi literaturowymi, co stanowi podstawę do formułowania założeń dla dalszych eksperymentów psychoakustycznych opisanych w kolejnych częściach pracy.

Część C poświęcona jest weryfikacji hipotezy głównej pracy poprzez zestaw jedenastu eksperymentów psychoakustycznych (E1–E11), z których każdy opierał się na hipotezie cząstkowej sformułowanej w odniesieniu do określonego aspektu percepcji pogłosu. Do stworzenia próbek dźwiękowych wykorzystano 1682 SRIR-ów, we wszystkich eksperymentach wzięło udział w sumie 848 słuchaczy. W sumie przeprowadzono 24 234 oceny porównawcze w zakresie względnej długości pogłosu; w każdej z nich uczestnicy porównywali dwie lub trzy próbki dźwiękowe.

Badania te miały na celu nie tylko próbę rozstrzygnięcia hipotezy głównej, lecz również pogłębienie wiedzy na temat mechanizmów percepcji pogłosu w zróżnicowanych warunkach akustycznych. Analizowano zarówno przestrzenie wyposażone w aktywne systemy wspomagania pogłosu (RES), jak i sale bez takich systemów, uwzględniając sytuacje, w których występowały nieliniowe zaniki energii akustycznej. Eksperymenty E1 do E10 przeprowadzono parami: każdemu eksperymentowi w salach z RES (np. E1) odpowiadał analogiczny eksperyment w salach bez RES (np. E2). W eksperymentach wykorzystano próbki dźwiękowe przygotowane na podstawie zarejestrowanych odpowiedzi impulsowych, różnicowane pod względem wartości wybranych parametrów czasowych (EDT, RT10, RT20, RT30) przy kontrolowanych pozostałych cechach sygnału. W każdym przypadku analizowano korelacje odpowiedzi słuchaczy z różnicami wybranych parametrów akustycznych. Analizy prowadzono w pełnym paśmie oraz w wybranych zakresach częstotliwości, badając wpływ fazy trwania i zaniku pogłosu, charakteru zaniku (liniowego i nieliniowego) oraz rodzaju regulacji akustyki na odbiór długości pogłosu.

Uzyskane wyniki pozwoliły zarówno na weryfikację hipotezy głównej, jak i na sformułowanie nowych wniosków istotnych dla teorii percepcji pogłosu w salach z RES i bez RES, w tym szczególnie w obiektach charakteryzujących się nieliniowym przebiegiem zaniku energii akustycznej.

10.1 Weryfikacja hipotezy głównej

W Tabeli 143 przedstawiono przeprowadzone w Części C eksperymenty wraz z najważniejszymi wnioskami. Wszystkie przeprowadzone eksperymenty oraz towarzyszące im hipotezy cząstkowe miały na celu weryfikację hipotezy głównej pracy, zakładającej odmienną percepcję pogłosu w salach wyposażonych w systemy wspomagania akustyki (RES) w porównaniu do sal pozbawionych takich systemów.

Tabela 143: Podsumowanie eksperymentów badawczych E1-E11

Nazwa eksp.	Hipoteza	Liczba słuchaczy	Weryfikacja hipotezy i najważniejsze wnioski
E1	W salach z RES silniejszą korelację z długością pogłosu wykazują parametry inne niż EDT (wartości średnie).	102	Potwierdzono hipotezę uzyskując wyższą korelację dla RT20 niż dla EDT przy określonych warunkach badawczych. Potwierdzono odmienną percepcję dla trybów <i>running</i> i <i>stop-chord</i> . Uzyskano odwrotną do oczekiwanej, ujemną i istotną korelację dla EDT i trybu <i>stop-chord</i> .
E2	W salach bez RES silniejszą korelację z długością pogłosu wykazują parametry inne niż EDT (wartości średnie).	36	Potwierdzono hipotezę wykazując wyższą korelację dla RT20 niż dla EDT w określonych warunkach badawczych i dla analizy odpowiedzi grupowych. Potwierdzono odmienną percepcję dla trybów <i>running</i> i <i>stop-chord</i> .

E3	Wartości parametrów EDT, RT10, RT20 i RT30 w poszczególnych pasmach mają wpływ na percepcję długości pogłosu w salach z RES	48	Potwierdzono hipotezę badawczą dodatkowo stwierdzając najwyższą przydatność RT20 w ocenie długości pogłosu zarówno w analizie odpowiedzi grupowych jak i w analizie korelacji.
E4	Wartości parametrów EDT, RT10, RT20 i RT30 w poszczególnych pasmach mają wpływ na percepcję długości pogłosu w salach bez RES	55	Potwierdzono hipotezę badawczą. Stwierdzono przydatność zarówno EDT jak i RT20 w ocenie długości pogłosu.
E5	RT20 koreluje silniej ze zmianą percepcji długości pogłosu niż EDT w salach z RES.	39 + 42	Nie potwierdzono jednoznacznie hipotezy o dominującej roli RT20 w percepcji długości pogłosu w salach z RES. W analizie korelacji uzyskano istotne wyniki dla RT20, natomiast w analizie odpowiedzi grupowych i trybu <i>running</i> wyższe wartości uzyskano dla EDT niż dla RT20.
E6	RT20 jest lepszym niż EDT predyktorem odczuwanej długości pogłosu w salach o nieliniowym zaniku energii akustycznej	60 + 80	Potwierdzono hipotezę na podstawie analizy korelacji uzyskując silne korelacje pomiędzy zmianą RT20 a wskazaniami słuchaczy.
E7	Słuchacze oceniają długość pogłosu wtedy, kiedy wybrzmienie pogłosu jest wyraźnie słyszalne (sale z RES).	61 + 63	Nie potwierdzono hipotezy badawczej. Percepcja pogłosu jest procesem złożonym i zależy od trybu pogłosu oraz źródła dźwięku.
E8	Słuchacze oceniają długość pogłosu wtedy, kiedy wybrzmienie pogłosu jest wyraźnie słyszalne (sale bez RES).	46 + 59	Hipoteza badawcza nie została potwierdzona. Percepcja pogłosu jest procesem złożonym i zależy od trybu pogłosu oraz źródła dźwięku.
E9	W salach z RES długość pogłosu może być różnie postrzegana, nawet przy zbliżonych wartościach EDT, RT20 i RT30.	51	Hipoteza nie została potwierdzona. Rozpoznanie próbek z dłuższym pogłosem korelowało ze zmianami wartości parametrów pogłosowych w poszczególnych pasmach częstotliwości co świadczy o wysokiej czułości słuchaczy na różnice w strukturze częstotliwościowej sygnałów.
E10	W salach z nieliniowym zanikiem energii akustycznej długość pogłosu może być różnie postrzegana, nawet przy zbliżonych wartościach EDT, RT20 i RT30.	49	Potwierdzono hipotezę badawczą. Słuchacze potrafią istotnie statystycznie odróżnić próbki o zbliżonych wartościach parametrów czasowych, a ich odpowiedzi korelują z innymi parametrami akustyki wewnątrz takimi jak C50, C80, Ts, D i wskaźnikami zrozumiałości mowy.
E11	W salach z liniowym zanikiem energii akustycznej długość pogłosu może być różnie postrzegana, nawet przy zbliżonych wartościach EDT, RT20 i RT30.	57	Potwierdzono hipotezę badawczą. Słuchacze potrafią istotnie statystycznie odróżnić próbki o zbliżonych wartościach parametrów czasowych, a ich odpowiedzi korelują z innymi parametrami akustyki wewnątrz takimi jak C50, C80, Ts, D i wskaźnikami zrozumiałości mowy.

Zestawienie wyników przeprowadzonych eksperymentów jednoznacznie potwierdza główną hipotezę badawczą sformułowaną w niniejszej pracy. Wykazano, że percepcja długości pogłosu w salach wyposażonych w systemy elektronicznej regulacji akustyki (RES) istotnie różni się od percepcji w przestrzeniach pozbawionych takich rozwiązań lub wykorzystujących jedynie regulację pasywną.

Zarówno dobór parametrów najsilniej powiązanych z percepcją długości pogłosu, jak i ich znaczenie dla oceny subiektywnej, zależą od zastosowanego systemu regulacji oraz trybu pogłosu (*running, stop-chord*). W salach z RES obserwuje się wyraźnie większe znaczenie parametrów związanych z klarownością i zrozumiałością mowy oraz istotne różnice w kierunkach korelacji klasycznych wskaźników akustycznych, takich jak EDT, w porównaniu z salami pozbawionymi aktywnej regulacji. Otrzymane wyniki wskazują, że zastosowanie systemów RES prowadzi do zmiany mechanizmów percepcji długości pogłosu oraz zwiększa złożoność zależności pomiędzy parametrami obiektywnymi a subiektywną oceną akustyki pomieszczenia.

W salach z RES (eksperymenty nieparzyste: E1, E3, E5, E7, E9) częściej obserwowano wyraźne i silne korelacje pomiędzy odpowiedziami słuchaczy a wybranymi parametrami akustycznymi, zwłaszcza RT20, co sugeruje większą wrażliwość percepcyjną na różnice w strukturze czasowej pogłosu. Potwierdzono również, że w tych salach percepcja długości pogłosu zależy od trybu jego prezentacji (*running* vs. *stop-chord*). Jednocześnie w niektórych eksperymentach (np. E5) nie uzyskano jednoznacznego potwierdzenia dominującej roli RT20 – jego przydatność zależała od metody analizy (korelacje vs. odpowiedzi grupowe). Z kolei w salach bez RES (eksperymenty parzyste: E2, E4, E6, E8, E10) korelacje z parametrami czasowymi były słabsze lub mniej spójne, a percepcja pogłosu okazała się bardziej złożona i mniej przewidywalna na podstawie standardowych wskaźników (EDT, RT20, RT30).

Wyraźną różnicę w percepcji wykazano również pomiędzy E9 i E10, a więc eksperymentach, w których poszczególne próbki w parach miały zbliżone wartości poszczególnych parametrów. W przypadku E9 (i sal z RES) odpowiedzi słuchaczy korelowały ze zmianami wartości parametrów czasowych RT20 (mimo różnic pomiędzy nimi mniejszych niż dolny próg JND), natomiast w salach bez RES odpowiedzi słuchaczy korelowały ze zmianą wartości klarowności, wyrazistości i wskaźnikami określającymi zrozumiałość mowy. Taki wynik również stanowi argument wspierający hipotezę główną, zakładającą odmiennosć percepcji pogłosu w salach z systemem RES w porównaniu do sal bez takiego systemu.

Podsumowując, systemy RES zdają się wzmacniać spójność percepcji pogłosu z wybranymi parametrami akustycznymi, co czyni wyniki słuchaczy bardziej przewidywalnymi i jednoznacznymi, podczas gdy w salach bez RES ocena długości pogłosu częściej zależy od złożonej kombinacji parametrów oraz struktury częstotliwościowej sygnału.

Należy podkreślić, że w wyniku przeprowadzonych eksperymentów wykazano również pewne podobieństwa w percepcji długości pogłosu w salach z RES oraz w salach

wykorzystujących pasywne rozwiązania do regulacji warunków akustycznych. Zarówno w salach z RES, jak i bez RES, RT20 okazał się najczęściej wykazywać silną korelację z odpowiedziami słuchaczy, co wskazuje na jego dominującą rolę w percepcji długości pogłosu. Jednocześnie rola EDT pozostawała niepewna i zależna od kontekstu eksperymentalnego. W większości przeprowadzonych eksperymentów to właśnie RT20 okazał się być najlepszym predyktorem długości pogłosu, czy to za sprawą licznych i silnych korelacji (zazwyczaj pełno- lub szerokopasmowych), czy też najsilniejszego kontrastu odpowiedzi słuchaczy (przy braku korelacji w analizie szczegółowej, jak to miało miejsce w E2). EDT wykazał większą przydatność jedynie w E5 i trybu *running* (jedynie w analizie odpowiedzi grupowych, przy braku istotnych statystycznie korelacji) oraz E7 i trybu *stop-chord*. Ostatecznie należy uznać, że RT20 jest lepszym predyktorem długości pogłosu w salach, w których wykorzystuje się regulację warunków akustycznych i w sytuacji, kiedy zastosowanie jej powoduje powstanie nieliniowych zaników energii akustycznej. Uzyskane w eksperymentach E5 i E7 wyniki, w których to parametr EDT okazał się najlepiej korelującym z odpowiedziami słuchaczy, nie pozwalają na umniejszanie jego roli w percepcji pogłosu w salach z regulowaną akustyką, mimo że w przestrzeniach z systemem RES zmiany wartości EDT są stosunkowo niewielkie. Szczególnie wyniki E7 wskazują na silną korelację odpowiedzi słuchaczy ze zmianami wartości tego parametru.

10.2 Pozostałe wyniki uzyskane w ramach przeprowadzonych eksperymentów

10.2.1 Wnioski z pomiarów przeprowadzonych w salach z RES

Systemy wspomagania akustyki (RES) wykazują istotny wpływ na warunki pogłosowe w salach koncertowych i wielofunkcyjnych, umożliwiając elastyczne kształtowanie czasu pogłosu bez konieczności ingerencji w strukturę architektoniczną. Analiza pomiarów przeprowadzonych w ośmiu salach (31 wariantów działania RES) potwierdziła, że działające systemy RES pozwalają na znaczące wydłużenie późnej fazy pogłosu (głównie RT20 i RT30), przy jednoczesnym niewielkim wpływie na parametry związane z wczesną energią (EDT, D) oraz wskaźnikiem zrozumiałości mowy (STI). Typowy mechanizm działania RES opiera się na zwiększeniu czasu pogłosu przy zachowaniu klarowności i percepcyjnej czytelności dźwięku. W większości przypadków, zmiany wartości STI mieściły się w zakresie $\pm 0,08$, co oznacza, że akustyczna adaptacja nie obniża istotnie zrozumiałości mowy. Warianty o ekstremalnie długim pogłosie ($RT30 > 2,5$ s) pokazały jednak, że zbyt silna ingerencja systemu prowadzi do wzrostu niejednorodności pola akustycznego (SD) oraz wyraźnego pogorszenia parametrów takich jak Ts i STI.

Zestawienie zmian wartości parametrów w Tabeli 38 potwierdza, że systemy RES oddziałują przede wszystkim na późne odbicia, co czyni je użytecznym narzędziem do dostosowania akustyki wnętrza do wymagań różnych typów wydarzeń – od prezentacji ustnych po koncerty symfoniczne – bez konieczności fizycznych modyfikacji przestrzeni.

10.2.2 Wnioski z pomiarów przeprowadzonych w salach bez RES

Zastosowanie pasywnych elementów regulacji akustyki, takich jak kotary i banery, wykazuje wyraźny wpływ na parametry obiektywne pogłosu, jednak ich działanie różni się w zależności od rodzaju zastosowanego rozwiązania. Analiza wyników pomiarowych przedstawionych w rozdziale 6.3.13 pokazuje, że kotary umieszczone w tylnej części sceny wpływają głównie na strukturę wczesnych odbić, przy jedynie minimalnym oddziaływaniu na późną fazę pogłosu. Z kolei wykorzystanie banerów akustycznych powodują znacznie większe zmiany parametrów pogłosowych, w tym RT20, co wskazuje na ich szersze oddziaływanie w przestrzeni sali. W niemal wszystkich analizowanych wariantach zauważalny był wzrost wartości parametrów klarowności (C50 i C80), co wiąże się ze zwiększeniem udziału energii wczesnych odbić, poprawiając tym samym czytelność zarówno mowy, jak i muzyki. Dodatkowo, wartości wskaźnika STI wykazały nieznaczne, ale systematyczne wzrosty, co również potwierdza korzystny wpływ rozwiązań pasywnych na zrozumiałość mowy. Największy efekt akustyczny odnotowano w przypadkach, gdy kotary i banery stosowano łącznie, co prowadziło do znacznych zmian w strukturze czasowej odbić: skrócenia T_s , wzrostu klarowności, a przy tym umiarkowanego wpływu na wartości pogłosowe.

Podsumowując, pasywne metody regulacji akustyki wewnątrz umożliwiają skuteczne dostosowanie warunków odsłuchowych do wymagań użytkowych poprzez modyfikację wczesnych odbić i poprawę parametrów klarowności, przy zachowaniu relatywnej stabilności podstawowych parametrów pogłosowych.

10.2.3 Porównanie wpływu aktywnych i pasywnych metod regulacji na warunki akustyczne sal

Zarówno systemy RES, jak i pasywne elementy regulacji akustyki (kotary, banery) umożliwiają modyfikację warunków pogłosowych, dostosowując akustykę sali do różnych typów wydarzeń. Rozwiązania pasywne pozwalają skrócić czas pogłosu (średnio o 0,2 s) i poprawić klarowność (średni wzrost C50 i C80 o 1,1–1,3 dB), przy minimalnym wpływie na STI. Z kolei systemy RES działają przeciwnie – wydłużają pogłos (RT20 nawet o 2,2 s, średnio o 0,5 s) i mogą obniżać klarowność, lecz nie pogarszają istotnie zrozumiałości mowy. RES

oferuje znacznie szerszy zakres regulacji niż rozwiązania pasywne, umożliwiając uzyskanie skrajnie różnych warunków akustycznych bez zmian architektonicznych.

10.2.4 Wpływ systemów regulacji akustyki i obecności widowni na nieliniowość zaniku pogłosu

Wyniki pomiarów przeprowadzonych na potrzeby niniejszej pracy oraz analiza danych literaturowych wskazuje, iż nieliniowy zanik energii akustycznej nie jest zjawiskiem marginalnym, lecz powszechnie występującym w salach zarówno z systemami regulacji akustyki (RES), jak i bez nich. Analiza danych własnych oraz porównanie z wynikami opublikowanymi przez Beranka (2004) wskazuje, że odsetek nieliniowych zaników – zdefiniowanych jako różnice między wartościami parametrów RT20 i EDT przekraczające próg JND – wynosi od około 27% (w salach bez widowni według Beranka) do ponad 80% (w salach z działającymi systemami RES w niniejszej pracy). W salach bez systemów aktywnej regulacji, lecz z zastosowaniem pasywnych elementów, takich jak kotary czy banery, odsetek nieliniowych zaników również wzrasta – z 33% do około 60%. Szczególnie wysoką częstość nieliniowych zaników wykazano w wariantach z włączonym RES (86%), co świadczy o silnym wpływie tego typu systemów na późną fazę pogłosu. Podobny odsetek (ok. 29–38%) uzyskano także dla sal z wyłączonym systemem RES. W świetle tych danych należy uznać, że liniowość zaniku energii akustycznej nie jest regułą, a jej brak powinien być traktowany jako naturalny składnik właściwości akustycznych sal, szczególnie przy obecności widowni lub zastosowaniu systemów regulacyjnych.

10.2.5 Wzorce korelacyjne parametrów akustycznych a wpływ systemów regulacji

Wyniki analiz korelacyjnych wykazały istotne różnice w zależnościach między parametrami akustycznymi w zależności od zastosowanego rodzaju systemu regulacji – aktywnego (RES) lub pasywnego (kotary i banery). Zarówno w salach z RES, jak i bez niego, odnotowano ogólnie zgodne z literaturą silne korelacje dodatnie pomiędzy parametrami czasu pogłosu (EDT, RT20, RT30) oraz parametrem T_s , jak również silne ujemne korelacje pomiędzy T_s a parametrami klarowności (C50, C80, D50).

Zastosowanie aktywnych systemów RES prowadzi jednak do znaczących modyfikacji siły tych zależności – przede wszystkim osłabia korelacje pomiędzy czasowymi parametrami pogłosowymi (szczególnie RT30) a pozostałymi wskaźnikami. Jednocześnie, w salach z działającym RES wzmacniają się zależności pomiędzy parametrami klarowności (C50, C80, D50) a wskaźnikiem zrozumiałości mowy STI. Szczególnie wyraźne są także dodatnie

korelacje między STI a C80, które są wyższe niż dla pary STI i C50, co potwierdza przydatność tego parametru również w kontekście mowy, a nie tylko muzyki.

Podobne zmiany obserwuje się w przypadku zastosowania pasywnych systemów regulacji. Choć kierunki zależności pomiędzy parametrami pozostają zgodne z oczekiwaniami (np. ujemna korelacja pomiędzy czasem pogłosu a klarownością), to siła korelacji parametrów czasowych z pozostałymi ulega osłabieniu. Korelacje między parametrami C50, C80 i D50 pozostają natomiast silne, niezależnie od zastosowanego wariantu akustyki, co wynika z ich matematycznej bliskości. W analizach indywidualnych sal bez RES zauważono również nietypowe przypadki ujemnych korelacji pomiędzy EDT i RT, które rzadko występują w literaturze i mogą wskazywać na szczególną specyfikę akustyczną tych przestrzeni.

Podsumowując, zarówno aktywne, jak i pasywne systemy regulacji wpływają na charakter i siłę zależności pomiędzy parametrami akustycznymi – aktywne systemy częściej wzmacniają powiązania między parametrami klarowności a STI, natomiast osłabiają tradycyjne powiązania między parametrami czasu pogłosu. W przypadku systemów pasywnych zmiany te są mniej wyraźne, ale również obecne.

10.2.6 Wpływ systemów regulacji akustyki na jednorodność przestrzenną parametrów akustycznych

Zastosowane systemy regulacji akustycznej, zarówno aktywne (RES), jak i pasywne (kotary, banery), wpływają w odmienny sposób na jednorodność przestrzenną parametrów akustycznych w salach.

Systemy aktywnej regulacji (RES) w większości przypadków zmniejszają jednorodność akustyczną, co przejawia się zwiększonymi odchyleniami standardowymi (SD) dla parametrów takich jak EDT, RT20, RT30 i Ts. W salach takich jak 1, 4, 7 i 8 obserwowano wzrost zmienności przestrzennej, który w wielu przypadkach przekracza próg JND, a więc może być percepcyjnie zauważalny przez słuchaczy w różnych miejscach sali. Wpływ RES na parametry związane z bezpośredniością dźwięku i zrozumiałością mowy (D i STI) był jednak pomijalny – odchylenia pozostały niskie i stabilne. W przypadku parametrów klarowności (C50 i C80), wpływ systemu RES na jednorodność był zazwyczaj niewielki, choć w sali 5 oraz w wariancie 4 sali 8 zanotowano pozytywny efekt – zmniejszenie zmienności i poprawę jednorodności rozkładu energii akustycznej.

Z kolei rozwiązania pasywne, takie jak kotary i banery, nie powodują istotnych zmian jednorodności akustycznej. Wartości odchyłeń standardowych dla wszystkich analizowanych

parametrów (czasy pogłosu, klarowność, T_s , STI) pozostały niskie i stabilne w przedziale typowym dla dobrze zaprojektowanych wnętrz. Brak istotnych wzrostów zmienności przestrzennej wskazuje na wysoką powtarzalność działania pasywnych systemów regulacyjnych, niezależnie od zastosowanego wariantu.

Podsumowując, systemy pasywne są bardziej przewidywalne i stabilne pod względem jednorodności warunków akustycznych w przestrzeni, natomiast systemy RES – choć oferują szerokie możliwości modulacji pogłosu – mogą pogarszać równomierność rozkładu parametrów akustycznych, co może negatywnie wpływać na spójność wrażeń słuchowych w różnych miejscach sali.

10.2.7 Wpływ wyników badań na projektowanie, ocenę i optymalizację sal o regulowanej akustyce

Wyniki przeprowadzonych badań dostarczają nowych informacji, które mogą być wykorzystane w wielu dziedzinach związanych z projektowaniem, oceną i eksploatacją wnętrz o regulowanej akustyce – zarówno w kontekście architektonicznym, jak i inżynierskim oraz edukacyjnym.

10.2.8 Projektowanie i modernizacja sal koncertowych oraz wielofunkcyjnych

Wyniki wskazują, że systemy aktywne (RES) oraz pasywne metody regulacji (kotary, banery) w odmienny sposób wpływają na kluczowe parametry akustyczne, takie jak czas pogłosu, klarowność czy jednorodność rozkładu energii. Pozwala to na świadomy wybór odpowiedniego rodzaju systemu w zależności od zakładanego przeznaczenia obiektu oraz wymaganej elastyczności przestrzeni. Możliwość przewidywania efektów percepcyjnych zmian akustycznych już na etapie projektowym (np. dzięki analizom korelacji) pozwala uniknąć kosztownych modyfikacji po oddaniu obiektu do użytku.

10.2.9 Optymalizacja działania i kalibracji systemów RES

Zidentyfikowanie parametrów najlepiej skorelowanych z percepcją długości pogłosu – w szczególności RT20 oraz C80 – umożliwia lepsze dostosowanie ustawień systemów aktywnych do oczekiwanych efektów akustycznych. Wyniki eksperymentów pokazują, że niektóre ustawienia RES mogą powodować spadek jednorodności akustycznej. Dane te mogą być więc wykorzystywane do tworzenia zaleceń dotyczących bezpiecznych zakresów regulacji oraz do zautomatyzowanej kalibracji systemu (np. zależnie od rodzaju wydarzenia lub liczby słuchaczy). Należy jednak podkreślić, że w wybranych scenariuszach pomiarowych

(w określonych trybach oraz w zależności od rodzaju materiału dźwiękowego) istotny okazał się również parametr EDT. W związku z tym projektanci i operatorzy systemów RES powinni uwzględniać wpływ zarówno parametrów opisujących fazę późną pogłosu, jak i tych odnoszących się do początkowego przebiegu odpowiedzi impulsowej, w szczególności EDT, który w określonych warunkach może mieć istotne znaczenie dla subiektywnej oceny długości pogłosu.

10.2.10 Konstrukcja i validacja modeli predykcyjnych percepcji pogłosu

Zestawienie odpowiedzi słuchaczy z wartościami poszczególnych parametrów akustycznych może stanowić podstawę dla tworzenia modeli predykcyjnych – zarówno heurystycznych, jak i opartych na sztucznej inteligencji. Takie modele mogą być wykorzystywane w oprogramowaniu do symulacji akustycznych (np. *CATT-Acoustic*, *Odeon*) w celu lepszego odwzorowania odbioru dźwięku przez słuchacza. Ponadto, uwzględnienie nieliniowości zaniku energii akustycznej oraz wpływu rodzaju prezentacji próbki (*running* vs. *stop-chord*) może prowadzić do stworzenia bardziej realistycznych algorytmów symulacyjnych.

10.2.11 Rozwój norm i standardów w dziedzinie akustyki wnętrza

Wyniki pracy sugerują, że niektóre standardowo stosowane parametry, takie jak EDT, mogą nie być wystarczające lub reprezentatywne dla opisu percepcji pogłosu w salach z systemami regulacji. Może to prowadzić do konieczności rewizji lub uzupełnienia istniejących norm (np. ISO 3382) o dodatkowe miary – takie jak analiza nieliniowości zaniku, rozszerzone wykorzystanie C80 lub nowatorskie indeksy korelacyjne. Praktyczne obserwacje wskazują też na konieczność uwzględnienia percepcyjnych progów JND nie tylko dla średnich wartości parametrów, ale także dla ich przestrzennego rozkładu.

10.2.12 Edukacja i szkolenia specjalistów z zakresu akustyki

Złożoność zjawisk opisanych w pracy – w tym zależności pomiędzy typem sali, zastosowaną regulacją, typem źródła dźwięku, trybem pogłosu i oceną słuchową – czyni ją cennym materiałem dydaktycznym w kształceniu przyszłych akustyków, projektantów oraz inżynierów dźwięku. Może być wykorzystywana jako baza do analiz porównawczych, ćwiczeń laboratoryjnych oraz studiów przypadków, ukazując praktyczne konsekwencje decyzji projektowych i konfiguracyjnych.

10.2.13 Wsparcie procesów rewitalizacji istniejących przestrzeni

Wyniki badań mogą posłużyć jako wskazówki w przypadku rewitalizacji istniejących obiektów, w których poprawa akustyki jest konieczna, ale ingerencja w strukturę budynku ograniczona. Pokazując, jakie efekty akustyczne przynosi zastosowanie kotar, banerów czy systemów aktywnych, praca dostarcza konkretnych rekomendacji, jak osiągnąć zamierzone cele (np. poprawa zrozumiałości mowy, zmniejszenie różnic percepcyjnych między rzędami) przy użyciu możliwie mało inwazyjnych metod.

10.2.14 Projektowanie sal hybrydowych i adaptacyjnych

Konieczność wykorzystywania przestrzeni do realizacji różnych wydarzeń stawia przed akustyką nowe wyzwania, związane z koniecznością szybkiej i elastycznej zmiany warunków akustycznych w zależności od charakteru wydarzenia. W takich salach szczególnie istotne stają się systemy elektronicznego wspomagania akustyki (RES), które pozwalają na dynamiczne kształtowanie parametrów, takich jak czas pogłosu czy klarowność mowy. Niniejsza praca dostarcza narzędzi do lepszego zrozumienia, w jaki sposób różne tryby działania RES są odbierane przez słuchaczy oraz wskazuje, jak można je optymalnie dostosowywać do specyfiki wydarzeń – od kameralnych odczytów literackich, przez koncerty jazzowe, po duże konferencje naukowe. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę praktycznych rekomendacji dla projektantów i użytkowników sal wielofunkcyjnych, umożliwiając świadome zarządzanie percepcją akustyki w zależności od potrzeb.

10.2.15 Optymalizacji algorytmów pogłosowych

Znajomość parametrów akustycznych determinujących subiektywną ocenę długości pogłosu umożliwia celowe kształtowanie charakterystyki akustycznej wirtualnej przestrzeni odsłuchowej zgodnie z pożądanym profilem percepcyjnym. Praktyczne zastosowanie tej wiedzy znajduje odzwierciedlenie m.in. w systemach przetwarzania dźwięku stosowanych w grach komputerowych czy programach do mikśowania dźwięku, gdzie istotnym czynnikiem jest minimalizacja zapotrzebowania na moc obliczeniową procesorów DSP. Osiągnięcie wrażenia długiego pogłosu prawdopodobnie nie wymaga bowiem implementacji rzeczywistej, długiej odpowiedzi impulsowej – efekt ten można uzyskać przy krótszej odpowiedzi, pod warunkiem odpowiedniego obniżenia parametrów związanych z klarownością sygnału. Uzyskane wyniki, które wskazują na możliwość celowej modyfikacji kształtu odpowiedzi impulsowej w celu optymalizacji zarówno percepcji, wymagają dalszych badań i weryfikacji eksperymentalnej. Otwiera to perspektywę przyszłych prac badawczych.

10.3 Ciągłość badań i nowe wyzwania

Uzyskane rezultaty nie wyczerpują złożoności zagadnienia i powinny stanowić punkt wyjścia do kolejnych badań, których celem będzie jeszcze dokładniejsze określenie zależności między parametrami akustycznymi a subiektywnym odbiorem dźwięku w zróżnicowanych warunkach przestrzennych i funkcjonalnych. Rozwój akustyki wnętrz pozostaje procesem dynamicznym i otwartym – o jego tempie najlepiej świadczy fakt, że w roku 1946 zaledwie 120 stron formatu A5 wystarczyło, by opisać większość znanych wówczas zagadnień tej dziedziny (Malecki, 1949). Zaledwie trzy dekady później, w 1976 roku, kolejna fundamentalna dla polskiej literatury książka z zakresu akustyki zawierała już 549 stron w formacie B5 (Sadowski, 1976). Współczesne opracowania nierzadko przekraczają objętością kilkaset stron, a mimo to nie są w stanie wyczerpująco omówić całego obszaru tej dynamicznie rozwijającej się dyscypliny. W perspektywie dalszego rozwoju szczególnego znaczenia nabierają badania nad akustyką adaptacyjną, interaktywną i personalizowaną – umożliwiającą dostosowanie warunków odsłuchowych nie tylko do rodzaju wydarzenia, ale również do indywidualnych potrzeb słuchaczy. Coraz większa rola cyfrowych technologii przetwarzania dźwięku, rozwój systemów immersyjnych oraz integracja akustyki z systemami inteligentnego zarządzania przestrzenią otwierają nowe możliwości, ale też stawiają nowe wyzwania badawcze. W tym kontekście eksperymenty nad percepcją pogłosu i wpływem parametrów fizycznych na subiektywne odczucia pozostają nie tylko aktualne, lecz wręcz niezbędne dla dalszego rozwoju nowoczesnej akustyki wnętrz.

Spis tabel:

Tabela 1: Częstotliwości środkowe pasm tercjowych i oktaowych.....	34
Tabela 2: Najczęściej wykorzystywane zakresy pomiarowe dla Poziomu dźwięku wraz odpowiadające im zjawiska percepcyjne oraz podobieństwo do innych parametrów akustyki wewnątrz	36
Tabela 3: Zależność pomiędzy zrozumiałością mowy, %ALCons, wartościami współczynnika STI oraz C50	45
Tabela 4: Wartości parametrów zalecane przez Beranka (2004) dla sal symfonicznych i operowych.....	47
Tabela 5: Wartości parametrów zalecane przez Barrona (1993) dla sal o różnym przeznaczeniu.	47
Tabela 6: Wartości czasu pogłosu proponowane przez Meyera i Neumanna (Kulowski, 2011).	48
Tabela 7: Wartości czasu pogłosu proponowane przez Brückmayera (Kulowski, 2011).....	48
Tabela 8: Zalecany czas pogłosu zależny od funkcji i kubatury pomieszczenia (Kulowski, 2011).	48
Tabela 9: Najczęściej spotykane wartości parametrów akustycznych (ISO 3382-1, 2009).	50
Tabela 10: Wartości parametrów akustycznych sugerowane przez Barrona (2006).....	50
Tabela 11: Sugerowane wartości Siły dźwięku (Barron, 1993; Beranek, 2004; ISO 3382-1, 2009).	53
Tabela 12: Wartości JND dla czasu pogłosu uzyskane w różnych eksperymentach.	59
Tabela 13: Wartości JND dla niektórych parametrów akustyki wewnątrz, które można znaleźć w literaturze.....	61
Tabela 14: Najważniejsze subiektywne parametry oceny jakości akustycznej pomieszczeń w metodzie Beranka i ich obiektywne odpowiedniki (Kulowski, 2011).....	64
Tabela 15: Wagi atrybutów oceny akustyki określone w % przez Beranka (1962).....	65
Tabela 16: Punktacja w ocenie jakości akustycznej sal wg. metody Leo Beranka (Sadowski, 1971).	66
Tabela 17: Wagi atrybutów oceny jakości akustycznej sal (Beranek, 1966).	67
Tabela 18: Preferowane wartości wybranych parametrów sygnału w metodzie Yoichi Ando.	72
Tabela 19: Podsumowanie badań nad percepcją pogłosu	107
Tabela 20: Podsumowanie badań nad pogłosami o nieliniowym zaniku.....	116

Tabela 21: Liczba sal koncertowych z opublikowanymi wartościami RT20 i EDT w różnych warunkach pomiarowych, na podstawie (Beranek, 2004).	122
Tabela 22: Zestaw pomiarowy 1, zmiana wartości RT20 bez udziału widowni i z widownią. Na podstawie Beranka (2004).	123
Tabela 23: Zestaw pomiarowy 2, wartości RT20 i EDT bez udziału widowni. Opracowano na podstawie Beranka (2004).	124
Tabela 24: Zestaw pomiarowy 3, wartości RT20 bez widowni i EDT z udziałem widowni. Opracowano na podstawie Beranka (2004).	126
Tabela 25: Zestaw pomiarowy 4, wartości RT20 bez widowni i z widownią, różnica wartości pomiędzy nimi oraz wartości EDT bez widowni. Opracowano na podstawie Beranka (2004).	127
Tabela 26: Zestaw pomiarowy 5, wartości RT20 oraz EDT bez widowni i z widownią, różnica wartości pomiędzy poszczególnymi parametrami. Opracowano na podstawie Beranka (2004).	128
Tabela 27: Podstawowe informacje o salach z RES, w których prowadzono pomiary parametrów akustycznych.	134
Tabela 28: Wartości parametrów zmierzone w sali 1 z RES.	135
Tabela 29: Wartości parametrów zmierzone w sali 2 z RES.	136
Tabela 30: Wartości parametrów zmierzone w sali 3 z RES.	137
Tabela 31: Wartości parametrów zmierzone w sali 4 z RES.	138
Tabela 32: Wartości parametrów zmierzone w sali 5 z RES.	140
Tabela 33: Wartości parametrów zmierzone w sali 6 z RES.	140
Tabela 34: Wartości parametrów zmierzone w sali 7 z RES.	141
Tabela 35: Wartości parametrów zmierzone w sali 8 z RES.	142
Tabela 36: Wartości korelacji dla wszystkich sal bez działających RES. Silne i bardzo silne korelacje zaznaczono pogrubioną czcionką.	145
Tabela 37: Wartości korelacji dla wszystkich sal i działających wariantów RES. Silne i bardzo silne korelacje zaznaczono pogrubioną czcionką.	145
Tabela 38: Podsumowanie zmian wartości najważniejszych parametrów na skutek działania RES	148
Tabela 39: Podstawowe informacje o salach bez RES, w których prowadzono pomiary. ...	149
Tabela 40: Powierzchnie i właściwości banerów i kurtyn zainstalowanych w poszczególnych salach.	150

Tabela 41: Wartości parametrów EDT, RT20 i RT30 zmierzone w poszczególnych salach bez RES i bez wariantów zmiennej akustyki.	151
Tabela 42: Wartości parametrów zmierzone w sali 2 bez RES.	152
Tabela 43: Wartości parametrów zmierzone w sali 5 bez RES.	153
Tabela 44: Wartości parametrów zmierzone w sali 7 bez RES.	153
Tabela 45: Wartości parametrów zmierzone w sali 8 bez RES.	154
Tabela 46: Wartości parametrów zmierzone w sali 9 bez RES.	155
Tabela 47: Wartości parametrów zmierzone w sali 10 bez RES.	155
Tabela 48: Wartości parametrów zmierzone w sali 11 bez RES.	156
Tabela 49: Wartości parametrów zmierzone w sali 14 bez RES.	157
Tabela 50: Wartości korelacji dla parametrów zmierzonych w salach bez RES oraz bez pasywnej regulacji akustyki. Silne i bardzo silne korelacje zaznaczono pogrubioną czcionką.	158
Tabela 51: Wartości korelacji dla parametrów zmierzonych w salach bez RES z wykorzystaniem pasywnej regulacji akustyki. Silne i bardzo silne korelacje zaznaczono pogrubioną czcionką.	159
Tabela 52: Zakresy zmian wartości poszczególnych parametrów zanotowane w salach z pasywnymi systemami regulacji akustyki.	160
Tabela 53: Liczba SRIR-ów z określoną liniowością zaniku energii akustycznej.	163
Tabela 54: Parametry akustyczne inne niż wskaźniki długości pogłosu analizowane w eksperymentach.	174
Tabela 55: Bodźce dźwiękowe wykorzystane w eksperymentach.	175
Tabela 56: Interpretacja siły efektu w zależności od wartości parametru Rho.	183
Tabela 57: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E1 i różnych wartościach EDT.	187
Tabela 58: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E1 i różnych wartościach RT10.	188
Tabela 59: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E1 i różnych wartościach RT20.	188
Tabela 60: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E1 i różnych wartościach RT30.	189
Tabela 61: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E1.	189
Tabela 62: Liczba uczestników E1 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.	190
Tabela 63: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E1.	190

Tabela 64: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E1. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.....	192
Tabela 65: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E1. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.....	193
Tabela 66: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach EDT.	197
Tabela 67: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT10.....	198
Tabela 68: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT20.....	198
Tabela 69: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT30.....	199
Tabela 70: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E2.	199
Tabela 71: Liczba uczestników E2 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.....	199
Tabela 72: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E2.....	200
Tabela 73: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E2. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.....	201
Tabela 74: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E2. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.....	202
Tabela 75: Porównanie E1 i E2 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.	205
Tabela 76: Przykładowa para próbek AB i różnice w wartościach parametrów EDT w poszczególnych pasmach częstotliwości w E3.	209
Tabela 77: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach EDT.	209
Tabela 78: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT10.....	210
Tabela 79: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT20.....	211
Tabela 80: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E2 i różnych wartościach RT30.....	211

Tabela 81: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E3.	212
Tabela 82: Liczba uczestników E3 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.	212
Tabela 83: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E3.	212
Tabela 84: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E3. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.	214
Tabela 85: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E3. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.	215
Tabela 86: Porównanie E1 i E3 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.	217
Tabela 87: Przykładowa para próbek AB i różnice w wartościach parametrów EDT w poszczególnych pasmach częstotliwości w E4.	219
Tabela 88: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E4 i różnych wartościach EDT.	219
Tabela 89: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E4 i różnych wartościach RT10.	220
Tabela 90: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E4 i różnych wartościach RT20.	220
Tabela 91: Wartości parametrów pogłosowych próbek dźwiękowych wykorzystanych w E4 i różnych wartościach RT30.	221
Tabela 92: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E4.	221
Tabela 93: Liczba uczestników E4 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.	221
Tabela 94: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E4.	222
Tabela 95: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E4. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.	223
Tabela 96: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E4. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.	224
Tabela 97: Porównanie E3 i E4 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.	226
Tabela 98: Porównanie E2 i E4 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.	228
Tabela 99: Wartości parametrów EDT i RT20 dla dwóch przykładowych zestawów próbek wykorzystanych w E5.	230
Tabela 100: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E5.	231

Tabela 101: Liczba uczestników E5 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.....	231
Tabela 102: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E5.....	231
Tabela 103: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E5. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką. Pogrubioną czcionką zaznaczono silne i bardzo silne korelacje.....	233
Tabela 104: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E5.....	233
Tabela 105: Wartości parametrów EDT i RT20 dla dwóch przykładowych zestawów próbek wykorzystanych w E6.	235
Tabela 106: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E6.....	236
Tabela 107: Liczba uczestników E6 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.....	236
Tabela 108: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E6.....	236
Tabela 109: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E6. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.....	238
Tabela 110: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E6. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.....	238
Tabela 111: Porównanie E5 i E6 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.	240
Tabela 112: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E8.....	242
Tabela 113: Liczba uczestników E8 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.....	242
Tabela 114: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E8.....	243
Tabela 115: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E7. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.....	244
Tabela 116: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E7. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.....	245
Tabela 117: Porównanie E1 i E7 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.	247
Tabela 118: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E8.....	249
Tabela 119: Liczba uczestników E8 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.....	249
Tabela 120: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E8.....	250
Tabela 121: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla parametrów badanych w E8. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.....	251

Tabela 122: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E8. Pogrubioną czcionką zaznaczono korelacje pomiędzy zmianą wartości danego parametru a wynikami eksperymentu, w którym ten parametr był bezpośrednio testowany.....	252
Tabela 123: Porównanie E7 i E8 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.	254
Tabela 124: Porównanie E8 i E2 na podstawie odpowiedzi słuchaczy.	256
Tabela 125: Wartości parametrów czasowych dla przykładowych par próbek wykorzystanych w E9.....	259
Tabela 126: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E9.	259
Tabela 127: Liczba uczestników E10 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.....	259
Tabela 128: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E10.....	260
Tabela 129: Wartości istotności statystycznej dla poszczególnych par i trybów pogłosu w E9. Wartości istotne statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.	261
Tabela 130: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E9. Pogrubioną czcionką zaznaczono silne i bardzo silne korelacje.....	261
Tabela 131: Wartości parametrów czasowych dla przykładowych par próbek wykorzystanych w E10.....	264
Tabela 132: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E10.....	264
Tabela 133: Liczba uczestników E10 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.....	264
Tabela 134: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E10.....	265
Tabela 135: Wartości istotności statystycznej dla poszczególnych par i trybów pogłosu w E10. Wartości istotnie statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.....	265
Tabela 136: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E10. Pogrubioną czcionką zaznaczono silne i bardzo silne korelacje.....	266
Tabela 137: Wartości parametrów czasowych dla przykładowych par próbek wykorzystanych w E11.....	270
Tabela 138: Liczba uczestników wg zadeklarowanego stanu słuchu w E11.....	270
Tabela 139: Liczba uczestników E11 z podziałem na poszczególne grupy wiekowe.....	270
Tabela 140: Zawód lub kierunek studiów deklarowany przez respondentów w E11.....	271
Tabela 141: Wartości istotności statystycznej dla poszczególnych par i trybów pogłosu w E11. Wartości istotnie statystycznie zaznaczono pogrubioną czcionką.....	272

Tabela 142: Parametry akustyczne dla poszczególnych trybów pogłosu, dla których uzyskano istotnie statystyczną korelację z odpowiedziami słuchaczy w E11. Pogrubioną czcionką zaznaczono silne i bardzo silne korelacje.....	272
Tabela 143: Podsumowanie eksperymentów badawczych E1-E11	277

Spis rysunków:

Rysunek 1: Wizualizacje pomiarów dokonanych za pomocą narzędzia do trójwymiarowej analizy pola akustycznego w przestrzeni ratusza w Auckland (Exton, 2014).	24
Rysunek 2: Parametry uzyskane z analizy odpowiedzi impulsowej (na podstawie Engel i in., 2007).	31
Rysunek 3: Zakresy zaniku energii akustycznej wykorzystywane do obliczenia wartości parametrów RT20 i RT30.	33
Rysunek 4: Zakres zaniku energii akustycznej wykorzystywany do obliczenia wartości parametru EDT.	34
Rysunek 5: Średnia zmierzona wartość RT30 na scenie i na widowni w zakresie od 63 Hz do 2 kHz w stosunku do objętości sali dla 20 sal. Większy znacznik oznacza lepszą ogólną ocenę łączną. Linia przedstawia zalecany czas pogłosu w funkcji objętości Sali (Adelman-Lar.	49
Rysunek 6: Parametry oceny subiektywnej zaproponowane przez Beranka (1962).....	63
Rysunek 7: Punktacja przy ocenie jakości akustycznej wg. metody Leo Beranka - część 1 (Sadowski, 1971).	65
Rysunek 8: Punktacja przy ocenie jakości akustycznej wg. metody Leo Beranka - część 2 (Sadowski, 1971).	66
Rysunek 9: Formularz odpowiedzi wykorzystywany w badaniach przez Barrona (Barron, 1998).	68
Rysunek 10: Wynik analizy wielowymiarowej. Skróty na Rysunku oznaczają: dla sal: Se=Sello, Ko= Konserwatorium, Ta=Tapiola. Kompozytorzy mo=Mozart, be=Beethoven, ma =Mahler. KoR1 oznacza wyniki dla pozycji nagraniowej R1 w sali Konserwatorium i utworów Mozarta (Lokki, 2011).	74
Rysunek 11: Wynik hierarchicznej analizy wielowymiarowej, który pokazuje uporządkowanie próbek w przestrzeni głównych składowych wraz z danymi subiektywnymi i obiektywnymi. Wektory subiektywne są średnimi poszczególnych wektorów atrybutów. (Lokki i in. 2010). 75	75
Rysunek 12: Układ głośnic w urządzeniu Ambiophony firmy Philips (Bakker, Gillan, 2014).	82
Rysunek 13: Zasadniczy układ urządzenia ambiofonicznego (Miszczak, 1969).....	83
Rysunek 14: Wspomaganie rezonansów - koncepcja działania systemu (Bakker, Gillan 2014).	84
Rysunek 15: System regeneratywny - koncepcja działania pojedynczej pętli systemu (Bakker, Gillan 2014).	85
Rysunek 16: Wirtualna ściana systemu CARMEN (Ballou, 2015).....	86
Rysunek 17: Idea działania systemu typu in-line (Bakker, 2012).	88

Rysunek 18: Schemat blokowy systemu SIAP (Ballou, 2015).	89
Rysunek 19: Rysunek 9: Schemat blokowy systemu LARES (Ballou, 2015).....	89
Rysunek 20: Idea działania systemu VRA (Poletti, 2006).	91
Rysunek 21: Idea działania szesnastokanałowego systemu VRA (Bakker, Gillan 2014).....	91
Rysunek 22: Idea działania systemu VRA (Poletti, 1994)	92
Rysunek 23: Idea działania systemu AFC (Bakker, Gillan 2014).	92
Rysunek 24: Schemat działania modułu EMR (pl.yamaha.com).	93
Rysunek 25: Widok modelu sali, w której prowadzono pomiary. Czerwone punkty A1 do A6 reprezentują pozycje źródła dźwięku a niebieskie o numerach od 01 do 06 reprezentują pozycje mikrofonów pomiarowych.	134
Rysunek 26: Ankieta wypełniana przez uczestników testów pogłosowych.	179
Rysunek 27: Wygląd interfejsu do zbierania odpowiedzi w czasie testów percepcji pogłosu – porównanie dwóch próbek.	179
Rysunek 28: Wygląd interfejsu do zbierania odpowiedzi w czasie testów percepcji pogłosu – porównanie dwóch próbek z próbką wzorcową opisaną jako „Baza”.....	179
Rysunek 29: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu running w E1	191
Rysunek 30: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu stop-chord w E1	191
Rysunek 31: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu running w E2	201
Rysunek 32: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu stop-chord w E2	201
Rysunek 33: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu running w E3	213
Rysunek 34: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu stop-chord w E3	213
Rysunek 35: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu running w E4	222
Rysunek 36: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu stop-chord w E4	223
Rysunek 37: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu running i stop- chord w E5	232
Rysunek 38: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu running i stop- chord w E6	237
Rysunek 39: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu running w E7	244
Rysunek 40: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu stop-chord w E7	244

Rysunek 41: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu running w E8	251
Rysunek 42: Procentowy udział poprawnych odpowiedzi dla pogłosu typu stop-chord w E8	251
.....	251

Literatura:

1. Abdel Alim, O. (1973). Abhängigkeit der Zeit- und Register-durchsichtigkeit von raumakustischen Parametern bei Musikdarbietungen (Dependence of time and register definition of room acoustical parameters with music performances). TU Dresden.
2. Adelman-Larsen, N. W., Thompson, E. R., & Gade, A. C. (2010). Suitable reverberation times for halls for rock and pop music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(1), 247–255. <https://doi.org/10.1121/1.3263611>
3. Ando, Y. (1983). Calculation of subjective preference at each seat in a concert hall. *Journal of the Acoustical Society of America*, 74(4), 873–887. <https://doi.org/10.1121/1.389874>
4. Ando, Y. (1985). *Concert hall acoustics*. Springer-Verlag.
5. Ando, Y., Johnson, B., & Bosworth, T. (1996). Theory of planning environments incorporating spatial and temporal values. *Memoirs of the Graduate School of Science and Technology, Kobe University*, 14-A, 67–92.
6. Ando, Y., Okura, M., & Yuasa, K. (1982). On the preferred reverberation time in auditoriums. *Acustica*, 50, 134–141.
7. Ahnert, W., & Schmidt, W. (1980). *Akustik in Kulturbauten (Acoustics in cultural buildings)*. Berlin: Institut für Kulturbauten.
8. Arend, J. M., Liesefeld, H. R., & Pörschmann, C. (2021). On the influence of non-individual binaural cues and the impact of level normalization on auditory distance estimation of nearby sound sources. *Acta Acustica*, 5, 7.
9. Aretz, M., & Orłowski, R. (2009). Sound strength and reverberation time in small concert halls. *Applied Acoustics*, 70(9), 1099–1110. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.02.001>
10. Armstrong, C., Thresh, L., Murphy, D., & Kearney, G. (2018). A Perceptual Evaluation of Individual and Non-Individual HRTFs: A Case Study of the SADIE II Database. *Applied Sciences*, 8(11), 2029. <https://doi.org/10.3390/app8112029>
11. Arni, P. (1950). Rooms with reverberation time adjustable over a wide frequency band. *Journal of the Acoustical Society of America*, 22(3), 353–354. <https://doi.org/10.1121/1.1906610>

12. Atal, B. S., Schroeder, M. R., & Sessler, G. M. (1965). *Subjective reverberation time and its relation to sound decay*. Presented at the 5th International Congress on Acoustics, Liège, paper G32.
13. Bakker, R. (2012, November 23). *Active acoustic enhancement systems – Introducing Yamaha AFC3* [Conference presentation]. 27th Tonmeistertagung, Cologne, Germany.
14. Bakker, R., & Gillan, S. (2014). The history of active acoustic enhancement systems. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 36(2).
15. Ballou, G. (Ed.). (2015). *Handbook for sound engineers* (5th ed.). Focal Press – Taylor & Francis Group.
16. Barron, M. (1993). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. London: E. & F. N. Spon. <https://doi.org/10.4324/9780203874226>
17. Barron, M. (1978). The Gulbenkian great hall, Lisbon, II: An acoustic study of a concert hall with variable stage. *Journal of Sound and Vibration*, 59(4), 481–502. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(78\)80129-1](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(78)80129-1)
18. Barron, M. (2006). Objective assessment of concert hall acoustics. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 28(2), 69–76.
19. Barron, M. (1988). Subjective study of British symphony concert halls. *Acustica*, 66(1), 1–14.
20. Barron, M. (2017). Leo Beranek – A life in acoustics 1914–2016. *Proceedings of ICSV24*, London, 23–27 July.
21. Barron, M. (2009). Then and now: How concert hall design of the 1960s and '70s compares with the present. *Proceedings of NAG/DAGA*, Rotterdam.
22. Barron, M. (1971). The subjective effects of first reflections in concert halls—The need for lateral reflections. *Journal of Sound and Vibration*, 15(4), 475–494. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90406-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90406-8)
23. Barron, M. (1981). Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: The derivation of a physical measure. *Journal of Sound and Vibration*, 77(2), 211–232. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(81\)80020-X](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(81)80020-X)
24. Barron, M., & Morimoto, M. (1998). *Auditorium acoustics and architectural design*. E & FN Spon.
25. Bech, S., & Zacharov, N. (2006). *Perceptual Audio Evaluation – Theory, Method and Application*. Wiley.
26. Beranek, L. L. (1996). *Concert and opera halls: How they sound*. Woodbury, NY: Acoustical Society of America.

27. Beranek, L. L. (2004). *Concert halls and opera houses: Music, acoustics, and architecture* (2nd ed.). Springer-Verlag.
28. Beranek, L. L. (2003). Subjective rank-orderings and acoustical measurements for fifty-eight concert halls. *Acta Acustica united with Acustica*, 89(3), 494–508.
29. Beranek, L. L. (1996). How they sound: Concert and opera halls. Woodbury, NY: Acoustical Society of America.
30. Beranek, L. L. (1962). *Music, acoustics & architecture*. Cambridge, MA.
31. Beranek, L. L., & Schultz, T. J. (1965). Some recent experiences in the design and testing of concert halls with suspended panel arrays. *Acustica*, 15, 307.
32. Billon, A., & Embrechts, J. J. (2012). Discrimination thresholds of the reverberation in large volumes by naïve listeners. In *Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference* (pp. 300–403).
33. Bistafa, S. R., & Bradley, J. S. (2006). Revisiting algorithms for predicting the articulation loss of consonants (ALcons). *Journal of the Audio Engineering Society*, 48(6).
34. Blevins, M. G., Buck, A. T., Peng, Z., & Wang, L. M. (2013). Quantifying the just noticeable difference of reverberation time with band-limited noise centered around 1000 Hz using a transformed up-down adaptive method. *Architectural Engineering - Faculty Publications*, Paper 38.
35. Błaśiński, Ł. (2025). Enhancing concert hall acoustics: The impact of acoustic banners and curtains. *Building Acoustics*.
<https://doi.org/10.1177/1351010X251330070>
36. Błaśiński, Ł. (2022). Objective evaluation of multipurpose enclosures equipped with active acoustic enhancement systems. *Inter-Noise 2022 Proceedings*, Glasgow, Scotland, August 21–24. https://doi.org/10.3397/IN_2022_0497
37. Błaśiński, Ł., Felcyn, J., & Kociński, J. (2024). Perception of reverberation length in rooms with reverberation enhancement systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 156(1), 450–462. <https://doi.org/10.1121/10.0026485>
38. Błaśiński, Ł., Pastusiak, A., Kociński, J., & Buszkiewicz, M. (2023). *Objective measurements and subjective assessment of the speech intelligibility in rooms with an Active Acoustic Enhancement Systems*. Proceedings of the Internoise Conference, Glasgow. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 265(4), 3480–3489.
https://doi.org/10.3397/IN_2022_0495

39. Bolt, R. H. (1946). Note on normal frequency statistics for rectangular rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 18(1), 130–133.
<https://doi.org/10.1121/1.1916349>
40. Bolt, R. H., & Doelz, P. E. (1950). A tentative criterion for the short-term transient response of auditoriums. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22(6), 803–808.
<https://doi.org/10.1121/1.1917208>
41. Bonello, C. (1981). A new criterion for the distribution of normal room modes. *Journal of the Audio Engineering Society*, 29(9), 597–606.
42. Boré, G. (1956). Ph.D. thesis, Technische Hochschule, Aachen.
43. De Bortoli, G. M., Prawda, K., & Schlecht, S. (2024). Active acoustics with a phase cancelling modal reverberator. *Journal of the Audio Engineering Society*, 72(10).
<https://doi.org/10.17743/jaes.2022.0171>
44. Braasch, J., & Blauert, J. (2017). Auditory perception in rooms. In *Architectural Acoustics Handbook* (pp. 189-190). J. Ross Publishing.
45. Brachmański, S., & Dobrucki, A. (2021). Impact of the level of noise and echo on the reaction time of listeners in the perception of logatoms. *Vibrations in Physical Systems*, 32(2). <https://doi.org/10.21008/j.0860-6897.2021.2.15>
46. Brachmański S., Staroniewicz P. (1999), Phonetic structure of a test material used in subjective measurements of speech quality, *Speech and Language Technology*, 3: 71–80.
47. Bradley, J. S., Reich, R., & Norcross, S. G. (1999). A just noticeable difference in C50 for speech. *Applied Acoustics*, 58(2), 99–108. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(98\)00075-9](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(98)00075-9)
48. Bradley, J. S. (1986). Auditorium acoustics measurement from pistol shots. *Journal of the Acoustical Society of America*, 80(1). <https://doi.org/10.1121/1.394162>
49. Bradley, J. S. (1986). Predictors of speech intelligibility in rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 80(3), 837–845. <https://doi.org/10.1121/1.393907>
50. Bradley, D. T., & Wang, L., (2010). Optimum Absorption and Aperture Parameters for Realistic Coupled Volume Spaces Determined From Computational Analysis and Subjective Testing Results. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(1), pp. 223–232. <https://doi.org/10.1121/1.3268604>
51. Bradley, D. T., & Wang, L. M. (2005). The effects of simple coupled volume geometry on the objective and subjective results from nonexponential decay. *Journal*

- of the Acoustical Society of America*, 118(3), 1480–1490.
<https://doi.org/10.1121/1.1984892>
52. Bradley J.S., Reich R.D., Norcross S.G. (1999), On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(4): 1820–1828. <https://doi.org/10.1121/1.427932>
 53. Bradley J.S., Sato H., Picard M. (2003), On the importance of early reflections for speech in rooms. *Journal of Acoustical Society of America*, 113: 3233–3244.
<https://doi.org/10.1121/1.1570439>
 54. Bradley, J. S., & Soulodre, G. A. (1995a). The influence of late arriving energy on spatial impression. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(4), 2263–2271.
<https://doi.org/10.1121/1.411951>
 55. Conturie, L. (1955). *L'acoustique dans les bâtiments: Théorie et application*. Paris: Eyrolles.
 56. Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2004). *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. London: Spon Press.
 57. Cox, T. J., Davies, W. J., & Lam, Y. W. (1993). The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria. *Acustica*, 79(1), 27–41.
 58. Cremer, L., & Müller, H. A. (1978). *Principles and applications of room acoustics* (T. J. Schultz, Trans.). London: Applied Science Publishers. (Original work published 1973)
 59. Cremer, L., Müller, H. A., & Schultz, T. J. (1982). *Principles and Applications of Room Acoustics, Vol. 1*. London: Applied Science Publishers.
 60. Damaske, P. (1967). Subjektive Untersuchung von Schallfeldern. *Acustica*, 19, 199.
 61. Damaske, P., & Ando, Y. (1972). Interaural cross-correlation for multichannel reproduction. *Acustica*, 27(4), 232–238.
 62. Dammerud, J. J. (2006). *Stage acoustics – Literature review*. University of Bath.
 63. Davis, D. (1979). *The role of initial time-delay gap in the acoustic design of control rooms for recording and reinforcing systems*. Paper presented at the 64th Audio Engineering Society Convention.
 64. Davis, D., Patronis, E., & Brown, P. (2013). *Sound system engineering* (4th ed.). Focal Press.
 65. Dietsch, L., & Kraak, W. (1986). Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen (An objective criterion for capturing echo disturbances with music and speech performances). *Acustica*, 60, 205.
 66. Doelle, L. L. (1972). *Environmental acoustics*. McGraw-Hill.

67. Drobner, H. (2004). *Instrumenty muzyczne. Mały przewodnik*. PWM.
68. Egan, M. D. (1988). *Architectural acoustics*. Academic Press.
69. Ellison, S., & Schwenke, R. W. (2023, October). Integrating spatial audio and active acoustics systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154(4, Suppl.), A169. <https://doi.org/10.1121/10.0023161>
70. Embrechts, J. J. (2000). Broad spectrum diffusion model for room acoustics ray-tracing algorithms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 107(4), 2068–2081. <https://doi.org/10.1121/1.428489>
71. Engel, Z., Engel, J., Kosała, K., & Sadowski, J. (2007). *Podstawy akustyki obiektów sakralnych*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy.
72. Ermann, M. (2007). Double sloped decay: Subjective listening test to determine perceptibility and preference. *Building Acoustics*, 14(2), 91–108. <https://doi.org/10.1260/135101007781448055>
73. Ermann, M., & Johnson, M. (2005). Exposure and materiality of the secondary room and its impact on the impulse response of coupled-volume concert halls. *Journal of Sound and Vibration*, 284(3–5), 915–931. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.07.030>
74. Exton, P. (2014). IRIS – The sound of science. *Acoustics Australia*, 42(1), 43.
75. Eyring, C. F. (1931). Reverberation time measurements in coupled rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 3(2A), 181–206. <https://doi.org/10.1121/1.1915555>
76. Fechner, G. (1966). *Elements of psychophysics* (Vol. 1). New York: Holt, Rinehart and Winston.
77. Frissen, I., Katz, B. F. G., & Guastavino, C. (2009). *Perception of reverberation in large single and coupled volumes*. W *Proceedings of the 15th International Conference on Auditory Display (ICAD 2009)* (s. 125–129). Copenhagen, Denmark.
78. Gade, A. C. (1986). *Acoustics for choir and orchestra*. Royal Swedish Academy of Music (No. 52).
79. Gade, A. (2007). Acoustics in halls for speech and music. In T. Rossing (Ed.), *Springer handbook of acoustics* (pp. 301–350). New York: Springer.
80. Gade, A. C. (1997). Evaluation of a reverberation enhancement system installed in a small multi-purpose hall. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(3), 522–529.
81. Gade, A. C. (1989a). Investigations of musicians' room-acoustic conditions in concert halls. Part I: Methods and laboratory experiments. *Acustica*, 69, 193–203.

82. Gade, A. C. (1989b). Investigations of musicians' room-acoustic conditions in concert halls. Part II: Field experiments and synthesis of results. *Acustica*, 69, 249–262.
83. Gade, A. C. (1992). Practical aspects of room acoustics measurements on orchestra platforms. In *Proceedings of the 14th International Congress on Acoustics (ICA'92)* (Vol. 3, Paper F3-5). Beijing, China.
84. Garnier, C. (1880). *Le nouvel Opéra de Paris* (Vols. 1–2). Ducher et Cie.
85. Gescheider, G. A. (1976). *Psychophysics: Method and theory* (pp. 20–38). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
86. Glasberg, B. R., & Moore, B. C. J. (2002). A model of loudness applicable to time-varying sounds. *Journal of the Audio Engineering Society*, 50(5), 331–342.
87. Griesinger, D. (2008). The importance of the direct to reverberant ratio in the perception of distance, localization, clarity, and envelopment. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 30(6).
88. Griesinger, D. (1997). *The Psychoacoustics of Apparent Source Width, Spaciousness and Envelopment in Performance Spaces*. Proceedings of the 103rd Audio Engineering Society Convention, New York, USA.
89. Haan, C. H., & Fricke, F. R. (1993). Surface diffusivity as a measure of the acoustic quality of concert halls. In *Proceedings of the Conference of the Australia and New Zealand Architectural Science Association* (pp. 81–90). Sydney, Australia.
90. Haan, C. H., & Fricke, F. R. (1995). Musician and music critic responses to concert hall acoustics. In *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics*. Trondheim, Norway.
91. Haas, H. (1951). On the influence of a single reflection on the perception of speech. *Acustica*, 1, 49–58.
92. Harasimowicz, J. (2017). Protestantka architektura kościelna XVI–XVIII wieku w Polsce i krajach sąsiednich. *Rocznik Historii Sztuki*, 42, 1–20. Polska Akademia Nauk.
93. Hartmann, G. (1982). Über den optimalen Nachhall in kleinen bis mittelgroßen Kirchen. *Applied Acoustics*, 15, 41–48.
94. Hartmann, W. M., & Wittenberg, A. (1996). On the externalization of sound images. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99(6), 3678–3688.
<https://doi.org/10.1121/1.414965>
95. Harvie-Clark, J., & Dobinson, N. (2013). *The practical application of G and C₅₀ in classrooms*. W *Proceedings of the INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference*

- (pp. 1510–1520). Institute of Noise Control Engineering.
<https://doi.org/10.25144/16352>
96. Hawkes, R. J., & Douglas, H. (1971). Subjective acoustic experience in concert auditoria. *Acustica*, 24, 235–250.
 97. Helmholtz, H. L. F. (1863). *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Braunschweig: Vieweg.
 98. Helmholtz, H. (1865). On sensations of tone. *Annalen der Physik und Chemie*, 99, 497–540.
 99. Hidaka, T., Beranek, L. L., & Okano, T. (1995). Interaural cross-correlation, lateral fraction, and low- and high-frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(2), 988–1007.
<https://doi.org/10.1121/1.414451>
 100. Hidaka, T., & Nishihara, N. (2022). Favorable reverberation time in concert halls revisited for piano and violin solos. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 151(3), 1583–1592. <https://doi.org/10.1121/10.0009931>
 101. Hidaka, T., Nishihara, N., Suzuki, K., & Nakagawa, T. (2024). Reexamination of the favorable reverberation time of concert halls measured in a 3D synthesized sound field. *Acoustical Science and Technology*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1250/ast.e23.76>
 102. Hoffmeier, J. (1996). *Untersuchungen zum Einfluß von Raumklangfärbungen auf die Deutlichkeit von Sprache* [Praca dyplomowa, Technische Universität Dresden].
 103. Hojan, E. (1988). *Zasady nagłaśniania pomieszczeń i przestrzeni otwartej*. Poznań: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza.
 104. Houtgast, T., & Steeneken, H. J. M. (1971). Evaluation of speech transmission channels by using artificial signals. *Acustica*, 25, 355–367.
 105. Houtgast, T., & Steeneken, H. J. M. (1973). The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility. *Journal of the Acoustical Society of America*, 54, 557. <https://doi.org/10.1121/1.1913632>
 106. Houtgast T., Steeneken H.J.M. (1985), The MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria, *Journal of the Acoustical Society of America*, 77: 1069–1077. <https://doi.org/10.1121/1.392224>
 107. Iida, K., Ishii, Y., & Nishioka, S. (2014). Personalization of head-related transfer functions in the median plane based on the anthropometry of the listener's

- pinnae. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 136(1), 317–333.
<https://doi.org/10.1121/1.4880856>
1108. International Electrotechnical Commission. (2020). *IEC 60268-16:2020 - Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index* (5th ed.). Geneva: IEC.
 1109. International Organization for Standardization. (1997). *ISO 3382:1997. Acoustics — Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*.
 1110. International Organization for Standardization. (2009). *ISO 3382-1:2009. Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces*.
 1111. International Organization for Standardization. (2008). *ISO 3382-2:2008. Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 2: Reverberation time in ordinary rooms*.
 1112. International Organization for Standardization. (2017). *Acoustics – Methods for calculating loudness – Part 1: Zwicker method* (ISO 532-1:2017)
 1113. International Organization for Standardization. (2022). *ISO 3382-3:2022. Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 3: Open plan offices*.
 1114. Izenour, G. (1977). *Theater design*. New York: McGraw-Hill.
 1115. Joo, H., & Jeong, D. (2013). Subjective evaluation of reverberation with a non-exponential sound decay. W: *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics (ISRA)*, 9–11 czerwca 2013, Toronto, Kanada.
 1116. Jeong, D., & Joo, H. (2017). Prediction of reverberance in rooms with simulated non-single-exponential sound decays. *Applied Acoustics*, 127, 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.04.018>
 1117. Jaffe, J. C. (2005). Innovative approaches to the design of symphony halls. *Acoustical Science and Technology*, 26(2), 240–243. <https://doi.org/10.1250/ast.26.240>
 1118. Jaffe, J. C. (1995). Selective reflection and acoustic coupling in concert hall design. W Y. Ando & D. Noson (Red.), *Music and Concert Hall Acoustics: Conference Proceedings from MCHA 1995* (s. 85–94). Academic Press.
 1119. Jiménez-Dianderas, C. R., & Recuero López, M. (2010, August 29–31). *Acoustical behaviour of Colonial Churches in Peruvian Andean Plateau (Puno, Peru)*. In *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics (ISRA 2010)*, Melbourne, Australia.

120. Johnson, R., Kahle, E., & Essert, R. (1995). Variable coupled cubage for music performance. In *Proceedings of MCHA'95*, Kirishima, Japan.
121. Jordan, V. L. (1980). *Acoustical design of concert halls and theaters*. Applied Science Publishers Ltd.
122. Jordan, V. L. (1970). Acoustical criteria for auditoriums and their relation to model techniques. *Journal of the Acoustical Society of America*, 47(2), 408–412.
<https://doi.org/10.1121/1.1911535>
123. Jordan, V. L. (1975). Comprehensive musical criterion: The Inversion Index. *Journal of the Audio Engineering Society*, 23(3), 131–135.
124. Jurkiewicz, Y., Berrier, V., & Kahle, E. (2024). Turku Fuuga – Acoustic design of an intimate and immersive concert hall. *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics (ISRA 2024)*.
125. Kahle, E., & Jullien, J. P. (1994). Some new considerations on the subjective impression of reverberance and its correlation with objective criteria. In *Proceedings of the W. C. Sabine Centennial Symposium*.
126. Kahle, E., & Jullien, J. P. (1995). Subjective listening tests in concert halls: Methodology and results. In *Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics (ICA'95)* (Vol. 2, pp. 521–524). Trondheim, Norway.
127. Karjalainen, M., & Järveläinen, H. (2001, November). More about this reverberation science: Perceptually good late reverberation. *Proceedings of the 111th Audio Engineering Society Convention*. Audio Engineering Society.
128. Klepper, D. L., Newman, R. B., & Watters, B. G. (1968). Acoustics of the Jesse H. Jones Performing Arts Hall, Houston, Texas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 44(1, Supplement), 366. <https://doi.org/10.1121/1.1970418>
129. Knudsen, V. O. (1932). *Architectural acoustics*. Wiley.
130. Knudsen, V. O., & Harris, C. (1950). *Acoustical designing in architecture*. Wiley. (Revised edition published in 1978 by the Acoustical Society of America).
131. Kotchy, A., Tarnoczy, T., & Vicsi, K. (1974). Subjective judgment of artificial reverberation processes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56(4), 1192–1194. <https://doi.org/10.1121/1.1903407>
132. Kuhl, W. (1978). Räumlichkeit als Komponente des Raumeindrucks (Spaciousness as a component of spatial impression). *Acustica*, 40, 167 ff.
133. Kuhl, F. (1954a). *Raumakustische Untersuchungen in Konzertsälen und Rundfunkstudios*. *Acustica*, 4, 40–56.

134. Kuhl, W. (1954b). Über Versuche zur Ermittlung der günstigsten Nachhallzeit großer Musikstudios. *Acustica*, 4, 618–634.
135. Kulkarni, A., & Colburn, H. S. (1998). Role of spectral detail in sound-source localization. *Nature*, 396(6710), 747–749.
136. Kulowski, A. (2011). *Akustyka sal. Zalecenia projektowe dla architektów*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
137. Kuroda, T., & Hasuo, E. (2014). *The first step to start psychophysical experiments. Acoustical Science and Technology*, 35(1), 1–9. <https://doi.org/10.1250/ast.35.1>
138. Kuttruff, H. (2009). *Room acoustics* (5th ed.). Spon Press.
139. Kürer, E. (1971). A simple measuring procedure for determining the "center time" of room acoustical impulse responses. In *Proceedings of the 7th International Congress on Acoustics*, Budapest.
140. Kürer, R., Plenge, G., & Wilkens, H. (1974). Correct spatial sound perception rendered by a special 2-channel recording method. *Proceedings of the 37th Audio Engineering Society (AES) Convention*.
141. Lachenmayr, W., Meyer-Kahlen, N., Gomes, O. C., Kuusinen, A., & Lokki, T. (2023). Chamber music hall acoustics: Measurements and perceptual differences. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154(1), 388–400. <https://doi.org/10.1121/10.0020066>
142. Lavandier, C. (1989). *Validation perceptive d'un modèle objectif de caractérisation de la qualité acoustique des salles* (Doctoral dissertation). Université du Maine, Le Mans, France.
143. Lee, D., Van Dorp Schuitman, J., Cabrera, D., Qiu, X., & Burnett, I. (2017). Comparison of psychoacoustic-based reverberance parameters. *Journal of the Acoustical Society of America*, 142(4), 1832–1840. <https://doi.org/10.1121/1.5005508>
144. Lehmann, A. W., & Müller, G. M. (1971). Über den Zusammenhang zwischen einigen raumakustischen Maßen und dem subjektiven Urteil. *Acustica*, 24(5), 244–249.
145. Lehmann, P. (1976). *On the ascertainment of room acoustical criteria and correlation of the same with subjective assessments of the acoustic overall impression* (Doctoral dissertation, TU Berlin).
146. Lehmann, P., & Wilkens, H. (1980). Subjective parameters important for judging room acoustics. *Acustica*, 45, 256–268.

147. Lenihan, L. M. A. (1951). Mersenne and Gassendi: An early chapter in the history of sound. *Acustica*, 2, 96–99.
148. Lenihan, L. M. A. (1952). The velocity of sound in air. *Acustica*, 2, 205–212.
149. Lifshitz, S. (1926). Mean intensity of sound in an auditorium and optimum reverberation. *Physical Review*, 27, 618–621.
150. Lindsay, R. B. (1966). The story of acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 39, 629–644. <https://doi.org/10.1121/1.1909936>
151. Lokki, T. (2013). Sensory evaluation of concert hall acoustics [Conference presentation]. *ICA 2013 – International Congress on Acoustics*, Montreal, Canada. <https://doi.org/10.1121/1.4800481>
152. Lokki T., Hiipakka J. (2001), A time variant reverberation algorithm for reverberation enhancement systems, [in:] Proceedings of the COST G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFX-01), pp. 28–32, Limerick.
153. Lokki, T., Pätynen, J., Kuusinen, A., Vertanen, H., & Tervo, S. (2011). Concert hall acoustics assessment with individually elicited attributes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(2), 835–849. <https://doi.org/10.1121/1.3607422>
154. Lokki, T., Pätynen, J., Kuusinen, A., & Tervo, S. (2012). Disentangling preference ratings of concert hall acoustics using subjective sensory profiles. *Journal of the Acoustical Society of America*, 132(5), 3148–3161. <https://doi.org/10.1121/1.4756826>
155. Lokki, T., Vertanen, H., Kuusinen, A., Pätynen, J., & Tervo, S. (2010). Auditorium acoustics assessment with sensory evaluation methods. *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics (ISRA 2010)*, 29–31 August, Melbourne, Australia.
156. Long, M. (2006). *Architectural acoustics*. Elsevier.
157. Luizard, P., & Katz, B. F. G. (2011). Coupled volume multi-slope room impulse responses: A quantitative analysis method. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 33(Pt. 2). <https://doi.org/10.25144/16852>
158. Luizard, P., Katz, B. F. G., & Guastavino, C. (2015a). Perceived suitability of reverberation in large coupled volume concert halls. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 25(3), 317–325. <https://doi.org/10.1037/pmu0000109>
159. Luizard, P., Katz, B. F. G., & Guastavino, C. (2015b). Perceptual thresholds for realistic double-slope decay reverberation in large coupled spaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(1), 75–84. <https://doi.org/10.1121/1.4904515>

160. Macmillan, N. A., & Creelman, C. D. (2005). *Detection theory: A user's guide* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
161. MacNair, W. A. (1930). Optimum reverberation time for auditoriums. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1, 242–248. <https://doi.org/10.1121/1.1915176>
162. Malecki, I. (1949). *Akustyka budowlana*. Instytut Badawczy Budownictwa.
163. Makarewicz, R. (2004). *Dźwięki i fale*. Wydawnictwo Naukowe UAM.
164. Martellotta, F. (2010). The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *Journal of the Acoustical Society of America*, 128(2), 654–663. <https://doi.org/10.1121/1.3455837>
165. Marshall, A. H. (1967). A note on the importance of room cross-section in concert halls. *Journal of Sound and Vibration*, 5, 100–112. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(67\)90181-2](https://doi.org/10.1016/0022-460X(67)90181-2)
166. Marshall, L. G. (1995). *Speech intelligibility prediction from calculated C₅₀ values*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5, Pt. 1), 2845–2847. <https://doi.org/10.1121/1.413184>
167. Maxfield, J. P., & Harrison, H. C. (1926). High quality recording and reproducing of music and speech. *Bell Telephone Laboratories*.
168. Meissner, M. (2015). Theoretical and numerical determination of low-frequency reverberant characteristics of coupled rooms. *Journal of Vibration and Acoustics*, 137(4), 041013. <https://doi.org/10.1115/1.4029991>
169. Meng, Z., Zhao, F., & He, M. (2006). The just noticeable difference of noise length and reverberation perception. *Proceedings of the International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 970–973.
170. Meyer, E., & Thiele, R. (1956). Room acoustical investigations in numerous concert halls and broadcasting studios using recent measurement techniques. *Acustica*, 6, 1–12.
171. Meyer, E., & Schroeder, G. R. (1952). On the influence of sound reflections on the localisation and loudness of speech. *Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse IIa*, 6, 31–42.
172. Meyer, E. (1950). *Raumakustik*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht
173. Meyer, J. (1994). Understanding the orchestral stage environment from the musician's, singer's, and conductor's point of view. In *Proceedings of the Wallace C. Sabine Centennial Symposium* (pp. 93–96). June 5–7.
174. Miller, D. C. (1935). *Anecdotal history of the science of sound*. Macmillan.

175. Miller, G. A. (1947). Sensitivity to changes in the intensity of white noise and its relation to masking and loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 19(4), 609–619. <https://doi.org/10.1121/1.1916528>
176. Miszczak, S. (1969). *Elektro-akustyka, monofonia, stereofonia, ambiofonia, stereoambiofonia*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
177. Möller, H., & Błaśiński, Ł. (2023). Room acoustic measurements in halls with electro-acoustic enhancement systems. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 45(2).
178. Möller, H., & Pätynen, J. (2025). Practical spatial acoustic measurements in performance halls with a reduced virtual orchestra. *Applied Acoustics*, 110740. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110740>
179. Moore, B. C. (2013). *An introduction to the psychology of hearing*. Boston: Brill.
180. Moore, B. C. J., Peters, R. W., & Glasberg, B. R. (1993). Effects of frequency on the detection of decrements and increments in sinusoids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 94(6), 3190–3198. <https://doi.org/10.1121/1.407224>
181. Na, Y., Lancaster, J., Casali, J., & Cho, G. (2007). Sound absorption coefficients of micro-fiber fabrics by reverberation room method. *Textile Research Journal*, 77(5), 330–335. <https://doi.org/10.1177/0040517507078743>
182. Niaounakis, T. I., & Davies, W. J. (2002). Perception of reverberation time in small listening rooms. *Journal of the Audio Engineering Society*, 50(5), 343–350.
183. Neal, M., & Vigeant, M. C. (2013). The effect of using matched, but not individualized, head related transfer functions on the subjective evaluation of auralizations (A). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(5), 3970. <https://doi.org/10.1121/1.4830461>
184. Oppenheim, A. V., Schaffer, R. W., & Buck, J. R. (1999). *Discrete-time signal processing*. Prentice-Hall.
185. Peutz, V. M. A. (1971). Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room. *Journal of the Audio Engineering Society*, 19(11), 915–919.
186. Picard, D. (2003). *Audibility of non-exponential reverberation decays* (Master's thesis). Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY.
187. Plenge, G. (1965). Über die Hörbarkeit von Änderungen im Frequenzgang der Nachhallzeit. *Acustica*, 16(5), 269–278.
188. Poletti, M. A. (2010). Active acoustic systems for the control of room acoustics. In *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics (ISRA 2010)*, August 29–31, Melbourne, Australia.

189. Poletti, M. A. (2006, July 18). *Reverberators for use in wide band assisted reverberation systems* (U.S. Patent No. RE39,189 E). United States Patent and Trademark Office.
190. Poletti, M. A. (1994). The performance of a new assisted reverberation system. *Acta Acustica*, 2(6), 511–524.
191. Polski Komitet Normalizacyjny. (2015). PN-B-02151-4:2015-06. *Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach. Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań*. Polski Komitet Normalizacyjny.
192. <https://pl.yamaha.com/pl/products/proaudio/afc/afc3/downloads.html>
193. Raichel, D. R. (2006). *Applications of acoustics*. Springer Science+Business Media.
194. Rea, L. M., & Parker, R. A. (1992). *Designing and conducting survey research*. San Francisco, CA: Jossey-Bass.
195. Reichard, W., Abdel Alim, O., & Schmidt, W. (1975). Definition und Messgrundlage eines objektiven Masses zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikdarbietung. *Acustica*, 32, 126–137.
196. Reichard, W., Abdel, A. O., & Schmidt, W. (1974). Dependence of the limit between useful and useless transparency on the kind of music, the reverberation time, and the onset time of the sound decay. *Applied Acoustics*, 7, 243–250.
197. Reichardt, W., & Kushev, A. (1973). Initial and decay transients of complete instrumental groups and envelopes of an orchestra. *Zeitschrift für Elektrische Informations- und Energietechnik*, 3(2), 73–88.
198. Reichardt, W., & Schmidt, W. (1966). Die hörbaren Stufen des Raumeindrucks bei Musik. *Acustica*, 17, 17–25.
199. Rettinger, M. (1977). *Acoustic design and noise control* (Vol. 1). Chemical Publishing Co.
200. Reynolds, G. S., & Scharf, B. (1975). Experimental sensory psychology. In B. Scharf (Ed.), *Experimental sensory psychology* (pp. 17–67). Glenview, IL: Scott, Foresman.
201. Rhode, W. S. (1971). Observations of the vibration of the basilar membrane in squirrel monkeys using the Mössbauer technique. *Journal of the Acoustical Society of America*, 49(4B), 1218–1231. <https://doi.org/10.1121/1.1912485>

202. Riionheimo, J., Möller, H., & Ruusuvuori, A. (2012). *The LOGOMO Hall. Proceedings of the Baltic-Nordic Acoustics Meeting (BNAM 2012)*, Odense, Dania.
203. Rumsey, F. (2008). Concert hall acoustics: Let the arguments begin! *Journal of the Audio Engineering Society*, 56(11), 1001–1004.
204. Sabine, W. C. (1922). *Collected papers on acoustics*. Dover.
205. Sabine, W. C. (1900). Reverberation. *The American Architect*. Reprinted in Sabine, W. C. (1964). *Collected papers on acoustics*. Dover.
206. Sadowski, J. (1976). *Akustyka architektoniczna*. Warszawa–Poznań: Państwowe Wydawnictwa Naukowe.
207. Sadowski, J. (1971). *Akustyka w urbanistyce, architekturze i budownictwie*. Wydawnictwo Arkady.
208. Sato, H., Morimoto, M., Wada, M. (2008), Relationship between listening difficulty and acoustical objective measures in reverberant sound fields. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(4): 2087–2093. <https://doi.org/10.1121/1.2885750>
209. Satoh, F., Hirano, J., Sakamoto, S., & Tachibana, H. (2005). Influence of time-variance in auditorium on impulse response. In *Proceedings of InterNoise 2005*, Rio de Janeiro, Brazil.
210. Schütze, J., Kirsch, C., Kollmeier, B., & Ewert, S. D. (2025). Comparison of speech intelligibility in a real and virtual living room using loudspeaker and headphone presentations. *Acta Acustica*, 9(6). <https://doi.org/10.1051/aacus/2024068>
211. Seraphim, H. P. (1958). Untersuchungen über die Unterschiedsschwelle exponentiellen Abklingens von Rauschbandimpulsen. *Acustica*, 8, 280–284.
212. Schacter, D. L., Gilbert, D. T., & Wegner, D. M. (2011). *Psychology* (pp. 127–130). New York: Worth Publishers.
213. Scharer, M. U., & Buchholz, J. M. (2007). Subjective measurements of preference and listening effort in rooms with reverberation. *Acta Acustica united with Acustica*, 93(6), 1034–1045.
214. Schroeder, M. R., Gottlob, D., & Siebrasse, K. F. (1974). Comparative study of European concert halls: Correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56(4), 1195–1201. <https://doi.org/10.1121/1.1903408>

215. Schroeder, M. R. (1975). Diffuse sound reflection by maximum-length sequences. *Journal of the Acoustical Society of America*, 57(1), 149–150.
<https://doi.org/10.1121/1.380425>
216. Schroeder, M. R. (1962). Frequency-correlation functions of frequency responses in rooms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12), 1819–1823.
<https://doi.org/10.1121/1.1909136>
217. Schroeder, M. R. (1965). New method of measuring reverberation time. *Journal of the Acoustical Society of America*, 37(3), 409–412.
<https://doi.org/10.1121/1.1909343>
218. Schroeder, M. R. (1987). Statistical parameters of the frequency response curves of large rooms. *Journal of the Audio Engineering Society*, 35(5), 299–306.
219. del Solar Dorrego, F., & Vigeant, M. C. (2022). A study of the just noticeable difference of early decay time for symphonic halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, 151(1), 80–94. <https://doi.org/10.1121/10.0009167>
220. <https://doi.org/10.1121/1.413735>
221. Soulodre, G. A. (2006). Can reproduced sound be evaluated using measures designed for concert halls? *Paper presented at the Spatial Audio & Sensory Evaluation Techniques*, Guildford, UK.
222. Soulodre, G. A., & Bradley, J. S. (1995). Subjective evaluation of new room acoustic measures. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98, 294–301.
<https://doi.org/10.1121/1.413735>
223. Steeneken H.J.M. (1992), On measuring and predicting speech intelligibility, Ph.D. dissertation, University of Amsterdam.
224. Steeneken, H. J. M., & Houtgast, T. (1980). A physical method for measuring speech-transmission quality. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67(1), 318–326.
<https://doi.org/10.1121/1.384464>
225. Steeneken H.J.M., Houtgast T. (2002), Validation of the revised STI method, *Speech Communication*, 38: 413–425.
226. Svennson U.P. (1998), Energy-time relations in a room with an electroacoustic system, *J. Acoust. Soc. Am.*, 104(3): 1483–1490.
227. Taylor, J. R. (1997). *An introduction to error analysis: The study of uncertainties in physical measurements* (2nd ed.). University Science Books.
228. Thiele, R. (1953). Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen. *Acustica*, 3, 291.

229. Valentine, J. (1997). North Shore Theatre in the Bruce Mason Theatre: Commissioning measurements. *14th Biennial Conference of the New Zealand Acoustical Society*, 6-5.1–6-5.11.
230. Vermeulen, R., Kleis, D. (1959). *Method of reproducing sound by means of scattered loudspeakers* (Patent No. 584497). Philips N.V.
231. Vitruvius Pollio, M. (1st century BCE). *The ten books on architecture* (M. H. Morgan, Trans.). Harvard University Press. (Original work published in 1914).
232. Vigeant, M. C., Celmer, R. D., Jasinski, C. M., Ahearn, M. J., Schaeffler, M. J., Giacomoni, C. B., Wells, A. P., & Ormsbee, C. I. (2015). The effects of different test methods on the just noticeable difference of clarity index for music. *Journal of the Acoustical Society of America*, 138(1), 476–491. <https://doi.org/10.1121/1.4922955>
233. Ward, W. C., Elko, G. W., Kubli, R. A., & McDougald, W. C. (1994). The new Varechoic chamber at AT&T Bell Labs. In *Wallace Clement Sabine Centennial Symposium*, Cambridge, Massachusetts, USA, June 5–7.
234. Warusfel, O., Kahle, E., & Jullien, J. P. (1993). Relationships between objective measurements and perceptual interpretation: The need for considering spatial emission of sound sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93(4), 2281–2281. <https://doi.org/10.1121/1.406548>
235. Watanabe, T., & Ikeda, M. (2011, October). Various applications of active field control. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(4), 2534. <https://doi.org/10.1121/1.3655123>
236. Watanabe, T., Ikeda, M., & Kim, S. (2013). Active field control using sound field generation technique: Case study of a live concert at a virtual Renaissance church. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(5), 3402. <https://doi.org/10.1121/1.4805920>
237. Wegel, R. L., & Lane, C. E. (1924). The auditory masking of one pure tone by another and its probable relation to the dynamics of the inner ear. *Physical Review*, 23, 266–285.
238. Wier, C. C., Jesteadt, W., & Green, D. M. (1977). Frequency discrimination as a function of frequency and sensation level. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 61(1), 178–184. <https://doi.org/10.1121/1.381251>
239. Wilkens, H., & Plenge, G. (1974). The correlation between subjective and objective data of concert halls. In R. Mackenzie (Ed.), *Auditorium acoustics*. John Wiley & Sons.

240. World Health Organization (1991), Report of the Informal Working Group on Prevention of Deafness and Hearing Impairment Programme Planning, No. WHO/PDH/91.1, Geneva.
241. Xiang, N., & Goggans, P. M. (2003). Evaluation of decay times in coupled spaces: Bayesian decay model selection. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(5), 2685–2697. <https://doi.org/10.1121/1.1562151>
242. Xiang, N., Goggans, P. M., Jasa, T., & Robinson, P. (2011). Bayesian characterization of multiple-slope sound energy decays in coupled-volume systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(2), 741–752. <https://doi.org/10.1121/1.3518773>
243. Zahorik, P., & Wightman, F. L. (2001). Loudness constancy with varying sound source distance. *Nature Neuroscience*, 4(1), 78–83. <https://doi.org/10.1038/82931>
244. Zha, X., Fuchs, H. V., & Drotleff, H. (2002). Improving the acoustic working conditions for musicians in small spaces. *Applied Acoustics*, 63(2), 203–221. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(01\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(01)00024-X)
245. Zohourian, M., & Martin, R. (2020). Binaural direct-to-reverberant energy ratio and speaker distance estimation. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 28, 92–104. <https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2948730>
246. Zwicker, E., & Fastl, H. (1999). *Psychoacoustics: Facts and models* (2nd ed.). Springer.
247. Zwislocki, J. J. (1962). *Analysis of the middle-ear function. Part I: Input impedance.* *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(8, Pt. 2), 1514–1523. <https://doi.org/10.1121/1.1918382>
248. Dostęp do stron internetowych w okresie od 1.01.2025 do 20.06.2025