

Wiesław ŁYSKAWIŃSKI*
Łukasz KNYPPIŃSKI*
Lech NOWAK*

OBWODOWO-POŁOWA OPTYMALIZACJA TRANSFORMATORA IMPULSOWEGO

W artykule zaprezentowano nową strategię projektowania transformatora impulsowego polegającą na jego dwuetapowej optymalizacji. W pierwszym etapie obliczeń przeprowadzono optymalizację parametrów strukturalnych obwodu magnetycznego transformatora na podstawie modelu obwodowego zjawisk przy narzuconych wymaganiach funkcjonalnych. Optymalizację parametrów urządzenia przeprowadzono przy użyciu algorytmu genetycznego. Ograniczenia uwzględniono poprzez dodanie do funkcji celu składnika reprezentującego karę za ich przekroczenie. Parametry zaprojektowanego w ten sposób transformatora spełniającego zadane przy projektowaniu wymagania, należy wykorzystać jako dane początkowe do optymalizacji konstrukcji w ujęciu połowym. Przedstawiono i omówiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych i optymalizacyjnych.

1. WSTĘP

Strukturę projektowanego transformatora dobiera się odpowiednio do postulowanej mocy, napięcia i prądu wejściowego oraz wyjściowego. Metody wstępnego doboru wymiarów głównych obwodu magnetycznego transformatorów impulsowych oraz sposób wyznaczania parametrów konstrukcyjnych i elektrycznych uzwojeń przedstawiono w pracach [1, 9, 13]. Na podstawie wstępnie przyjętych wymiarów głównych transformatora oraz parametrów uzwojeń, oblicza się pozostałe wymiary obwodu magnetycznego i uzwojeń, potrzebne do jednoznacznego określenia struktury transformatora, a następnie wyznacza się jego parametry funkcjonalne. W literaturze do wyznaczania tych parametrów są proponowane dwa ujęcia. W pierwszym z nich wykorzystuje się model obwodowy zjawisk. Występujące w równaniach tego modelu indukcyjności, pojemności i rezystancje wyznacza się analitycznie [3, 9] lub na podstawie pomiarów impedancji w funkcji częstotliwości [4, 11], a także metodami numerycznymi na podstawie analizy rozkładu pola w transformatorze [2, 10, 12]. Jednak w procesie optymalizacji z uwagi na dużą czasochłonność obliczeń połowych, dogodnie jest przeprowadzić je przed przystąpieniem do projektowania. Tworzy się charakterystyki ujmujące zależność poszukiwanych współczynników równań modelu obwodowego transformatora od zmieniających się w

* Politechnika Poznańska.

ustalonym zakresie, wybranych parametrów struktury. Potrzebne w obliczeniach projektowych parametry modelu, dla aktualnie ustalonej struktury i przy danych wymuszeniach, oblicza się na podstawie utworzonych charakterystyk za pomocą procedur interpolacyjnych. Proces projektowania kończy się, jeśli uzyskany projekt spełnia wszystkie wymagania określone w zbiorze danych.

Przy projektowaniu transformatora impulsowego, ze względu na bardzo dużą czasochłonność wyznaczania parametrów funkcjonalnych metodą polową, celowe jest przeprowadzenie obliczeń najpierw przy wykorzystaniu mniej dokładnego modelu obwodowego zjawisk. Parametry zaprojektowanego w ten sposób transformatora spełniającego sformułowane przy projektowaniu wymagania można wykorzystać jako dane początkowe do syntezy konstrukcji w ujęciu polowym. Taka strategia projektowania transformatora impulsowego polegająca na jego dwuetapowej optymalizacji pozwala znacznie zredukować czas obliczeń.

W wyniku wielokrotnego powtarzania algorytmu projektowania można uzyskać zbiór projektów spełniających zadane wymagania. Wówczas do oceny projektów transformatora i wybrania najlepszego rozwiązania wykorzystuje się kryteria oceny, do których należą np.: masa transformatora, sprawność, koszt produkcji czy koszty eksploatacji. Do rozstrzygnięcia problemu wyboru rozwiązania optymalnego wykorzystuje się metody poszukiwania ekstremum funkcji wielu zmiennych, przy nieliniowej funkcji celu i nieliniowych funkcjach ograniczeń.

2. SFORMUŁOWANIE ZADANIA OPTYMALIZACJI OBWODU MAGNETYCZNEGO TRANSFORMATORA

W procesie optymalizacji dogodnie jest posługiwać się unormowanymi zmiennymi decyzyjnymi [5], które powinny być bezwymiarowe i mieć porównywalne wartości. W celu unormowania tych zmiennych wprowadza się bezwymiarowe wielkości x_i według zależności

$$x_i = \frac{s_i - s_{id}}{s_{ig} - s_{id}} \quad (1)$$

gdzie s_{id} oraz s_{ig} oznaczają odpowiednio dolną i górną granicę przedziału spodziewanych wartości każdej ze zmiennych s_i . Wyznaczone w ten sposób zmienne decyzyjne przyjmują wartości z przedziału $\langle 0,1 \rangle$.

Przy optymalizacji autorzy proponują przyjmować jako parametry s_i : średnicę środkowej kolumny rdzenia $s_1 = d_{Fe}$ oraz $s_2 = h_t$ wysokość i szerokość $s_3 = b_t$ okna transformatora. Ostatnie dwie wielkości muszą zapewniać dostateczną przestrzeń na umieszczenie uzwojeń i wymaganej izolacji. Określona na ich podstawie minimalna powierzchnia okna transformatora, zapewniająca minimum masy rdzenia, jest równa polu powierzchni przekroju izolacji i miedzi zajmowanej przez uzwojenia. Na podstawie pola powierzchni miedzi i założonej gęstości prądu w przewodach oraz przekładni obliczana jest liczba zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego.

Po wielu obliczeniach testowych autorzy artykułu zaproponowali multiplikatywną kompromisową funkcję celu w postaci:

$$F(\mathbf{x}) = \left[\frac{m_c(\mathbf{x})}{m_{c0sr}} \right]^{a_1} \left[\frac{\Delta P(\mathbf{x})}{\Delta P_{0sr}} \right]^{a_2} \quad (2)$$

gdzie m_c , ΔP – odpowiednio masa materiałów czynnych i straty mocy transformatora, m_{c0sr} , ΔP_{0sr} – średnie wartości masy i strat mocy transformatora uzyskane w algorytmie genetycznym w procesie inicjacji, a_1 , a_2 – współczynniki wagowe, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T$ – wektor zmiennych decyzyjnych.

W trakcie procesu optymalizacji uwzględniono ograniczenia nierównościowe dotyczące:

- ustalonego przyrostu temperatury uzwojeń $\Delta \vartheta_u$

$$g_1(\mathbf{x}) = \frac{\Delta \vartheta_u(\mathbf{x})}{\Delta \vartheta_{u\max}} - 1 \leq 0 \quad (3)$$

- mocy wyjściowej P transformatora

$$g_2(\mathbf{x}) = 1 - \frac{P(\mathbf{x})}{P_n} \leq 0 \quad (4)$$

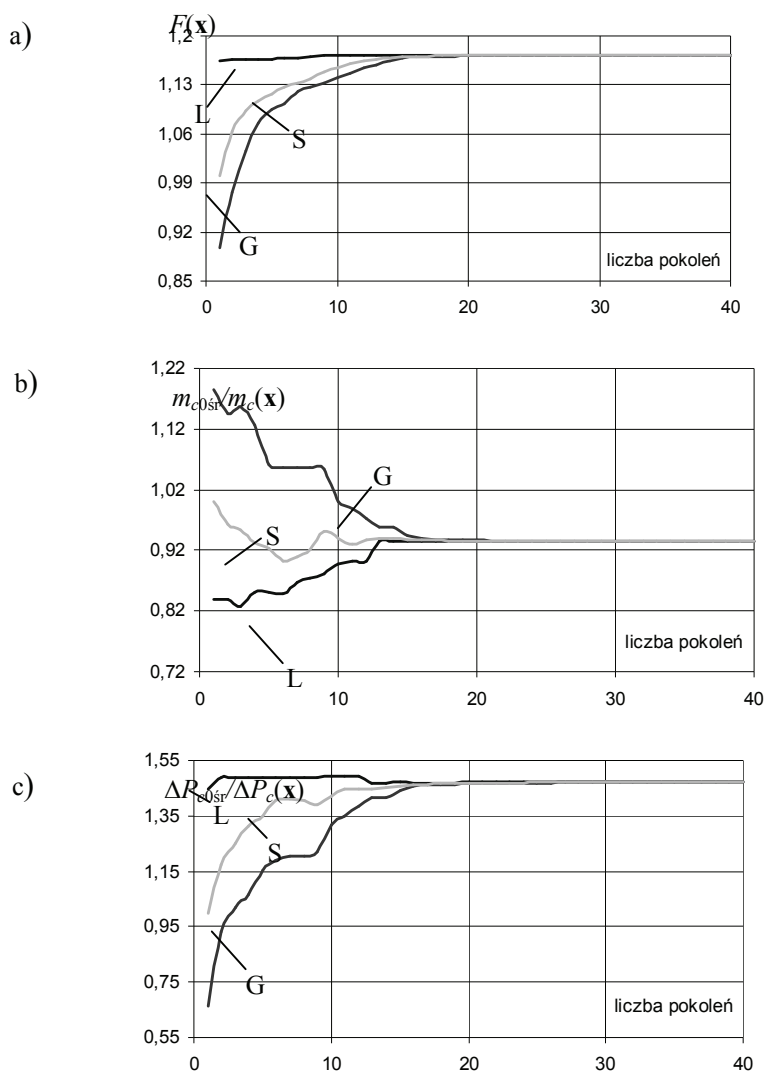
Powyższe ograniczenia uwzględniono wykorzystując metodę funkcji kary zewnętrznej. Za przekroczenie powyższych ograniczeń dodawana jest kara do funkcji celu. W obliczeniach przyjęto następujące dane: napięcie zasilające znamionowe $U_{1n} = 230$ V, częstotliwość napięcia zasilającego $f_n = 100$ kHz, znamionowa średnia wartość napięcia wyjściowego $U_{2n} = 24$ V oraz wyznaczona z mocy znamionowej P_n wartość prądu obciążenia $I_{2n} = 10$ A.

Przy optymalizacji transformatora, ze względu na bardzo dużą czasochłonność obliczeń parametrów funkcjonalnych na podstawie polowego modelu zjawisk, zaproponowano koncepcję dwuetapowej syntezy projektowanego obiektu [4]. Najpierw, opierając się na mniej dokładnym modelu obwodowym zjawisk, a następnie w etapie drugim wykorzystuje się parametry struktury uzyskane z pierwszego etapu optymalizacji transformatora, jako dane początkowe do syntezy konstrukcji w ujęciu polowym.

3. OPTIMALIZACJA Z WYKORZYSTANIEM MODELU OBWODOWEGO TRANSFORMATORA

Dla potrzeb optymalizacji obwodu magnetycznego transformatora impulsowego opracowano oprogramowanie składające się z procedur optymalizacyjnych wykorzystujących algorytm genetyczny oraz procedur zawierających obwodowy model zjawisk transformatora [8]. Badano wpływ liczby osobników, liczby pokoleń i prawdopodobieństwa mutacji na zbieżność procesu optymalizacyjnego. Na rysunku 1 pokazano zmianę wartości kryterium opisanego zależnością (1) oraz kryteriów cząstkowych w kolejnych pokoleniach. Przyjęto liczbę osobników równą 200, a

prawdopodobieństwo mutacji równe 0,05%. Dla liczby pokoleń większej od 30 zmiana wartości poszczególnych kryteriów była mniejsza niż 0,01%.



Rys. 1. Zależność kryterium oceny (a) oraz kryteriów cząstkowych (b) i (c) od liczby pokoleń (L - najlepiej przystosowanego osobnika, G - najgorzej przystosowanego osobnika, S - średnia pokolenia)

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych sformułowano wytyczne do optymalnego doboru parametrów algorytmu genetycznego mających duży wpływ na zbieżność obliczeń. Należą do nich liczba osobników, liczba pokoleń i

prawdopodobieństwo mutacji. Parametry te dobrano w taki sposób, aby minimalizować liczbę wywołań funkcji celu. Przeprowadzone obliczenia optymalizacyjne cechowały się dobrą zbieżnością dla następujących parametrów numerycznych algorytmu: liczba osobników nie mniejsza niż 100, liczba pokoleń co najmniej większa od 40, a prawdopodobieństwo mutacji mieszczące się w zakresie 0,3 – 0,05 %.

W tabeli 1 przedstawiono otrzymane w wyniku obliczeń wartości wymiarów h_t , b_t , d_{Fe} rozpatrywanego transformatora, dla których uzyskuje się ekstremum funkcji celu. Zgodnie z ideą algorytmu genetycznego, zestaw rozwiązań początkowych uzyskano w wyniku losowego doboru wartości zmiennych decyzyjnych z przestrzeni rozwiązań dopuszczalnych. W pierwszym wierszu zestawiono wyniki optymalizacji dla liczby zwojów wynikającej z wymiarów okna transformatora. Uzyskana w ten sposób liczba zwojów jest liczbą rzeczywistą. Ze względu na wykonalność uzwojenia liczba zwojów powinna być liczbą całkowitą. W kolejnych dwóch wierszach zamieszczono wyniki obliczeń otrzymane przy założeniu stałej szerokości okna transformatora i zaokrągleniu liczby zwojów z_1 w górę i w dół do najbliższej liczby całkowitej. Założona szerokość okna wynika z przyjętych wymiarów przewodów nawojowych i odstępów izolacyjnych.

Tabela 1. Wyniki pierwszego etapu optymalizacji

z_1	h_t [mm]	b_t [mm]	d_{Fe} [mm]	η [%]	m_c [g]
35,34	28,96	7,74	14,25	97,62	273,26
36	29,50	7,80	14,71	97,32	299,51
35	28,75	7,80	14,05	97,52	266,02

Ze względu na wymiary rdzenia zbliżone do standardowego rdzenia ETD-44 do dalszych rozważań przyjęto wariant przedstawiony w drugim wierszu tabeli 1. Takie rozwiązanie umożliwia łatwą weryfikację pomiarową na zbudowanych modelach transformatorów. Udokładnioną syntezę tego wariantu wykonano, wykorzystując polowy model zjawisk. Rozpatrzono wpływ na sprawność parametrów odwzorowanych w sposób przybliżony w modelu obwodowym takich jak długość szczeliny izolacyjnej między uzwojeniami δ , rozmieszczenie uzwojeń.

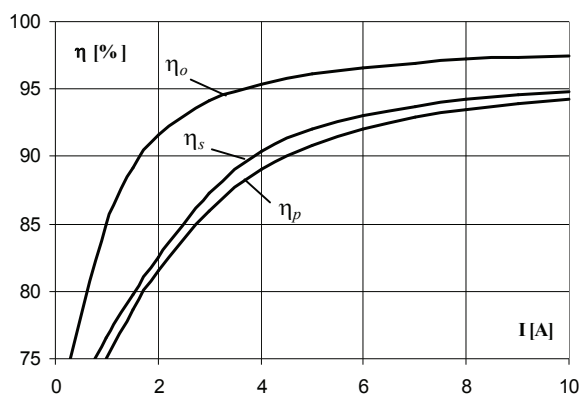
4. SYNTEZA TRANSFORMATORA W UJĘCIU POLOWYM

Ujęcie polowe umożliwia dokładniejsze wyznaczanie parametrów funkcjonalnych niż przy wykorzystaniu modelu obwodowego [8]. Z tego względu dalszą optymalizację transformatora wykonano z wykorzystaniem kompleksowego polowego modelu zjawisk [7, 8], w którym uwzględniono nieliniowe i histerezowe właściwości obwodu magnetycznego, prądy wirowe w rdzeniu i uzwojeniach oraz procesy cieplne i straty dielektryczne.

Przy projektowaniu transformatora metodą polową jako dane początkowe wykorzystano parametry transformatora uzyskane w procesie optymalizacji z zastosowaniem modelu obwodowego zjawisk (tab. 1). Na podstawie wykonanych badań

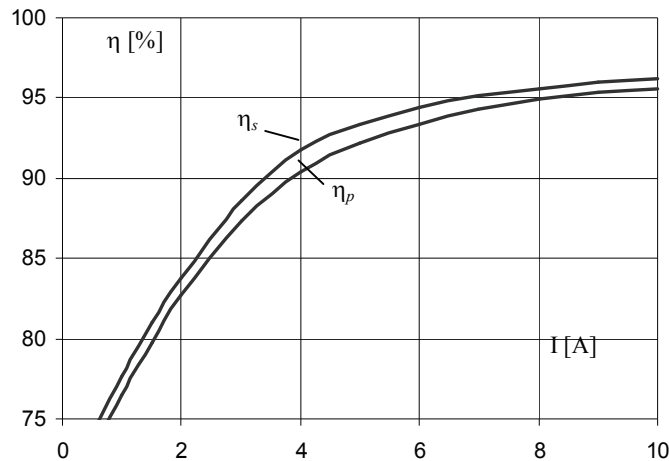
symulacyjnych stwierdzono, że konfiguracja uzwojeń w istotny sposób wpływa na parametry funkcjonalne transformatora. Z tego względu skupiono się nad optymalizacją konfiguracji uzwojeń, aby uzyskać możliwie jak największą sprawność [7]. Z przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych wybrano dwa warianty rozmieszczenia uzwojeń. W pierwszym uzwojenie pierwotne jest umieszczone bliżej środkowej kolumny rdzenia, a na nim nawinięte jest uzwojenie wtórne (uzwojenia niedzielone). W drugim uzwojenie wtórne umieszczono między dwoma połówkami uzwojenia pierwotnego (dzielone uzwojenie pierwotne). Optymalizowano długość szczeliny izolacyjnej między uzwojeniami δ , tak aby straty w uzwojeniach i rdzeniu były jak najmniejsze. Stwierdzono, przy $\delta = 0,5 \text{ mm}$ sprawność jest największa.

Na rysunku 2 przedstawiono porównanie sprawności transformatora z uzwojeniami niedzielonymi w funkcji prądu obciążenia. Uzyskane charakterystyki wyznaczono na podstawie modelu polowego η_s i obwodowego η_o . Wartości obliczone porównano następnie z wynikami pomiarów η_p . Duża zgodność wyników pomiarów i obliczeń symulacyjnych świadczy o właściwym wyborze modelu polowego do projektowania transformatora impulsowego. Sprawność η_o obliczona przy wykorzystaniu modelu obwodowego różni się znacznie od wyników pomiarów ze względu na małą dokładność odwzorowania w nim zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych. Przy obciążeniu znamionowym 10 A sprawność η_o jest prawie o 3% większa od η_p . W celu zwiększenia dokładności modelu obwodowego należałoby parametry tego modelu wyznaczyć metodami polowymi lub określić je na podstawie pomiarów.



Rys. 2. Sprawność transformatora impulsowego z uzwojeniami niedzielonymi w funkcji prądu obciążenia

Przeprowadzono również badania transformatora modelowego z dzielonym uzwojeniem pierwotnym. Wyznaczone z wykorzystaniem modelu polowego transformatora wartości sprawności w funkcji obciążenia porównano z wynikami pomiarów (rys. 3).



Rys. 3. Sprawność transformatora impulsowego z dzielnym uzwojeniem pierwotnym w funkcji prądu obciążenia

W wariacie transformatora z uzwojeniami dzielnymi przy obciążeniu znamionowym tego transformatora uzyskano sprawność o 1,5% większą od sprawności transformatora z uzwojeniami niedzielnymi. Świadczy to o poprawnie przeprowadzonej optymalizacji rozpatrywanego transformatora i przydatności opracowanego modelu do projektowania tego typu transformatorów.

5. WNIOSKI

Przy optymalizacji transformatora impulsowego, ze względu na bardzo dużą czasochłonność obliczeń parametrów funkcjonalnych na podstawie polowego modelu zjawisk, zaproponowano dekompozycję zadania optymalizacji na dwa etapy. Najpierw, bazując na mniej dokładnym modelu obwodowym zjawisk, a następnie w etapie drugim wykorzystuje się parametry struktury transformatora zaprojektowanego w etapie pierwszym, jako dane początkowe do syntezy konstrukcji w ujęciu polowym. Takie podejście pozwala znacznie zredukować czas obliczeń.

Opracowane oprogramowanie do optymalizacji transformatora impulsowego umożliwia określenie wymiarów obwodu magnetycznego, liczby zwojów i właściwości zastosowanych materiałów przy ekstremalizacji przyjętej funkcji celu. Dobra zgodność rezultatów obliczeń polowych z wynikami pomiarów potwierdza przydatność opracowanego oprogramowania do projektowania i optymalizacji transformatorów impulsowych. Zastosowanie oprogramowania umożliwi m.in. obniżenie kosztów modernizacji istniejących i opracowanie nowych konstrukcji dzięki ograniczeniu liczby budowanych prototypów.

LITERATURA

- [1] Billings K.H., Switchmode power supply handbook, McGraw-Hill 1999.
- [2] Jianyong Lou, Yitong Chen, Deliang Liang, Lin Gao, Fei Dang, Fangjun Jiao, Novel network model for dynamic stray capacitance analysis of planar inductor with nanocrystal magnetic core in high frequency, Proceedings of the 14th IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, CEFC 2010, Biennial 2010.
- [3] Kazimierzczuk M.K., High-Frequency Magnetic Components, John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [4] Knypiński Ł., Nowak L., Jędryczka C., Kowalski K., Algorytm optymalizacji magnetoelektrycznych silników synchronicznych z uwzględnieniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2/2013, s. 143 - 147.
- [5] Knypiński Ł., Nowak L., Sujka P., Radziuk K., Application of a PSO algorithm for identification of the parameters of Jiles-Atherton hysteresis model, Archives of Electrical Engineering, Vol. 30, No. 2, June 2012, pp. 139 – 148.
- [6] Laouamri K., Keradec J.-P., Ferrieux J.-P., Barbaroux J., Dielectric losses of capacitor and ferrite core in an LCT component, IEEE Transactions on Magnetics, 2003, Vol. 39, No. 3, s. 1574-1577.
- [7] Łyskawiński W., Polowa analiza wpływu konfiguracji uzwojeń na straty mocy w transformatorze impulsowym, Przegląd Elektrotechniczny, nr 4/2010, s. 201-204.
- [8] Łyskawiński W., Analiza stanów pracy i synteza transformatora impulsowego w ujęciu polowym, WPP, Poznań 2011.
- [9] McLyman W.T., Transformer and inductor design, handbook, 3rd edn., Marcel Dekker, New York 2004.
- [10] Moreau O., Michel R., Chevalier T., Meunier G., Joan M., Delcroix J.B., 3-D high frequency computation of transformer R, L parameters, IEEE Transactions on Magnetics, 2005, Vol. 41, No. 5, s. 1364-1367.
- [11] Schellmanns A., Berrouche K., Keradec J.-P., Multiwinding transformers: a successive refinement method to characterize a general equivalent circuit, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, Vol. 47 No. 5, s. 1316-1321.
- [12] Stadler A., Albach M., The influence of the winding layout on the core losses and the leakage inductance in high frequency transformers, IEEE Transactions on Magnetics, 2006, Vol. 42, No. 4, s. 735-738.
- [13] Tomczuk K., Parchomik M., Projektowanie transformatora impulsowego w programie MATLAB-SIMULINK, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 3/2010, s. 39-41.

CIRCUIT-FIELD OPTIMIZATION OF PULSE TRANSFORMER

The paper presents the new design strategy of pulse transformer consisting of his two-stage optimization. In the first stage, the optimization process is based on less accurate circuit model of phenomena on functional requirements formulated. The genetic algorithm has been applied for optimization. In order to include to constrains, the penalty function has been adopted. The transformer parameters designed in such method may be used as initial data in second stage of design process. In the second stage the field model has been employed. The selected results have been presented and discussed.