

Spis treści

<b>O autorach</b>	<b>19</b>
<b>Wstęp</b>	<b>21</b>
<b>Rozdział I</b>	
<b>Podstawowe informacje o dźwięku</b>	<b>23</b>
Fala sinusoidalna	24
Dźwięk w ośrodku	25
Ruch cząsteczek	26
Rozchodzenie się dźwięku	27
Prędkość dźwięku	29
Długość fali i częstotliwość	31
Harmoniczne	33
Faza	34
Tony składowe	37
Oktawy	37
Pojęcie widma	40
Analogie elektryczne, mechaniczne i akustyczne	44
<b>Rozdział II</b>	
<b>Poziom głośności dźwięku a decybele</b>	<b>47</b>
Stosunek a różnica	47
Wartości liczbowe	48
Logarytmy	50
Decybele	50
Poziomy odniesienia	53
Porównanie postaci logarytmicznej i wykładniczej	55
Moc akustyczna	56
Korzystanie z decybeli	57
Pomiar poziomu ciśnienia akustycznego	62
Pomiary fali sinusoidalnej	63
<b>Rozdział III</b>	
<b>Dźwięk w polu akustycznym swobodnym</b>	<b>67</b>
Pole akustyczne swobodne	67
Rozchodzenie się dźwięku	68
Natężenie akustyczne w polu akustycznym swobodnym	69
Ciśnienie akustyczne w polu akustycznym swobodnym	70

Pola akustyczne w przestrzeniach zamkniętych	73
Półkolistą propagacja fal	74

## **Rozdział IV**

<b>Odbieranie dźwięków</b>	<b>77</b>
Czułość ucha	78
Budowa ucha ludzkiego	79
Ucho zewnętrzne	80
Kierunkowość odbioru dźwięku — ćwiczenie	80
Przewód słuchowy	81
Ucho środkowe	82
Ucho wewnętrzne	85
Stereocilia	86
Głośność a częstotliwość	87
Regulacja głośności	90
Obszar słyszalności	90
Głośność a poziom ciśnienia akustycznego	92
Głośność i szerokość pasma	94
Głośność impulsów	97
Zmiany głośności	99
Wysokość dźwięku a częstotliwość	99
Doświadczenie z wysokością dźwięku	101
Brakująca składowa podstawowa	101
Barwa dźwięku a widmo	101
Lokalizacja źródeł dźwięku	102
Lokalizacja za pomocą pary uszu	105
Prawo dźwięku bezpośredniego	106
Efekt Franssena	106
Efekt pierwszeństwa	107
Percepcja dźwięku odbitego,	109
Efekt cocktail party	112
Nieliniowość słuchowa	112
Subiektywność i obiektywność	114
Głuchota zawodowa i wynikająca ze sposobu spędzania wolnego czasu	114
Podsumowanie	116

## **Rozdział V**

<b>Sygnaly, mowa, muzyka i szum</b>	<b>119</b>
Spektrograf akustyczny	119
Mowa	122
Narząd głosu	124
Powstawanie głosek dźwięcznych	124
Powstawanie głosek bezdźwięcznych	125
Zakres częstotliwości mowy	126
Kierunkowość mowy	127

Muzyka	128
Instrumenty strunowe	128
Instrumenty dęte	129
Nieharmoniczne tony składowe górne	130
Zakres dynamiczny mowy i muzyki	131
Moc mowy i muzyki	132
Zakres częstotliwości mowy i muzyki	133
Obszar słyszalności mowy i muzyki	133
Szum	136
Pomiary szumu	137
Szum losowy	138
Szum biały i różowy	139
Zniekształcenia sygnału	142
Zniekształcenia harmoniczne	143
Rezonans	146
Filtry	148

## **Rozdział VI**

### **Odbicia dźwięku** **153**

Odbicia zwierciadlane	153
Echa łopoczące	155
Podwojenie ciśnienia przy odbiciu	156
Odbicia od powierzchni wypukłych	156
Odbicia od powierzchni wklęsłych	157
Odbicia od powierzchni parabolicznych	158
Galerie szeptów	159
Fale stojące	160
Odbicia dźwięku od dwóch powierzchni prostopadłych do siebie - reflektor kątowy	160
Średnia droga swobodna	161
Percepcja odbić dźwięku	162
Pojedyncze odbicia	163
Percepcja przestrzenności, obrazu dźwiękowego i echa	164
Wpływ kąta padania, rodzaju sygnału i widma na słyszalność odbić	166

## **Rozdział VII**

### **Dyfrakcja** **169**

Propagacja i dyfrakcja czoła fali	169
Dyfrakcja a długość fali	170
Dyfrakcja dźwięku na przeszkodzie	170
Dyfrakcja dźwięku na otworach	174
Dyfrakcja dźwięku na szczelinie	175
Dyfrakcja na soczewce dźwiękowej	175
Dyfrakcja wokół ludzkiej głowy	177
Dyfrakcja na krawędzi obudowy głośnika	177

Dyfrakcja na różnych obiektach	180
<b>Rozdział VIII</b>	
<b>Refrakcja dźwięku</b>	<b>181</b>
Natura refrakcji	182
Refrakcja dźwięku w ciałach stałych	183
Refrakcja dźwięku w atmosferze	184
Refrakcja dźwięku w pomieszczeniach zamkniętych	188
Refrakcja dźwięku w oceanie	189
<b>Rozdział IX</b>	
<b>Rozpraszanie dźwięku</b>	<b>191</b>
Doskonale rozproszone pole akustyczne	192
Ocena rozproszenia w pomieszczeniu	192
Pomiary stanu ustalonego	193
Nierównomierności (dudnienia) charakterystyki czasu pogłosu	194
Zanik poziomu dźwięku o charakterze wykładniczym	195
Jednorodność przestrzenna czasu pogłosu	197
Nieregularności geometryczne	200
Pojedyncze elementy pochłaniające	200
Powierzchnie wklęsłe	202
Powierzchnie wypukłe - przestrzenny ustrój dźwiękochłonny	203
Powierzchnie płaskie	204
<b>Rozdział X</b>	
<b>Filtr grzebieniowy</b>	<b>205</b>
Czym jest filtr grzebieniowy?	205
Superpozycja dźwięku	206
Sygnały tonalne i filtry grzebieniowe	207
Łączenie sygnałów muzyki i mowy	209
Łączenie dźwięku bezpośredniego i odbitego	210
Filtry grzebieniowe i pasma krytyczne	215
Filtry grzebieniowe przy odtwarzaniu wielokanałowym	217
Odbicia i przestrzenność	217
Filtry grzebieniowe w sygnale mikrofonu stereofonicznego	218
Filtry grzebieniowe w praktyce: sześć przykładów	218
Ocena wpływu efektu filtru grzebieniowego	224
<b>Rozdział XI</b>	
<b>Pogłos</b>	<b>227</b>
Narastanie dźwięku w pomieszczeniu	228
Zanik dźwięku w pomieszczeniu	230
Model narastania i zanikania dźwięku	230
Obliczanie czasu pogłosu	231
Wzór Sabine'a	233

Wzór Eyringa i Norrisa	235
Pochłanianie przez powietrze	236
Pomiar czasu pogłosu	237
Impulsowe źródła dźwięku	237
Źródła stałe	238
Sprzęt pomiarowy	239
Przebieg pomiarów	240
Pogłos i drgania normalne	241
Analiza przebiegu czasu zaniku poziomu dźwięku w pomieszczeniu	243
Zmienność zanikania drgań własnych	244
Efekt częstotliwości	247
Charakterystyka pogłosu	247
Zmiany czasu pogłosu w zależności od lokalizacji	249
Tempo tłumienia i pole pogłosowe	250
Przestrzeń akustycznie powiązane	251
Przestrzeń powiązane elektroakustycznie	251
Eliminowanie fluktuacji tłumienia	252
Wpływ pogłosu na mowę	252
Wpływ pogłosu na muzykę	254
Optymalny czas pogłosu	255
Wzrost niskich tonów w czasie pogłosu	258
Opóźnienie pierwszego odbicia	260
Czas pogłosu pomieszczenia mieszkalnego	260
Sztuczny pogłos	262
Obliczenia pogłosu	264

## **Rozdział XII**

<b>Pochłanianie dźwięku</b>	<b>269</b>
Rozpraszanie energii dźwiękowej	269
Współczynnik pochłaniania dźwięku	271
Metoda pomiaru współczynnika pochłaniania w warunkach pola pogłosowego	273
Pomiar w rurze Kundta	274
Metoda krótkich impulsów tonowych	278
Montaż materiału pochłaniającego	278
Porowatość a pochłanianie średnich i wysokich częstotliwości	280
Materiały izolacyjne z włókna szklanego	282
Włókno szklane - płyty	284
Włókno szklane - płytki akustyczne	284
Wpływ grubości materiału dźwiękochłonnego	285
Wpływ pustki powietrznej za materiałem dźwiękochłonnym	286
Wpływ gęstości materiału pochłaniającego	287
Pianki o porach otwartych	287
Zasłony jako materiały pochłaniające dźwięk	288
Dywan jako materiał pochłaniający dźwięk	292

Wpływ rodzaju wykładziny na pochłanianie	293
Wpływ podkładu wykładziny na pochłanianie	294
Współczynniki pochłaniania dźwięku wykładzin	296
Pochłanianie dźwięków przez ludzi	297
Pochłanianie dźwięku w powietrzu	298
Przeponowe ustroje dźwiękochłonne	299
Przestrzenne ustroje dźwiękochłonne	305
Konstrukcja ustrojów przestrzennych	307
Pułapka basowa - pochłanianie w zakresie niskich częstotliwości spowodowane rezonansem	308
Rezonatory Helmholtza	310
Perforowane płyty dźwiękochłonne	314
Listwowe ustroje dźwiękochłonne	318
Lokalizacja materiałów	321
Czas pogłosu rezonatorów Helmholtza	321
Obniżanie drgań własnych pomieszczenia za pomocą ustrojów dźwiękochłonnych	323
Zwiększanie czasu pogłosu	325
Moduły	325

## **Rozdział XIII**

<b>Rezonanse drgań własnych</b>	<b>329</b>
Wczesne doświadczenia i przykłady	330
Rezonans w rurze	331
Odbicia w pomieszczeniu	334
Rezonans między dwiema ścianami	336
„Obszary” częstotliwości	337
Równanie rezonansów pomieszczenia	340
Obliczanie rezonansów - przykład	342
Weryfikacja doświadczalna	345
Tłumienie drgań własnych	347
Szerokość pasma rezonansu	351
Wykresy ciśnienia drgań własnych	354
Gęstość drgań własnych	358
Odstęp między drganiami własnymi i „zakolorowania” dźwięku	359
Słyszalność zakolorowań	360
Optymalny kształt pomieszczenia	361
Kryterium Bonella	366
Zmiana kąta powierzchni w pomieszczeniu	367
Pomieszczenia o kształcie różnym od prostokąta	367
Kontrolowanie problematycznych drgań własnych	370
Uproszczona analiza rezonansów osiowych	371
Podsumowanie	373

## **Rozdział XIV**

<b>Dyfuzor (rozpraszacz) Schroedera</b>	<b>375</b>
Część badawcza	375
Dyfuzory RPG — Reflection-Phase Grating (bazujące na siatkach zmieniających fazę odbicia)	377
Dyfuzory oparte na sekwencji residuum kwadratowego	378
Dyfuzory oparte na sekwencji pierwiastka pierwotnego	380
Działanie dyfuzorów opierających się na siatce dyfrakcyjnej	382
Zastosowania dyfuzorów RPG	386
Rozwiązywanie problemów z „drzeniem” dźwięku	390
Zastosowanie fraktali	391
Rozpraszanie w trzech wymiarach	394
Betonowe bloki akustyczne	395
Pomiar skuteczności rozpraszania	396
Porównanie „siatek” z rozwiązaniami konwencjonalnymi	399
<b>Rozdział XV</b>	
<b>Zmienne warunki akustyczne</b>	<b>401</b>
Zasłony	401
Regulowane panele - pochłanianie	403
Panele na zawiasach	405
Panele z żaluzjami	405
Regulowane panele pochłaniające i rozpraszające dźwięk	406
Zmienne urządzenia rezonansowe	408
Obracanie elementów	410
Moduły przenośne	411
<b>Rozdział XVI</b>	
<b>Zakłócenia</b>	<b>417</b>
Metody obniżania poziomu hałasu	418
Hałas przenoszony drogą powietrzną	419
Izolacyjność akustyczna	420
Wpływ masy i częstotliwości	421
Efekt koincydencji	423
Rozdział mas	424
Złożone przegrody	425
Materiały porowate	426
Klasyfikacja STC	428
Porównanie konstrukcji ścian	430
Okna dźwiękoszczelne	432
Drzwi dźwiękoszczelne	434
Hałas przenoszony przez konstrukcję	436
Hałas przenoszony przez drgania	437
Podłogi pływające	438
Ściany i sufity z warstwą izolacji przeciwdźwiękowej	441
Hałas a rezonans w pomieszczeniu	441

Normy i wymagania w zakresie hałasu	442
-------------------------------------	-----

## **Rozdział XVII**

### **Kontrola hałasu systemu wentylacyjnego** **445**

Wybór wskaźnika oceny hałasu	446
Szum wentylatora	451
Hałas i drgania urządzeń	452
Prędkość powietrza	455
Tłumienie „naturalne”	457
Wykładzina w kanale	458
Tłumiki absorpcyjne	459
Gotowe tłumiki fabryczne	460
Tłumiki refleksyjne	460
Tłumik rezonansowy	462
Lokalizacja kanału	462
Stowarzyszenie ASHRAE	463
Aktywne tłumienie hałasu	464
Kilka porad praktycznych	464

## **Rozdział XVIII**

### **Akustyka pomieszczenia odsłuchowego** **467**

Charakter odtwarzanego dźwięku	468
Akustyka małego pomieszczenia	470
Rozmiar i proporcje pomieszczenia	470
Czas pogłosu	471
Kwestie niskich częstotliwości	472
Zakolorowania	476
Sterowanie rezonansami drgań własnych	476
Pułapki basowe w pomieszczeniach odsłuchowych	476
Kwestie częstotliwości średnio-wysokotonowych	478
Identyfikacja i adaptacja akustyczna punktów odbicia	482
Odbicia poprzeczne - kontrola przestrzenności	484
Lokalizacja głośników	484

## **Rozdział XIX**

### **Akustyka małego studia nagraniowego** **487**

Wymagania w odniesieniu do hałasu otoczenia	488
Charakterystyka akustyczna studia	489
Dźwięk bezpośredni i pośredni	489
Rola adaptacji akustycznej pomieszczenia	490
Drgania własne pomieszczenia i jego objętość	491
Analiza rezonansu dla różnych rozmiarów pomieszczeń	492
Czas pogłosu	494
Pogłos w małych pomieszczeniach	495
Optymalny czas pogłosu	495



Rozpraszanie	496
Hałas	497
Przykład projektu studia	497
Zakładana chłonność	498
Proponowana adaptacja pomieszczenia	499

## **Rozdział XX**

<b>Akustyka w reżyserce</b>	<b>505</b>
Opóźnienie pierwszego odbicia	506
Część niewytlumiona - część wytlumiona	508
Odbicia a rozpraszanie	509
Rezonanse niskotonowe w reżyserce	511
Opóźnienie pierwszego odbicia w praktyce	513
Lokalizacja głośnika i rozchodzenie się odbić	515
Reżyserka ze strefą pozbawioną odbić	516
Zakres częstotliwości w reżyserce	518
Zewnętrzna i wewnętrzna konstrukcja reżyserki	519

## **Rozdział XXI**

<b>Pomieszczenia do obróbki audiowizualnej</b>	<b>521</b>
Warunki projektowania	521
Adaptacja pomieszczenia	522
Przykład miejsca pracy	522
Ocena rezonansów pomieszczenia	524
Kontrola nad rezonansami pomieszczenia	524
Obliczenia pochłaniania	524
Propozycja adaptacji	525
Specjalistyczna adaptacja	527
Problemy z dźwiękiem w kabinie spikera	528
Pole tłumione i nietłumione	528
Pierwsze odbicia	529
Wytlumienie jednej części studia	530

## **Rozdział XXII**

<b>Akustyka dużych sal</b>	<b>533</b>
Najistotniejsze kryteria w projektowaniu	534
Kontrola pogłosu i echa	535
Salę służące do odbioru mowy	538
Objętość	538
Geometria sali	538
Pochłanianie	540
Sufit, ściany i podłoga	541
Zrozumiałość mowy	542
Częstotliwości i czas trwania mowy	542
Metody subiektywne	543

Metody analityczne	544
Projektowanie akustyczne sali koncertowej	545
Pogłos	546
Klarowność	546
Przejrzystość	547
Wzmocnienie	547
Liczba miejsc siedzących	548
Objętość	549
Przeźrenność	549
Pozorna szerokość źródła	549
Początkowe opóźnienie	550
Stosunek tonów niskich i ciepłe brzmienie	550
Projekt architektoniczny sali koncertowej	551
Balkon	551
Sufit i ściany	552
Podłoga nachylona	553
Analiza obrazu pozornego źródła	554
Procedura projektowania sali	556
Przykładowe rozwiązania	556

## **Rozdział XXIII**

<b>Zniekształcenia akustyczne</b>	<b>561</b>
Zniekształcenia akustyczne i odbiór dźwięków	561
Źródła zniekształceń akustycznych	562
Sprzężenie drgań własnych pomieszczenia	562
Interferencje między głośnikiem a powierzchniami otaczającymi	563
Filtr grzebieniowy	565
Rozpraszanie	570
Pomiary rozpraszania	572
Metody projektowania	574

## **Rozdział XXIV**

<b>Oprogramowanie do pomiarów akustyki pomieszczenia</b>	<b>577</b>
Pomiary akustyczne	578
Podstawowa aparatura pomiarowa	579
Techniki pomiarowe TDS (time-delay spectrometry)	580
Techniki pomiarowe MLS	584
Program ETF firmy AcoustiSoft	585
Pomiary charakterystyki częstotliwościowej	589
Pomiary rezonansów	595
Pomiary w pasmach węższych od oktawy	596
Pomiary krzywej zależności energii od czasu	598
Czas pogłosu	603

## **Rozdział XXV**

<b>Optymalizacja pomieszczenia</b>	<b>605</b>
Drgania własne	606
Interferencje między głośnikiem a powierzchniami otaczającymi	609
Optymalizacja	610
Teoria działania	612
Przewidywanie charakterystyki pomieszczenia	613
Proces optymalizacji	618
Parametr kosztu	618
Procedura optymalizacji	621
Wyniki działania	624
Konfiguracja stereofoniczna	624
Zestawy głośnikowe w układzie stereo z dwoma głośnikami niskotonowymi w każdym zestawie	625
Kino domowe w systemie 5.1 z dipolowymi głośnikami dźwięku surround	628
Kino domowe w systemie 5.1 z zestawami satelitarnymi	630
Subwoofer	633
Wnioski	635
<b>Rozdział XXVI</b>	
<b>Prezentacja dźwięku</b>	<b>637</b>
Historia modelowania akustycznego	638
Proces prezentacji akustycznej	642
Współczynniki rozpraszania	642
Charakterystyka odbiornika	644
Przetwarzanie echogramu	644
Dane modelu pomieszczenia	648
Odwzorowanie modelu pomieszczenia	651
Odtwarzanie binauralne	654
Podsumowanie	656
<b>Literatura</b>	<b>657</b>
<b>Dodatek</b>	<b>673</b>
Wybrane współczynniki pochłaniania	673
<b>Słownik</b>	<b>675</b>
<b>Index</b>	<b>681</b>