

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	3
2. Źródła błędów algorytmów zabezpieczeniowych	8
2.1. Struktura zabezpieczenia cyfrowego	8
2.2. Błędy członu pomiarowego zabezpieczeń cyfrowych	10
2.3. Modele matematyczne sygnałów wejściowych zabezpieczeń	13
3. Estymacja parametrów modeli sygnałowych	19
3.1. Wprowadzenie	19
3.2. Metoda najmniejszych kwadratów	20
3.2.1. Matematyczne podstawy metody	20
3.2.2. Rekursywny algorytm MNK	25
3.3. Nierekursywne algorytmy estymacji parametrów sygnału	29
3.3.1. Dwustanowy algorytm Fouriera	29
3.3.2. Trzystanowy algorytm Fouriera	31
3.3.3. Dwustanowy algorytm Walsha	35
3.3.4. Trzystanowy algorytm Walsha	36
3.3.5. Pięciostanowy algorytm Fouriera	37
3.3.6. Algorytm Fouriera z modelem pomiarowym dostosowanym do długości okna	39
3.4. Wariancja błędów estymacji	40
3.5. Podsumowanie	43
4. Algorytmy wstępnego przetwarzania sygnałów	44
4.1. Wprowadzenie	44
4.2. Filtracja cyfrowa	45
4.2.1. Filtry o skończonej odpowiedzi impulsowej	47
4.2.2. Filtry o nieskończonej odpowiedzi impulsowej	51
4.3. Korelacja cyfrowa	52
4.4. Obserwatory stanu	57
4.4.1. Stacjonarne obserwatory stanu	59
4.4.2. Niestacjonarne obserwatory stanu	61
4.5. Filtracja Kalmana	62
4.5.1. Algorytm filtracji	62
4.5.2. Zasady projektowania filtra	63
4.6. Przekształcenie procedur rekursywnych w filtry nierekursywne	64
5. Algorytmy pomiaru wielkości kryterialnych	69
5.1. Wprowadzenie	69
5.2. Estymacja sygnału zespolonego	70
5.2.1. Zastosowanie filtrów cyfrowych	70
5.2.2. Zastosowanie korelacji	76

5.2.3. Zastosowanie opóźnienia sygnału	76
5.2.4. Zastosowanie różniczkowania sygnału	79
5.2.5. Błędy estymacji sygnału zespolonego	82
5.3. Pomiar amplitudy prądu i napięcia	84
5.3.1. Korzystanie z modelu sygnału zespolonego	84
5.3.2. Uśrednianie bezwzględnej wartości sygnału	84
5.4. Pomiar mocy	85
5.5. Pomiar składowych impedancji	86
5.5.1. Zastosowanie fazorów prądu i napięcia	86
5.5.2. Korzystanie z równania pętli zwarciowej	87
5.6. Podsumowanie	88
6. Błędy stanu ustalonego algorytmów	89
6.1. Wprowadzenie	89
6.2. Błędy związane ze zmianą częstotliwości podstawowej sygnału	90
6.2.1. Błędy estymacji amplitudy sygnału	90
6.2.2. Błędy estymacji mocy	91
6.2.3. Błędy estymacji impedancji	93
6.3. Błędy wynikające ze zmiany fazy sygnału	96
6.4. Eliminacja oscylacyjnych składowych zakłócających	99
6.5. Błędy wywołane aperiodyczną składową zakłócającą	103
6.5.1. Problemy eliminacji składowej aperiodycznej	103
6.5.2. Metody eliminacji zakłóceń aperiodycznych	104
6.5.3. Adaptacyjny filtr składowej aperiodycznej	108
7. Błędy stanu przejściowego algorytmów	111
7.1. Źródła błędów w stanie przejściowym algorytmów	111
7.2. Błędy algorytmów o stałym oknie pomiarowym.....	112
7.2.1. Analiza błędów	112
7.2.2. Sposoby zmniejszania błędów dynamicznych	115
7.3. Błędy estymatorów stosujących obserwatory stanu	117
7.3.1. Błędy deterministycznych odserwatorów stanu	117
7.3.2. Własności filtru Kalmana jako estymatora składowych ortogonalnych sygnału	120
7.4. Dynamika estymatorów impedancji - przykład obliczeniowy....	122
7.4.1. Wprowadzenie	122
7.4.2. Cyfrowy model systemu	123
7.4.3. Rezultaty pomiarów	124
8. Skutki próbkowania i kwantowania sygnału w zabezpieczeniach cyfrowych	128
8.1. Wprowadzenie	128

8.2. Błędy związane z ograniczoną długością rejestrów procesora i przetwornika A/C	129
8.2.1. Określenie parametrów obwodu wejść analogowych	129
8.2.2. Charakterystyki szumów w algorytmach zabezpieczeń cyfrowych	132
8.2.3. Analiza wrażliwości numerycznych procedur pomiarowych	134
8.3. Badanie charakterystyk podstawowych algorytmów	135
9. Wnioski	137
Dodatek A. Niektóre użyteczne związki trygonometryczne	141
Dodatek B. Synteza obserwatorów stacjonarnych	142
Literatura	147

CONTENTS

1. Introduction	3
2. Sources of errors for digital protection algorithms	8
2.1. General structure of a digital protection	8
2.2. Errors for a digital protection measurement unit	10
2.3. Mathematical models of protection input signals	13
3. Estimation of signal model parameters	19
3.1. Introduction	19
3.2. The least squares method	20
3.2.1. Mathematical background	20
3.2.2. Recursive LSE algorithm	25
3.3. Nonrecursive algorithms for signal parameter estimation	29
3.3.1. 2-state Fourier algorithm	29
3.3.2. 3-state Fourier algorithm	31
3.3.3. 2-state Walsh algorithm	35
3.3.4. 3-state Walsh algorithm	36
3.3.5. 3-state Fourier algorithm	37
3.3.6. Fourier algorithm with variable data window	39
3.4. Variance of estimation errors	40
3.5. Summary	43
4. Input signal processing algorithms	44
4.1. Introduction	44
4.2. Digital filtering	45
4.2.1. FIR filters	47
4.2.2. IIR filters	51
4.3. Digital correlation	52