

Eugeniusz Rosołowski

**Komputerowe metody analizy
elektromagnetycznych
stanów przejściowych**



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2009

SPIS TREŚCI

OD AUTORA	7
1. DYSKRETNE LINIOWE MODELE SIECI ELEKTRYCZNEJ	11
1.1. WPROWADZENIE	11
1.2. DYSKRETNA REPREZENTACJA RÓWNAŃ RÓŻNICZKOWYCH	13
1.2.1. Wybrane algorytmy	13
1.2.2. Dokładność i stabilność rozwiązania	15
1.3. MODELE CYFROWE LINIOWYCH ELEMENTÓW OBWODU ELEKTRYCZNEGO	18
1.3.1. Rezystancja	18
1.3.2. Indukcyjność	18
1.3.3. Pojemność	19
1.3.4. Gałęzie złożone	21
1.3.5. Źródła sterowane	23
1.3.6. Linia długa	24
1.3.7. Właściwości częstotliwościowe modeli cyfrowych	32
1.4. METODA POTENCJAŁÓW WĘZŁOWYCH	34
1.4.1. Tworzenie równań	34
1.4.2. Rozwiązanie równań potencjałów węzłowych	40
1.4.3. Algorytm symulacji	45
1.4.4. Określanie warunków początkowych	48
1.5. STABILNOŚĆ MODELI CYFROWYCH	53
1.5.1. Numeryczne oscylacje podczas symulacji stanu przejściowego	54
1.5.2. Tłumienie oscylacji za pomocą dodatkowej rezystancji	55
1.5.3. Tłumienie oscylacji przez zmianę metody całkowania	58
1.5.4. Metoda dopasowania transmitancji	65
ZADANIA	72
2. MODELE ELEMENTÓW NIELINIOWYCH I ZALEŻNYCH OD CZASU	75
2.1. METODY ROZWIĄZYWANIA RÓWNAŃ NIELINIOWYCH	75
2.1.1. Metoda iteracji prostej	76
2.1.2. Metoda Newtona	78
2.1.3. Metoda siecznych	80
2.1.4. Metoda Aitkena	81
2.1.5. Metoda Newtona-Raphsona	83

2.2.	MODELE ELEMENTÓW NIELINIOWYCH OBWODU ELEKTRYCZNEGO	84
2.2.1.	Rezystancja.....	85
2.2.2.	Indukcyjność.....	88
2.2.3.	Pojemność	96
2.3.	MODEL SIECI NIELINIOWEJ I ZALEŻNEJ OD CZASU	97
2.3.1.	Obwód z elementami nieliniowymi i zależnymi od czasu	97
2.3.2.	Metoda kompensacji.....	100
2.3.3.	Metoda odcinkowo-liniowej aproksymacji charakterystyki nieliniowej.....	107
	ZADANIA	109
3.	METODA ZMIENNYCH STANU	111
3.1.	WPROWADZENIE	111
3.2.	FORMUŁOWANIE RÓWNAŃ STANU.....	114
3.3.	ROZWIĄZYWANIE RÓWNAŃ STANU	117
3.3.1.	Układy liniowe	117
3.3.2.	Układy nieliniowe.....	119
3.4.	PODSUMOWANIE	122
	ZADANIA	123
4.	MODEL LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ.....	125
4.1.	LINIA JEDNOFAZOWA	125
4.1.1.	Parametry linii	125
4.1.2.	Uwzględnienie zależności parametrów od częstotliwości	127
4.2.	LINIA WIELOFAZOWA	145
4.2.3.	Model o parametrach skupionych.....	145
4.2.4.	Model o parametrach rozłożonych.....	153
	ZADANIA	170
5.	MODEL TRANSFORMATORA	171
5.1.	WPROWADZENIE	171
5.2.	TRANSFORMATOR JEDNOFAZOWY.....	172
5.2.1.	Schemat zastępczy	172
5.2.2.	Model transformatora dwuuzwojeniowego.....	175
5.2.3.	Model transformatora trójuzwojeniowego	182
5.2.4.	Model autotransformatora	184
5.2.5.	Modele obwodu magnetycznego	184
5.3.	TRANSFORMATOR TRÓJFAZOWY	193
5.3.6.	Transformator dwuuzwojeniowy	193
5.3.7.	Transformator wielouzwojeniowy	203
5.3.8.	Transformatory z uzwojeniem Z.....	209
	ZADANIA	214
6.	MODELOWANIE WIRUJĄCYCH MASZYN ELEKTRYCZNYCH	215
6.1.	MASZYNA SYNCHRONICZNA	215

6.1.1.	Model w składowych $0dq$	216
6.1.2.	Model w składowych fazowych	239
6.2.	MASZYNA INDUKCYJNA	240
6.2.1.	Uwagi ogólne.....	240
6.2.2.	Model matematyczny	243
6.2.3.	Model elektromechaniczny.....	248
6.2.4.	Modele cyfrowe.....	253
6.2.5.	Model wektorowy.....	254
6.3.	MASZYNA UNIWERSALNA	263
	ZADANIA	264
	UWAGI KOŃCOWE	265
	DODATEK A. ATP-EMTP: STRUKTURA PROGRAMU	269
A.1.	WPROWADZENIE	269
A.2.	STRUKTURA PAKIETU ATP-EMTP	270
A.2.1.	Edytor danych wejściowych	271
A.2.2.	Struktura programu ATP-EMTP	272
A.2.3.	Procesor wyników symulacji	275
	DODATEK B. PRZYGOTOWANIE DANYCH	277
B.1.	WPROWADZENIE	277
B.2.	EDYTOR TEKSTOWY	278
B.2.1.	Struktura pliku danych wejściowych	278
B.2.2.	Nagłówek zbioru danych	281
B.2.3.	Dane o modelach układu sterowania	284
B.2.4.	Dane o gałęziach modelu sieci.....	285
B.2.5.	Dane o wyłącznikach.....	289
B.2.6.	Dane o źródłach.....	290
B.3.	EDYTOR GRAFICZNY ATPDRAW	290
	DODATEK C. PRZYKŁADY	295
C.1.	TWORZENIE MODUŁÓW DANYCH	295
C.1.1.	Struktura modułu	295
C.1.2.	Tworzenie modułów w trybie wsadowym	298
C.1.3.	Tworzenie modułów w edytorze graficznym ATPDraw	303
C.1.4.	Zastosowanie modułów w edytorze graficznym ATPDraw.....	306
C.2.	TRANSFORMATOR TRÓJFAZOWY DO SYMULACJI ZWARĆ WEWNĘTRZNYCH.....	311
C.3.	MODEL ANALOGOWEGO FILTRU ODCINAJĄCEGO	317
C.4.	MODEL ZABEZPIECZENIA RÓŻNICOWEGO TRANSFORMATORA.....	322
C.4.1.	Wprowadzenie	322
C.4.2.	Zabezpieczenie różnicowe transformatora.....	323
C.4.3.	Model przekaźnika różnicowego	327
C.4.4.	Badanie zabezpieczenia	333

C.5.	ANALIZA ROZRUCHU SILNIKA INDUKCYJNEGO	337
C.5.1.	Wprowadzenie	337
C.5.2.	Model matematyczny silnika indukcyjnego	338
C.5.3.	Analiza rozruchu silnika	341
C.5.4.	Analiza rozruchu i zmiany obciążenia silnika	344
C.6.	MODELOWANIE GENERATORA INDUKCYJNEGO DWUSTRONNIE ZASILANEGO	346
C.6.1.	Wprowadzenie	346
C.6.2.	Struktura elektrowni wiatrowej	347
C.6.3.	Model matematyczny generatora z układem sterującym	348
C.6.4.	Model ATP-EMTP	356
C.6.5.	Warunki początkowe	358
C.6.6.	Wyniki symulacji.....	359
C.6.7.	Podsumowanie.....	361
C.7.	SYMULACYJNA ANALIZA ZWARĆ ŁUKOWYCH W LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ ..	361
C.7.1.	Wprowadzenie	361
C.7.2.	Model matematyczny łuku zwarciovego	363
C.7.3.	Model ATP-EMTP	367
C.7.4.	Wyniki symulacji.....	368
C.7.5.	Podsumowanie.....	369
C.8.	STATYCZNA KOMPENSACJA MOCY BIERNEJ	370
C.8.1.	Wprowadzenie	370
C.8.2.	Statyczny kompensator mocy biernej	372
LITERATURA		377
SKOROWIDZ.....		385

OD AUTORA

Modelowanie komputerowe zrobiło w ostatnich latach zawrotną karierę. Złożyło się na to wiele czynników, wśród których istotną rolę odgrywają, z jednej strony, gwałtowny rozwój technologii komputerowych, a z drugiej – ciągle niezaspokojona potrzeba lepszego zrozumienia otaczającego nas świata. Włączenie technik komputerowych do modelowania i symulacji zjawisk dynamicznych pozwala na bardzo elastyczne podglądanie, często niedostępnych w inny sposób zależności. Jest to wielce pomocne także w technice – zarówno do analizy zjawisk, jak i do weryfikacji pomysłów konstrukcyjnych.

Zachowanie systemów dynamicznych może być śledzone poprzez analizę ich opisów (modeli) matematycznych. W klasycznym podejściu, model matematyczny zjawiska jest zazwyczaj formułowany w odniesieniu do czasu ciągłego (model ciągły). W przypadku komputerowej symulacji, ciągły model należy zamienić na model dyskretny. Ta transformacja nie jest jednoznaczna, gdyż różniczkowanie lub całkowanie może być w różny sposób przedstawiane w modelu dyskretnym. Wybór określonej metody numerycznej w istotny sposób wpływa na właściwości modelu cyfrowego. Należy pamiętać, że właściwości cyfrowego modelu określonego zjawiska w ogólnym przypadku różnią się od właściwości jego modelu ciągłego. Zasadnicza różnica jest widoczna w dziedzinie częstotliwości: widmo sygnału dyskretnego powtarza się z okresem zależnym od wybranego kroku modelowania. Jego ciągły w czasie oryginał może być zatem w miarę wiernie reprezentowany przez numeryczną replikę w ograniczonym przedziale częstotliwości. Ponadto, porzucenie gładkiej, na ogół, przestrzeni czasu ciągłego na rzecz, z natury chropowatej, dziedziny czasu dyskretnego sprawia, że nasilają się problemy związane z uzyskaniem stabilnego rozwiązania. Pojawiające się w takich przypadkach nienaturalne oscylacje w wynikach symulacji stanów dynamicznych stanowią znany problem. Do tego dochodzą także nieuchronne błędy zaokrągleń arytmetycznych, wynikające z ograniczonej długości słowa w komputerach cyfrowych. Na szczęście, ten ostatni problem został w znacznej mierze usunięty we współczesnych komputerach.

Analizując wymienione trudności łączące się z zastosowaniem komputerów do symulacji procesów dynamicznych można zapytać, jaki jest sens stosowania takich rozwiązań w praktyce. Gwałtowny wzrost zainteresowania komputerowymi technikami symulacji jest dowodem na to, że z pewnością wskazane trudności można pokonać.

W książce przedstawiono metody zmierzające do komputerowej symulacji stanów przejściowych w sieciach elektrycznych. Zagadnienie to stało się aktualne z chwilą pojawienia się łatwo dostępnych i dostatecznie zaawansowanych komputerów w połowie lat 60. ubiegłego wieku. Działania w tym kierunku zostały wymuszone przez konieczność analizowania szybkozmiennych procesów przejściowych związanych z różnymi zakłóceniami w złożonych sieciach elektroenergetycznych. Gromadzenie informacji na temat przebiegu takich zakłóceń w naturalnym obiekcie jest drogie i niezmiernie utrudnione ze względu na losowy charakter zachodzących zdarzeń. Sprawny i wiarygodny symulator dawał nadzieję na postęp w tej dziedzinie.

Klasyczna praca z zakresu cyfrowych metod modelowania stanów przejściowych w sieciach elektrycznych z obiektami reprezentowanymi za pomocą modeli o parametrach skupionych i rozłożonych, autorstwa prof. H. Dommela, została opublikowana w 1969 r. [28]. Utworzona przez niego grupa badawcza, złożona ze specjalistów z zakresu elektroenergetyki, metod numerycznych i technik komputerowych, stworzyła podwaliny pod dobrze znany pakiet programowy ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) [30]. Na podstawie sformułowanych wówczas metod powstało wiele różnych wersji programu. Większość z nich, to obecnie profesjonalne programy komercyjne z rozbudowanym interfejsem użytkownika, co ułatwia ich obsługę oraz analizę uzyskanych wyników. Na bazie tego podejścia powstały również symulatory pracujące w czasie rzeczywistym, które pozwalają analizować zjawiska elektromagnetyczne w sieci, odtwarzając je w tempie zachodzącego procesu fizycznego – wymagają one jednak zastosowania specjalistycznego, drogiego sprzętu komputerowego.

Materiał książki jest podzielony na dwie części. W pierwszej z nich znajduje się omówienie podstawowych metod, które mają zastosowanie w modelowaniu elementów obwodów elektrycznych, oraz omówienie sposobów modelowania podstawowych elementów trójfazowej sieci elektroenergetycznej: linii, transformatorów oraz wirujących maszyn elektrycznych.

Drugą część stanowią Dodatki, gdzie zamieszczono podstawowe informacje na temat struktury i obsługi programu w wersji ATP-EMTP oraz wiele przykładów praktycznego wykorzystania tego programu. Program ten jest wciąż rozbudowywany przez międzynarodową społeczność specjalistów, którzy są zorganizowani w Regionalne Grupy Użytkowników. Jest to w pełni profesjonalny program, którego licencję można otrzymać za symboliczną, drobną opłatę. Dzięki temu jest on szczególnie rozpowszechniony w środowisku akademickim, chociaż jest także stosowany w profesjonalnym zakresie.

Przykłady zamieszczone w Dodatku C mają na celu pogłębioną ilustrację materiału prezentowanego w pierwszej części książki. Pełnią one także funkcję praktycznego przewodnika w zakresie posługiwania się programem, zwłaszcza przy tworzeniu własnych modeli. Realizacja tego ostatniego zadania wymagała zamieszczenia zaawansowanych modeli samych obiektów, jak również modeli odpowiednich

układów automatyki. Analiza tych przykładów wymaga niekiedy od Czytelnika posiadania bardziej zaawansowanej wiedzy w zakresie omawianych zagadnień. Mam jednak nadzieję, że Czytelnik nie będzie się tym zrażał – tego typu programy są w końcu przeznaczone dla profesjonalistów. Każdy ma szansę nim zostać po pokonaniu wstępnych trudności.

Dokonany przeze mnie wybór określonej bazy programowej w postaci pakietu ATP-EMTP faworyzuje, oczywiście, użytkowników tego właśnie programu. Mam jednak nadzieję, że również zwolennicy innych wersji programu z rodziny EMTP znajdą w tej książce wiele pożytecznych uwag, analiz i przykładów. Wiadomo bowiem, że, większość dostępnego obecnie oprogramowania do analizy omawianych tu zagadnień ma wspólną bazę, a kody danych wejściowych do symulacji różnią się w niewielkim stopniu. Pomocny tu może być wykaz stron internetowych podstawowych producentów i ważniejszych grup użytkowników tego oprogramowania, który zamieściłem w końcowej części spisu literatury.

Książkę tę pisałem przede wszystkim z myślą o moich studentach i doktorantach z kierunków elektrotechnika oraz automatyka i robotyka, przewidując, że w ten sposób po części zdejmę z siebie obowiązek różnorodnych szczegółowych konsultacji w tym zakresie. Oni też są głównymi inspiratorami tej pracy oraz – w dużej mierze – autorami jej układu. Mam nadzieję, że publikacja ta będzie także pomocna dla szerokiego grona specjalistów zajmujących się projektowaniem i eksploatacją urządzeń automatyki i pomiarów w elektrotechnice.

Uzupełnieniem książki są programy komputerowe z numerycznymi obliczeniami związanymi z wybranymi przykładami z głównego tekstu – w większości są to procedury napisane w programie MATLAB [85] oraz programy do wszystkich przykładów zamieszczonych w Dodatku C. Te ostatnie zostały opracowane w programie ATP-EMTP z edytorem graficznym ATPDraw w wersji 5.5 [8, 30, 104]. Są one dostępne na stronie internetowej: http://www.rose.pwr.wroc.pl/przyklady_D/. Mam nadzieję, że ten dodatkowy materiał będzie dobrym wprowadzeniem do poruszanych zagadnień i zachęci Czytelników do samodzielnego doskonalenia umiejętności w tym zakresie.

Materiał zawarty w tej książce ulega szybkiemu starzeniu, co jest związane z powstawaniem nowych pomysłów w zakresie metod numerycznych, rozwojem technik programowania komputerowego, a w konsekwencji – nowych wersji omawianych tu programów do symulacji komputerowej. Zwłaszcza w tym ostatnim zakresie zmiany mają szybkie tempo. Sądzę jednak, że nawet po kilku latach zamieszczony tu materiał będzie można z pożytkiem wykorzystać. Będę wdzięczny za wszelkie uwagi dotyczące proponowanego w tej książce materiału. Można je przysyłać na mój adres e-mailowy: eugeniusz.rosolowski@pwr.wroc.pl.

LITERATURA

1. ALEXANDER R., *Diagonally implicit Runge-Kutta methods for stiff O.D.E.'s*, SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 14, No. 6, (Dec., 1977), s. 1006-1021.
2. ALVARADO F.L., LASSETER R.H., SANCHEZ J.J., *Testing of trapezoidal integration with damping for the solution of power transient problems*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.12, December 1983, s. 3783-3790.
3. AMETANI A. BABA Y., *Frequency-dependent line and cable modeling*, EEUG Course, 27-th September 2000, Wrocław, Poland.
4. ANDERSON P.M., FOUAD A.A., *Power system control and stability*, The Iowa State University Press, Iowa, 1977.
5. ANNAKAGE U.D., MCLAREN P.G., DIRKS E., JAYASINGHE R.P., PARKER A.D., *A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis*, IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 15, No. 1, January 2000, s. 57-61.
6. ARRILLAGA J., WATSON N., *Computer modeling of electrical power systems*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2001
7. АРУШАНЯН О.Б., ЗАЛЁТКИН С.Ф., *Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений (задача Коши)*, Publikacja dostępna w: http://www.srcc.msu.su/num_anal/list_wrk/sb3_doc/part6.htm.
8. *ATP-EMTP Rule Book*, Canadian/American EMTP User Group, 1987-92.
9. BASTOS J.P.A., SADOWSKI N., *Electromagnetic modeling by finite element methods*, Marcel Dekker, Inc., New York, 2003.
10. BERGEN A.R., VITTAL V., *Power systems analysis*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J., 2000.
11. BERNAS S., CIOK Z., *Modele matematyczne elementów systemu elektroenergetycznego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1977.
12. BIAŁKO M., *Analiza układów elektronicznych wspomagana komputerem*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1989.
13. BOLDEA I., *Variable speed generators*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
14. BOLDEA I., NASAR S.A., *The induction machine handbook*, CRC Press LLC, Boca Raton, 2002.
15. BRANDWAJN V., DOMMEL H.W., DOMMEL I.I., *Matrix representation of three-phase n-winding transformers for steady-state and transient studies*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6, 1982, s. 1369-178.
16. CAO X., KURITA A., TADA Y., OKAMOTO H., *Type-58 synchronous machine model and related modifications*, EMTP Journal, Vol. 11, 2006, s. 78-84.
17. CAO X., KURITA A., MITSUMA H., TADA Y., OKAMOTO H., *Improvements of Numerical Stability of Electromagnetic Transient Simulation by Use of Phase-Domain Synchronous Machine Models*, Electrical Engineering in Japan, Vol. 128, No. 3, 1999, s. 53-62.
18. CARSON J.R., *Wave propagation in overhead wires with ground return*, Bell Syst. Tech. Journal, Vol. 5, 1926, s. 539-554.

19. CHANDRASENA W., MCLAREN P.G., ANNAKKAGE U.D., JAYASINGHE R.P., MUTHUMUNI D., DIRKS E., *Simulation of hysteresis and eddy current effects in a power transformer*, Proc. Int. Conf. on Power System Transients, IPST 2003, New Orleans, paper 9a-3.
20. CHAUDHARY A.K.S., TAM K.S., PHADKE A.G., *Protection System Representation in the Electromagnetic Transients Program*, IEEE Transactions Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994, s. 700-711.
21. CHEN X., *Negative inductance and numerical instability of saturable transformer component in EMTP*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, October 2000, s. 1199-1204.
22. CHOLEWICKI T., *Elektrotechnika teoretyczna*, T. II. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1971.
23. CHUA L.O., LIN P.M., *Komputerowa analiza układów elektronicznych. Algorytmy i metody obliczeniowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1981.
24. CLARKE E., *Circuit Analysis of AC Power Systems*, Vol. I. New York: Wiley, 1950.
25. DENNETIÈRE S., MAHSEREDJIAN J., MARTINEZ M., RIOUAL M., XÉMARD A., *On the implementation of a hysteretic reactor model in EMTP*, Proc. Int. Conf. on Power System Transients, IPST 2003, New Orleans, paper 9d-3.
26. DIRECTOR S.W., ROHRER R.A., *Podstawy teorii układów elektrycznych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1976.
27. ДОЛГИНОВ А.И., СТУПЕЛЬ А.И., ЛЕВИНА Л.С., *Алгоритмы и программа расчета на ЭВМ электромагнитных переходных процессов в электрических системах*, Электричество, 1966, № 8, s. 23-29.
28. DOMMEL H.W., *Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-88, April 1969, s. 388-399.
29. DOMMEL H.W., *Nonlinear and time-varying elements in digital simulation of electromagnetic transients*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, November 1971, s. 2561-2567.
30. DOMMEL H.W., *Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP theory book)*, Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
31. DOMMEL H.W., *Introduction to the use of MicroTran® and other EMTP versions, Notes used in Graduate Course ELEC 553 'Advanced Power Systems Analysis'*: <http://www.ece.ubc.ca/power/e553data/e553.pdf>.
32. DUBÉ L., *Models in ATP. Language manual*, Feb. 1996.
33. DUBÉ L., BONFANTI I., *MODELS. A new simulation tool in the EMTP*, European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol. 2, No. 1, January/February 1992, 45-50.
34. DUDURYCH I., ROSOŁOWSKI E., *Analysis of Overvoltages on Overhead Ground Wires of EHV Power Transmission Line under Single-Phase-to-Ground Faults*, Electric Power Systems Research, Vol. 53, January 2000, s. 105-111.
35. DUDURYCH I.M., GALLAGHER T.J., ROSOŁOWSKI E., *Arc Effect on Single-phase Reclosing Time of an UHV Power Transmission Line*, IEEE Transactions Power Delivery, Vol. , No. ?,
36. ДЖУВАРЛЫ Ч.М., ДМИТРИЕВ Е.В., *Применение метода характеристик к решению т-проводной линии электропередач*, Изв. АН СССР, Энергетика и Транспорт, № 1, 1967.
37. *Electromagnetic Transients Program (EMTP) Workbook*, Electric Power Research Institute, Palo Alto 1986. EL-4651, Research Project 2149-6.
38. ФИРАГО Б.И., ПАВЛЯЧИК Л.Б., *Теория электропривода*, «Техноперспектива», Минск 2007.
39. FITZGERALD A.E., KINGSLEY C., JR., UMANS S.D., *Electric machinery*, McGraw-Hill, New York, 2003.

-
40. FORSYTHE G.E., MALCOLM M.A., MOLER C.B., *Computer methods for mathematical computations*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, Inc., 1977.
 41. FORTUNA Z., MACUKOW B., WĄSOWSKI J., *Metody numeryczne*, Warszawa, WNT, 1993.
 42. FURST G., *Induction and synchronous motor simulation using ATP/U.M. type 1, 3 and 4. A brief review*, European ATP-EMTP Users Group e.V Meeting, Wrocław, 2000.
 43. GALAS G.J., DOYLE J.C., GLOVER K., PACKARD A., SMITH R., *μ -Analysis and Synthesis Toolbox For Use with MATLAB. User's Guide*, The MathWorks, Inc. 1998.
 44. GÓMEZ P., URIBE F.A., *The numerical Laplace transform: An accurate technique for analyzing electromagnetic transients on power system devices*, Electrical Power and Energy Systems 31 (2009) 116-123.
 45. GLOVER J.D., SARMA M.S., *Power system analysis and design*, Brooks/Cole, 2002.
 46. GOGOLEWSKI Z., KUCZEWSKI Z., *Napęd elektryczny*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1971.
 47. GOLDBERG S., HORTON W.F., TZIOUVARAS D., *A computer model of the secondary arc in single phase operation of transmission line*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4 No. 1, January 1989, s. 586-595.
 48. HAGINOMORI E., *Highly Sophisticated Electric Power Systems*, Japanese ATP User Group: <http://www.jaug.gr.jp/atp/index.shtml>.
 49. HENSCHER S., IBRAHIM A.I., DOMMEL H.W., *Transmission line model for variable step size simulation algorithms*, Electrical Power and Energy Systems. 21 (1991), s. 191-198.
 50. HØIDALEN H.K., SPORILD R., *Modeling of phase-shift zigzag transformers in ATP*. EEUG Meeting, Trondheim, 2004.
 51. HØIDALEN H.K., SPORILD R., *Using Zigzag Transformers with Phase-shift to reduce Harmonics in AC-DC Systems*, Proc. Int. Conf. on Power System Transients, IPST 2005, Montreal, IPST05_Paper044.
 52. HOLMES D.G., LIPO T.A., *Pulse width modulation for power converters, Principles and practice*. IEEE Press, Piscataway, 2003.
 53. HUMPAGE W.D., *Z-Transform Electromagnetic Transient Analysis in High-Voltage Networks*, Peter Peregrinus Ltd., London, 1982.
 54. IBRAHIM A.I., *Frequency dependent network equivalents for electromagnetic transients studies: a bibliographical survey*, Electrical Power and Energy Systems. 25 (2003), s. 193-199.
 55. IBRAHIM A.I., HENSCHER S., LIMA A.C., DOMMEL H.W., *Application of a new EMTP line model for short overhead lines and cables*, Electrical Power and Energy Systems. 24 (2002), s. 639-645.
 56. *IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*, IEEE Std C37.111-1999.
 57. IŻYKOWSKI J., *Fault location on power transmission lines*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008.
 58. JACKSON L.B., *Digital filters and signal processing*, Kluwer Academic Publisher, Boston 1986.
 59. JASICKI Z., *Zjawiska nieustalone w układach elektroenergetycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1969.
 60. KACEJKO P., MACHOWSKI J., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 2002.
 61. KACZOREK T., *Wektory i macierze w automatyce i elektrotechnice*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1998.
 62. КАДОМСКАЯ К.П., ЛЕВИНШТЕЙН М.Л., ШТЕРЕНБЕРГ Г.П., *О решении уравнений длинной линии электропередачи на математических машинах непрерывного и дискретного действия*, Изв. АН СССР, Энергетика и Транспорт, №4, 1963.

-
63. KASZTENNY B., ROSOŁOWSKI E., *Cyfrowe zabezpieczenie różnicowe transformatora*. Projekt celowy Nr 8 8259 94C/1830, Instytut Energoelektryki PWr. Raport Serii Sprawozdania Nr 39/95, Wrocław, 1995.
 64. KASZTENNY B., ROSOŁOWSKI E., SAHA M.M., HILLSTROM B., *A power transformer model for investigation of protection schemes*, Proc. Int. Conf. on Power System Transients, IPST 1995, Lisbon, Portugal, s. 136-141.
 65. KĄCKI R., *Równania różniczkowe cząstkowe w zagadnieniach fizyki i techniki*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1989.
 66. KIELBASIŃSKI A., SCHWETLICK H., *Numeryczna algebra liniowa*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1992.
 67. KIZILCAY M., PNIOK T., *Digital simulation of fault arcs in power system*, European Transactions on Electric Power, Vol. 1, January 1991, s. 55-60.
 68. KIZILCAY M., *Review of solution methods in ATP-EMTP*, EEUG News, Feb-May 2001, s. 25-36.
 69. KUDREWICZ J., *Nieliniowe obwody elektryczne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1996.
 70. KURZAWA S., *Liniowe obwody elektryczne*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1971.
 71. LAGACE P.J., VOUNG M.H., AL.-HADDAD K., *A time domain model for transient simulation of synchronous machines using phase coordinates*, Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE (2006), 6 pp.
 72. LATEK W., *Teoria maszyn elektrycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1987.
 73. LAUW H.K., MEYER W.S., *Universal machine modeling for representation of rotating electric machinery in an electromagnetic transients program*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.6, June 1982, s. 1342-1351.
 74. LEON F.D., SEMLYEN A., *Complete transformer model for electromagnetic transients*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, January 1994, s. 231-239.
 75. LIN J., MARTI J.R., *Implementation of the CDA procedures in the EMTP*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 2, May 1990, s. 394-401.
 76. MACHOWSKI J., BERNAS S., *Stany nieustalone i stabilność systemu elektroenergetycznego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1989.
 77. MACHOWSKI J., BIALEK J., BUMBY J., *Power System Dynamics, Stability and Control*. New York, John Wiley & Sons, 2008.
 78. MARTI J.R., *Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.1, January 1982, s. 147-155.
 79. MARTI J.R., LIN J., *Suppression of numerical oscillations in the EMTP*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No.2, May 1989, s. 739-745.
 80. MARTI J.R., LOUIE K.W., *A phase-domain synchronous generator model including saturation effect*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February 1997, s. 222-227.
 81. MARTI L., *Low-order approximation of transmission line parameters for frequency-dependent models*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.11, November 1983, s. 3582-3589.
 82. MARTI L., *Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices*, IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 3, No.3, July 1988, s. 1099-1106.
 83. MARTINEZ J.A., *EMTP simulation of a digitally-controlled static var system for optimal load compensation*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No.3, July 1995, s. 1408-1415.

84. MARTINEZ J.A., JOHNSON B., GRANDE-MORAN C., *Parameter determination for modeling system transients – Part IV: Rotating machines*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005, s. 2063-2072.
85. *MATLAB user's guide*. The Math Works Inc., Natick, MA, USA, 2000.
86. MENEMENLIS N., MAHARSI Y.H.: *Real-time implementation of a CCVT includeing a noniterative dynamic hysteresis model*, Second International Conference on Digital Power System Simulators – ICDS'97, Montreal, May 28-30, 1997, s. 111-116.
87. MEYER W.S., DOMMEL H.W., *Numerical modelling of frequency-dependent transmission line parameters in an electromagnetic transients program*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-93, Sept./Oct. 1974, s. 1401-1409.
88. MOHAN N., UNDELAND T.M., ROBBINS W.P., *Power electronics. Converters, applications and design*, John Wiley & Sons, Inc. 2003.
89. MORENO P., RAMIREZ A., *Implementation of the numerical Laplace transform: a review*, Task Force on Frequency Domain Methods for EMT Studies, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, October 2008, s. 2599-2609.
90. NGUYEN H.V., DOMMEL H.W., MARTI J.R., *Direct phase-domain modeling of frequency-dependent overhead transmission lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, July 1997, s. 1335-1342.
91. NODA T., NAGAOKA N., AMETANI A., *Phase domain modeling of frequency-dependent transmission lines by means of an ARMA model*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996, s. 401-411.
92. NODA T., TAKENAKA K., INOUE T., *Numerical integration by the 2-stage diagonally implicate Runge-Kutta metod for Electromagnetic Transient Simulation*, IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 24, No. 1, 2009, s. 390-399.
93. NOWAK M., BARLIK R., *Poradnik inżyniera energoelektronika*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1998.
94. OGRODZKI J., *Komputerowa analiza układów elektronicznych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1994.
95. ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003.
96. OSIOWSKI J., *Zarys rachunku operatorowego. Teoria i zastosowania w elektrotechnice*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1972.
97. OSIOWSKI J., SZABATIN J., *Podstawy teorii obwodów*, T. I, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1992.
98. OSIOWSKI J., SZABATIN J., *Podstawy teorii obwodów*, T. II, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1993.
99. OSIOWSKI J., SZABATIN J., *Podstawy teorii obwodów*, T. III, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1995.
100. OSOWSKI S., *Modelowanie układów dynamicznych z zastosowaniem języka SIMULINK*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999.
101. PASZEK W., *Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, WNT, Warszawa 1986.
102. PLAMITZER A., *Maszyny elektryczne*, WNT, Warszawa, 1976.
103. PRESS W.H., TEUKOLSKY S.A., VETTERLING W.T., FLANNERY B.P., *Numerical recipes in C. The art of scientific computing*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
104. PRIKLER L., HØIDALEN H.K., *ATPDRAW version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP. Users' Manual*. SINTEF Energy Research, Norway, 2002.
105. ROSOŁOWSKI E., *Разработка и исследование метода имитационного моделирования электромагнитных переходных процессов в электрических системах для анализа условий*

- функционирования быстродействующих защит*, Praca Doktorska, Politechnika Kijowska, Kijów, 1978.
106. ROSOŁOWSKI E., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w automatyce zabezpieczeniowej*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002.
 107. SACHDEV M.S., NAGPAL M. ADU T., *Interactive Software for Evaluating and Teaching Digital Relaying Algorithms*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, Feb. 1990, s. 346-352.
 108. СЕГЕДА М.С., *Електричні мережі та системи*. Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, Львів 2007.
 109. SIDHU T.S., HFUDA M. SACHDEV M.S., *Generating Relay Models for Protection Studies*, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 11, No. 4, Oct. 1998, s. 33-38.
 110. СИГОРСКИЙ В.П., ПЕТРЕНКО А.И., *Алгоритмы анализа электронных схем*, СОВЕТСКОЕ РАДИО, Москва 1976.
 111. SONG Y.H., AGGARWAL R.K., JONES A.T., *Digital Simulation of Fault Arcs Long-Distance Compensated Transmission Systems with Particular Reference to Adaptive Autoreclose*, European Transactions on Electric Power, Vol. 5, No. 5. Sept/Oct 1995, s.315-324.
 112. STEIGLITZ K., *Wstęp do systemów dyskretnych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1977.
 113. STOER J., BULRISCH R., *Wstęp do analizy numerycznej*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1987.
 114. TADEUSIEWICZ M., *Metody komputerowej analizy stałoprądowej nieliniowych układów elektronicznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1991.
 115. TAPIA A., TAPIA G., OSTOLAZA J.X., SAENZ J. R., *Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator*, IEEE Transactions on Power Energy Conversion, Vol. 18, No. 2, June 2003, s. 194-204.
 116. TAPIA G., TAPIA A., OSTOLAZA J.X., *Two alternative modeling approaches of wind farm active and reactive power performances*, IEEE Transactions on Power Energy Conversion, Vol. 21, No. 4, December 2006, s. 909-920.
 117. TEWARSON R.P., *Sparse matrices*, Academic Press, New York, 1973.
 118. THAM M.T., *Internal model control. Lecture notes on Robust Control*. Dostępny: <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/robust/imc.pdf>
 119. TOKIC A., UGLEŠIC I., JAKL F., *An algorithm for calculations of low frequency transformer transients*, International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003 in New Orleans, USA, paper 9a-2.
 120. TRAN-QUOC T., PIERRAT L., MONTMEAT A., KUENY J.L., *Modeling of nonlinear elements in a digital simulator, Part I: Implementation*, Second International Conference on Digital Power System Simulators – ICDS’97, Montreal, May 28-30, 1997, s. 99-104.
 121. *Tutorial on Electromagnetic Transient Program Applications to Power System Protection*, IEEE Power Engineering Society, 01TP150, 2000.
 122. УЛЬЯНОВ С.А., *Электромагнитные переходные процессы в электрических системах*, ЭНЕРГИЯ, Москва 1970.
 123. WATSON N., ARRILLAGA J., *Power systems electromagnetic transients simulation*, The Institution of Electrical Engineers, London, 2003.
 124. WATSON N.R., IRWIN G.D., *Electromagnetic transient simulation of power systems using root-matching techniques*, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, Vol. 145, No. 5, September 1998, s. 481-486.
 125. WATSON N.R., IRWIN G.D., *Comparison of root-matching techniques for electromagnetic transient simulation*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, April 2000, s. 629-634.

126. WEDEPOHL L.M., *Application of matrix methods to the solution of travelling wave phenomena in polyphase systems*, Proc. IEE, pt C, Vol. 110 (12) 1963, s. 2200-2212.
127. WEEDY B.M., CORY B.J., *Electric power systems*, John Wiley & Sons, Chichester, 1999.
128. WILCOX D.J., *Numerical Laplace transformation and inversion*, Int. J. Elect. Eng. Educ. 1978, 15, s. 247-265.
129. WINKLER W., WISZNIEWSKI A., *Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 2005.
130. WISZNIEWSKI A., *Przekładniki w elektroenergetyce*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1992.
131. WOJTKIEWICZ A., *Elementy syntezy filtrów cyfrowych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1984.
132. Working Group B5.17, *Relay Software Models for Use with Electromagnetic Transient Analysis Programs*, CIGRE 2003.
133. Working Group C-5 of the Systems Protection Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee, *Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000, pp. 62-72.

Strony internetowe:

134. Alan Philips, <http://www.lancs.ac.uk/staff/steveb/cpaap/pfe/default.htm> - edytor tekstowy PFE.
135. <http://www.ee.mtu.edu/atp/> - Kanadyjsko-Amerykańska Grupa Użytkowników EMTP.
136. atp-empt@listserv.nodak.edu - lista dyskusyjna ATP-EMTP.
137. <http://www.eeug.de> - Europejska Grupa Użytkowników EMTP.
138. <http://www.emtp.org/> - Alternative Transients Program (ATP).
139. <http://www.elkraft.ntnu.no/atpdraw/> - strona twórców programu ATPDraw.
140. <http://www.emtp.com/> - CEATI International Inc. (EMTP-RV)
141. <http://www.microtran.com> - wersja UBC (University of British Columbia, Kanada).
142. <http://www.pscad.com/> - PSCAD/EMTDC (Manitoba HVDC Research Centre).
143. <http://www.digsilent.com/> - DiGSILENT PowerFactory.
144. <http://etap.com/> - ETAP Enterprise Solution for Electrical Power Systems.
145. <http://www.netomac.com/index.html> - NETOMAC (Siemens).
146. <http://www.rtds.com/> - RTDS (Real Time Digital Simulator, symulator czasu rzeczywistego).
147. http://www.pes-psrc.org/Reports/Apublications_new_format.htm - EMTP Tutorial sponsored by the Power System Relaying Committee IEEE PES.
148. <http://www.ece.uidaho.edu/ee/power/EE524/> - Law J. D., notatki do wykładu EE524, 'Transients in Power Systems'.
149. <http://www.ece.utexas.edu/~grady/EE394J.FALL02.html> - Grady W.M., notatki do wykładu EE394J 'Electrical Transients in Power Systems'.
150. <http://www.ece.utexas.edu/~grady/PNG.html> - Grady W.M, ATP/ATPDraw Materials.
151. <http://www.pqsoft.com/top/index.htm> - TOP, The Output Processor[®], developed by Electrotek Concepts[®].
152. <http://www.mathworks.com/> - The MathWorks, Inc.
153. <http://www.ipst.org/> - home page of the International Conference on Power Systems Transients (IPST), dostępnych jest wiele publikacji.
154. <http://thunderbird.kuee.kyoto-u.ac.jp/> - Japońska Grupa Użytkowników EMTP.