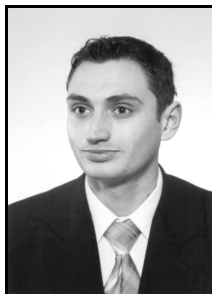


Jarosław SZYMAŃSKI, Andrzej GRACZKOWSKI, Krzysztof WALCZAK
POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

Wpływ jakości oleju na spektrum napięcia powrotnego w układach modelowych papier-olej

Mgr inż. Jarosław SZYMAŃSKI

Doktorant na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 20 publikacji z zakresu diagnostyki układów izolacyjnych transformatorów energetycznych.



e-mail: jaroslawszymanski@wp.pl

Dr inż. Andrzej GRACZKOWSKI

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, Pracownik Instytutu Elektroenergetyki. Autor ponad 60 publikacji z zakresu materiałoznawstwa elektrotechnicznego, diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych, spektroskopii dielektrycznej, rozkładu pola elektrycznego przy napięciu stałym w kablu.



e-mail: andrzej.graczkowski@put.poznan.pl

Dr inż. Krzysztof WALCZAK

Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej, Pracownik Instytutu Elektroenergetyki. Autor ponad 70 publikacji z zakresu diagnostyki urządzeń wysokonapięciowych oraz ochrony przeciwprzepięciowej.



e-mail: krzysztof.walczak@put.poznan.pl

Streszczenie

Zbyt uproszczona interpretacja spektrum napięcia powrotnego może prowadzić do błędnej oceny zawilgocenia układu izolacyjnego papier-olej. Najwięcej kontrowersji wzbudza nieuwzględnienie w interpretacji wpływu jakości oleju na parametry spektrum polaryzacyjnego (system pomiarowy Tettex 5462 plus firmowy program do interpretacji wyników). W badaniach wykorzystano symulację komputerową oraz układy modelowe izolacji papierowo-olejowej do określenia wpływu rezystywności oleju na spektrum napięcia powrotnego. Wyniki przedstawiono w niniejszym artykule.

Słowa kluczowe: spektrum napięcia powrotnego, rezystywność oleju.

Influence of oil quality on recovery voltage spectrum of oil-paper insulation models

Abstract

Very simple interpretation of recovery voltage spectrum can be the reason for incorrect evaluation of moisture content in oil-paper insulation system. The software for the recovery voltage spectrum analysis offered by Tettex does not take into consideration such important parameter like oil resistivity. In research authors used computer simulation and models of oil-paper insulation system in order to determine influence of oil quality on recovery voltage spectrum. The results of the investigations were presented in this paper.

Keywords: recovery voltage spectrum, oil resistivity, equivalent circuit of insulation.

1. Wstęp

Zawilgocenie izolacji transformatorów, szczególnie sieciowych bardzo dużej mocy, uważane jest za jeden z najpoważniejszych problemów eksploatacyjnych. Wysoki poziom zawilgocenia izolacji powoduje znaczne przyspieszenie procesu jej degradacji, natomiast przekroczenie krytycznego zawilgocenia izolacji papierowej może prowadzić do wystąpienia groźnego zjawiska gwałtownego wydzielania się pęcherzyków pary wodnej (z ang. *bubble effect*). Ocena zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej jest zatem podstawowym i szczególnie ważnym elementem diagnostyki transformatorów energetycznych [1-4].

Na przestrzeni ostatnich lat coraz bardziej rozpowszechniona stała się ocena zawilgocenia przy wykorzystaniu metod opartych na analizie tak zwanej odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego. Do grupy tych metod zalicza się, między innymi metodę wykorzystującą odpowiedź dielektryczną w dziedzinie czasu, opartą na pomiarze napięcia powrotnego – *RVM* [5-8].

W przypadku metod polaryzacyjnych kluczowym elementem oceny zawilgocenia układu izolacyjnego papier-olej jest poprawna interpretacja uzyskanych wyników, polegająca na porównaniu odpowiedzi badanego układu izolacyjnego z odpowiedzią modelu wzorcowego. Standardowy program do interpretacji napięcia powrotnego *RVM Data Analysis* bazuje na wykorzystaniu prostych wzorców laboratoryjnych, w postaci impregnowanych olejem płaskich próbek papieru o znanym stopniu zawilgocenia. W takim przypadku dominująca stała czasowa rzeczywistego układu izolacyjnego, na przykład transformatora, składającego się z papieru i preszpanu impregnowanego olejem oraz oleju jest odnoszona do stałej czasowej układu wzorcowego zawierającego sam papier impregnowany olejem. Interpretacja taka jest bardzo uproszczona i może być przyczyną błędnej oceny zawilgocenia izolacji. Program do analizy spektrum napięcia powrotnego *RV*, zaproponowany przez firmę Tettex, uwzględnia jedynie temperaturę oraz zawilgocenie papieru, jako dwa decydujące czynniki mające wpływ na kształt spektrum, nie uwzględnia natomiast geometrii układu oraz wpływu jakości oleju [9].

Celem przeprowadzonych symulacji komputerowych oraz badań modelowych było określenie wpływu obecności oleju i jego jakości na kształt charakterystyki spektrum napięcia powrotnego oraz ocena poprawności wyznaczenia zawilgocenia przy wykorzystaniu programu *RVM Data Analysis*.

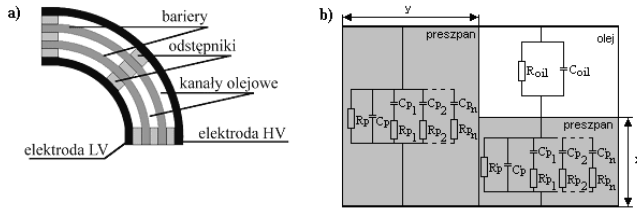
2. Symulacja komputerowa

Model matematyczny układu izolacyjnego transformatora

Izolacja główna uzwojeń transformatora składa się z preszpanowanych barier i odstępników oraz przestrzeni olejowych - jak pokazano na rysunku 1a. W celu zamodelowania odpowiedzi dielektrycznej takiego układu można posłużyć się uproszczonym modelem X-Y. Parametr X reprezentuje względną zawartość barier, a parametr Y względną zawartość odstępników. Każdemu z elementów modelu X-Y (olej, bariery i odstępniki) można przypisać odpowiedni model w postaci obwodu zastępczego, jak pokazano na rysunku 1b. Parametry obwodu, w tym modelu, muszą zostać odpowiednio wyskalowane, w zależności od przyjętej geometrii (X-Y) oraz pojemności geometrycznej układu [10].

Dane potrzebne do matematycznego zamodelowania spektrum napięcia powrotnego układu izolacyjnego uzyskano wykorzystując pomiary odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości próbek preszpanu o różnym stopniu zawilgocenia. Na podstawie wyników pomiarów odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości $C(\omega)$, wyznaczono odpowiednio parametry sche-

matów zastępczych. Procedura wyznaczania parametrów schematu zastępczego, przy wykorzystaniu pomiarów odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości została szczegółowo przedstawiona w [10].

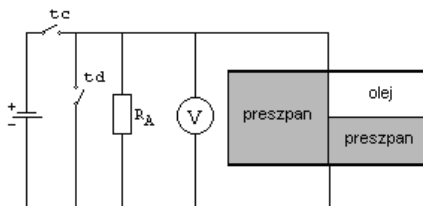


Rys. 1. Układ izolacyjny transformatora (a) oraz jego reprezentacja za pomocą modelu X-Y i schematu zastępczego (b) [10]
 Fig. 1. Cross-section of main insulation of a power transformer (a) and its representation by means of X-Y model combined with equivalent circuits (b) [10]

Obliczenia spektrum napięcia powrotnego

Przedstawiony wcześniej model matematyczny układu izolacyjnego transformatora został zaimplementowany w programie PSpice celem przeprowadzenia symulacji komputerowej. Model umożliwia wyznaczenie odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie czasu (RVM, PDC) i częstotliwości (FDS). W dalszej części artykułu przedstawiono zastosowanie modelu do badania wpływu rezystywności oleju na spektrum napięcia powrotnego RVM.

Schemat układu do wyznaczania napięcia powrotnego pokazano na rysunku 2. Rezystor R_A reprezentuje rezystancję miernika oraz rezystancję upływu. Spektrum napięcia powrotnego wyznaczono dla czasów ładowania t_c od 0,02 s do 2000 s, przyjmując czas rozładowania t_d równy połowie czasu ładowania. Parametry obliczeń zestawiono w tabeli 1.



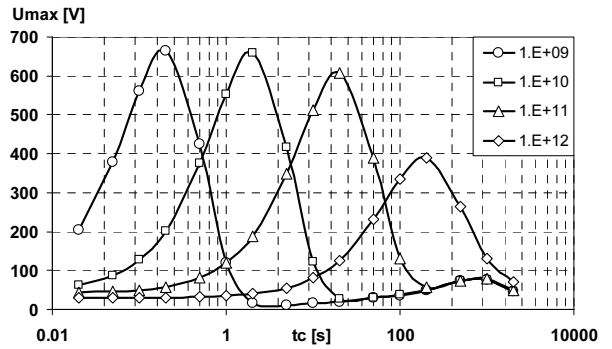
Rys. 2. Schemat układu do wyznaczania napięcia powrotnego
 Fig. 2. Setup of the recovery voltage test

Tab. 1. Parametry obliczeń
 Tab. 1. Parameters of calculations

Parametr	Wartość
względna zawartość barier X	20 %
względna zawartość odstępników Y	20 %
Temperatura	20 °C
rezystancja równoległa R _A	10 ¹⁰ Ω
rezystywność oleju	10 ⁹ – 10 ¹² Ωm

Wyniki symulacji komputerowej

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji odpowiedzi dielektrycznej matematycznego modelu X-Y izolacji papier-olej dla różnych wartości rezystywności oleju.



Rys. 3. Wpływ rezystywności oleju [Ωm] na spektrum napięcia powrotnego
 Fig. 3. Dependence of the RV spectra on the oil resistivity

Jak pokazano na rysunku 3, wpływ rezystywności oleju na charakterystykę spektrum napięcia powrotnego jest bardzo istotny. Dla niewielkiej rezystywności oleju w spektrum napięcia powrotnego występują dwa maksima. Wzrost rezystywności powoduje przesuwanie pierwszego (lewego) maksimum w kierunku dłuższych czasów, z jednoczesnym zmniejszeniem jego wartości. Przy pewnej wystarczająco dużej rezystywności oleju, w spektrum występuje tylko jedno maksimum. Można więc wnioskować, że drugie (prawe) maksimum, zależne od zwilgocenia preszpanu, zostaje „zakryte” przez dominujące maksimum zależne od oleju. Wtedy w spektrum pojawia się tylko jedno maksimum przesunięte w stosunku do maksimum zależnego od zawilgocenia preszpanu.

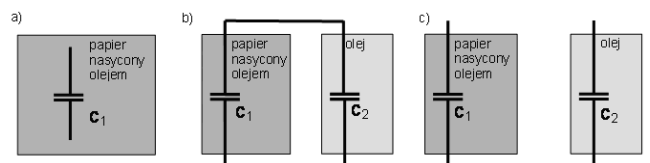
W analizowanym przypadku wartość zawilgocenia wyznaczona przy pomocy programu RVM Data Analysis nie odpowiada rzeczywistej wartości zawilgocenia izolacji celulozowej. Interpretacja wyników, polegająca na określeniu tzw. dominującej stałej czasowej jest w tym przypadku zbyt uproszczona i prowadzi do błędnego określenia zawilgocenia izolacji.

3. Model laboratoryjny izolacji papier-olej

3.1. Obiekty i metodyka badań

Objektami badań były przygotowane modele łączące w sobie izolację papierową syconą olejem oraz olej, przedstawione na rysunku 4. W skład modelu izolacji wchodziła zwijka papierowa zaimpregnowana nowym olejem mineralnym oraz próbki oleju mineralnego pochodzące z eksploatowanych transformatorów energetycznych, różniące się jakością. Zawilgocenie zwijki papierowej impregnowanej olejem określone na podstawie analizy jej odpowiedzi dielektrycznej wynosiło 1,1%. Próbkę oleju zostały umieszczone w kondensatorze pomiarowym służącym do wyznaczania parametrów elektrycznych cieczy izolacyjnych.

Rozpatrując układ izolacyjny transformatora składający się z preszpanowych barier i odstępników oraz kanałów olejowych można stwierdzić, że olej współpracuje z materiałami celulozowymi w układzie równoległego (odstępnik-papier) i szeregowego (bariera-olej) połączenia tych elementów. Postanowiono oddzielnie przeanalizować te dwa przypadki.



Rys. 4. Badane modele izolacji: a – zwijka papierowa sycona olejem, b – równoległe połączenie zwijki oraz oleju, c – szeregowo połączenie zwijki oraz oleju
 Fig. 4. Insulations models: a – paper bundle and oil connected in parallel, c – paper bundle and oil connected in series

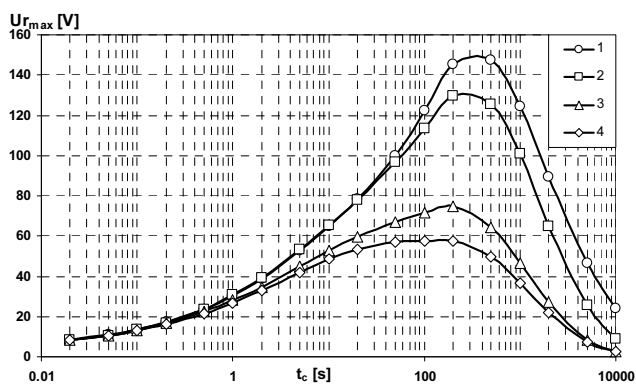
Badania wpływu obecności i jakości oleju na spektrum polaryzacyjne modelu układu izolacyjnego papier sycony olejem plus olej wykonano przy użyciu miernika napięcia powrotnego *RVM* typu 5462. Analizę wyników wykonano przy użyciu programu *RVM Data Analysis*.

3.2. Wyniki badań i ich interpretacja

Na rysunku 5 przedstawiono widma polaryzacyjne zwijki z papieru syconego olejem oraz modeli powstałych z równoległego połączenia tej zwijki z próbkami oleju o różnej rezystywności.

W przypadku modelu izolacji zawierającego jedynie zwijkę z papieru syconego olejem (model 1) analiza spektrum wykazała zawilgocenie na poziomie 1,1%. Spektra polaryzacyjne modeli składających się z równoległego połączenia papierowej zwijki i próbek oleju (modele 2, 3 i 4) odbiegają od odpowiedzi dielektrycznej samej zwijki. Różnica jest zauważalna nie tylko w wartości maksymalnej spektrum *RV*, ale co bardzo istotne, również w czasie ładowania, dla którego występuje maksimum charakterystyki spektrum *RV*, co odpowiada dominującej stałej czasowej układu.

Zarówno wartość maksymalna charakterystyki spektrum *RV*, jak i dominująca stała czasowa, zależą od rezystywności zastosowanego oleju w modelu. Użycie w modelu oleju o niższej rezystywności powoduje obniżenie wartości maksymalnej charakterystyki spektrum *RV* oraz przesunięcie dominującej stałej czasowej obiektu w kierunku krótszych czasów ładowania. Im rezystywność oleju jest mniejsza, tym bardziej spłaszczone są charakterystyki. W przypadku modelu 4, zawierającego olej o najniższej rezystywności, zaczynają się nawet ekspanować dwa maksima.

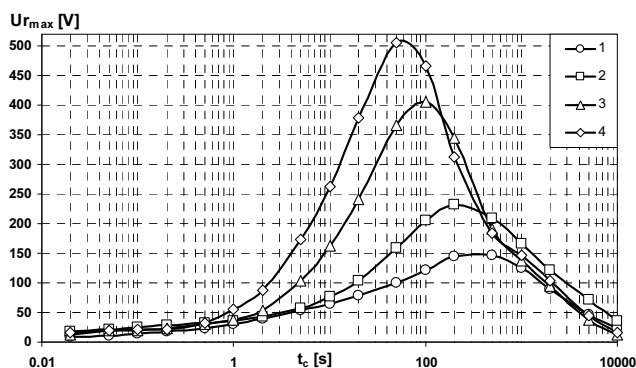


Rys. 5. Spektra polaryzacyjne zwijki z papieru syconego olejem (1) oraz modeli utworzonych przez równoległe połączenie zwijki syconej olejem z próbka oleju o rezystywności $323 \cdot 10^{12} \Omega m$ (2), $134 \cdot 10^{12} \Omega m$ (3), $54 \cdot 10^{12} \Omega m$ (4)
Fig. 5. Polarization spectra of paper bundle (1), paper bundle and oil connected in parallel – resistivity of oil: $323 \cdot 10^{12} \Omega m$ (2), $134 \cdot 10^{12} \Omega m$ (3), $54 \cdot 10^{12} \Omega m$ (4)

Na rysunku 6 przedstawiono spektra polaryzacyjne modeli izolacji papierowo-olejowej składających się z samego papieru syconego olejem (model 1) oraz szeregowego połączenia papieru syconego olejem oraz próbek oleju (modele 2, 3, 4).

Jak wynika z rysunku, obecność oleju i jego rezystywność, w przypadku szeregowego połączenia papieru syconego olejem oraz próbek oleju, ma decydujący wpływ na spektrum napięcia powrotnego. W tym przypadku rezystywność oleju ma znaczący wpływ nie tylko na wartość maksymalną charakterystyki spektrum *RV*, lecz również na dominującą stałą czasową. Zastosowanie w modelu oleju o niższej rezystywności powoduje zwiększenie wartości maksymalnej charakterystyki spektrum polaryzacyjnego oraz znaczne przesunięcie dominującej stałej czasowej w kierunku krótszych czasów ładowania. Dla modelu izolacji zawierającego jedynie zwijkę z papieru syconego (model 1) analiza spektrum wykazała zawilgocenie 1,1%, podczas gdy dla modelu zawierającego olej o niskiej jakości (model 4) wyznaczone zawilgocenie wynosi aż 1,9%. Jest to wartość bardzo zawyżona w stosunku do rzeczywistego zawilgocenia izolacji stałej w modelu.

W przypadku modeli izolacji powstałych z szeregowego połączenia papieru syconego olejem i próbek oleju widoczne jest jedno maksimum. Czas jego wystąpienia może być zdeterminowany w znacznym stopniu rezystywnością oleju, a w mniejszym stopniu zawilgoceniem izolacji stałej. Analizując wyniki badań modelowych jak i symulacji komputerowych można stwierdzić, że maksimum zależne od zawilgocenia papieru (model 1) zostało zakryte przez dominujące maksimum zależne od parametrów oleju.



Rys. 6. Spektra polaryzacyjne zwijki z papieru syconego olejem (1) oraz modeli utworzonych przez szeregowe połączenie zwijki syconej olejem z próbka oleju o rezystywności $323 \cdot 10^{12} \Omega m$ (2), $134 \cdot 10^{12} \Omega m$ (3), $54 \cdot 10^{12} \Omega m$ (4)
Fig. 6. Polarization spectra of paper bundle (1), paper bundle and oil connected in series – resistivity of oil: $323 \cdot 10^{12} \Omega m$ (2), $134 \cdot 10^{12} \Omega m$ (3), $54 \cdot 10^{12} \Omega m$ (4)

4. Wnioski

Wyniki symulacji komputerowej oraz badań modelowych potwierdzają kontrowersje dotyczące interpretacji wyników przyjętej w metodzie *RVM*. Dominująca stała czasowa izolacji, określona jako czas wystąpienia maksimum w spektrum *RV* zależy nie tylko od zawilgocenia izolacji celulozowej i temperatury, ale także od geometrii układu i rezystywności oleju.

Im gorszy olej zastosowano w modelach izolacji, tym większą wartość zawilgocenia papieru wyznaczono na podstawie analizy spektrum napięcia powrotnego (program *RVM Data Analysis*). Wynika stąd istotny wniosek, że rezystywność oleju, określająca jego jakość, zdecydowanie wpływa na wynik zawilgocenia. Im mniejsza rezystywność oleju, tym większym błędem obciążony jest wynik zawilgocenia papieru.

Z przeprowadzonych badań wynika, że generalnie w spektrum napięcia powrotnego układu izolacyjnego papier-olej występują dwa maksima. Jedno zależne głównie od geometrii i rezystywności oleju, drugie zależne od zawilgocenia preszpanu, dlatego wnioskowanie o zawilgoceniu preszpanu jedynie na podstawie dominującej stałej czasowej nie jest poprawne. W pewnych przypadkach maksima mogą na siebie zachodzić – wówczas widoczne jest tylko jedno maksimum. Położenie pojedynczego maksimum może być wtedy inne niż wynikające z zawilgocenia preszpanu.

5. Literatura

- [1] Bossi A., Dind J.E., Frisson J.M., Khoudiakov U., Ligot H.F.: An International Survey of Failures In Large Power Transformers In Service, Final Report of the CIGRE Working Group 12.05, Electra, 1983, No. 88, s. 21-48.
- [2] Moser H.P., Dahinden V.: Transformerboard II, H. Weidmann AG, Rapperswil, 1987.
- [3] Oommen T.V., Lindgren S.R.: Bubble Evolution from Transformer Overload, Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, 2001, Vol. 1, s. 137-142.
- [4] Morañda H., Mościcka-Grzesiak H., Gielniak J., Neumann S.R., Przybyłek P., Walczak K., Sikorski W., Siodła K., Staniek P.: Bubble

effect – powstawanie i monitorowanie, Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje, Rok 4, 1'2006, s. 166-169.

- [5] Gubanski S.M., Boss P., Csépes G., Der Hauhanessian V., Filipini J., Guinic P., Gäfvert U., Karius V., Lapworth J., Urbani G., Werelius P., Zaengl W.: Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 2003 – Vol. 19, No. 3, s. 12-18.
- [6] Malewski R.: Przegląd metod diagnostycznych transformatorów mocy, International Conference on Power Transformers Transformer 03, Pieczyska 18 – 21 maja 2003, s. 51-64.
- [7] Praca zbiorowa: Transformatory w eksploatacji, Wydawnictwo Energo-Complex, Kwiecień 2007.
- [8] Gäfvert U., Adeen L., Tapper M., Ghasemi P., Jönsson B.: Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain Applied to Diagnostics of Power Transformer, 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 21 – 26, 2006 Xi'an Jiatong University, Xi'an, China.
- [9] Csépes G., Hámos I., Brooks R., Volker K.: Practical Foundations of the RVM (Recovery Voltage Method for Oil/Paper Insulation Diagnosis), 1998 Annual Report. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Atlanta, 1998, vol. 1, s. 345-355.
- [10] Graczkowski A., Walczak K., Szymański J.: Application of Equivalent Circuit In Dielectric Response Analysis of Oil-Paper Insulation System, XIV International Symposium on High Voltage Engineering ISH 2005, Beijing, China, August 25-29, 2005, s. 443.

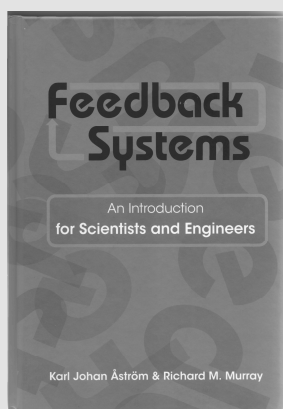
Artykuł recenzowany

RECENZJE

Feedback Systems, An Introduction for Scientists and Engineers

(Układy ze sprzężeniem zwrotnym, wprowadzenie dla naukowców i inżynierów)

Karl Johan Astrom and Richard M. Murray
Princeton University Press, str. 396



Jest to pozycja pod wieloma względami wyjątkowa. Została napisana przez dwóch, o światowej sławie, wybitnych specjalistów z dziedziny teorii sterowania: przez Profesora Uniwersytetu w Lund (Szwecja) i Uniwersytetu Santa Barbara (California, USA) K. J. Astroma oraz Profesora Uniwersytetu Pasadena (California, USA) R. M. Murray.

Jak wynika z podtytułu jest to książka adresowana do naukowców i inżynierów. Pojęciami centralnymi są pojęcia sprzężenia zwrotnego

i sterowania występujące w układach fizycznych, biologicznych, informatycznych oraz w układach społecznych. Struktura tej książki jest różna od powszechnie spotykanej. Autorzy na początku przedstawiają teorię projektowania i analizy układów ze sprzężeniem zwrotnym, opartą na opisie równaniami różniczkowymi i różnicowymi w przestrzeniach stanu a następnie klasyczne metody syntezy układów w dziedzinie częstotliwości.

Książka składa się z dwóch części. Część pierwsza obejmująca pierwszych siedem rozdziałów jest poświęcona tak zwanym „nowoczesnym metodom sterowania” w przestrzeni stanów, a część druga obejmująca następnych pięć rozdziałów jest poświęcona klasycznej teorii sterowania. W rozdziale 1 wprowadzają pojęcie sprzężenia zwrotnego i sterowania. Omawiają istotę tych pojęć i powszechność występowania w różnych procesach w naukach technicznych, biologicznych i społecznych. Podają również przykłady takich układów. Rozdział 2 jest poświęcony modelowaniu układów dynamicznych. Omówione są tu modele układów dynamicznych w postaci równań różniczkowych oraz równań różnicowych, a także zagadnienia symulacji oraz analizy takich układów z nietrywialnymi przykładami z obszaru techniki i nauk biologicznych. Rozdział 3 zawiera nietrywialne przykłady układów dynamicznych liniowych i nieliniowych występujących w naukach technicznych, w biologii i medycynie. Analizie dyna-

miki układów opisanych równaniami różniczkowymi jest poświęcony rozdział 4. Omówiono tu jakościową analizę układów nieliniowych a w szczególności portrety fazowe, punkty równowagi i cykle graniczne. Dużo uwagi poświęcone jest problemom stabilności. Omówiono metody Lapunova badania stabilności układów liniowych i nieliniowych, zasady niezmienniczości Krasovskiego – Lasalle'a, obszary atrakcji oraz projektowanie dynamik układów nieliniowych przy wykorzystaniu sprzężenia zwrotnego. Rozdział 5 jest poświęcony układom liniowym głównie ciągłym o parametrach stałych. Omówiono metody wyznaczania rozwiązań układów opisanych macierzowym równaniem różniczkowym oraz wyznaczania odpowiedzi układu na dowolne wymuszenia. Omówiono też problem linearyzacji układów nieliniowych w otoczeniu punktów równowagi. Układom liniowym ze sprzężeniem zwrotnym jest poświęcony rozdział 6. Wprowadzono tu pojęcie osiągalności, postaci kanoniczne macierzy oraz stabilizację układów za pomocą sprzężeń zwrotnych. Omówiono również problem sterowania układów liniowych przy kwadratowym wskaźniku jakości. Układom liniowym ze sprzężeniem zwrotnym od wyjścia jest poświęcony rozdział 7. Wprowadzono tu pojęcie obserwowalności układu, obserwatorów stanu oraz syntezy układów ze sprzężeniem zwrotnym od estymaty wyznaczonej przez obserwację. Omówiono też filtrację Kalmana oraz dekompozycję Kalmana układu liniowego. W rozdziale 8 rozpoczynającym drugą część książki wprowadzono pojęcie transmitancji operatorowej. Wykazano, że jest ona niezmiennicza względem sprzężenia zwrotnego oraz wprowadzono pojęcia zer i biegunów układu liniowego. Omówiono schematy blokowe układów liniowych, zasady ich przekształcania oraz problem skracania zer i biegunów transmitancji. Wprowadzono również pojęcia transmitancji widmowej i charakterystyk częstotliwościowych. Analizie układów liniowych w dziedzinie częstotliwości jest poświęcony rozdział 9. Podano tu klasyczne kryterium Nyquista, pojęcie zapasu stabilności oraz układów minimalno - fazowych. Podano tu również twierdzenie o małym współczynniku wzmocnienia oraz omówiono znacznie pasywności układu. Podano też metodę funkcji opisującej dla układów nieliniowych.

cd. na str. 715