

DOI: 10.5604/20830157.1201318

APROKSYMACJA CHARAKTERYSTYKI STRUMIENIOWO-PRĄDOWEJ PRZETWORNIKA ELEKTROMECHANICZNEGO WYKORZYSTUJĄCA WYNIKI POMIARÓW

Zygmunt Kowalik

Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Mechatroniki

Streszczenie. Hamiltonowski model przetwornika elektromechanicznego wymaga aproksymacji jego charakterystyki strumieniowo-prądowej. Można jej dokonać kawałkami afinicznymi w oparciu o zbiory odpowiadających sobie punktów w przestrzeniach prądów i strumieni. W artykule przedstawiono cztery oryginalne metody konstrukcji tych zbiorów w oparciu o dane pomiarowe. Najlepsze rezultaty osiągnięto za pomocą metod wykorzystujących obliczoną wartość koenergii pola w maszynie.

Słowa kluczowe: aproksymacja symplecjalna, modelowanie matematyczne, pomiary elektryczne, charakterystyka strumieniowo-prądowa

APPROXIMATION OF THE FLUX-CURRENT CHARACTERISTIC OF THE ELECTROMECHANICAL ACTUATOR BASED ON MEASUREMENT RESULTS

Abstract. A Hamiltonian model of an electromechanical actuator requires an approximation of its flux-current characteristic. It can be made using a piecewise affine function, based on sets of corresponding points in the spaces of flux and current. In the paper four original methods of constructing these sets based on measurements results are presented. The best results are obtained using methods that incorporate the computed value of the magnetic field coenergy in the modeled machine.

Keywords: simplicial approximation, mathematical modeling, electrical measurements, flux-current characteristic

Wstęp

Charakterystyka strumieniowo-prądowa przetwornika elektromechanicznego (dalej: funkcja Ψ - i) to funkcja wiążąca prądy płynące w jego uzwojeniach i strumienie sprzężone skojarzone z tymi uzwojeniami. W przypadku przetworników, w których magnetowód może być silnie nasycony, np. w przypadku silników synchronicznych reluktancyjnych (SynRM), funkcja Ψ - i może mieć skomplikowaną postać. Jest ona funkcją o wielowymiarowej przestrzeni zarówno argumentów, jak i wartości.

Aproksymacja funkcji Ψ - i jest ważna przy modelowaniu przetworników elektromechanicznych z wykorzystaniem formalizmu Hamiltona. Model hamiltonowski jest dobrze dostosowany do modelowania przetworników o skomplikowanej funkcji Ψ - i , ponieważ w stosunku do dualnego formalizmu Lagrange'a nie wymaga podania postaci macierzy indukcyjności dynamicznych, których elementy trudno wyznaczyć, a przeprowadzanie na niej operacji matematycznych może powodować dodatkowe błędy. W związku z powyższym model hamiltonowski może być dokładniejszy od analogicznego modelu opartego na formalizmie Lagrange'a [2].

Aproksymacja funkcji Ψ - i może być przeprowadzona z wykorzystaniem aproksymacji symplecjalnej będącej narzędziem topologii algebraicznej. Aproksymacja taka wymaga zbiorów odpowiadających sobie punktów w przestrzeniach prądów i strumieni. W obszarach pomiędzy danymi wprost punktami funkcja Ψ - i jest przy takim podejściu aproksymowana kawałkami afinicznymi [1].

W artykule przedstawiono sposoby uzyskiwania zbiorów wykorzystywanych przy aproksymacji funkcji Ψ - i metodą aproksymacji symplecjalnej. Metody są dostosowane do danych pochodzących z pomiarów. W artykule przedstawiono także zbiory uzyskane z wykorzystaniem tych metod, na podstawie pomiarów dotyczących prototypowego silnika SynRM. Przedstawiono również cechy aproksymacji opartych na uzyskanych zbiorach.

1. Hamiltonowski model przetwornika elektromechanicznego

W hamiltonowskim modelu przetwornika elektromechanicznego zmiennymi stanu są uogólnione strumienie sprzężone z uzwojeniami przetwornika oraz moment pędu jego wirnika. Model został sformułowany dla przetwornika trójfazowego, którego uzwojenia połączono w gwiazdę bez przewodu zerowego. Dzięki temu rozplływ prądów jest jednoznacznie określony przy

podaniu tylko dwóch prądów fazowych, np. fazy A – i_A i fazy B – i_B , a jako zmienne stanu można wybrać strumienie uogólnione $\Psi_{AC} = \Psi_A - \Psi_C$ oraz $\Psi_{BC} = \Psi_B - \Psi_C$, gdzie Ψ_A , Ψ_B , Ψ_C – strumienie sprzężone odpowiednio z fazami A, B i C. Pozwala to na redukcję wymiarów przestrzeni prądów i strumieni i znacznie upraszcza model. Dodatkowo, ponieważ pomiar jest przeprowadzany przy zatrzymanym wirniku, można przy tworzeniu zbiorów do aproksymacji funkcji Ψ - i rozważać tylko elektryczną część modelu oraz zaniedbać zmienność strumieni i prądów przy zmianie kąta obrotu wirnika przetwornika. W rezultacie równanie opisujące przetwornik elektromechaniczny w czasie pomiaru to:

$$\frac{d}{dt} \Psi = \mathbf{u} - \mathbf{R}i(\Psi) \quad (1)$$

gdzie: $\Psi = [\Psi_{AC}, \Psi_{BC}]^T$ – wektor strumieni sprzężonych uogólnionych, $\mathbf{u} = [u_{AC}, u_{BC}]^T$ – wektor napięć międzyfazowych, $\mathbf{R} = [r_A + r_C, r_C; r_C, r_B + r_C]$ – macierz rezystancji, przy czym r_A , r_B , r_C – rezystancje faz A, B, C, $i(\Psi) = [i_A(\Psi_{AC}, \Psi_{BC}), i_B(\Psi_{AC}, \Psi_{BC})]^T$ – wektor prądów fazowych.

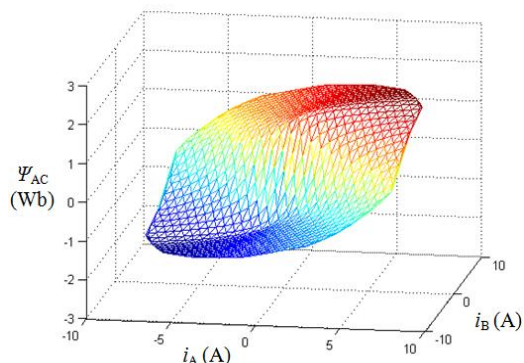
2. Aproksymacja symplecjalna

W równaniu (1) wyrażenie $i(\Psi)$ określa wymagającą aproksymacji funkcję Ψ - i . Aby użyć w tym celu aproksymacji symplecjalnej należy określić:

- 1) zbiory odpowiadających sobie punktów w przestrzeniach (w tym przypadku dwuwymiarowych) prądów i strumieni,
- 2) podział (triangulacja) zbiorów, określająca obszary wyznaczone przez trójki punktów w każdej przestrzeni takie, że w danym obszarze nie ma żadnego innego punktu należącego do określonych wcześniej zbiorów. Obszary takie nazywane są sympleksami [1], w przestrzeniach dwuwymiarowych są one trójkątami.

Funkcja Ψ - i jest w każdym sympleksie aproksymowana przekształceniem afinicznym, którego postać jest wyznaczana przez jego wierzchołki. Przekształcenia kawałkami afinicznymi (lub liniowymi, ang. *piecewise affine/linear*) są często używane do opisu systemów nieliniowych [5]. Tak określone przekształcenie kawałkami afinicznymi jest homeomorfizmem – ma więc przekształcenie odwrotne i budując potrzebne do aproksymacji zbiory można rozważać zarówno funkcję $i = i(\Psi)$ jak i $\Psi = \Psi(i)$. Dokładność aproksymacji w pewnych obszarach przestrzeni prądów i strumieni jest tym większa, im mniejsze są w nim sympleksy, a co za tym idzie im bardziej zagęszczone są w nim zbiory punktów, na których oparto aproksymację. Mając to na uwadze, należy określić takie zbiory, na których będzie oparta aproksymacja funkcji Ψ - i , które będą zagęszczone w obszarach silnej nielino-

wości tej funkcji, a rozrzedzone w obszarach, w których funkcji Ψ -i jest bliska przekształceniu afinicznemu (tj. w obszarach bliskich początkom obu przestrzeni oraz w obszarach silnego nasycenia magnetowodu przetwornika). Na rysunku 1 przedstawiono przebieg funkcji $\Psi_{AC} = \Psi_{AC}(i_A, i_B)$, otrzymany na podstawie danych pochodzących z modelu polowego prototypowej maszyny SynRM. Widoczne są wspomniane wyżej obszary.



Rys. 1. Przykładowy przebieg funkcji $\Psi_{AC} = \Psi_{AC}(i_A, i_B)$

3. Pomiary prądów i strumieni sprzężonych

Pomiaru strumieni uogólnionych i odpowiadających im prądów dokonuje się z użyciem metody zaniku prądu stałego. Na procedurę składają się:

- 1) ustalenie żądanych prądów w fazach przetwornika elektromechanicznego,
- 2) zwarcie faz maszyny i rejestrowanie przebiegów prądów,
- 3) obliczenie przebiegów strumieni przez scałkowanie równania (1) przy $\mathbf{u} = \mathbf{0}$.

Przed zastosowaniem powyższej procedury należy dokładnie określić wartości rezystancji w macierzy \mathbf{R} , gdyż błędy w jej wyznaczeniu mogą istotnie wpłynąć na obliczone przebiegi strumieni.

Po zastosowaniu wyżej opisanej procedury otrzymuje się zmierzające do zera przebiegi wielkości elektrycznych opisujących stan przetwornika. Na ich podstawie można również obliczyć przebieg koenergii pola magnetycznego w maszynie:

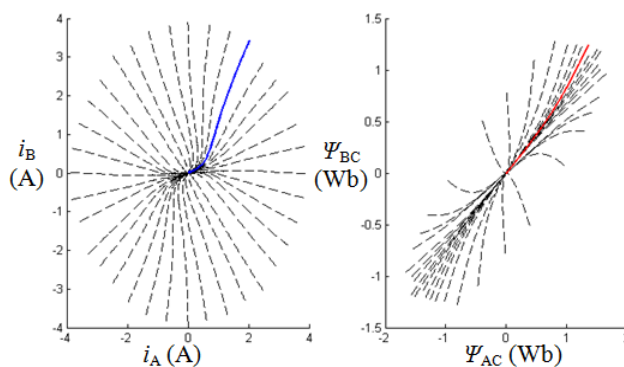
$$E_{cm}(t) = E_{cm}^0 + \int_0^t \left[\Psi_{AC}(\tau) \frac{di_A(\tau)}{d\tau} + \Psi_{BC}(\tau) \frac{di_B(\tau)}{d\tau} \right] d\tau \quad (2)$$

gdzie: t – czas, $E_{cm}^0 = -\int_0^T \left[\Psi_{AC}(\tau) \frac{di_A(\tau)}{d\tau} + \Psi_{BC}(\tau) \frac{di_B(\tau)}{d\tau} \right] d\tau$ – początkowa koenergia, przy czym T – czas, po którym przyjmuje się, że przebiegi prądów i strumieni są równe 0.

Otrzymane przebiegi prądów i strumieni wyznaczają trajektorie w przestrzeniach odpowiadających im zmiennych. Z pary trajektorii pochodzących z pojedynczego pomiaru można wybrać kilka punktów do konstruowanych zbiorów dla aproksymacji funkcji Ψ -i. Po wybraniu punktów z pewnego zbioru trajektorii wyznaczonych dla warunków początkowych położonych w różnych kierunkach przestrzeni strumieni i prądów, można otrzymać zbiory dobrze aproksymujące funkcję Ψ -i. Przykładowe trajektorie przedstawiono na rysunku 2. W praktyce, pomiarów i obliczeń można dokonywać analizując tylko dwie wybrane ćwiartki przestrzeni prądów i odpowiadające im obszary w przestrzeni strumieni, ponieważ funkcja Ψ -i jest symetryczna względem początków obu przestrzeni.

Przedstawionej metody pomiarowej użyto do utworzenia zbiorów punktów pozwalających na aproksymację funkcji Ψ -i rzeczywistej maszyny elektrycznej. Obiektem pomiarowym jest prototypowa maszyna SynRM o dwóch parach biegunów, zbudowana na bazie stojana seryjnego sinika indukcyjnego, dla którego prąd znamionowy wynosi 2,2 A.

W czasie pomiaru silnik zasilano napięciem stałym przy użyciu regulowanych zasilaczy. Uzwojenia faz zwierano przy użyciu tranzystorów IGBT. Zanikające przebiegi prądów mierzono za pomocą przekładników prądowych (LEM) i rejestrowano za pomocą oscyloskopu.

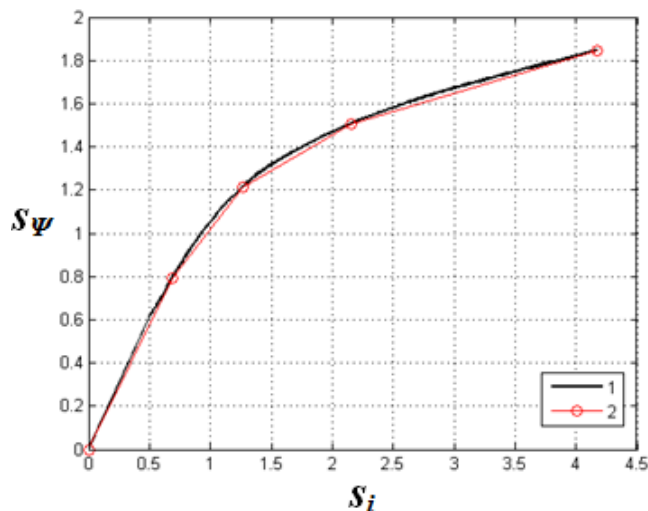


Rys. 2. Trajektorie w przestrzeniach prądów (z lewej) i strumieni. Zaznaczono parę odpowiadających sobie trajektorii

4. Metody wyboru punktów z trajektorii

Zaproponowano cztery metody wyboru punktów z pojedynczej pary trajektorii, podzielone na dwie grupy:

- 1) Metody wykorzystujące geometryczne właściwości trajektorii
 - metoda I, z funkcją długości – sprowadza zadanie do problemu wyboru punktów, które pozwalają na optymalną aproksymację kawałkami liniową funkcji długości trajektorii w przestrzeni strumieni s_Ψ od długości trajektorii w przestrzeni prądów s_i . Przyjęto konwencję odmierzania długości s_i i s_Ψ od początków przestrzeni odpowiednio prądów i strumieni.



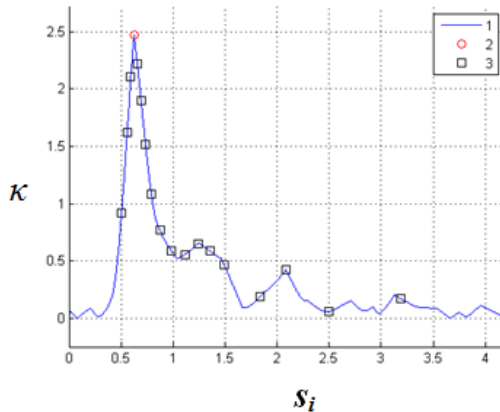
Rys. 3. Przebieg funkcji $s_\Psi = s_\Psi(s_i)$ (1) i jej aproksymacja oparta na 5 punktach (2)

Początkowo przebieg funkcji długości $s_\Psi = s_\Psi(s_i)$ jest zdefiniowany przez punkty odpowiadające wszystkim punktom próbkowanych przebiegów prądów i strumieni. Następnie tworzony jest zbiór punktów aproksymujących przez naprzemienne usuwanie punktów ze zbioru bazowego i przesuwanie punktów pozostałych tak, by aproksymacja kawałkami liniową funkcji długości oparta na tym zbiorze była obciążona możliwie małym błędem średniokwadratowym. Tak określony zbiór jest brany jako parametr wejściowy do następnej iteracji procedury aż do momentu, w którym zbiór zawiera iterowaną na początku liczbę punktów. W czasie procedury ze zbiorów usuwane są punkty, które leżą blisko prostej wyznaczonej przez punkty z nimi sąsiadujące (czyli byłyby dobrze aproksymowane przez aproksymację kawałkami liniową opartą na punktach sąsiednich). Przesuwanie punktów jest częściowo oparte na algorytmie Groffa [4]. Na rysunku 3 pokazany jest przebieg funkcji długości i jego aproksymacja kawałkami liniową oparta na zbiorze złożonym z 5 punktów, wyznaczona dla pary trajektorii wyróżnionej na rys. 2. Po otrzymaniu zbioru punkty w przestrzeniach prądów i strumieni, służące do aproksymacji funkcji Ψ -i, otrzymuje się korzystając z jednoznacznych odwzorowań $s_i(i)$ i $s_\Psi(\Psi)$.

- metoda II, z obliczaniem krzywizn – w tej metodzie oblicza się krzywizny: krzywiznę κ_{AC} funkcji $\Psi_{AC}(i_A, i_B)$ oraz krzywiznę κ_{BC} funkcji $\Psi_{BC}(i_A, i_B)$ [6], a następnie krzywiznę "średnią" κ jako sumę geometryczną obliczonych:

$$\kappa = \sqrt{\kappa_{AC}^2 + \kappa_{BC}^2} \quad (3)$$

Krzywizny oblicza się po parametryzacji przebiegów prądów i strumieni od długości s_i . Następnie punkty wybiera się z trajektorii tak, by odzwierciedlać jej zakrzywienie, tzn. częściej we fragmentach o dużej krzywiznie κ . Wyboru dokonuje się na podstawie przebiegu funkcji $\kappa(s_i)$, a punkty do aproksymacji funkcji $\Psi-i$ wybiera się na podstawie wybranych wartości długości s_i i wcześniej sparametryzowanych przebiegów. Liczba punktów wybieranych z każdej pary trajektorii jest określana na początku procedury, podobnie jak dla metody I. Na rysunku 4 przedstawiono przebieg krzywizny $\kappa = \kappa(s_i)$ (1). Zaznaczono punkt o największej krzywiznie (2) oraz pozostałe wybrane punkty (3). Przebieg wyznaczono dla trajektorii wyróżnionych na rys. 2. Ponieważ obliczenie krzywizny wymaga obliczania pochodnej sparametryzowanych przebiegów prądów i strumieni, przebiegi te przed obliczeniami aproksymowane są krzywymi sklejanymi 3. stopnia, a obliczenia są przeprowadzane na wzorach tych krzywych. Nie uwzględnia się też fragmentów przebiegów prądów i strumieni położonych blisko początków odpowiednich przestrzeni, by ograniczyć wpływ zakłóceń pomiarowych na wyniki obliczeń.



Rys. 4. Wykres krzywizny κ dla przebiegu reprezentatywnego (1) wraz z zaznaczonym punktem o największej krzywiznie (2) i pozostałymi wartościami krzywizn (3)

2) Metody związane z koenergią

- metoda III, sprawdzanie poprawności obliczeń koenerгии zakładających liniową funkcję $\Psi-i$ – przy liniowej funkcji $\Psi-i$ zmiana koenerгии pola magnetycznego ΔE_{cm} zależy tylko od punktu początkowego Ψ_{start}, i_{start} i końcowego Ψ_{end}, i_{end} w obu przestrzeniach i jest określona wzorem:

$$\Delta E_{cm} = \frac{1}{2} (\Psi_{end} + \Psi_{start}) \cdot (i_{end} - i_{start}). \quad (4)$$

W metodzie na danej parze trajektorii w przestrzeniach prądów i strumieni wybierane są fragmenty, w których moduł względnego błędu δE_{traj} między zmianą koenerгии obliczaną ze wzorów (2) i (4) (w odniesieniu do wartości koenerгии w punkcie początkowym fragmentów) jest mniejszy niż założony. Obliczenia rozpoczynają się od punktów początkowych pary trajektorii (punktu dla $t = 0$), które wyznaczają początek pierwszego z wybranych fragmentów na każdej z trajektorii. Jako koniec tego fragmentu wybiera się (zgodnie ze wzrastającym czasem) kolejne, odpowiadające sobie punkty leżące na każdej z trajektorii do momentu, w którym wartość obliczonego błędu względnego jest większa niż założona. Tak wybrane punkty końcowe stają się punktami początkowymi kolejnego fragmentu na obu trajektorii i procedura jest powtarzana. Procedurę prowadzi się do momentu, w którym jako punkty końcowe dla pewnej pary fragmentów zostaną wybrane punkty końcowe analizowanych trajektorii, położone w bliskim sąsiedztwie początków odpowiednich przestrzeni. Do zbiorów służących do aproksymacji funkcji $\Psi-i$

brane są wszystkie punkty wyznaczające granice fragmentów na danej parze trajektorii z wyjątkiem końców trajektorii; zamiast niego do zbiorów dodaje się początki każdej z przestrzeni.

- metoda IV, hybrydowa – z reprezentatywnej pary trajektorii wybiera się punkty stosując jedną z metod I-III, a następnie oblicza się dla wybranych punktów wartości koenerгии, które tym punktom odpowiadają. Reprezentatywna para trajektorii powinna przebiegać przez obszary przestrzeni prądów i strumieni, w których funkcja $\Psi-i$ jest mocno zakrzywiona. Z każdej kolejnej pary trajektorii wybiera się punkty, dla których obliczone wartości koenerгии są takie, jak obliczone dla trajektorii reprezentatywnej. Przy obliczeniach w artykule korzystano z metody I jako metody wyboru punktów z pary trajektorii reprezentatywnych. Jako reprezentatywną parę trajektorii przyjęto parę wyróżnioną na rysunku 2.

5. Cechy aproksymacji opartych na wyznaczonych zbiorach

W tabeli 1 przedstawiono niektóre cechy aproksymacji sympleksjalnych opartych na zbiorach określonych z wykorzystaniem metod I-IV. Warunki obliczeń były następujące:

- metody I i II – liczba punktów wybranych z pary trajektorii: 4,
- metoda III – maks. wartość $|\delta E_{traj}|$: 2,5%,
- metoda IV – liczba punktów wybranych z reprezentatywnej pary trajektorii: 4.

Obliczenia przeprowadzono dla każdej pary trajektorii przedstawionej na rys. 2. Początkowe wartości prądów dla każdej trajektorii w przestrzeni prądów leżą na okręgu o promieniu 4 A i są na nim umieszczone co 10° , rozpoczynając od punktu (4 A, 0 A). Zbiory w przestrzeni prądów poddawano triangulacji z wykorzystaniem algorytmu Delaunaya [1], a jej struktura była przenoszona na zbiór w przestrzeni strumieni.

Ważnym wskaźnikiem określającym błąd aproksymacji w ramach pojedynczego sympleksu jest błąd względny δE_{cm} , obliczany przez podzielenie zmiany koenerгии obliczonej na łamanej zamkniętej stanowiącej granicę tego sympleksu przez średnią koenerგიę obliczoną w jego wierzchołkach [3]. Istotnym wymogiem dla tak przeprowadzanej aproksymacji jest utrzymywanie obliczonego w ten sposób błędu był utrzymywany w pewnych granicach, ale niekoniecznie na poziomie bliskim zeru. W szczególności chęć utrzymania bardzo niskiej wartości błędu powodowałoby duże zagęszczenie konstruowanych zbiorów punktów w obszarach przestrzeni prądów i strumieni, w których funkcja $\Psi-i$ jest mocno zakrzywiona. W rezultacie zwiększony zostałby stopień komplikacji modelu, nie zwiększając przy tym jego dokładności. Dzieje się tak, ponieważ w modelu hamiltonowskim przetwornika elektromechanicznego nie bierze się pod uwagę strat energii związanych ze zmiennością pola magnetycznego, więc różnice w przewidywaniach modelu i w rzeczywistych pomiarach będą obecne nawet przy idealnej aproksymacji funkcji $\Psi-i$ przeprowadzanej w opisany sposób. Uznaje się, że akceptowalny poziom modułu tego błędu wynosi 5%. Przedstawiony w tabeli 1 błąd średni $|\delta E_{cm}|_{avg}$ obliczono jako średnią ważoną rozumianą przez stosunek sumy iloczynów modułów błędów w sympleksach $|\delta E_{cm}|$ i pół sympleksów (w przestrzeni prądów) do sumy pół tych sympleksów.

Tabela 1. Cechy aproksymacji opartych na zbiorach skonstruowanych z użyciem opisanych metod (sympl. – sympleksów)

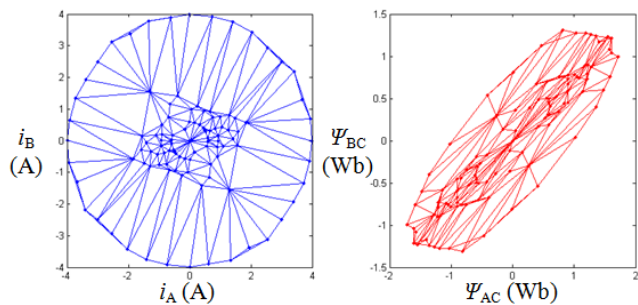
Metoda konstrukcji zbiorów	Liczba punktów w zbiorach	Liczba sympl.	Maks. $ \delta E_{cm} $, %	$ \delta E_{cm} _{avg}$, %	Liczba sympl. z błędem > 5%
I	109	190	33,6	3,61	34
II	109	190	36,7	7,07	34
III	91	154	16,6	3,00	26
IV	113	196	14,7	2,60	22

Z analizy tabeli 1 wynika, że metody związane z koenergią dają zbiory, na których oparta aproksymacja jest dokładniejsza od aproksymacji opartych na zbiorach otrzymanych przy użyciu metod I i II. Najlepszą dokładność osiągnięto przy użyciu metody IV, ale poddane triangulacji zbiory uzyskane przy jej użyciu mają najwięcej wierzchołków i sympleksów. Ponieważ wartości błędów średnich są podobne (i akceptowalne) dla metod I, III i IV, jako najlepszą należy ocenić metodę prowadzącą do uzyskania najmniejszych zbiorów, a więc metodę III.

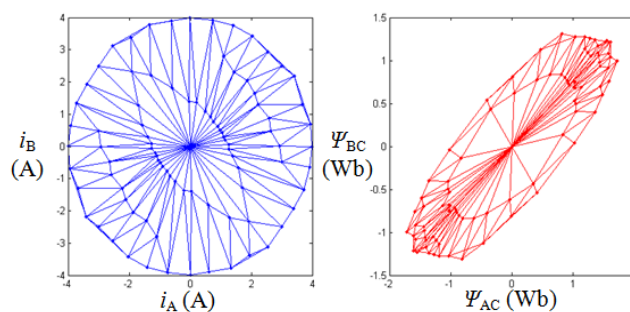
Wyniki takie można wytłumaczyć analizując poddane triangulacji zbiory otrzymane przy użyciu przedstawionych metod. Na rysunku 5 pokazano poddane triangulacji zbiory w przestrzeniach prądów i strumieni, uzyskane przy użyciu metody II, a na rysunku 6 przy użyciu metody III. Na rys. 5 widać koncentrację

punktów w sąsiedztwie początku przestrzeni prądów, mimo, że funkcja Ψ -i w tym obszarze jest bliska przekształceniu afinicznemu. Zbiór punktów w przestrzeni strumieni jest także bardzo nieregularny i zawiera wiele długich i cienkich sympleksów, co może pogarszać jakość aproksymacji. Z drugiej strony zbiory uzyskane przy użyciu metody III przedstawione na rys. 6 są regularne w obu przestrzeniach, a żadne punkty nie są obecne w bliskim sąsiedztwie początków przestrzeni.

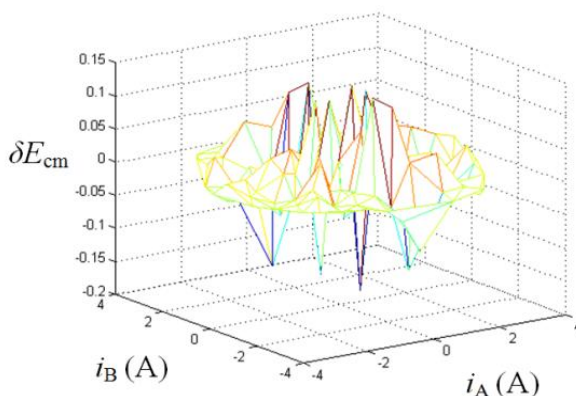
Na rysunku 7 pokazano wykres błędu aproksymacji δE w funkcji prądów dla aproksymacji sympleksyjnej funkcji Ψ -i opartej na zbiorach uzyskanych z użyciem metody III. Można zauważyć, że największe wartości błędów są obliczone dla dużych sympleksów w centrum przestrzeni prądów. W pozostałych obszarach przestrzeni błąd jest akceptowalny.



Rys. 5. Poddane triangulacji zbiory punktów w przestrzeniach prądów (z lewej) i strumieni, uzyskane przy użyciu metody II



Rys. 6. Poddane triangulacji zbiory punktów w przestrzeniach prądów (z lewej) i strumieni, uzyskane przy użyciu metody III



Rys. 7. Wykres błędu aproksymacji w funkcji prądów, wykreślony dla aproksymacji opartej o zbiory uzyskane przy użyciu metody III

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono metody konstruowania zbiorów używanych przy aproksymacji sympleksyjnej charakterystyki strumieniowo-prądowej przetwornika elektromechanicznego. Metody te polegają na wyborze punktów z trajektorii położonych w przestrzeniach prądów i strumieni (przestrzeń stanu). Trajektorie są otrzymywane pomiarowo, z użyciem metody zaniku prądu stałego.

Opisanych metod użyto do skonstruowania zbiorów, na których oparto aproksymację funkcji Ψ -i prototypowego silnika SynRM. Najlepsze okazały się metody wykorzystujące koenergię pola magnetycznego w maszynie. Zbiory uzyskane z ich użyciem były małe (najmniejsze dla metody III), a maksymalny popelniany błąd, błąd średni oraz liczba sympleksów, w których błąd był większy niż 5% były najmniejsze z uzyskanych (metoda IV).

Przedstawione metody nie pozwalają na określenie zbiorów trajektorii, z których wybierane są kolejne punkty budujące konstruowane zbiory. Identyfikacja pomiarowa charakterystyk strumieniowo-prądowych wymaganych w modelu hamiltonowskim przetwornika elektromechanicznego powinna się stać przedmiotem dalszych analiz pozwalających na określenie minimalnego zbioru trajektorii, które do tej identyfikacji posłużą.

Literatura

- [1] Agoston M.K.: Computer Graphics and Geometric Modeling – Mathematics, Springer, 2005.
- [2] Burlikowski W.: Zastosowanie formalizmu Hamiltona w opisie przetwornika elektromechanicznego na przykładzie silnika reluktancyjnego. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [3] Burlikowski W., Kowalik Z.: Error Analysis in Mathematical Model of Electromechanical Actuator Using Hamiltonian Equations, Technical Transactions, 1-E/2015.
- [4] Groff R.E.: Piecewise Linear Homeomorphisms for Approximation of Invertible Maps, Ph.D. Thesis, University of Michigan, 2003.
- [5] Rodrigues L., How J. P.: Observer-Based Control of Piecewise-Affine Systems, Decision and Control, 2008.
- [6] Shifrin T.: Differential Geometry: A First Course in Curves and Surfaces. University of Georgia, 2015.

Mgr inż. Zygmunt Kowalik
e-mail: zygmunt.kowalik@polsl.pl

Zygmunt Kowalik urodził się w 1989 r. w Zabrze. W 2008 r. rozpoczął studia na kierunku Mechatronika na Wydz. Elektrycznym Politechniki Śląskiej, kończąc je w 2013 r. W tym samym roku rozpoczął studia doktoranckie. Jego opiekunem naukowym jest dr hab. inż. Wojciech Burlikowski. Zainteresowania naukowe Zygmunta Kowalika obejmują modelowanie matematyczne przetworników elektromechanicznych oraz ich systemy sterowania.

