

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI

JAK PROBLEMY NAUKOWE ROZWIĄDUJE MÓZG, A JAK KOMPILER? PRZYKŁAD Z TEORII MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Streszczenie. Na podstawie własnych doświadczeń badawczych oraz na przykładzie wybranego problemu naukowego z zakresu teorii maszyn elektrycznych Autor wskazuje na niezwykle własności ludzkiego mózgu w odkrywaniu i analizie zjawisk fizycznych. Podkreśla rolę i znaczenie wyobraźni, luźnych i nieoczekiwanych skojarzeń oraz przeżyć i wspomnień pochodzących z różnych okresów życia, a sięgających nieraz odległych czasów dzieciństwa i lat szkolnych - na dokonujący się w mózgu proces myślenia oraz na przebieg i tok twórczego - częstokroć podświadomego - rozumowania.

Szczególne uwagę zwraca na wiedzę, doświadczenia i umiejętności wybiegające poza naukę i technikę – i pozornie nie mające z nimi żadnego związku, jak na przykład: muzykę, malarstwo, czy grafikę, które to strefy wiedzy w najmniej oczekiwanym momencie stają się źródłem inspiracji, umożliwiającej przekroczenie i przełamanie kolejnej trudności. W prezentowanym przykładzie jest to „muzyczna notacja” poliharmonicznego modelu maszyny indukcyjnej, „graficzna struktura” torów generowania momentów pasywnych oraz „bajecznie proste” wskaźniki, porządkujące składniki rozwiązania nieliniowego układu równań różniczkowych bardzo wysokiego stopnia, zawierającego tysiące współczynników.

HOW ARE SCIENTIFIC PROBLEMS SOLVED BY HUMAN BRAIN AND HOW ARE THEY SOLVED BY COMPUTER? AN EXAMPLE FROM THEORY OF ELECTRICAL MACHINES

Summary. Basing on the own research experiences and on the especially selected problems within the domain of electrical machines the author considers the extreme features of human brains in discovering and analysing physical phenomena. The author emphasises the leading role of imagination, associations as well as memories dated back to the different periods of life. It is underlined that the significant role plays experience, knowledge and skills referring to the field of interest entirely different from engineering like music, painting, graphics etc. which can be helpful in solving technical problems and which provide inspiration enabling to overcome the various actual engineering problems. In the considered exemplary problem this influence can be found in „the music notation” of the polyharmonic mathematical model of an induction motor, „the graphical notation”

of the so-called paths of generating parasitic torques and in „the enchanted factors” enabling to classify the various components of solution for differential equations of very high order including thousands of parameters.

1. WSTĘP

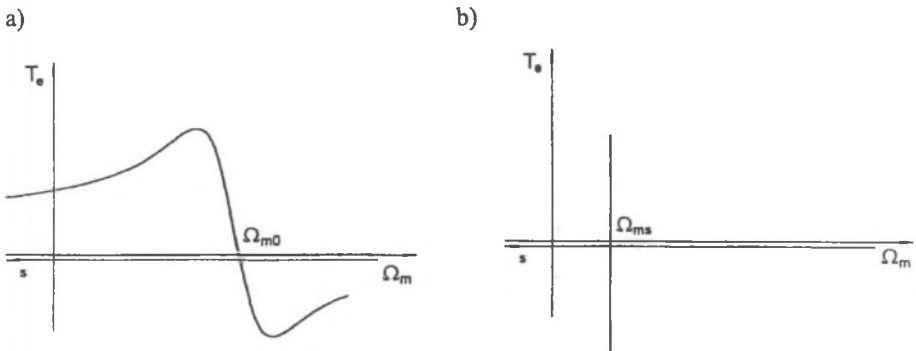
Niezwykły postęp w naukach technicznych z jednej strony oraz w naukach biologicznych i medycznych z drugiej strony powoduje, że nieustannie wzrasta podziw dla niezwyklej budowy i możliwości ludzkiego mózgu, a równocześnie stale pogłębia się i utrwała fascynacja komputerami jako aktualnie najbardziej powszechnymi i uniwersalnymi narzędziami pracy. Ta sytuacja podwójnego zauroczenia techniką i medycyną znajduje odzwierciedlenie w terminologii technicznej i w popularnych obiegowych przenośniach: o osobie wyróżniającej się niezwykle talentem matematycznym i łatwością w rachunkach mówi się, że ma „komputer w głowie”, zaś nie tak jeszcze dawno maszyny cyfrowe zwano potocznie „mózgami elektro-nowymi”.

O silnym pragnieniu naśladowania czy też zbliżenia się w technice przetwarzania do procesów zachodzących w mózgu człowieka świadczą coraz to nowe terminy przyjmowane i upowszechniające się w naukach technicznych (np. sieci neuronowe, algorytmy genetyczne, systemy ekspertowe, wirusy), mające wskazywać i eksponować podobieństwa zachodzące w świecie materii ożywionej i nieożywionej. Pomimo owych podobieństw i analogii coraz częściej i mocniej gruntuje się przekonanie, że owe dwa światy być może na zawsze pozostaną światami rozłącznymi. Przytaczane argumenty są rzeczowe i głęboko naukowo umotywowane - pochodzą od wybitnych uczonych i autorytetów. Mój argument jest moim „własnym prywatnym argumentem”, nie pretendującym do roli argumentu mogącego kogokolwiek przekonać. Jest drobnym, intuicyjnym i całkowicie nienaukowym argumentem - dla mnie jednak ma rangę argumentu niezbitego. Ten argument - to piękno ludzkiego rozumowania i smak przyjemności płynącej z doznawanych podczas pracy twórczej cudownych olśnień - olśnień, w których splatają się w sposób często niezrozumiały i podświadomy najprzeróżniejsze, czasem żywe, a czasem mgliste wspomnienia i doświadczenia z dzieciństwa, młodości i wieku dojrzałego - w których miesza się coś z matematyki, fizyki i muzyki oraz wszystkie ziemskie, rajske i niebiańskie geometrie z tego i z tamtego świata.

2. CO TO SĄ PASOŻYTNICZE MOMENTY ELEKTROMAGNETYCZNE?

Wszystkim słuchającym wykładów z teorii maszyn elektrycznych jest znana charakterystyka momentu elektromagnetycznego maszyny asynchronicznej w funkcji prędkości obrotowej Ω_m (poślizgu s), zwana charakterystyką mechaniczną (rys. 1a). Jej cechą charakterysty-

czną jest to, że w stanie ustalonym przy zasilaniu sinusoidalnym moment elektromagnetyczny powstaje w całym zakresie prędkości z wyłączeniem jednej tylko prędkości tzw. prędkości synchronicznej Ω_{m0} . Stąd też i nazwa maszyn generujących tego typu moment – maszyny asynchroniczne. Zupełnie odwrotnie przedstawia się sytuacja w przypadku maszyn synchronicznych, które mają zdolność wytwarzania momentu elektromagnetycznego przy jednej tylko prędkości obrotowej, zwanej prędkością synchroniczną Ω_{ms} , a przy wszystkich innych prędkościach moment elektromagnetyczny przyjmuje wartość (średnią) równą 0 (rys.1b). Ze względu na tę właśnie cechę o momencie tym mówimy, że jest momentem synchronicznym.



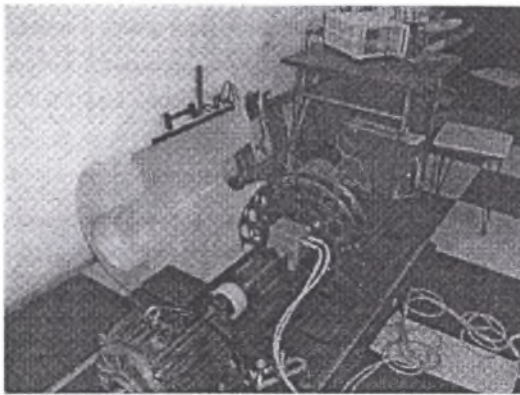
Rys. 1. Charakterystyka momentu elektromagnetycznego: a) asynchronicznego, b) synchronicznego

Fig. 1. Characteristic of the electromagnetic moment: a) asynchronous, b) synchronic

Charakterystykę mechaniczną maszyny indukcyjnej $T_e = f(\Omega_m)$, przedstawioną na rys. 1a, można zdjąć różnymi metodami. Jedną z nich to metoda dynamiczna (rys.2), polegająca na rejestracji prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego maszyny indukcyjnej z kilkakrotnie sztucznie powiększonym momentem bezwładności na wale podczas rozruchu z ujemnym warunkiem początkowym dla prędkości obrotowej, np. $\Omega_m(0) \approx -0,5\Omega_{m0}$ (rys.3).

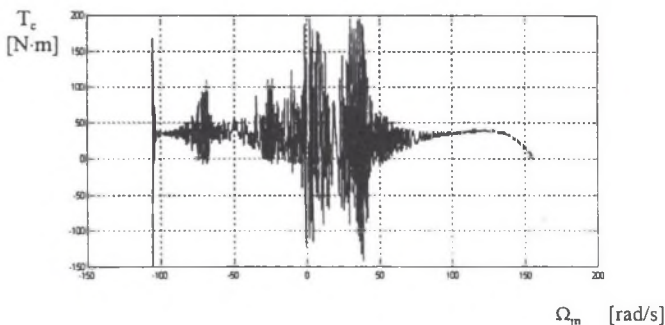
Wynik pomiaru w sposób zasadniczy, a częstokroć - wręcz drastyczny odbiega od przebiegu charakterystyki mechanicznej z rys. 1a. Charakterystyczne jest zniekształcenie krzywej momentu asynchronicznego, ponadto pojawienie się dodatkowych składowych przemiennych o zmiennej częstotliwości (w przypadku przedstawionym na rys. 3 momenty te prowadzą do powstania rezonansu mechanicznego w układzie: maszyna – wałek skrętny – masy bezwładnościowe) oraz – co jest znacznym zaskoczeniem – momentów elektromagnetycznych synchronicznych. Przyczyną tych anomalii są wyższe harmoniczne przestrzenne pola magnetycznego w szczelinie powietrznej maszyny, zwłaszcza te, które są wynikiem dyskretnego przestrzennego rozkładu przewodników z prądem w żłobkach stojana i wirnika, czyli tzw. harmoniczne przestrzenne przepływu (inne harmoniczne przestrzenne pola magnetycznego, to

harmoniczne permeancyjne, wynikające z obustronnego użłobkowania oraz niecentrycznego ułożenia osi wału, oraz harmoniczne przestrzenne nasyceniowe, związane z nieliniowością charakterystyki magnesowania $B = f(H)$. Na owe pasożytnicze zjawiska zwrócono uwagę już bardzo dawno, jednakże ich pełne wyjaśnienie i analiza teoretyczna stały się możliwe dopiero niedawno dzięki rozwojowi komputerów i ich oprogramowania. Wcześniej było to niemożliwe, albowiem przetworniki elektromechaniczne są opisywane złożonymi nieliniowymi układami równań różniczkowych, zawierającymi - przy uwzględnieniu wyższych harmonicznych przestrzennych - kilka lub nawet kilkadziesiąt tysięcy współczynników.



Rys. 2. Stanowisko do pomiaru charakterystyki mechanicznej silnika metodą dynamiczną (z momentomierzem Hottingera)

Fig. 2. Stand for measurement of the motor's mechanical characteristic using a dynamic method (with the Hottinger's torque meter)



Rys. 3. Charakterystyka momentu elektromagnetycznego w funkcji prędkości obrotowej podczas rozruchu silnika z ujemnym warunkiem dla prędkości

Fig. 3. Characteristic of the electromagnetic moment as a function of the rotational speed during motor's start-up with the speed negative condition

3. MODEL MATEMATYCZNY MASZYNY ELEKTRYCZNEJ I CUDOWNA TRANSFORMACJA DWUOSIOWA

Trójfazowa maszyna indukcyjna z wirnikiem klatkowym o liczbie żłobków wirnika Q_r jest opisana następującym układem równań napięciowych i mechanicznych:

$$\begin{bmatrix} [u_s^{\alpha\beta}] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s^{\alpha\beta}] & [0] \\ [0] & [R_r^{dq}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s^{\alpha\beta}] \\ [i_r^{dq}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{ss}^{\alpha\beta}] & [0] \\ [0] & [L_{rr}^{dq}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [i_s^{\alpha\beta}] \\ [i_r^{dq}] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} [M_{ss}^{\alpha\beta}] & [M_{sr}^{\alpha\beta dq}(\vartheta)] \\ [M_{sr}^{\alpha\beta dq}(\vartheta)]^T & [M_{rr}^{dq}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s^{\alpha\beta}] \\ [i_r^{dq}] \end{bmatrix} \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \Omega_m = \frac{1}{J} \left(\left\{ [i_s^{\alpha\beta}]^T \frac{d}{d\vartheta} [M_{sr}^{\alpha\beta dq}(J)] [i_r^{dq}] \right\} - T_m \right), \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \vartheta_m = \Omega_m, \quad (3)$$

gdzie:

$[R_s^{\alpha\beta}]$, $[L_{ss}^{\alpha\beta}]$ - macierze rezystancji i indukcyjności rozproszenia stojana,

$[R_r^{dq}]$, $[L_{rr}^{dq}]$ - macierze rezystancji i indukcyjności rozproszenia wirnika,

$[M_{ss}^{\alpha\beta}]$, $[M_{rr}^{dq}]$ - macierze indukcyjności własnych stojana i wirnika,

$[M_{sr}^{\alpha\beta dq}(\Omega)]$ - macierz indukcyjności wzajemnych stojan-wirnik,

$[i_s^{\alpha\beta}]$, $[i_r^{dq}]$ - wektory prądów stojana i wirnika,

$[u_s^{\alpha\beta}]$ - wektor napięć zasilających stojan,

Ω_m - mechaniczna prędkość kątowna,

ϑ , ϑ_m - kąt elektryczny i mechaniczny wirnika,

J - moment bezwładności.

Kluczowe znaczenie ma postać hipermacierzy indukcyjności głównych (związanych ze strumieniem przenikającym przez szczelinę powietrzną i sprzęgającym uzwojenia stojana i wirnika) o wymiarach $(3+Q_r) \times (3+Q_r)$. Każdy z elementów tej macierzy jest nieskończonym szeregiem Fouriera, którego współczynniki odpowiadają kolejnym harmonicznym przestrzennym pola magnetycznego występującego w szczelinie powietrznej (4).

Chcąc możliwe dokładnie odwzorować kształt charakterystyki mechanicznej, należy uwzględnić możliwie jak najwięcej kolejnych harmonicznym przestrzennych. Częstokrot rząd najwyższej uwzględnionej harmonicznej przestrzennej wynosi kilkaset. Rozwiązanie układu równań o tak dużej liczbie współczynników jest czasochłonne, niesie duże prawdopodobieństwo przypadkowych pomyłek, a określenie wpływu poszczególnych współczynników, a przede wszystkim ich różnych kombinacji, na rozwiązanie – nawet przy wykorzystaniu wyrafinowanych metod komputerowych - jest praktycznie niemożliwe.

$$\left[\begin{array}{ccc|cc}
 \sum_{\nu} L_{\nu_{11}} & \sum_{\nu} L_{\nu_{12}} & \sum_{\nu} L_{\nu_{13}} & \sum_{\nu} M_{\nu_{11}}(\vartheta_m) & \sum_{\nu} M_{\nu_{12}}(\vartheta_m) \\
 \sum_{\nu} L_{\nu_{21}} & \sum_{\nu} L_{\nu_{22}} & \sum_{\nu} L_{\nu_{23}} & \sum_{\nu} M_{\nu_{21}}(\vartheta_m) & \sum_{\nu} M_{\nu_{22}}(\vartheta_m) & \dots \\
 \sum_{\nu} L_{\nu_{31}} & \sum_{\nu} L_{\nu_{32}} & \sum_{\nu} L_{\nu_{33}} & \sum_{\nu} M_{\nu_{31}}(\vartheta_m) & \sum_{\nu} M_{\nu_{32}}(\vartheta_m) & \dots \\
 \hline
 \sum_{\nu} M_{\nu_{11}}(\vartheta_m) & \sum_{\nu} M_{\nu_{12}}(\vartheta_m) & \sum_{\nu} M_{\nu_{13}}(\vartheta_m) & \sum_{\nu} L_{\nu_{11}} & \sum_{\nu} L_{\nu_{12}} & \dots \\
 \sum_{\nu} M_{\nu_{21}}(\vartheta_m) & \sum_{\nu} M_{\nu_{22}}(\vartheta_m) & \sum_{\nu} M_{\nu_{23}}(\vartheta_m) & \sum_{\nu} L_{\nu_{21}} & \sum_{\nu} L_{\nu_{22}} & \dots \\
 \vdots & & & & & \ddots
 \end{array} \right] \quad (4)$$

W tym miejscu należy pokłonić się niezwyklej pomysłowości i intuicji człowieka, w wyniku której w 1933 r. została wprowadzona do teorii maszyn elektrycznych transformacja współrzędnych zwana transformacją dwuosiową (transformacją $\alpha\beta$ na płaszczyźnie stojana i transformacją dq na płaszczyźnie wirnika) [11]:

$$[K_r] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \vartheta_{r1} & \cos \vartheta_{r2} & \cos \vartheta_{r3} \\ -\sin \vartheta_{r1} & -\sin \vartheta_{r2} & -\sin \vartheta_{r3} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Transformacja ta, zastosowana do układu równań różniczkowych (1), prowadzi do daleko idących uproszczeń. Wystarczy tylko powiedzieć, że model maszyny we współrzędnych $\alpha\beta dq$ przy uwzględnieniu głównej (pierwszej) harmonicznej przestrzennej, a więc model, na podstawie którego uzyskuje się charakterystykę mechaniczną z rys.1a, zawiera hipermacierz indukcyjności o postaci:

$$\left[\begin{array}{cc|cc}
 L_{s\alpha} & & M_{\alpha d} & M_{\alpha q} \\
 & L_{s\beta} & M_{\beta d} & M_{\beta q} \\
 \hline
 M_{d\alpha} & M_{d\beta} & L_{rd} & \\
 M_{q\alpha} & M_{q\beta} & & L_{rq}
 \end{array} \right] \quad (6)$$

Niezwykłe możliwości tej transformacji ujawniły się w całej rozciągłości kilkadziesiąt lat później przy analizie modeli maszyn elektrycznych, uwzględniających wyższe harmoniczne pola magnetycznego, czyli przy analizie tzw. *modeli poliharmonicznych*.

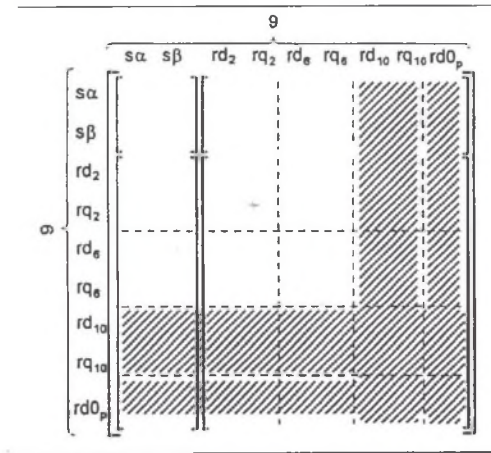
Istota działania tej transformacji tkwi w możliwości powiązania kolejnych nowych współrzędnych wirnika: $d_1, q_1, d_2, q_2, \dots$ ze ściśle określonymi bardzo rozrzedzonymi ciągami harmo-

nicznych przestrzennych. W wyjaśnienie tych zagadnień od strony matematycznej (zdefiniowanie tzw. składowych zerowych i aktywnych prądu) oraz w uogólnienie transformacji dwuosiowej na układy n -fazowe:

$$[K_r] = \sqrt{\frac{2}{Q_r}} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha_r & \cos 2\alpha_r & \dots & \cos(Q_r - 1)\alpha_r \\ 0 & -\sin \alpha_r & -\sin 2\alpha_r & \dots & -\sin(Q_r - 1)\alpha_r \\ 1 & \cos 2\alpha_r & \cos 4\alpha_r & \dots & \cos 2(Q_r - 1)\alpha_r \\ 0 & -\sin 2\alpha_r & -\sin 4\alpha_r & \dots & -\sin 2(Q_r - 1)\alpha_r \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \dots & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

istotny wkład wnieśli naukowcy z Politechniki Śląskiej [1, 2, 4, 9, 10].

Modele poliharmoniczne maszyn w dwuosiowym układzie współrzędnych są znacznie prostsze niż w układzie naturalnym, albowiem ze względu na pewne cechy symetrii obwodów magnetycznych maszyn, niektóre współrzędne dwuosiowe są stale równe 0 i stają się w hipermacierzy indukcyjności zbędne:

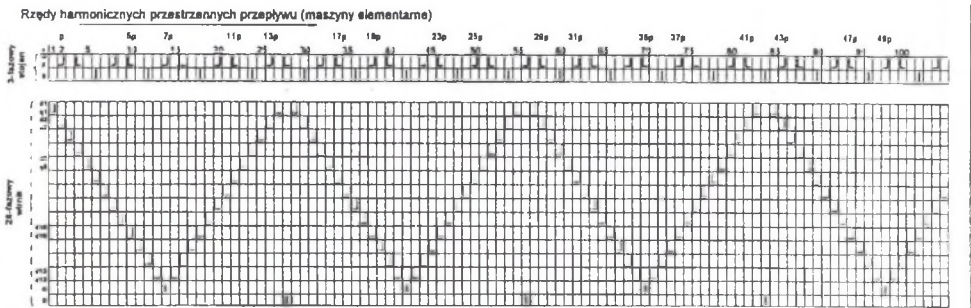


Stąd też liczba współczynników równań różniczkowych w układzie współrzędnych $\alpha\beta dq$ jest mniejsza, tym niemniej nadal znaczna, a obliczenia wciąż zbyt czasochłonne.

4. „MUZYCZNA NOTACJA” MODELU MATEMATYCZNEGO MASZYNY ELEKTRYCZNEJ

W tym miejscu zbliżamy się znów do kroku, którego komputer nie byłby zdolny wykonać, a którego istota tkwi w odkryciu możliwości graficznej reprezentacji równań i wizualizacji oddziaływań elektrycznych i elektromagnetycznych pomiędzy harmonicznymi przestrzennymi pola oraz wzajemnych związków i interakcji pomiędzy współczynnikami równań. Ta graficzna reprezentacja równań, to schemat rozkładu maszyny na tzw. maszyny elementarne, którego narodziny były olśnieniem, mającym bez wątpienia podświadomy związek z muzyką, a ściślej – z notacją muzyczną.

Tabelarycznie ujęty schemat rozkładu, pozwalający prześledzić procesy elektromagnetyczne i scharakteryzować je w sposób graficzny za pomocą tzw. torów generowania momentów pasożytniczych, okazał się punktem przełomowym. Schemat ten pozwolił zrozumieć i w przejrzysty sposób wyjaśnić, dlaczego spośród tysięcy współczynników znaczący wpływ na rozwiązanie układu równań ma tylko kilkanaście, czy nawet tylko kilka współczynników. Co więcej, schemat ten pozwala bez trudu wskazać harmoniczne przestrzenne pola magnetycznego, uczestniczące w generowaniu momentów pasożytniczych oraz związane z nimi współczynniki - i to dla maszyn o dowolnych danych konstrukcyjnych (tzn. o dowolnej liczbie żłobków stojana Q_s i wirnika Q_r oraz liczbie par biegunów p) [3, 4, 5, 6].



Rys. 4. Schemat rozkładu maszyny na maszyny elementarne

Fig. 4. Scheme of decomposition of the electrical machine to elementary machines

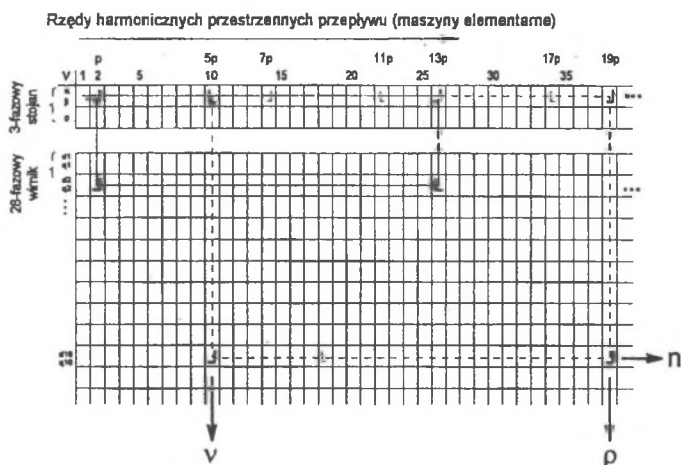
5. „BAJECZNIE PROSTE” MODELE MATEMATYCZNE MASZYNY

Konsekwencją możliwości wskazanej w rozdz. 4 stały się zredukowane modele poliharmoniczne, których czas numerycznego rozwiązania uległ dalszemu, ale tym razem już bardzo znacznemu skróceniu. Warto również podkreślić, że schemat rozkładu pozwala przewidzieć i

dokładnie opisać istotne cechy rozwiązania układu równań maszyny elektrycznej, umożliwiając wybór odpowiedniej metody całkowania, kroku całkowania, techniki i sposobu wizualizacji wyników itp. [7, 8].

I wreszcie trzeci krok – dokonany w umyśle człowieka poza komputerem – to zdefiniowanie i wprowadzenie do analizy *globalnego współczynnika* dla harmonicznych przestrzennych, uczestniczących w powstawaniu pasożytniczych momentów elektromagnetycznych [12]:

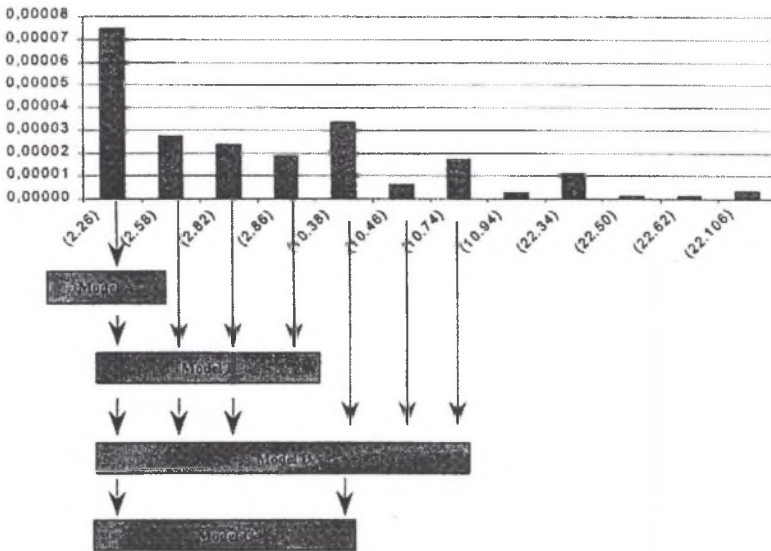
$$|k_{(v,\rho)} = \frac{k_{wsv} k_{wsp} k_{wrv} k_{wrp} k_{sqv} k_{sqp}}{v\rho n}| \quad (8)$$



Rys.5. Wyznaczanie globalnego współczynnika dla harmonicznych przestrzennych uczestniczących w generowaniu momentów pasożytniczych na podstawie schematu rozkładu maszyny

Fig. 5. Determination of the global coefficient for the space harmonics, which participate in generation of parasitic moments, on the base of the machine's decomposition scheme

Ten współczynnik, obliczany na podstawie odpowiedniej kombinacji liczb wskazanych przez schemat rozkładu i tory generowania (liczby v , ρ , n we wzorze 7 - patrz rys. 5) oraz uwzględniający określone cechy konstrukcyjne (skrót i schemat uzwojenia stojana oraz skos klatki wirnika), pozwala na uporządkowanie współczynników występujących w zredukowanych modelach poliharmonicznych wg ich znaczenia i na sformułowanie tzw. *zredukowanych modeli minimalnoharmonicznych*. Przykładowe 4 modele minimalnoharmoniczne: A, B, C, D, uzyskane na podstawie słupkowego wykresu globalnych współczynników, scharakteryzowano poniżej:



W skrajnym przypadku model taki uwzględni tylko dwie harmoniczne przestrzenne: model A, ale otrzymane na jego podstawie wyniki mogą dla określonych typów silników oraz dla pewnych wybranych stanów dynamicznych tylko nieznacznie różnić się od rozwiązań uzyskiwanych przy uwzględnieniu tysięcy współczynników i być zgodne - co należy mocno podkreślić - z wynikami badań laboratoryjnych.

To, co w pierwszej chwili dziwi, ale po zastanowieniu staje się zrozumiałe, to to, że odpowiednio zredukowane modele minimalnoharmoniczne prowadzą do wyników bliższych pomiarom niż pełne - skomplikowane i rozbudowane - modele poliharmoniczne niezredukowane. W tym właśnie zdaje się znajdować potwierdzenie znana dobrze w świecie sztuki zasada, którą dobitnie i lapidarnie wyartykułował wybitny polski artysta Władysław Skoczylas: *rysować, to znaczy opuszczać*. Dla nas inżynierów oznacza to: *tworzyć model matematyczny, to znaczy mądrze upraszczać*.

LITERATURA

1. Kluszczyński K.: Uogólnienie transformacji dwuosiowej i jej zastosowanie do analizy niesymetrycznych maszyn indukcyjnych, a w szczególności jednofazowego silnika z kondensatorem pracy o uzwojeniach stojan typu T. Praca doktorska, Pol. Śląska, Gliwice 1978.
2. Kluszczyński K.: Składowe aktywne i zerowe prądów w obwodach elektromagnetycznych. Rozprawy Elektrotechniczne, nr 27, z. 3. Warszawa 1981.

3. Kluszczyński K.: Momenty pasożytnicze w maszynach asynchronicznych. ZN Pol. Śląskiej, ser. Elektryka, z.102, Gliwice 1986, monografia habilitacyjna.
4. Kluszczyński K.: Decomposition of current vector into active and zero- component in magnetic circuits. Proc. of European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD'87, Paryż 1987.
5. Kluszczyński K.: Diagrammatic notation of differential equations of polyphase asynchronous machine allowing for all MFF space harmonics. Proc. of Beijing International Conference on Electrical Machines, BICEM' 87, Pekin 1987.
6. Kluszczyński K.: Graphical method of choice of the number of slots in asynchronous machines. Proc. of International Conference on Electrical Machines, ICEM'88, Piza 1988.
7. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Momenty pasożytnicze w indukcyjnych silnikach klatkowych. Prace Sekcji Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Komitetu Elektrotechniki PAN, PTETiS, Warszawa - Gliwice 1993.
8. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Modelowanie 3-fazowych maszyn indukcyjnych przy uwzględnieniu wyższych harmonicznnych przestrzennych przepływu. ZN Pol. Śląskiej, ser. Elektryka, z.142, Gliwice 1995, monografia.
9. Kluszczyński K.: The classes of electromagnetic circuits. Proc. of Polish-Japanese Joint Seminar on Electromagnetics in Science and Technology, Gdańsk 1997.
10. Kluszczyński K., Szymański D.: Two classes of coupled electric and magnetic circuits. Journal of Technical Physics, PAN, Warszawa 1998.
11. Park R.H.: Two-reaction theory of synchronous machines, ATEE, USA 1933.
12. Trawiński T.: Wpływ elektromagnetycznych momentów pasożytniczych na własności dynamiczne silników indukcyjnych zasilanych z układów przekształtnikowych. Praca doktorska, Pol. Śląska, Gliwice 2000.

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 czerwca 2000 r.