

MODELOWANIE MASZYN SYNCHRONICZNYCH W UJĘCIU GRAFÓW WIĄZAŃ**

STRESZCZENIE

Celem artykułu jest jednolite i zwarte przedstawienie modelowania maszyn synchronicznych metodą grafów wiązań (GW) na potrzeby symulacji szeroko pojętych systemów energetycznych (SE) i systemów napędowych (SN), w szczególności systemów o naturze hybrydowej. Omówiono ogólne założenia modelowania maszyny synchronicznej (MS) w ujęciu grafów wiązań, bazującego na koncepcji dwóch sprzężeń podstawowych – wzorcowego sprzężenia transformatorowego i wzorcowego sprzężenia elektromechanicznego. Na podstawie tak sformułowanego założenia przedstawiono model MS o wzbudzeniu elektromagnetycznym. Model opracowano z zastosowaniem edytora symulatora 20-sim.

Słowa kluczowe: maszyny synchroniczne, modelowanie, symulacja, grafy wiązań

MODELLING OF SYNCHRONOUS MACHINES USING BOND GRAPHS

The paper presents the bond graphs approach to modelling a synchronous machine (MS) for simulations the power conversion systems – systems of hybrid physical nature. In the first part the fundamentals of bond graph modelling approach are presented (Fig. 1–2). In the second part the model of SM in terms of bond graphs is described (Fig. 3). The model is based on the models of ideal couplings [8]: transformer and electromechanical. The model is elaborated using the editor of 20-sim simulator [14].

Keywords: synchronous machines, modeling and simulation, bond graphs

1. WSTĘP

Problem formułowania analogii elektrycznych w procesie modelowania obwodowego/sieciowego hybrydowych systemów przetwarzania energii uzasadnił konieczność opracowania metody zunifikowanej, która miałaby zalety opisu obwodowego/sieciowego (czytelny i logiczny zapis graficzny modelu), a jednocześnie bazowała na podstawowej wielkości fizycznej wspólnej dla różnych domen fizycznych – energii (mocy) przepływającej między elementami systemów.

Współczesne doświadczenia wskazują, że oczekiwania te w znacznym stopniu spełnia metoda grafów wiązań GW (*bond graphs*) [1, 2, 3, 13], oparta na koncepcji H.M. Payntera [7]. Metoda GW polega na jednolitym ujęciu procesów energetycznych zachodzących w systemach fizycznych i technicznych, niezależnie od ich natury (domeny) fizycznej.

Prace poświęcone modelowaniu ME w ujęciu GW są nieliczne [3, 4, 9, 10, 11, 12]. Obiektem, którego modelowanie stwarza stosunkowo dużo kłopotów, jest MS (maszyna synchroniczna). W literaturze przyjmuje się zgodnie, że najkorzystniejszym i najdogodniejszym opisem MS jest model dwuosiowy Parka [5, 6]. Model Parka MS w ujęciu GW przedstawiono w pracy [11], przy czym ograniczono się tylko do podania ogólnej postaci modelu maszyny – nie dokonano także jego implementacji do symulatora stosującego język GW.

Jednym z ważniejszych zagadnień w procesie modelowania ME jest uproszczenie samej procedury formułowania ich modeli – dotyczy to w szczególności modelowania procesu

przetwarzania energii w ME. Niniejsza praca jest kolejną próbą [9, 10] przedstawienia metody GW w zastosowaniu do modelowania MS na potrzeby symulacji dynamiki SE (systemów energetycznych) i SN (systemów napędowych), w szczególności napędu hybrydowego samochodu [2].

2. ZARYS METODY GRAFÓW WIĄZAŃ

Język metody GW jest szczegółowo opisany w literaturze źródłowej [1, 3, 7, 13], dlatego tu zostanie potraktowany bardzo skrótowo.

Metoda GW polega na jednolitym podejściu do opisu zjawisk fizycznych w teorii systemów przetwarzania energii (np. elektromechanicznych przemian energii). Prawa fizyki systemów formułowane są na podstawie praw zachowania.

Istotą metody GW jest:

- przyporządkowanie jednakowych formuł matematycznych i umownych symboli idealizowanym elementom systemu, niezależnie od ich natury fizycznej;
- przedstawienie struktury sprzężenia elementów systemu za pomocą języka graficznego (grafu);
- sformalizowanie układania równań dynamiki systemu w postaci równań stanu.

Formułowanie równań dynamiki systemu odwołuje się do zbudowanego uprzednio GW, wykorzystując informacje o charakterystykach elementów systemu, które mogą być wyrażone analitycznie lub graficznie.

* Politechnika Gdańska, Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych

** Artykuł uzyskał pozytywne recenzje i był prezentowany podczas Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2006 w Krakowie

W ogólnej strukturze modelu systemu w formie GW [1, 3, 7, 13] wyróżnia się:

- elementy zewnętrzne: źródła energii S (Se – źródło potencjału, Sf – źródło przepływu), akumulatory energii (C – potencjalnej, I – kinetycznej), elementy rozpraszające energię R ;
- elementy wewnętrzne: przetworniki energii (TR – transformatory, GY – żyratory), węzły (*junction*) typu „1” i „0”.

Elementy zarówno zewnętrzne, jak i wewnętrzne mogą być modulowane – oznacza się je dodatkowo symbolem „ M ”.

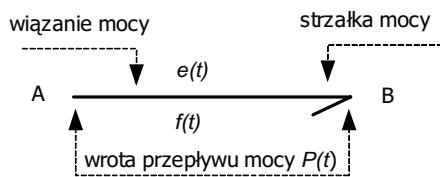
Połączenie energetyczne elementów systemu określa się jako **wrota energetyczne** (*energy port*) – miejsca, przez które przepływa energia między elementami systemu (podsystemami).

Modelowanie systemów o różnej naturze fizycznej uzasadnia wprowadzenie jednolitych nazw dla zmiennych określających moc.

Przepływ energii/mocy między wrotami idealizowanych modeli elementów systemu (np. elementy A i B na rys. 1), niezależnie od ich natury fizycznej, określają dwie wielkości sprzężone:

- 1) e – uogólniony potencjał (*effort*),
- 2) f – uogólniony przepływ (*flow*).

Wielkości te – w ogólnym przypadku są funkcjami czasu i są tak dobrane, aby ich iloczyn miał wymiar mocy – nazywane są **zmiennymi mocy**.



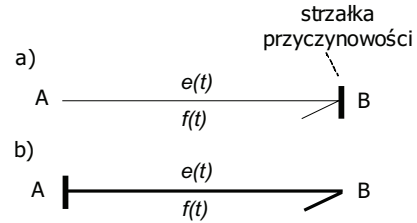
Rys. 1. Wielkości charakteryzujące przepływ mocy od A do B oraz jego reprezentacja w ujęciu GW

Fig. 1. Variables modelling power flow from A to B and its representation in terms of bond graph

Wzajemne oddziaływania poszczególnych elementów układu fizycznego oraz kierunek przepływu energii odzwierciedlają zorientowane krawędzie grafu – **wiązania** (*bond*), według przyjętej konwencji (rys. 2):

- wskazanie zwrotu przepływu mocy dodatniej, symbolizuje półstrzałka przy końcu krawędzi;
- potencjał e umieszcza się po przeciwnej stronie półstrzałki;
- przepływ f umieszcza się po stronie półstrzałki.

Celem właściwego wyprowadzenia równań dynamiki układu fizycznego, krawędziom grafu przypisuje się związki przyczynowo-skutkowe. Związki te, potocznie nazywane **przyczynowością** (*causality*), opisują relacje zachodzące pomiędzy wielkościami e i f . Zgodnie z przyjętą konwencją, oznaczenie przyczynowości krawędzi GW reprezentowane jest krótką prostopadłą kreską na jednym z końców wiązania/krawędzi (rys. 2). Położenie tej kreski wskazuje, która z wielkości e i f jest wielkością zależną, a która niezależną.



Rys. 2. Krawędź grafu wiązań między wrotami elementów A i B :
a) potencjał e jest przyczyną, a skutkiem – przepływ f ;
b) f jest przyczyną a skutkiem – e

Fig. 2. The edge of the bond graph between element A and B :
a) effort e – cause, flow f – result;
b) flow f – cause, effort e – result

Węzły (wierzchołki) GW „1” oraz „0” reprezentują uogólnione, niezależne od domeny fizycznej, prawa Kirchhoffa: węzeł „0” reprezentuje sumowanie f , a węzeł „1” – sumowanie e .

Dalsze szczegóły teorii GW są obszernie opisane w literaturze źródłowej [1, 3, 7, 13].

3. MODEL MASZINY SYNCHRONICZNEJ W UJĘCIU GRAFÓW WIĄZAŃ

Struktura wewnętrzna modelu ME w ujęciu GW wynika z przyjętego modelu procesu przetwarzania energii, który można odwzorować na podstawie modeli modulowanych przetworników energii: transformatorów MTF i żyratorów MGY bądź też na podstawie tzw. modeli IC – modeli wielowrotników polowych w postaci odpowiednio sprzężonych elementów I oraz C (*IC models – multiport field and junction structures*) [3].

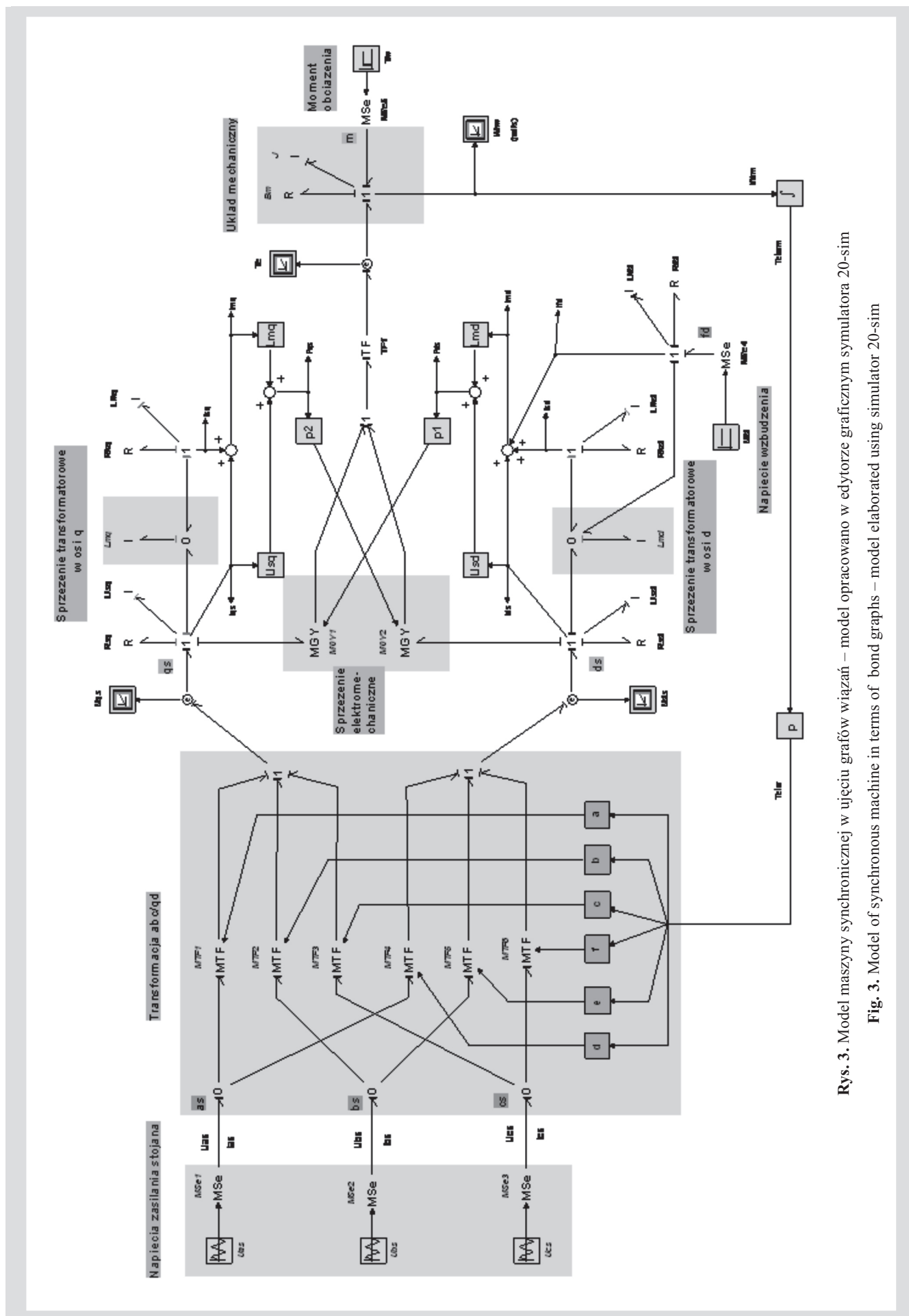
W niniejszej pracy do sformułowania modelu procesu przetwarzania energii w MS wykorzystano ideę i modele tzw. **sprzężeń wzorcowych: transformatorowego (WST) i elektromechanicznego (WSE)** [8]. Za ich przykłady fizyczne przyjęto odpowiednio transformator dwuuzwojowy i prymitywną maszynę prądu stałego.

Model MS w ujęciu GW przedstawiono na rysunku 3. Opracowano go w edytorze graficznym symulatora 20-sim [14] na bazie dwuosioowego (qd) modelu obwodowego – modelu Parka [5, 6], zakładając liniowy obwód magnetyczny.

Przedstawiony model MS składa się z następujących podsystemów (podmodeli):

- napięć zasilania stojana U_{as} , U_{bs} i U_{cs} raz wzbudzenia U_{fd} ;
- transformacji abc/qd ;
- sprzężeń transformatorowych w osiach q i d ;
- sprzężeń elektromechanicznych w osiach q i d ;
- układu mechanicznego, momentu obciążenia T_m .

Napięciowe źródła zasilania w obwodach osi naturalnych as , bs , cs MS reprezentują modulowane źródła potencjału MSe_1 , MSe_2 i MSe_3 , które są sterowane sygnałem reprezentującym napięcia systemu energetycznego (człony oznaczone: U_{as} , U_{bs} i U_{cs}). Dwukierunkową transformację napięć U_{as} , U_{bs} i U_{cs} oraz prądów I_{as} , I_{bs} i I_{cs} między układami osi naturalnych i osi qd realizują: człony $a-f$ oraz transformatory modulowane $MTF1$ – $MTF6$.



Rys. 3. Model maszyny synchronicznej w ujęciu grafów wiązań – model opracowano w edytorze graficznym symulatora 20-sim

Fig. 3. Model of synchronous machine in terms of bond graphs – model elaborated using simulator 20-sim

Na wejście członów $a-f$ podawany jest sygnał reprezentujący elektryczne położenie kątowne wirnika ($Tetar$ – sygnał na wyjściu układu całkującego mechaniczną prędkość kątową wirnika Wrm , pomnożony następnie przez liczbę par biegunów – człon p). Funkcją bloków $a-f$ jest wyliczanie elementów macierzy transformacji układów współrzędnych.

Potencjały e na wyjściu transformatorów $MTF1 - MTF6$ reprezentują napięcia zasilania stojana MS Uqs i Uds w układzie osi qd .

Do węzłów „1” w osiach qd , od strony napięć zasilania Uqs i Uds , dołączone są elementy obwodów stojana: Rsq i Rsd – rezystancje; $Llsq$, $Llsd$ – indukcyjności rozproszenia. Następnie węzły „1” w osiach qd połączone są odpowiednio z węzłami „0”, które odwzorowują sprzężenia transformatorowe w osiach qd za pomocą indukcyjności magnesowania Lmq oraz Lmd .

Do węzłów „0” wyprowadzone są zmienne e oraz f z węzłów „1” łączących odpowiednio:

- elementy obwodów klatek tłumiących w osiach qd (Rkq i Rkd – rezystancje, $Llkq$, $Llkd$ – indukcyjności rozproszenia);
- elementy obwodów wzbudzenia w osi d (Rfd – rezystancja, Lfd – indukcyjność rozproszenia).

W modelu MS przyjęto, że obwód wzbudzenia zasilany jest z modulowanego źródła potencjału $MSe4$ – sterowanego ze źródła napięciowego o wydajności Ufd (człon Ufd).

Strumienie Pqs i Pds skojarzone z obwodami stojana w osiach qd wyznaczono w oparciu o równania strumieniowo-prądowe [5]. Konieczne do obliczeń wartości prądów (Iqs , Ids , Ikq , Ikd , Ifd) wyprowadzono odpowiednio z węzłów „1” w osiach qd . Proces obliczania strumieni Pqs i Pds odwzorowują: człony $Llsq$ i Lmq w osi q , człony $Llsd$ i Lmd w osi d oraz węzły sumacyjne (sumowanie składowych strumieni – rozproszenia i magnesowania). Wyprowadzone z węzłów sumacyjnych sygnały Pqs i Pds (wartości strumieni skojarzonych w obwodach stojana w osiach qd) pomnożone przez współczynniki wzmocnienia członów $p1$ i $p2$ (równe liczbie par biegunów p MS), sterują modułami żyratorów modulowanych MGY1 i MGY2.

Żyratory MGY1 i MGY2 odwzorowują sprzężenia elektromechaniczne – odpowiednio w osiach qd . Iloczyny modułów (sterowanych sygnałami Pqs i Pds) i przepływów f (prądy osiowe Iqs i Ids) na wejściu żyratorów MGY1 i MGY2 określają na ich wyjściu potencjały e , które reprezentują składowe osiowe momentu elektromagnetycznego MS. Składowe te, po sumowaniu w węźle „1” i po pomnożeniu przez $2/3$ (realizuje to transformator $TF1$), określają potencjał e w układzie mechanicznym MS – równy momentowi elektromagnetycznemu MS T_e .

Potencjały od strony wrót wejściowych żyratorów MGY1 i MGY2, jako iloczyny elektrycznej prędkości kątowej wirnika Wr i odpowiednich osiowych strumieni skojarzonych (Pds , Pqs) pomnożonych przez liczbę par biegunów p (wzmocnienie członów $p1$ i $p2$), reprezentują napięcia rotacji indukowane w obwodach stojana. Napięcia ta modelują oddziaływanie układu mechanicznego na układ elektromagnetyczny MS.

Układ mechaniczny MS modelowany jest za pomocą bezwładności wirnika J i tarcia lepkiego Bm – sumowanie potencjałów e realizowane jest w węźle „1”. Z węzła tego wyprowadzone są sygnały: przebiegi prędkości kątowej wirnika i momentu obrotowego MS na monitory Te i Wrm , prędkości kątowej na człon całkujący, obliczający mechaniczne położenia kątowne wirnika.

Model MS w ujęciu GW (rys. 3) może być przekształcony do postaci modelu podsystemu, a następnie włączony do modelu badanego SE lub SN.

4. WNIOSKI

Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że metoda modelowania ME w ujęciu GW w zasadzie spełnia wymagania stawiane przez analityków i projektantów SE i SN, w szczególności w przypadku zastosowania symulatora 20-sim. Wymagane są jednak dalsze prace nad sformułowaniem nieliniowych modeli ME, np. uwzględniających zjawiska nasycenia dróg strumieni, gdyż modele dostępne w literaturze są modelami o parametrach stałych.

Literatura

- [1] Cichy M.: *Modelowanie systemów energetycznych*. Wyd. Pol. Gdańskiej, 2001
- [2] Cichy M., Makowski S.: *Modele typu „czarna skrzynka” elektrycznych elementów napędu hybrydowego*. Przegl. Elektr., nr 4, 2006
- [3] Karnopp D.C., et al.: *System Dynamics. Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*. New York, John Wiley 2000
- [4] Kim J., Bryant M.D.: *Bond Graph Model of a Squirrel Cage Induction Motor With Direct Physical Correspondence*. J. of Dyn. Syst., Measur., and Con., vol. 122, 2000, 461–469
- [5] Krause P.C.: *Analysis of Electric Machinery*. New York, McGraw-Hill 1986
- [6] Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Gliwice, Helion 1998
- [7] Paynter H.M.: *Analysis and Design of Engineering Systems*. MIT Press, 1961
- [8] Ronkowski M.: *A Unified Approach to Teaching the Modelling of Electrical Machines for Power Electronics and Electrical Drives Applications*. SME 2003, Proc. – sum. 143–144, CD-ROM Proc. 1–11
- [9] Ronkowski M.: *Modelowanie maszyn elektrycznych metodą grafów wiązań*. SME 2004, Proc., 149–158
- [10] Ronkowski M.: *Modelowanie i symulacja maszyn elektrycznych metodą grafów wiązań*. Przegl. Elektr., r. 80, nr 10, 2004, 944–947
- [11] Sahn D.A.: *Two-Axis Bond Graph Model of the Dynamics of Synchronous Electrical Machines*. Journal Franklin Inst., 308, No. 3, 1979, 205–218
- [12] Sirivadhana K., Earl F.R., Max D.A.: *The application of bond graphs to electrical machinery and power engineering*. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 102, No. 5, 1983, 1176–1184
- [13] Wojnarowski J.: *Zastosowanie grafów i liczb strukturalnych w modelowaniu drgań układów mechanicznych*. PWN, 1985
- [14] Control Lab Products B. V., 20-SIM Reference Manual, University of Twente, Enschede, Netherlands

Obszerną bibliografię dotyczącą grafów wiązań można znaleźć na stronie: <http://www.ece.arizona.edu/~cellier>

Wpłynęło: 26.09.2006



Mieczysław RONKOWSKI

Tytuł magistra inżyniera, stopień doktora nauk technicznych oraz doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechniki uzyskał na Politechnice Gdańskiej odpowiednio w latach 1969, 1979 i 1995. Od roku 1969 pracuje na Wydziale Elektrotechniki

i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Jest autorem lub współautorem 81 publikacji naukowo-technicznych, w tym czterech w czasopismach międzynarodowych najwyższej rangi (Journal on Circuits, Systems and Computers (special issue on power electronics), European Power Electronics and Drives Journal, Archives of Electrical Engineering). Jego zainteresowania naukowe dotyczą systemów przetwarzania energii złożonych z przekształtników energoelektronicznych i maszyn elektrycznych. Problematyka badawcza obejmuje między innymi projektowanie, modelowanie (polowo-obwodowe), metody i algorytmy komputerowej symulacji układów przekształtnik – maszyna elektryczna oraz analizę zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w maszynach elektrycznych o zasilaniu przekształtnikowym. Jest współtwórcą bardzo popularnego w kraju symulatora układów energoelektronicznych TCad, wykorzystywanego również w kilku ośrodkach zagranicznych. Aktualnie pracuje nad zagadnieniem modelowania maszyn elektrycznych

w ujęciu grafów wiązań dla symulacji hybrydowych systemów energetycznych. W latach 1995–2005 współrealizował siedem projektów badawczych finansowanych przez KBN; przy czym, w jednym był kierownikiem (grant promotorski), a w pozostałych był głównym wykonawcą bądź wykonawcą. Aktualnie realizuje jako wykonawca projekt PREdictive MAIntenance and Diagnostics of railway power trains (PREMAID) w ramach Marie Curie Host Fellowships for the Transfer of Knowledge (ToK) – programu Unii Europejskiej. Jest recenzentem międzynarodowego czasopisma naukowego European Power Electronics and Drives Journal, jak również recenzentem prac zgłaszanych na międzynarodowe konferencje w dziedzinie energoelektroniki, napędu elektrycznego i maszyn elektrycznych. W latach 1996, 1998, 1999, 2000, 2001 2002 i 2003 przebywał w Institut National Polytechnique de Toulouse, Francja, w charakterze Visiting Professor. Jest członkiem SEP oraz IEEE. W latach 1992–1993 pracował jako przedstawiciel Vendor Surveillance Corporation (Irvine, California, USA) celem kontroli jakości realizacji technologicznej projektu Energy Storage Inductor Project at the Scientific Industrial Association URAL-ELECTROTIAZHMASH (Jekaterynburg, Rosja). Realizowany projekt był związany z programem Superconducting Super Collider Laboratory Programme (Dallas, Texas, USA). W latach 2000–2003 pełnił funkcję kierownika Katedry Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych.

e-mail: m.ronkowski@ely.pg.gda.pl