

Henryk BANACH

POLITECHNIKA LUBELSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI, KATEDRA NAPĘDÓW I MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Pomiarowe wyznaczanie charakterystyk sterowania silników indukcyjnych pracujących z minimalnymi stratami mocy

Dr inż. Henryk BANACH

Pracownik Katedry Napędów i Maszyn Elektrycznych Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Tematyka jego badań obejmuje zagadnienia eksploatacyjnej minimalizacji strat mocy w silnikach i napędach prądu stałego oraz prądu przemiennego poprzez dobór parametrów zasilania, jak również problematykę konstrukcji silników elektrycznych przystosowanych do pracy energooszczędnej.



e-mail: h.banach@pollub.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę pomiaru charakterystyk sterowania indukcyjnych silników klatkowych pracujących z minimalnymi stratami. Opisana metoda bazuje na maksymalizacji mocy wydawanej. Dla założonej wartości mocy pobieranej $P_{in} = \text{const.}$ dokonuje się zmian wartości napięcia zasilającego i wyznacza sprawność silnika, rys. 2. Optymalna wartość napięcia wystąpi dla maksymalnej sprawności tzn. dla maksimum mocy na wale silnika. Zakładając szereg wartości mocy pobieranej można sporządzić charakterystykę sterowania tj. napięcia optymalnego w funkcji mocy na wale $U_{opt} = f(P)$ lub momentu obciążenia $U_{opt} = f(T_s)$. Dużym ułatwieniem przy wykonywaniu pomiarów jest zastosowanie miernika parametrów sieci używanego do pomiaru mocy pobieranej z sieci przez silnik indukcyjny. Pozwala to na szybkie i sprawne przeprowadzenie pomiarów. Wg opracowanej metody sporządzono charakterystyki sterowania dla indukcyjnego silnika klatkowego o mocy $P_N = 1,1 \text{ kW}$ przedstawione na rys. 4 oraz dla indukcyjnego silnika pierścieniowego o mocy $P_N = 0,8 \text{ kW}$, rys. 5. Charakterystyki te wyznaczono dla pięciu wartości częstotliwości napięcia zasilającego $f_s = 10, 20, 30, 40, 50 \text{ Hz}$. Badane silniki były obciążane hamownicą prądu stałego. Opisana metoda może znaleźć zastosowanie w badaniach laboratoryjnych dotyczących napędów energooszczędnych, jak również w praktycznej realizacji sterowania takimi układami.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, charakterystyka sterowania, napięcie optymalne, minimalizacja strat mocy, praca energooszczędna.

Determination of control characteristics of induction motors operating under minimal power losses condition by measurements

Abstract

The paper presents the method for measuring the control characteristics of induction motors operating under minimum power losses condition. The described method is based on the output power maximisation. For the assumed input power value $P_{in} = \text{const.}$, there are made the changes of the supplied voltage value and the motor efficiency is determined, Fig. 2. The optimal voltage value occurs at the maximal efficiency i.e. for the maximum shaft power. Assuming the input power values, it is possible to determine the control characteristic i.e. the optimal voltage as a function of the shaft power $U_{opt} = f(P)$ or the load torque $U_{opt} = f(T_s)$. Measurements can be taken much easier in case of using a power net analyser for measurements of the induction motor input power. This meter allows taking measurements fast and efficiently. Using the described method there were determined the control characteristics for the squirrel cage induction motor of rated power $P_N = 1,1 \text{ kW}$ (Fig. 4) and the slip ring induction motor of rated power $P_N = 0,8 \text{ kW}$ (Fig. 5) for five values of the supply voltage frequency $f_s = 10, 20, 30, 40, 50 \text{ Hz}$. The investigated induction motors were loaded with a d.c. generator. The described method can be used for laboratory test of energy saving drives as well as practical realisation of control for these drives.

Keywords: induction motor, control characteristic, optimal voltage, power losses minimisation, energy saving operation.

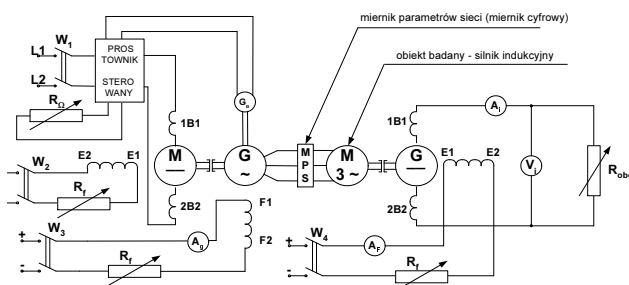
1. Wstęp

W silnikach indukcyjnych pracujących przy zmiennym obciążeniu istnieje możliwość poprawy sprawności przez minimalizację strat mocy [2, 3, 5, 6, 7]. Minimalizację strat mocy uzyskuje się przez dobór wartości napięcia zasilającego stosownie do aktualnego obciążenia. Doboru optymalnej wartości napięcia można dokonać poprzez obliczenia, korzystając z opracowanych metod analitycznych [5, 6, 7], bądź też na drodze pomiarowej. Mimo opracowanych przez autora metody analitycznego wyznaczania optymalnych parametrów zasilania o dokładności przewyższającej inne prezentowane w literaturze [3] oczywistym jest, że pomiarowe wyznaczenie charakterystyki sterowania, tj. optymalnego napięcia w funkcji mocy wydawanej na wale $U_{opt} = f(P)$, bądź też optymalnego napięcia w funkcji momentu na wale $U_{opt} = f(T_s)$ dla konkretnego silnika indukcyjnego będzie zawsze dokładniejsze niż charakterystyka otrzymana za pomocą metod analitycznych, które z założenia dopuszczają pewne uproszczenia, niezbędne do stworzenia tzw. modelu strat. Pomierzone charakterystyki wiążące optymalną wartość napięcia z obciążeniem silnika mogą być określane jako optymalne charakterystyki sterowania.

Możliwość pracy z minimalnymi stratami stwarza układ złożony z silnika indukcyjnego i przemiennika częstotliwości wyposażonego w układ optymalizujący sprawność maszyny indukcyjnej. Wyznaczone na drodze pomiarowej charakterystyki sterowania mogą być zapisane w pamięci układu optymalizującego sprawność silnika, który będzie dobierał optymalną wartość napięcia na wyjściu przemiennika częstotliwości w zależności od obciążenia.

2. Zasada pomiaru

W przypadku, kiedy układ pomiarowy składający się z silnika indukcyjnego i hamownicy zawiera czujnik i miernik momentu, stosowana jest procedura polegająca na utrzymywaniu założonej wartości momentu obciążenia i dokonywaniu zmian wartości napięcia zasilającego [5, 6, 7]. Po przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń wyszukuje się optymalną wartość napięcia zasilającego dla przyjętej wartości momentu obciążenia, kierując się maksymalną sprawnością. Jeżeli układ będzie pracował bez czujnika momentu, tylko przykładowo z wycechowaną hamownicą prądu stałego, to wówczas należy obrać inną strategię wyznaczania charakterystyk sterowania.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk sterowania $U_{opt} = f(P)$ silników indukcyjnych dla różnych częstotliwości napięcia zasilającego składający się z silnika napędowego prądu stałego, trójfazowej prądnicy synchronicznej, badanego silnika indukcyjnego oraz hamownicy prądu stałego

Fig. 1. Measuring system for determining the control characteristic $U_{opt} = f(P)$ of induction motors for different supply voltage frequency, consisting of d.c. drive motor, 3-phase synchronous generator, investigated induction motor and d.c. generator as dynamometer

Sprawność silnika indukcyjnego wyraża się zależnością

$$\eta = \frac{P}{P_{in}} \quad (1)$$

gdzie: P - moc mechaniczna wydawana na wale,
 P_{in} - moc elektryczna pobierana przez silnik z sieci.

Silnik indukcyjny, w którym minimalizowane są straty mocy to silnik pracujący z maksymalną sprawnością. Przy założeniu stałości częstotliwości napięcia zasilającego, $f_s = \text{const.}$, badania zmierzające do znalezienia maksymalnej sprawności mogą być prowadzone przy założeniu stałej mocy wydawanej P bądź stałej mocy pobieranej P_{in} .

W związku z tym należy rozważyć dwa przypadki:

1. $P = \text{const.}$

W tym przypadku badanie sprawności odbywa się przy zachowaniu stałej wartości mocy wydawanej. Zmieniając wartości napięcia zasilającego, porównuje się otrzymane wartości sprawności i poszukuje wartości maksymalnej. Utrzymywanie stałej wartości mocy wydawanej na wale będzie w tym przypadku niesłychanie kłopotliwe.

Moc na wale wyraża się zależnością

$$P = T_s \Omega_m \quad (2)$$

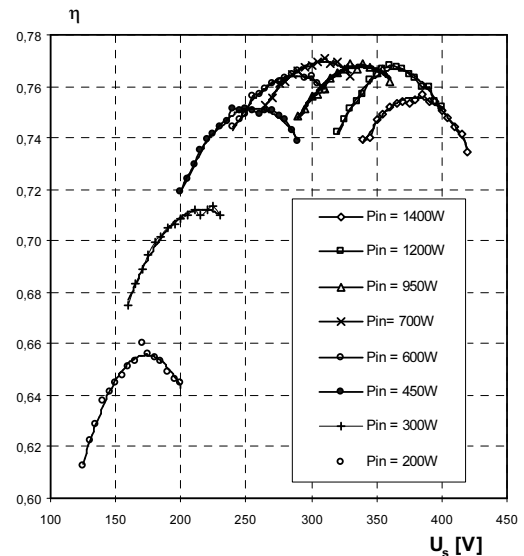
gdzie: T_s - moment na wale silnika,
 Ω_m - prędkość kątowna silnika indukcyjnego.

Każda zmiana napięcia zasilającego wywołuje zmianę poślizgu silnika, czyli zmianę prędkości kątownej. Dla każdej kolejnej zmiany wartości napięcia zasilającego należałoby dokonywać korekty obciążenia, aby zachować stałość iloczynu zgodnie z zależnością (2). Zmiana wartości momentu obciążenia wywołuje z kolei zmianę wartości poślizgu, co sprawia, że dochodzenie do założonej wartości mocy po każdej zmianie napięcia wymagałoby kilku korektur. Taka procedura pomiaru byłaby bardzo uciążliwa i czasochłonna ze względu na konieczność dokonywania przeliczeń, i dlatego będzie nieprzydatną w odniesieniu do silników indukcyjnych.

Należy podkreślić, że uzyskanie maksymalnej sprawności dla $P = \text{const.}$ nastąpi wtedy, gdy moc pobierana z sieci osiągnie minimum. Wynika z tego, że metoda ta oparta jest na minimalizacji mocy pobieranej. Powyższa metoda doskonale sprawdza się w przypadku silników pracujących ze stałą prędkością obrotową, np. silników synchronicznych. Wtedy to bez większych trudności udaje się zachować stałość mocy wydawanej.

2. $P_{in} = \text{const.}$

Zachowanie stałej wartości mocy pobieranej przy jednoczesnych zmianach wartości napięcia zasilającego pozwala na szybkie i sprawne przeprowadzenie pomiarów. Odbywa się to przez przyjęcie kolejnych założonych wartości mocy pobieranej przez silnik. Dla każdej założonej wartości mocy pobieranej P_{in} dokonuje się zmian wartości napięcia zasilającego. Po każdej zmianie wartości napięcia zazwyczaj zmienia się założona moc P_{in} ze względu na zmiany poślizgu i związane z tym zmiany momentu obciążenia. Wówczas przez drobną korektę obciążenia hamownicy można przywrócić założoną wartość mocy pobieranej przez badany silnik. Następnie wyznacza się moc wydawaną na wale i oblicza sprawność [4]. Maksymalną sprawność uzyskuje się w tym przypadku przy maksymalnej mocy wydawanej. Wynika z tego, że metoda ta wykorzystuje maksymalizację mocy wydawanej, rys. 2.



Rys. 2. Sprawność badanego silnika klatkowego w funkcji wartości napięcia zasilającego U_s dla założonych wartości mocy pobieranej z sieci P_{in}

Fig. 2. Efficiency of the investigated squirrel cage induction motor vs. the supplied voltage U_s for the assumed values of input power P_{in}

Zachowanie stałej wartości mocy pobieranej przy korzystaniu z klasycznego układu Arona jest dość kłopotliwe, gdyż wymaga odczytu i sumowania mocy wskazywanej przez dwa watomierze. Można to obejść przez zastosowanie miernika wieloustrajowego do pomiaru mocy trzech faz. Jednak najlepszym rozwiązaniem tego problemu jest użycie cyfrowego miernika parametrów sieci, który można zastosować w układach trójfazowych. Mierzy on moc całkowitą oraz podaje uśrednione skuteczne wartości prądu przewodowego, napięcia oraz współczynnika mocy.



Rys. 3. Widok miernika parametrów sieci N10 firmy „Lumel”

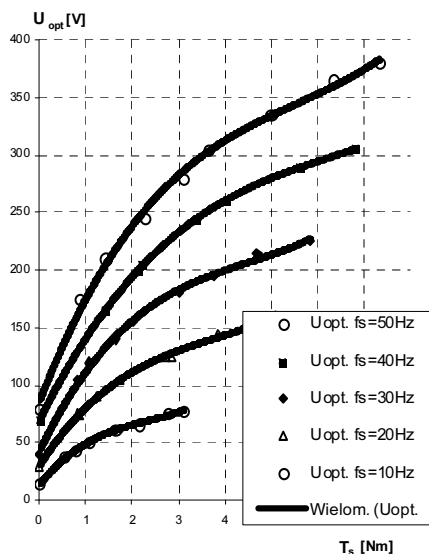
Fig. 3. View of the power network parameter meter N10 by “Lumel”

Autor do swoich badań zastosował miernik parametrów sieci polskiej produkcji typu N 10, którego widok przedstawiono na rys. 3 [8]. Użyto miernika o zakresach pomiarowych: $U = 400 \text{ V}$, $I = 5 \text{ A}$ [1]. W przypadku badania silników o większych mocach, istnieje możliwość zwiększania zakresów pomiarowych miernika przez zastosowanie przekładników prądowych i napięciowych. Miernik ten oprócz pomiarów podstawowych parametrów energii elektrycznej, pozwala również na przeprowadzenia analizy harmonicznych od 1 do 25.

3. Pomiary charakterystyk sterowania

Pomiary charakterystyk sterowania przeprowadzono z zastosowaniem układu przedstawionego na rys. 1. Ponieważ silnik miał być przebadany dla pięciu założonych wartości częstotliwości, $f_s = 10, 20, 30, 40, 50 \text{ Hz}$, zbudowano zespół składający się z silnika prądu stałego i trójfazowej prądnicy synchronicznej. Moc

pobieraną przez silnik indukcyjny mierzono wspomnianym już miernikiem parametrów sieci 3-fazowej N10 firmy „Lumel”.



Rys. 4. Charakterystyki sterowania $U_{opt} = f(T_s)$ dla silnika klatkowego otrzymane na podstawie pomiarów

Fig. 4. Control characteristics $U_{opt} = f(T_s)$ for squirrel cage induction motor obtained from measurements

Charakterystyki sterowania można przedstawiać w funkcji mocy wydawanej, ale w celach porównawczych lepszym jest przedstawienie ich w funkcji momentu na wale. Wymaga to dokonania tylko niewielu przeliczeń.

Badaniom poddano trójfazowy indukcyjny silnik klatkowy o następujących danych znamionowych:

Typ 2Sg 90 S-4
 $P_N = 1,1$ kW
 $U_N = 380$ V
 $I_N = 2,8$ A
 $\cos\varphi_N = 0,8$
 $n_N = 1415$ obr/min
 rodzaj pracy S1

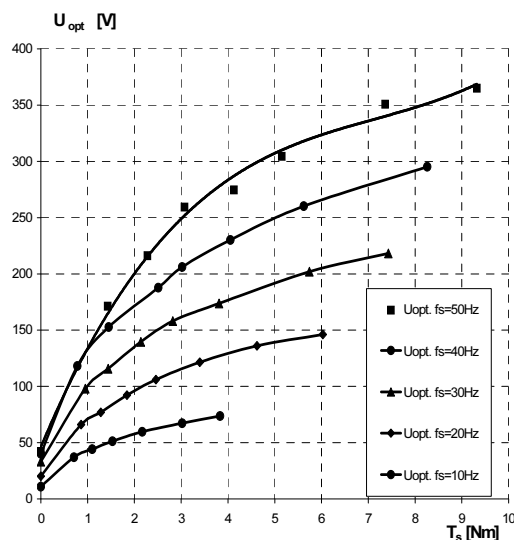
Dla silnika klatkowego wyznaczono charakterystykę sterowania w postaci zależności napięcia optymalnego od momentu na wale, rys. 4. Daje to możliwość porównania charakterystyk otrzymanych dla różnych częstotliwości napięcia zasilającego.

Z wykresu wynika, że dla przyjętej wartości momentu obciążenia wzrost częstotliwości zasilania powoduje zwiększenie optymalnych wartości napięcia zasilającego. Dla malejących częstotliwości napięcia zasilającego zmniejszono obciążenie badanego silnika ze względu na pogarszające się warunki chłodzenia występujące przy obniżonej prędkości obrotowej.

Charakterystyki sterowania sporządzono również dla trójfazowego indukcyjnego silnika pierścieniowego małej mocy o danych:

Typ 2SUDf 100 L-6A
 $P_N = 0,8$ kW
 $U_N = 380$ V
 $I_N = 3,0$ A
 $\cos\varphi_N = 0,61$
 $n_N = 905$ obr/min
 rodzaj pracy S1

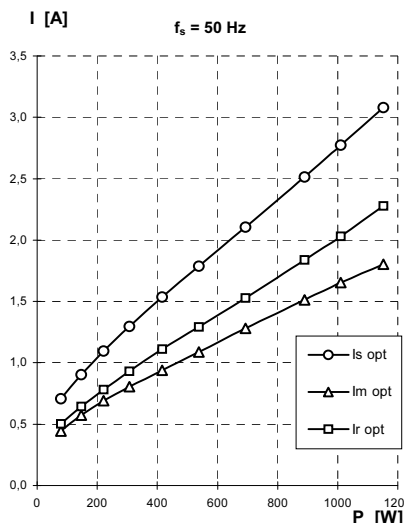
Charakterystyki sterowania dla silnika pierścieniowego przedstawione na rys. 5 mają podobną tendencję zmian jak dla silnika klatkowego.



Rys. 5. Charakterystyki sterowania $U_{opt} = f(T_s)$ dla silnika pierścieniowego otrzymane na podstawie pomiarów

Fig. 5. Control characteristics $U_{opt} = f(T_s)$ for slip ring induction motor obtained from measurements

Otrzymane charakterystyki sterowania mogą być pomocne przy zaprogramowaniu układu optymalizującego przemiennika częstotliwości do sterowania skalarnego napięciowego silnika indukcyjnego.



Rys. 6. Prąd stojana I_s silnika klatkowego i jego główne składowe w funkcji mocy wydawanej P dla $f_s = 50$ Hz; I_m – prąd magnesujący, I_r – sprowadzony prąd wirnika

Fig. 6. Stator current I_s of squirrel cage induction motor and his components vs. output power P for $f_s = 50$ Hz; I_m – magnetizing current, I_r – referred rotor current

W przypadku sterowania skalarnego prądowego konieczna jest znajomość składowych prądu stojana tj. prądu magnesującego i prądu wirnika sprowadzonego na stronę stojana. Prądy te można wyznaczyć na podstawie przeprowadzonych pomiarów niezbędnych do wyznaczenia charakterystyk $U_{opt} = f(P)$ lub $U_{opt} = f(T_s)$. Obliczone składowe prądu stojana dla badanego silnika klatkowego przedstawiono na rys. 6 [2].

4. Wnioski

Opracowana metoda wyznaczania charakterystyk sterowania dla silników indukcyjnych pracujących z minimalnymi stratami

może znaleźć zastosowanie w laboratoriach badawczych, jak również w laboratoriach uczelnianych.

Cechą charakterystyczną prezentowanej metody jest to, że pomiary dokonywane są przy założonych wartościach mocy pobieranej przez silnik z sieci i zmieniających się wartościach napięcia zasilającego.

W celu szybkiego i sprawnego wykonania pomiarów zgodnie z przedstawioną metodą, układ pomiarowy powinien być wyposażony w cyfrowy miernik parametrów sieci.

Opisana metoda pozwala na wyznaczenie charakterystyk sterowania w funkcji mocy na wale $U_{opt} = f(P)$ bądź momentu na wale $U_{opt} = f(T_s)$. W przypadku konieczności opracowania charakterystyk dla sterowania prądowego składowe prądu stojana można wyznaczyć na podstawie pomiarów wykonanych w celu wyznaczenia optymalnych wartości napięcia.

Metoda ta będzie szczególnie przydatna w układach pomiarowych składających się z silnika indukcyjnego i hamownicy prądu stałego. Wskazaniem byłoby dla takiego układu zastosowanie procedury pomiarowej do wyznaczania mocy obciążenia silnika opisanej w [4]. Opracowana metoda wyznaczania optymalnych charakterystyk sterowania może znaleźć zastosowanie również w przypadku układów pomiarowych wyposażonych w czujnik momentu i dowolną hamownicę.

Należy podkreślić, że pomiarów należy dokonywać na silniku nagrzanym, gdyż wtedy rezystancja uzwojeń przybiera wartości właściwe dla silnika pracującego.

5. Literatura

- [1] Lumel: Miernik parametrów sieci typu N 10. Instrukcja obsługi, 1999.
- [2] Banach H.: Optimal Operation of a Small Squirrel-Cage Induction Motor. Proceedings of XLIII International Symposium on Electrical Machines, Poznań, Poland, July 2-5, 2007, pp. 143-146.
- [3] Banach H.: Wyznaczanie optymalnych parametrów zasilania dla minimalizacji strat mocy w silnikach indukcyjnych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 84/2009, wyd. BOBRME Komel, str. 107-112.
- [4] Banach H.: Pomiary mocy obciążenia silników elektrycznych z użyciem hamownicy prądu stałego. Pomiary, Automatyka, Kontrola 5/2009 str. 310-313.
- [5] Kaźmierkowski M., Krishnan R., Blaabjerg F.: Control in Power Electronics. Academic Press 2002.
- [6] Bernal F.F., Cerrado A.G.: Model-Based Loss Minimization for DC and AC Vector-Controlled Motors Including Core Saturation. IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.36, No.36, May/June 2000 pp. 755 – 763.
- [7] Uddin AN., Nam SW.: Development of a Non-linear and Model-Based Online Loss Minimization Control of an IM Drives. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 23, No Issue: 4, December 2008, pp. 1015-1024.
- [8] Strona internetowa: www.lumel.pl

otrzymano / received: 06.01.2010

przyjęto do druku / accepted: 15.03.2010

artykuł recenzowany

RECENZJE

Podstawy teorii pola elektromagnetycznego

Zygmunt Piątek, Paweł Jabłoński

Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2010, s. 470, ISBN 978-83-204-3599-3



Podręcznik akademicki *Podstawy teorii pola elektromagnetycznego* autorstwa Zygmunta Piątka i Pawła Jabłońskiego dotyczy klasycznej teorii pola elektromagnetycznego oraz jej zastosowań do analizy wybranych zagadnień aplikacyjnych. Z mojego doświadczenia wiem, że studenci raczej niechętnie odnoszą się do teorii pola elektromagnetycznego, co wynika po części z pewnych wymagań matematycznych, nieodzownych w tej teorii, którym nie mogą sprostać, najczęściej z powodu luk na wcześniejszych etapach edukacji, po

części zaś być może z braku zainteresowania tą tematyką. Prezentowany podręcznik może w dużej mierze zmienić ich nastawienie.

Książkę rozpoczyna rozdział poświęcony matematycznej stronie omawianych zagadnień teorii pola elektromagnetycznego. Czytelnik znajdzie w niej niezbędny aparat matematyczny, a wszystko ilustrowane wieloma rysunkami i poparte przykładami. Jest to zresztą mocna strona całej książki: starannie wykonane rysunki, odpowiednio dobrane przykłady i liczne komentarze objaśniające matematyczną lub fizyczną stronę omawianych zagadnień pozwalają czytelnikowi dobrze zrozumieć przedstawianą partię materiału. Dalsze rozdziały przedstawiają kolejne działy elektromagnetyzmu: od elektrostatyki przez statyczne pole przepływowe, magnetostatykę i indukcję elektromagnetyczną aż do

pola elektromagnetycznego. Następne rozdziały – ponad połowa podręcznika – dotyczą harmonicznego pola elektromagnetycznego, a w szczególności pola wolnozmiennego, fal elektromagnetycznych swobodnych i prowadzonych w liniach TEM, falowodach i światłowodach oraz rezonatorów.

Prezentowane zagadnienia stanowią zatem nie tylko ogólny, czysto teoretyczny opis pola elektromagnetycznego, ale odnoszą się do wielu praktycznych zagadnień spotykanych w m.in. elektroenergetycznych i telekomunikacyjnych urządzeniach i układach przesyłowych i rozdzielczych, telefonii komórkowej, falowodach, liniach telekomunikacyjnych przewodowych i światłowodowych, układach pomiarowych i automatyki. Zakres tematyczny podręcznika jest zgodny z wymaganiami dla podręczników akademickich i z nawiązką wypełnia minima programowe przedmiotu elektrotechnika teoretyczna-teoria pola elektromagnetycznego opracowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Autorzy dołożyli wszelkiej staranności, aby prezentowany materiał tworzył logiczną całość, a jednocześnie, aby każdy z rozdziałów mógł być traktowany w dużej mierze, jako oddzielne zagadnienie. Podręcznik charakteryzuje szczegółowość opisu wielu zagadnień, poparta licznymi przykładami, rysunkami i komentarzami. Będzie on użyteczny nie tylko dla studentów takich kierunków, jak elektrotechnika, elektronika i telekomunikacja czy fizyka, ale również dla doktorantów i nauczycieli akademickich. Nie jest przesadne stwierdzenie, że jest to bardzo wartościowa publikacja.

Opracowanie: Prof. dr hab. inż. Marian ŁUKANISZYN