

VOLODYMYR SAMOTYY*

OPTIMALIZACJA GENETYCZNA PRZETWORNIKA
LICZBY FAZGENETIC OPTIMIZATION PHASE
CONVERTERS NUMBER

Streszczenie

Zaproponowano metodę optymalizacji parametrycznej przetwornika liczby faz za pomocą RLC -łańcucha oraz algorytmu genetycznego. Umożliwia on najbardziej przybliżony kształt sygnału wyjściowego przetwornika do idealnego napięcia trójfazowego.

Słowa kluczowe: algorytm genetyczny, model wrażliwości na warunki początkowe

Abstract

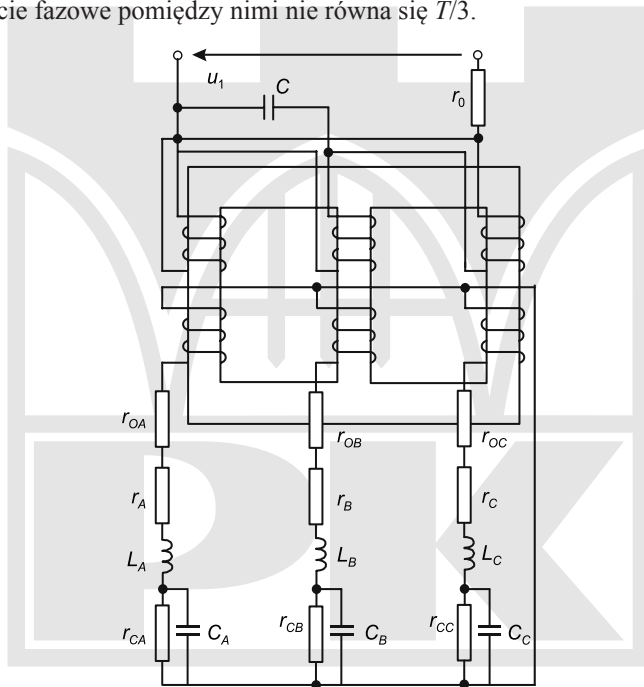
Proposed a method of optimizing the number of phases of the parametric transducer using RLC -chain and a genetic algorithm that allows the most approximate shape of the transducer output signal to an ideal three-phase voltage.

Keywords: genetic algorithm, model of sensitivities to the initial state

* Prof. dr hab. inż. Volodymyr Samotyy, Katedra Automatyki i Technik Informacyjnych, Wydział Elektrotechniki i Inżynierii Komputerowej, Politechnika Krakowska; Katedra Komputerowych Systemów Automatyki, Instytut Technologii Komputerowych, Automatyki i Metrologii, Uniwersytet Narodowy „Lwivska Politechnika”.

1. Wstęp

W wielu przypadkach użytkownicy nie mają dostępu do napięcia trójfazowego. Jeżeli jednak istnieje taka potrzeba, możemy otrzymać je z napięcia jednofazowego. Pierwszym sposobem jest przetwarzanie napięcia jednofazowego na napięcie stałe, a następnie, za pomocą falownika, do przemiennego napięcia trójfazowego. Ścieżka ta nie znajduje uzasadnienia technologicznego, ponieważ wymagany jest schemat sterowania tyrystorami falowników. Druga wada takiego podejścia polega na tym, że sygnał wyjściowy falownika nie jest sinusoidalny. Istnieje jeszcze inny sposób rozwiązania tego problemu – zastosowanie przetwornika liczby faz. Jego podstawowy element to transformator trójfazowy zasilany napięciem jednofazowym przez kondensator C (rys. 1). Prądy obciążenia przetwarzacza mają kształt niezgodny z zależnością trójfazową, tj. amplitudy prądów poszczególnych faz są różne, a przesunięcie fazowe pomiędzy nimi nie równa się $T/3$.



Rys. 1. Schemat przetwornika liczby faz

Fig. 1. Converter circuit among phases

W artykule zaproponowano regulowanie amplitud i faz prądów, korzystając z RLC -łańcuchów. Zmieniając wartości ich parametrów, możemy wpływać na prądy fazowe. Ze względu na nieliniowość badanego obiektu, analityczne obliczanie parametrów jest niemożliwe. Do ich inicjalizacji zaproponowano zastosowanie algorytmów genetycznych jako najbardziej odpowiednich dla takiego problemu. W ten sposób można rozwiązać problem globalnej optymalizacji parametrycznej przetwornika liczby faz, która zapewni równość wszystkich amplitud prądów fazowych i wymagane przesunięcie fazowe między nimi.

2. Przegląd literatury

Analiza przebiegów niestabilnych sprowadza się do rozwiązania problemu Cauchy'ego równań różniczkowych, przy podanych warunkach początkowych zmiennych stanu. Całkowanie takich równań metodami numerycznymi na znacznym odcinku czasu może doprowadzić do przebiegów okresowych. Jednak podobne podejście nie jest uzasadnione, biorąc pod uwagę liczbę obliczeń i akumulację błędów całkowania numerycznego. Dlatego ciągle były poszukiwane metody analizy przebiegów okresowych, pomijając przebiegi nieokresowe. Problem analizy przebiegów okresowych został rozpatrzony w wielu pracach naukowych. W [4] zaproponowano metodę analizy rezonansu nieliniowych obwodów elektromagnetycznych, opartych na szeregach Voltaire. Jej wadą jest jednak brak kryteriów wyboru liczby harmonicznych, branych pod uwagę, co dla przebiegów rezonansowych ma bardzo duże znaczenie. Wskazana wada jest wspólna dla wszystkich metod opartych na szeregach, w szczególności szeregach funkcjonalnych [2] oraz szeregach Fouriera [3]. Pozbawiona tych wad jest metoda Gaussa-Seidla korekty wtórnej [1], ale wymaga dużej liczby iteracji.

Znana jest idea wykorzystania metody ekstrapolacyjnej, [7, 13] opartej o ε -algorytm. Jego zastosowanie do analizy przebiegów okresowych opisano w pracach [9–11]. Za główną wadę tej metody [7, 13] uważa się konieczność całkowania równań różniczkowych na znacznym odcinku czasu (nT). Zastosowanie metody Newtona do analizy przebiegów okresowych opisane zostało w [6]. Za główny problem uznać tu należy obliczanie macierzy monodromii, części macierzy Jacobiego, która [6] obliczana jest przez całkowanie numeryczne równania wariacji. Niestety metoda [6] nie nadaje się do analizy nieliniowych obwodów elektromagnetycznych, a problem udało się rozwiązać w [5, 8, 9, 12].

3. Równania stanu przetwornika liczby faz

Równania przetwornika liczby faz z obciążeniem aktywnym przedstawiono w pracy [12]. W naszym przypadku wskazany przetwornik ma na wyjściu włączone dodatkowe układy *RLC* dla amplitudowo-fazowej korekty prądu obciążenia do wzorcowej zależności trójfazowej. W układzie zachowany został warunek, że amplitudy prądów obciążenia faz mają jednakowe wartości i są przesunięte w czasie o $1/3$ okresu. Zapiszemy równania stanu przetwornika liczby faz w postaci macierzowej:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{B}\mathbf{Z}(t), \quad \mathbf{Z}(t) = \frac{d\mathbf{Y}}{dt} \quad (1)$$

gdzie:

- $\mathbf{X} = (\psi, \mathbf{I}_2, \mathbf{u}_{C1}, \mathbf{U}_{C2})^T$ – wektor zmiennych stanu;
- $\mathbf{B} = \text{diag}((\mathbf{D}, \mathbf{A}_2)^T, \mathbf{C}_1^{-1}, \mathbf{C}_2^{-1})$ – macierz diagonalna współczynników;
- $\mathbf{Z}(t) = (\mathbf{U} - \mathbf{R}\mathbf{I}, -\mathbf{H}_C^T \mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2 - \mathbf{R}_C^{-1} \mathbf{U}_{C2})^T$ – wektor funkcji czasowej;
- \mathbf{C}_1 – pojemność kondensatora na wejściu;
- $\mathbf{C}_2 = \text{diag}(\mathbf{C}_A, \mathbf{C}_B, \mathbf{C}_C)$ – macierz diagonalna pojemności kondensatorów na wyjściu;

$$\begin{aligned} \Psi &= (\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C) && - \text{wektor strumieni głównych;} \\ I_1 &= (i_{1A}, i_{1B}, i_{1C})^T, I_2 = (i_{2A}, i_{2B}, i_{2C})^T && - \text{wektory prądów;} \\ I &= (I_1, I_2)^T && - \text{pełny wektor prądów obwodów elektrycznych;} \\ R &= \text{diag}(R_1, R_2) && - \text{macierz diagonalna rezystancji;} \\ U &= (H_1 u_1 + H_C u_{C1}, -U_{C2})^T && - \text{wektor napięć;} \\ u_1 &&& - \text{napięcie zasilania;} \\ u_{C1} &&& - \text{napięcie kondensatora na wejściu;} \\ U_{C2} &= (u_{CA}, u_{CB}, u_{CC})^T && - \text{wektor napięć kondensatorów na wyjściu;} \\ H_1 &= (1, 0, -1)^T, H_C = (0, 1, -1)^T && - \text{macierzy strukturalne;} \\ R_1 &&& - \text{macierz rezystancji strony pierwotnej} \end{aligned}$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} r_{1A} + r_0 & 0 & -r \\ 0 & r_{1B} & 0 \\ -r_0 & 0 & r_{1C} + r_0 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} r_0 &&& - \text{rezystancja wewnętrzna źródła zasilania;} \\ r_{1A}, r_{1B}, r_{1C} &&& - \text{rezystancje uzwojeń pierwotnych;} \\ R_2 &= \text{diag}(r_{2A} + r_{OA} + r_A, r_{2B} + r_{OB} + r_B, r_{2C} + r_{OC} + r_C) && - \text{przekątna rezystancji strony wtórnej;} \\ R_C &= \text{diag}(r_{CA}, r_{CB}, r_{CC}) && - \text{macierz diagonalna rezystancji układów RLC;} \\ D &= (D_1, D_2), A_2 = (A_{21}, A_{22}), D_1 = G\alpha_1, D_2 = G\alpha_2, && \\ G &= (\alpha'' + \alpha_0 E_1 + \alpha_1 + \alpha_2)^{-1}, A_{21} = -\alpha_2 D_1, A_{22} = \alpha_2 (E - D_2) && - \text{macierze współczynników;} \\ E &= \text{diag}(1, 1, 1) && - \text{macierz jednostkowa;} \\ E_1 &&& - \text{macierz o wymiarze } 3 \times 3 \text{ której wszystkie elementy równe są jedności;} \\ \alpha_1 &= \text{diag}(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}), \alpha_2 = \text{diag}(\alpha'_{2A}, \alpha'_{2B}, \alpha'_{2C}) && - \text{przekątne odwrotności indukcyjności rozpraszania pierwotnego i wtórnego uzwojeń;} \\ \alpha'_{2k} &= \alpha_{2k} / (1 + \alpha_{2k} L_k), \quad k = A, B, C; && \\ \alpha'' &= \text{diag}(\alpha''_A, \alpha''_B, \alpha''_C) && - \text{macierz diagonalna odwrotności indukcyjności dynamicznych obliczanych przez charakterystyki magnesowania} \end{aligned}$$

$$\alpha''_j = \frac{\partial \varphi_j(\psi_j)}{\partial \psi_j} = \alpha''_j(\psi_j), \quad j = A, B, C \quad (3)$$

Prądy uzwojeń pierwotnych można obliczyć analitycznie

$$I_1 = \alpha' \Psi + \alpha_0 E_1 \Psi - I_2 \quad (4)$$

Analiza przebiegów niestabilnych jest zredukowana do całkowania numerycznego równań (1), przy zadanych warunkach początkowych $X(0)$. Przebiegi ustalone można obliczyć,

podając warunki początkowe $X(0)$ spełniające warunek okresowości. Takie warunki otrzymujemy, korzystając z modelu wrażliwości na warunki początkowe.

4. Model wrażliwości na warunki początkowe

Jedną z metod, która umożliwia analizę przebiegów ustalonych opartą na cyklach iteracyjnych Newtona, znana jest pod nazwą modelu wrażliwości na warunki początkowe. To oznacza, że można obliczyć warunki początkowe $X(0)$, które przy całkowaniu równania (1) podają przebiegi ustalone. Jej głównym problemem jest określenie macierzy monodromii.

Wiadomo, że każdy przebieg ustalony jest przebiegiem okresowym i powinien spełniać warunki okresowe, które można zapisać w postaci układu nieliniowych równań algebraicznych:

$$F(X(0)) = X(0) - X(X(0), T) = 0 \quad (5)$$

gdzie:

T – okres sygnału wejściowego.

Równania nieliniowe (5) rozwiązujemy iteracyjną metodą Newtona:

$$X(0)^{(k+1)} = X(0)^{(k)} - (F'(X(0)^{(k)}))^{-1} F(X(0)^{(k)}) \quad (6)$$

gdzie:

$F'(X(0))$ – macierz Jacobiego równania okresowości (5).

Zapiszemy pochodną po $X(0)$ równania (5), wówczas otrzymamy:

$$F'(X(0)) = E - \Sigma(T), \quad \Sigma(T) = B(T)S(T) \quad (7)$$

gdzie:

$\Sigma(T)$ – macierz monodromii.

Macierz $S(T)$ obliczamy przez całkowanie równań wariacyjnych:

$$\frac{dS}{dt} = QS \quad (8)$$

gdzie:

$$Q = \begin{bmatrix} -R_1 A_1 & H_C C_1^{-1} \\ -R_2 A_2 & -C_2^{-1} \\ -H_C^T A_1 & 0 \\ A_2 & -R_C^{-1} C_2^{-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

gdzie:

$A = (A_1, A_2)^T$ – macierz współczynników równań różniczkowych prądów;

$A_1 = (A_{11}, A_{12}), A_{11} = -\alpha_1(E - D_2), A_{12} = -\alpha_1 D_2$.

Warunki początkowe $S(0)^{(k)}$ obliczamy zgodnie z wzorem

$$S(0)^{(k)} = (B(0)^{(k)})^{-1} \quad (10)$$

Proces iteracyjny kończymy po spełnieniu warunku stopu:

$$\text{mod}(1 - X(0)^{(k)}) / X(0)^{(k+1)} < \varepsilon \quad (11)$$

gdzie:

ε – błąd konwergencji.

5. Optymalizacja genetyczna parametrów przetwornika liczby faz

Badany układ jest obiektem nieliniowym, w którym zmiana wartości parametrów układu RLC prowadzi do zmian amplitud prądów obciążenia i do zmian przesunięcia fazowego między nimi. Manipulacja tymi parametrami może przybliżać albo oddalać kształt prądów obciążenia od zależności trójfazowej. Naszym celem jest dobranie takich parametrów, które doprowadzą do zależności trójfazowej. W takiej zależności amplitudy wszystkich faz są jednakowe, a przesunięcie fazowe jest równe $1/3$ okresu. Za pomocą algorytmu genetycznego były dobierane następujące parametry: $r_A, r_B, r_C, L_A, L_B, L_C, r_{CA}, r_{CB}, r_{CC}, C_A, C_B, C_C, C$.

Do optymalizacji parametrycznej został wykorzystany algorytm genetyczny, zmodyfikowany odpowiednio do rozpatrywanego modelu. Wartości parametrów były dobierane w taki sposób, aby zminimalizować funkcję celu:

$$f = |\varphi_{AB} - \varphi_0| + |\varphi_{BC} - \varphi_0| + |\varphi_{CA} - \varphi_0| + \sum_{i,j} |u_{ij} - 1| \quad (12)$$

gdzie

$$\begin{aligned} \varphi_{ij} &= |\varphi_i - \varphi_j|, (i, j = A, B, C); \varphi_0 = 2\pi/3; \\ \varphi_A, \varphi_B, \varphi_C &\quad - \text{wartości początkowe faz napięć obciążenia;} \\ u_{ij} &= U_{mi} / U_{mj}, (i, j = A, B, C, i \neq j); \\ U_{mA}, U_{mB}, U_{mC} &\quad - \text{wartości amplitud napięć obciążenia.} \end{aligned}$$

Funkcja celu powinna spełniać warunek $f = 0$. Algorytmy genetyczne z natury są metodami stochastycznymi, opartymi na analogii procesu ewolucyjnego. Nie nakładają dodatkowych warunków dla funkcji celu na każdej iteracji i przewidują sposoby wyjścia z lokalnych ekstremów.

Klasyczny algorytm genetyczny tworzy populację początkową losowo. Rozmiar populacji N (liczba wszystkich chromosomów) jest stała. Każdy osobnik jest generowany jako ciąg K bitów, gdzie K – długość kodu osobnika.

Każdy osobnik to rozwiązanie bieżącego problemu. Lepszy osobnik – lepsze rozwiązanie. Dane cechy algorytmu genetycznego pozwalają stwierdzić, że jest on bardziej efektywny dla optymalizacji parametrycznej niż inne algorytmy. Algorytm składa się z trzech etapów: tworzenie bieżącej populacji z aktualnego pokolenia; powtórne tworzenie bieżącego pokolenia z wykorzystaniem krosyngowera. Dalej, stosując mutacje, powstaje nowa generacja.

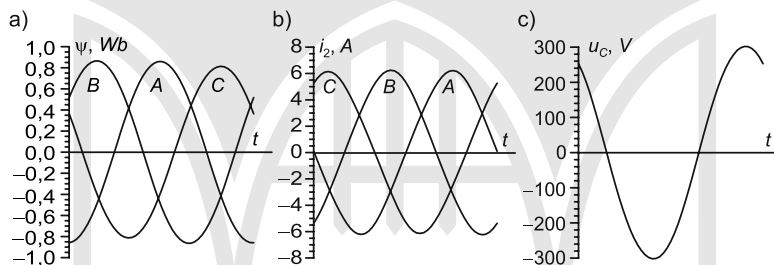
Skuteczność algorytmu genetycznego do rozwiązania danego problemu zależy od wielu czynników, w szczególności takich, jak operatory genetyczne, doboru odpowiednich wartości parametrów i również od sposobów przedstawiania problemu w chromosomie. Optymalizacja tych czynników prowadzi do zwiększenia szybkości i stabilności wyszukiwania, co ma istotny wpływ na stosowanie algorytmów genetycznych.

Moc algorytmu genetycznego jest zawarta w jego zdolności do manipulowania wieloma parametrami jednocześnie. Zazwyczaj algorytmy genetyczne „popołniają błąd” nie więcej niż (3–5)%.

6. Wyniki obliczeń

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki obliczeń przebiegów ustalonych przetwornika liczby faz, stosując model wrażliwości na warunki początkowe. Optymalizacja parametryczna wykonana została za pomocą algorytmu genetycznego. Układ równań różniczkowych całkowano metodą Rungego-Kutty ze stałym krokiem całkowania $\Delta t = 0,00002$ s.

Obliczenia przeprowadzono dla parametrów: $r_{1A} = r_{1B} = r_{1C} = 1,3 \Omega$; $r_0 = 0,5 \Omega$; $r_{2A} = r_{2B} = r_{2C} = 2,2 \Omega$; $r_{HA} = r_{HB} = r_{HC} = 40,0 \Omega$; $\alpha_1 = \alpha_{1B} = \alpha_1 = 175,0 \text{ H}^{-1}$; $\alpha_{2A} = \alpha_{2B} = \alpha_{2C} = 202,0 \text{ H}^{-1}$; $\alpha_0 = 120,0 \text{ H}^{-1}$; $u_1 = 311 \sin(314,1593t) \text{ V}$. Parametry algorytmu genetycznego: wielkość populacji 130 osobników, liczba pokoleń 40, odsetek nowych osobników 58.



Rys. 2. Wyniki obliczeń przebiegów ustalonych faz A, B, C: a) strumieni głównych, b) prądów obciążenia, c) napięcia kondensatora na odcinku jednego okresu ($T = 0,02$ s)

Fig. 2. The result of computation was established of phases A, B, C: the main streams a), load currents b), capacitor voltage c) over one period ($T = 0.02$ s)

Krzywa magnesowania aproksymowana wzorem:

$$\varphi(\psi) = \begin{cases} a_1 \psi, & |\psi| > \psi_1 \\ S_3(\psi), & \psi_1 \leq |\psi| \leq \psi_2 \\ a_2 \psi - a_0, & |\psi| > \psi_2 \end{cases} \quad (13)$$

gdzie:

$a_1 = 1,0 \text{ H}^{-1}$; $a_2 = 247 \text{ H}^{-1}$; $a_0 = 73,8 \text{ A}$; $\psi_1 = 0,1 \text{ Wb}$; $\psi_2 = 0,4 \text{ Wb}$; $\varphi(\psi_1) = 0,1 \text{ A}$; $\varphi(\psi_2) = 25 \text{ A}$; $S_3(\psi)$ – splajn trzeciego rzędu.

Parametry układów RLC i kondensatora na wejściu zostały dobrane algorytmem genetycznym. W rezultacie ustalono następujące wartości: $r_A = 1,59666 \Omega$; $r_B = 1,8703 \Omega$; $r_C = 0,623 \Omega$; $L_A = 0,0057 \text{ H}$; $L_B = 0,01178 \text{ H}$; $L_C = 0,0037497 \text{ H}$; $r_{CA} = 1,307 \Omega$; $r_{CB} = 0,36967 \Omega$; $r_{CC} = 0,22 \Omega$; $C_A = 0,0014155 \text{ F}$; $C_B = 0,00333475 \text{ F}$; $C_C = 0,00082 \text{ F}$; $C = 0,000242 \text{ F}$. Wartość funkcji celu obliczana zgodnie z (12) wyniosła 0,08018.

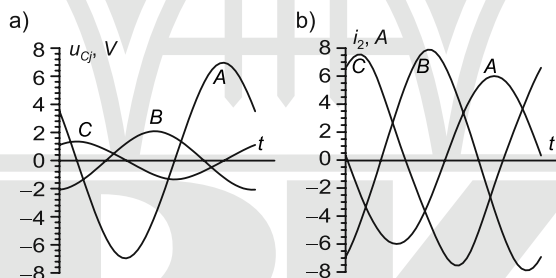
Analizując otrzymane wyniki, można dojść do następujących wniosków:

Na rysunku 2a przedstawiono wyniki obliczeń przebiegów ustalonych strumieni głównych faz A , B , C na odcinku jednego okresu ($0,02$ s). Widać, że przesunięcie fazowe pomiędzy nimi zbliża się do $1/3$ okresu, natomiast amplitudy różnią się o 10%. Zauważmy, że zmianie uległa kolejność faz w czasie, a mianowicie: nie A, B, C , jak powinno być, a A, C, B . Zmiana ta nie jest jednak istotna, ponieważ zawsze można zamienić ich kolejność.

Na rysunku 2b przedstawiono obliczone krzywe przebiegów ustalonych prądów obciążenia faz A, B, C . Amplitudy poszczególnych faz różnią się mniej niż o 2%. Kolejność faz jest taka sama, jak i dla strumieni głównych A, C, B . Mnożąc amplitudy prądów ($\approx 6,2$ A) przez rezystancje obciążenia (40Ω) otrzymujemy amplitudę napięcia obciążenia 248 V. Wartość ta może być regulowana. Przykładowo: można zadać w funkcji celu amplitudę wynoszącą 230 V. Algorytm genetyczny dobierze parametry układów RLC w taki sposób, aby warunek ten został spełniony. Dlatego do funkcji celu (12) wystarczy dodać wzór:

$$\sum_j |U_{mj} / 230 - 1| + \sum_j |230 / U_{mj} - 1|, \quad j = A, B, C$$

Krzywa napięcia kondensatora na wejściu (rys. 2c) zbliża się do zależności sinusoidalnej z amplitudą (≈ 302 V) bliską do amplitudy napięcia zasilania. Natomiast napięcia kondensatorów na wyjściu (rys. 3a) mają różne amplitudy, ze względu na znaczne różnice między wartościami pojemności kondensatorów.



Rys. 3. Wyniki obliczeń przebiegów ustalonych: napięć kondensatorów faz A, B, C a) i prądów obciążenia faz A, B, C b) na odcinku jednego okresu ($T = 0,02$ s)

Fig. 3. The results of computation was established: condenser voltages phase A, B, C a) load currents phase A, B, C b) over one period ($T = 0.02$ s)

Jeżeli podamy losowe wartości parametrów układów RLC i wartość pojemności kondensatora na wejściu, na przykład

$$\begin{aligned} r_A &= r_B = r_C = 1 \Omega; \\ L_A &= L_B = L_C = 0,01 \text{ H}; \\ r_{CA} &= r_{CB} = r_{CC} = 1 \Omega; \\ C_A &= C_B = C_C = 0,001 \text{ F}; \\ C &= 0,00035 \text{ F}, \end{aligned}$$

wtedy amplitudy prądów obciążenia poszczególnych faz będą różne, a przesunięcie fazowe między nimi nie równe $T/3$ (rys. 3b). Metoda genetyczna jest jedynym sposobem dobierania wartości parametrów układu RLC dla spełnienia warunku $f=0$ dla wzoru (12).

7. Wnioski

Zastosowanie algorytmu genetycznego dla wyboru parametrów układów RLC i pojemności kondensatora na wejściu pozwoliło uzyskać na wyjściu przetwornika liczby faz trójfazowe napięcie, dla którego amplitudy poszczególnych faz są równe, a przesunięcie fazowe pomiędzy nimi równa się $1/3$ okresu. Proponowaną metodę można realizować w praktyce. Program generuje wartości parametrów układów RLC i wartości pojemności kondensatora na wejściu, a pomiary funkcji celu są przekazywane do programu, dla kolejnej optymalizacji parametrycznej.

Literatura

- [1] Баламетов А.Б., Мамедяров О.С., *Расчет установившегося режима сложных электрических сетей методом Гаусса-Зейделя с вторичной коррекцией*, Электричество, 1985, N 10, 7-11.
- [2] Калугин Е.И., *Определение установившегося режима в нелинейной электрической цепи с помощью функциональных рядов*, Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, N 1, 1990.
- [3] Ланцов В.Н., Меркулов А.С., *Алгоритм расчета квазипериодических процессов в нелинейных радиотехнических устройствах*, Изв. вузов, Радиоэлектроника, N 6, 1990.
- [4] Осетров А.В., *Нелинейные искажения в резонансных цепях при сложном входном воздействии*, Изв. вузов, Радиоэлектроника, N 9, 1989.
- [5] Самотый В.В., *Математичне моделювання стаціонарних процесів електромагнетних перетворювачів систем керування*, Львів: Фенікс, 1997.
- [6] Aprille T.I., Trick T.N., *A computer algorithm to determine the steady-state response of non-linear oscillator*, IEEE Trans. Circuit Theory, vol. CT-19, 1972.
- [7] McLeod, *A note on the e-algorithm*, Computing (Arch. Elektron. Rechnen), V. 7, 1971.
- [8] Minkina W., Samotyj W., *Metoda analizy zjawiska ferorezonansu we wzmacniaczu magnetycznym*, Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, Tom VIII, Zeszyt 1/2, 2002.
- [9] Minkina W., Samotyj W., *Modelowanie matematyczne zjawiska ferorezonansu w trójfazowym przemienniku częstotliwości*, I Krajowa konferencja Modelowanie i Symulacja, 2000 (MiS-1), Kościelisko 2000.
- [10] Samotyj W., Dzelendziak U., Chomulak M., *Optymalizacja kształtu sygnału wyjściowego falownika tyrystorowego*, V Ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna Postępy w Elektrotechnice Stosowanej (PES-5), Kościelisko 2005.
- [11] Samotyj V., Kobyljansky A., *Transient Analysis of Cycloconverter Operating under Static Load*, Engineering Simulation, Vol. 14, 1997.
- [12] Samotyj V., *Analiza procesów okresowych nieliniowych urządzeń elektromagnetycznych systemów automatyki*, Czasopismo Techniczne, 1-E/2010, Wydawnictwo PK, Kraków 2010.
- [13] Skelboe S., *Computing of the periodic steady-state response of non-linear networks by extrapolation methods*, IEEE Trans. Circuits Syst., V. CAS-27, 1980.