
Spis treści

Wstęp	9
Organizacja książki	14
1. Preliminaria matematyczne	17
1.1. Liczby zespolone	18
1.1.1. Dlaczego wprowadzamy liczby zespolone	18
1.1.2. Dodawanie i odejmowanie liczb zespolonych	20
1.1.3. Mnożenie liczb zespolonych	20
1.1.4. Moduł oraz liczba sprzężona	22
1.1.5. Iloraz liczb zespolonych oraz odwrotność	22
1.1.6. Pierwiastek z liczby zespolonej	24
1.1.7. Reprezentacja Eulera i płaszczyzna zespolona	25
1.1.8. Reprezentacja trygonometryczna liczby zespolonej	27
1.2. Przestrzeń wektorowa	31
1.2.1. Podstawowe definicje	31
1.2.2. Baza oraz wymiar	35
1.2.3. Produkt wewnętrzny oraz przestrzeń Hilberta	38
1.2.4. Przekształcenia w przestrzeni	43
1.2.5. Wartości i wektory własne, hermitowskość i unitarność	50
1.2.6. Iloczyn tensorowy	51
1.3. Notacja Diraca	53
1.4. Postulaty mechaniki kwantowej jako postulaty obliczeń kwantowych	55
1.5. Operatory	58
1.5.1. Macierze gęstości	67
1.5.2. Rozkład biegunowy oraz rozkład SVD	73
1.6. Generatory grupy $SU(d)$	75
2. Wprowadzenie do informatyki kwantowej	77
2.1. Kubit – jednostka kwantowej informacji	77
2.1.1. Kubit i kudit	78
2.1.2. Rejestr kwantowy	79

2.1.3.	Technika wyznaczania śladu częściowego	81
2.1.4.	Częściowa transpozycja	82
2.2.	Operacje wykonywane na rejestrze kwantowym	84
2.2.1.	Ewolucja unitarna	84
2.2.2.	Ogólna operacja pomiaru	86
2.2.3.	Operacja pomiaru von Neumanna	88
2.2.4.	Operacja pomiaru POVM	89
2.2.5.	Ogólne operacje kwantowe	90
2.2.6.	Ślad częściowy jako operacja kwantowa	93
2.3.	Operacje zabronione	94
2.4.	Splątanie stanów kwantowych	99
2.4.1.	Rozkład Schmidta stanów wektorowych	99
2.4.2.	Kryterium PPT	100
2.4.3.	Świadek splątania	103
2.4.4.	Kryterium reorganizacji macierzy	104
3.	Obwody kwantowe	107
3.1.	Bramki kwantowe	107
3.1.1.	Bramki jednokubitowe	108
3.1.2.	Bramki jednokuditowe	112
3.1.3.	Bramki dwu- i więcej kubitowe oraz kuditowe	115
3.1.4.	Uniwersalne oraz aproksymatywne zbiory bramek kwantowych	123
3.2.	Synteza obwodów kwantowych	127
3.3.	Inne modele oparte na obwodowym modelu obliczeniowym	133
3.3.1.	Jednokierunkowe obliczenia kwantowe	133
3.3.2.	Kwantowe obwody klasy CHP	136
3.3.3.	Kwantowe obwody klasy PQC	138
3.4.	Inne modele obliczeń kwantowych	139
4.	Protokoły i algorytmy kwantowe	142
4.1.	Teleportacja kwantowa	142
4.1.1.	Protokół teleportacji kwantowej	143
4.1.2.	Protokół teleportacji dla kuditów	144
4.1.3.	Jednoditowa teleportacja z bramką X w roli bramki korekcji	145
4.1.4.	Jednoditowa teleportacja z bramką Z w roli bramki korekcji	147
4.2.	Problem Deutscha	150
4.3.	Problem Deutscha–Jozsy	155
4.4.	Algorytm Grovera	161
4.4.1.	Operatory wskazania i obrotu wokół średniej	163
4.4.2.	Obwód kwantowy dla algorytmu Grovera	164
4.5.	Algorytm Shora	170
4.5.1.	Kwantowa procedura wyznaczania rzędu	171
4.5.2.	Szukanie okresu	173
4.6.	Rozwiązywanie układu równań liniowych	175
4.6.1.	Kwantowy algorytm rozwiązywania układu równań liniowych	175
5.	Praktycznie o obliczeniach kwantowych	178
5.1.	Operacje na wektorach	178
5.2.	Cechy macierzy istotne w obliczeniach kwantowych	190
5.3.	Elementy syntezy obwodów kwantowych	213
5.4.	Kwantowe pomiary	236

SPIS TREŚCI

5.5.	Stany spletane	259
5.6.	Podstawowe algorytmy kwantowe	274
6.	Symulacje obliczeń kwantowych	282
6.1.	Zawartość systemu QCS	283
6.1.1.	Rejestr kwantowy	284
6.1.2.	Rejestr kwantowy w trybie symbolicznym	290
6.1.3.	Wprowadzanie nowych definicji bramek kwantowych	291
6.1.4.	Operacje kwantowe	293
6.1.5.	Wartość Fidelity i miary typu trace distance	296
6.2.	Teleportacja kwantowa	298
6.2.1.	Standardowa teleportacja kwantowa	298
6.2.2.	Jednoditowa teleportacja kwantowa	300
6.3.	Deterministyczne wykrywanie d -poziomowych stanów Bella	302
6.4.	Algorytm Shora faktoryzacji liczb naturalnych	304
6.4.1.	Odwód kwantowy dla $N=15$	308
6.5.	Rozwiązywanie układu równań liniowych	310
6.6.	Symulacja układów kwantowych w środowisku otwartym	312
6.6.1.	Symulacja zaszumionej bramki CNOT	312
6.6.2.	Algorytm Grovera	315
6.6.3.	Realizacja algorytmu Grovera w środowisku otwartym	316
6.7.	Wykrywanie spletania	323
6.7.1.	Wykrywanie spletania dla stanów czystych	323
6.7.2.	Wykrywanie spletania za pomocą kryterium CCNR	324
6.8.	Dowodzenie tożsamości obwodowych	328
A.	Wprowadzenie do języka Python	334
A.1.	Instalacja środowiska Python	334
A.2.	Środowisko Python dystrybucja PythonXY	335
A.3.	Interpreter	336
A.4.	Struktury danych	339
A.5.	Instrukcja warunkowa if	345
A.6.	Pętle	347
A.7.	Funkcje tworzone przez użytkownika	350
A.8.	Korzystanie z bibliotek oraz tworzenie własnych modułów	354
A.9.	Operacje na plikach	356
A.10.	Try i except	358
A.11.	Podstawy obiektowości	359
A.12.	Podstawowe elementy interfejsu użytkownika	361
B.	Ważniejsze symbole, oznaczenia oraz skróty	363
	Bibliografia	364
	Skorowidz	370