

Modele obwodowe uzwojeń transformatorów w przypadku występowania w nich połączeń szeregowo-równoległych

Streszczenie. W artykule przedstawiono modele obwodowe używane do modelowania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora w przypadku występowania w nich połączeń szeregowo-równoległych cewek lub pojedynczych zwojów. Działanie zaprezentowanych modeli sprawdzono na fragmencie uzwojenia. Wyniki symulacji porównano z wynikami pomiarów przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym. Przeprowadzone porównanie wskazuje na poprawne działanie zaproponowanych modeli obwodowych i ich wysoką skuteczność w modelowaniu odpowiedzi częstotliwościowej.

Abstract. The article introduces circuit models that are used to model the frequency response of transformer windings in the case of series-parallel connections of coils or single turns. The operation of the presented models was checked on a model of the winding. The simulation results were compared with measurements carried out on the actual winding. The comparison shows that the proposed circuit models operate correctly and are highly effective in modeling the frequency response. (Circuit models of the transformer windings in case of occurrence of series-parallel connections).

Słowa kluczowe: Analiza odpowiedzi częstotliwościowej (FRA), modelowanie, uzwojenia transformatora.

Keywords: Frequency response Analysis (FRA), modeling, transformer windings.

Wstęp

Transformatory energetyczne są jednymi z najważniejszych elementów systemu elektroenergetycznego, ponieważ gwarantują stabilne dostawy energii do odbiorców. Jednocześnie transformatory stanowią najdroższy element majątku sieciowego, a ich awarie zazwyczaj generują wysokie koszty – związane z samą naprawą oraz z kosztami przerw w dostawie energii. Utrzymanie niezawodności pracy i ciągłości działania transformatorów, szczególnie tych o znaczeniu strategicznym, jest więc jednym z najważniejszych zadań w zakresie ich eksploatacji. Częstotliwość i wielkość awarii transformatorów jest bezpośrednio związana z ich stanem technicznym, dlatego właściwy monitoring stanu technicznego populacji transformatorów pozwala na efektywne zarządzanie majątkiem sieciowym.

Badania [1] wykazały, że jedną z najczęściej występujących przyczyn awarii transformatorów są uszkodzenia mechaniczne części aktywnej. Uszkodzenia uzwojeń zazwyczaj mają charakter ukryty, niepowodujący wyłączenia jednostki, jednak przyczyniają się do osłabienia izolacji papierowo-olejowej oraz jej szybszej degradacji, co z kolei może prowadzić do fatalnej w skutkach awarii w przypadku wystąpienia kolejnego zwarcia lub przepięcia.

Jedną z metod umożliwiających określenie stanu mechanicznego części aktywnej transformatora, szczególnie uszkodzeń oraz deformacji uzwojeń i rdzenia, jest analiza odpowiedzi częstotliwościowej (FRA – Frequency Response Analysis). Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia polega na podaniu sygnału niskonapięciowego o zmiennej częstotliwości na jedno z wyprowadzeń uzwojenia i zarejestrowaniu go na wyprowadzeniu drugiego końca badanego uzwojenia lub na uzwojeniu przeciwnej strony danej fazy (w zależności od konfiguracji układu pomiarowego wg. normy IEC 60076-18). Wynikiem pomiaru FRA jest charakterystyka tłumienia sygnału pomiarowego (dB) przedstawiona w szerokim zakresie częstotliwości.

Metoda FRA jest metodą porównawczą, dlatego wymaga pomiaru referencyjnego wykonanego w stanie bez uszkodzenia (standardowo na nowej jednostce przed rozpoczęciem pracy). Identyfikacja uszkodzeń polega na porównaniu ze sobą co najmniej dwóch przebiegów odpowiedzi częstotliwościowej. Na podstawie różnic między

porównywalnymi przebiegami określa się możliwość wystąpienia oraz potencjalną lokalizację uszkodzenia badanego uzwojenia.

Największym wyzwaniem w interpretacji wyników FRA jest znalezienie korelacji pomiędzy zmianami w analizowanych krzywych konkretnym uszkodzeniem uzwojenia. W niektórych przypadkach nadal nie jest możliwe określenie rozmiaru oraz lokalizacji mniejszych uszkodzeń, lecz tylko identyfikacja niebezpiecznych symptomów wskazujących na uszkodzenie. Analizując wyniki FRA należy wziąć pod uwagę także inne czynniki takie jak historia awarii, układy połączeń czy geometrię uzwojenia. Różnice widoczne w przebiegach mogą pochodzić od innych elementów transformatora lub wynikać z różnych warunków pomiarów a nie być skutkiem uszkodzenia części aktywnej. W związku z tym, obecnie prowadzone badania w dziedzinie FRA skupiają się na rozwinięciu narzędzi mających na celu poprawę dokładności oraz efektywności oceny wyników. Wśród tych narzędzi znajdują się głównie metody statystyczne oraz metody oparte o sztuczną inteligencję.

Modelowanie odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora jest jedną z metod mających na celu zwiększenie możliwości interpretacyjnych wyników FRA. Wykorzystanie modeli komputerowych ma na celu zbadanie w jaki sposób uszkodzenia mechaniczne wpływają na zmianę charakterystyki częstotliwościowej. W praktyce tylko odpowiednio duża baza danych, która zawierałaby informacje na temat wpływu zmian geometrii części aktywnej transformatora na kształt krzywej odpowiedzi częstotliwościowej, pozwoliłaby na stworzenie automatycznego narzędzia do oceny wyników FRA.

Metoda FRA w praktyce wykorzystywana jest do diagnostyki transformatorów z grupy I-szej i II-giej. Są to najczęściej uzwojenia wielowarstwowe z przelotami, składające się z kilkuset lub kilku tysięcy pojedynczych zwojów oraz szeregu połączonych ze sobą równolegle cewek. W niniejszym artykule przedstawione zostały modele obwodowe, które mogą zostać wykorzystane do modelowania odpowiedzi częstotliwościowej każdego uzwojenia, także w przypadku występowania w nim połączeń szeregowo-równoległych. Modele o trzech konfiguracjach Π , Γ oraz T zostały opisane, a następnie ich działanie zostało przetestowane.

Modelowanie polowo-obwodowe

Na potrzeby symulowania odpowiedzi częstotliwościowej transformatora najczęściej wykorzystuje się modele obwodowe o parametrach skupionych, dla których parametry elektryczne RLC są uzyskiwane z modelu polowego części aktywnej. Deformacje poosiowe, promieniowe, uszkodzenia zwarciove oraz uszkodzenia międzyzwojowe mogą zostać w łatwy sposób uwzględnione i zmieniane w modelach komputerowych analizujących rozkład pola elektromagnetycznego. Wygenerowane w ten sposób parametry RLC pozwalają na dokładne odwzorowanie odpowiedzi częstotliwościowej analizowanego uzwojenia. Wadą tego rozwiązania jest konieczność znajomości dokładnych wymiarów geometrycznych badanej części aktywnej. Kolejnym problemem jest złożona budowa modelu części aktywnej transformatora, w którym ze względu na zmieniającą się częstotliwość sygnału pomiarowego, uwzględnić należy rozkład gęstości prądu wewnątrz przewodów. Szeroki zakres częstotliwości pomiarowych wymusza bardzo dokładną dyskretyzację modelu opartego na elementach skończonych tak, aby właściwie uwzględnić rozplw prądów wirowych w przewodach i efekty zbliżenia. Analiza takiego modelu w 3D jest bardzo czasochłonna, dlatego wykorzystuje się modele 2D o symetrii kołowo-walcowej, które poprzez zastosowanie odpowiednich zabiegów stają się równoważne modelowi 3D z dużą dokładnością, jednocześnie zwiększając wydajność analizy numerycznej. Szczegóły tworzenia takiego modelu przedstawiono w [2].

Dane wykorzystane do modelowania obwodowego zostały pozyskane z analizy numerycznej pola elektromagnetycznego modelu komputerowego 2D wykonanej w oprogramowaniu ANSYS Maxwell, które do obliczeń numerycznych wykorzystuje metodę elementów skończonych.

Macierz pojemności wyznaczana jest poprzez rozwiązanie rozkładu pola elektrycznego przy użyciu skalarnego potencjału elektrycznego z równania różniczkowego:

$$(1) \quad \nabla(\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \varphi) = -\rho,$$

następnie pojemności C_{ij} są wyznaczane na podstawie wartości energii pola elektrostatycznego:

$$(2) \quad W_{ij} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \mathbf{D}_i \cdot \mathbf{E}_j d\Omega, \quad C_{ij} = \frac{2W_{ij}}{V^2} = \int_{\Omega} \mathbf{D}_i \cdot \mathbf{E}_j d\Omega.$$

Pozostałe parametry, R i L , są wyznaczane z rozwiązania zmiennego w czasie pola magnetycznego w stanie ustalonym dla danej częstotliwości, przy użyciu magnetycznego potencjału wektorowego \mathbf{A} oraz skalarnego potencjału elektrycznego φ z równania pola:

$$(3) \quad \nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) = (\gamma + j\omega\epsilon)(-j\omega\mathbf{A} - \nabla\varphi).$$

Wartości indukcyjności są wyznaczane na podstawie wartości energii pola elektromagnetycznego:

$$(4) \quad W_{AV} = \frac{1}{4} \int_V \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}^* dV, \quad L = \frac{4W_{AV}}{I_m^2},$$

natomiast wartości rezystancji obliczane są na podstawie strat mocy czynnej:

$$(4) \quad P = \frac{1}{2\gamma} \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^* dV, \quad R = \frac{P}{I_{rms}^2} = \frac{2P}{I_m^2}.$$

W modelach obwodowych przedstawionych w niniejszym artykule wykorzystano trzy struktury połączeń między elementami RLC . Pojedyncze ogniwa

odpowiadające pojedynczym zwojom przyjmują konfigurację Π , Γ oraz T . Każdy z modeli posiada parametry własne R , L , C oraz odzwierciedla sprzężenia indukcyjne i pojemnościowe ze wszystkimi pozostałymi ogniwami modelu.

Model o strukturze Π

Model pojedynczego zwoju o strukturze Π został przedstawiony na rysunku 1a. Cechą charakterystyczną takiej struktury jest pojemnościowy charakter wejścia i wyjścia modelu. Pojemności w modelu Π podzielone zostały po połowie na wejście i wyjście modelu. Model zwoju

o numerze $M \cdot (k-1) + m$ zawiera indukcyjność własną $L_{M \cdot (k-1) + m}$, pojemność własną $C_{M \cdot (k-1) + m}$ oraz rezystancję własną $R_{M \cdot (k-1) + m}$, a także indukcyjność wzajemną $L_{M \cdot (k-1) + m, j}$ oraz pojemność wzajemną $C_{M \cdot (k-1) + m, j}$ między zwojami $M \cdot (k-1) + m$ oraz j . Model szeregowo-równoległy w konfiguracji Π został szczegółowo opisany w [3], natomiast modele Π , Γ oraz T nie zawierające połączeń równoległych przedstawiono w [4].

Model o strukturze Γ

Model pojedynczego zwoju o strukturze Γ został przedstawiony na rysunku 1b. W modelu Γ pojemność jest skoncentrowana na wyjściu modelu.

W przypadku połączenia szeregowo-równoległego liczba zwojów wynosi $N = M \cdot K$, gdzie M to liczba zwojów w szeregu, a K to liczba gałęzi równoległych. Schemat połączenia

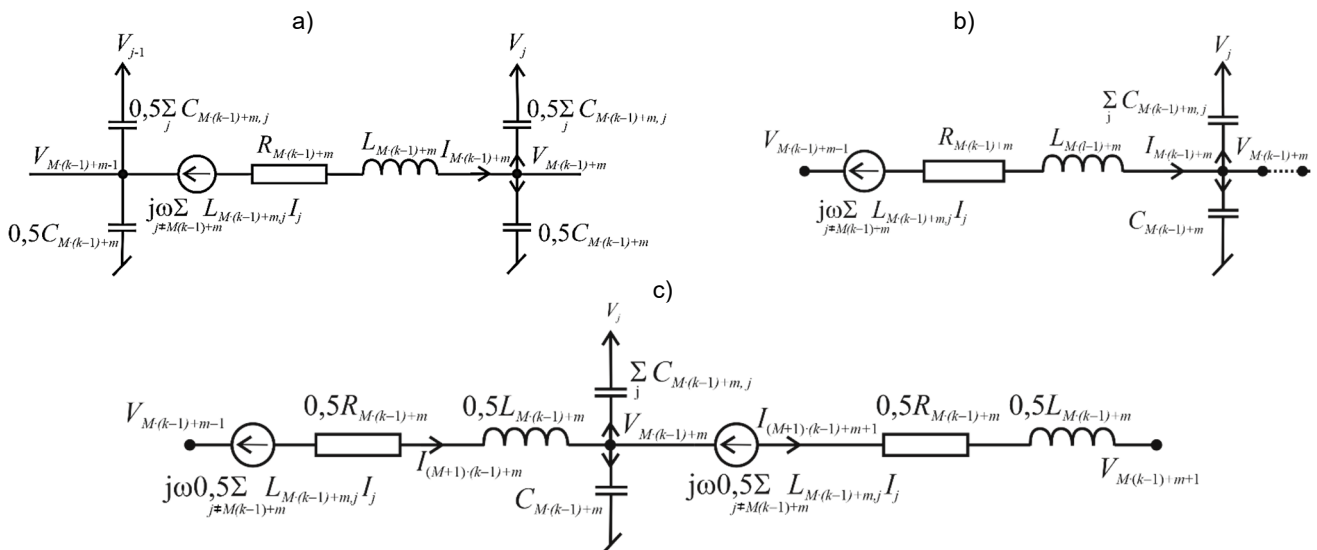
M cewek w K gałęzi równoległych pokazano na rysunku 2. Numer cewki jest dany wyrażeniem $M \cdot (k-1) + m$, gdzie $k = 1 \dots K$, $m = 1 \dots M$, przy czym $m = 1$ oznacza początek uzwojenia, a $m = M$ koniec uzwojenia. Kolejność cewek zmienia się od $m = 1 \dots M$, a następnie od $k = 1 \dots K$. Podobnie jak w modelu Π , tutaj też występują sprzężenia ze wszystkimi pozostałymi zwojami j poprzez indukcyjności wzajemne L_{ij} oraz pojemności C_{ij} .

Model o strukturze T

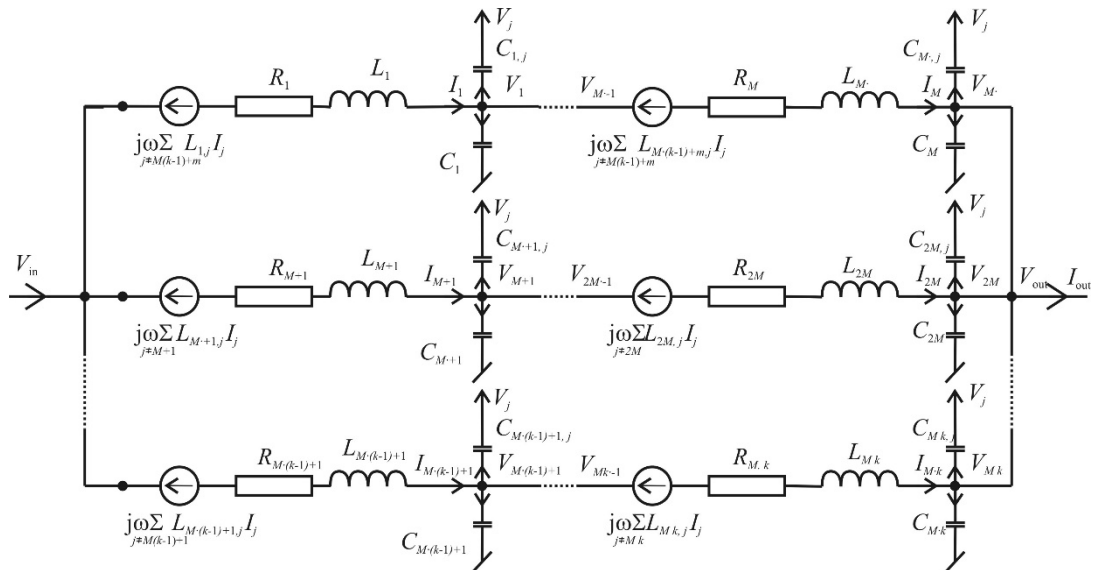
Model pojedynczego zwoju o strukturze T został przedstawiony na rysunku 1c. Cechą charakterystyczną struktury T jest indukcyjny charakter zarówno wejścia, jak i wyjścia modelu. Połączenie szeregowo-równoległe jest zrealizowane analogicznie do dwóch pozostałych konfiguracji i jest przedstawione na rysunku 3. Ten model również zawiera sprzężenia indukcyjne oraz pojemnościowe pomiędzy wszystkimi zwojami.

Symulacja i porównanie z wynikami pomiarów FRA

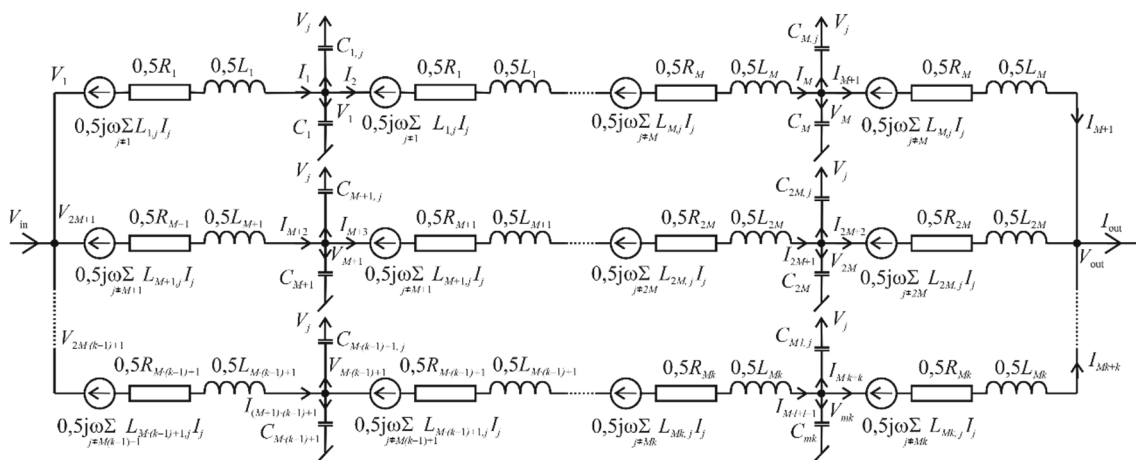
Obiektem testowym było uzwojenie niskiego napięcia pochodzące z transformatora rozdzielczego o mocy 800 kVA oraz napięciu 15/0,4 kV. Badane uzwojenie składa się z 12 cewek równoległych zawierających po 24 zwoje każda i jest przedstawione na rysunku 4. Co istotne, na rdzeniu znajdują się także inne uzwojenia. Testowane uzwojenie jest umieszczone na kolumnie po lewej stronie, na której osadzone jest także uzwojenie górnego napięcia (15 kV), na środkowej kolumnie znajduje się tylko uzwojenie niskiego napięcia, natomiast trzecia kolumna jest pusta. Badany fragment części aktywnej został wyjęty z kadzi, a wyprowadzenia wszystkich uzwojeń zostały odłączone od przepustów. Pomiar FRA wykonany został bezpośrednio na zakończeniach uzwojenia, przy czym sygnał pomiarowy podany został na początek uzwojenia, a zarejestrowany na jego końcu. Pozostałe uzwojenia obecne na rdzeniu w chwili pomiaru były otwarte. Pomiarzy zostały wykonane przy użyciu urządzenia Omicron FRAnalyzer w zakresie od 20 Hz do 10 MHz.



Rys. 1. Model pojedynczego zwoju: a) o strukturze Π , b) o strukturze Γ , c) o strukturze T



Rys. 2. Połączenie szeregowo-równoległe N cewek modelu o strukturze Γ

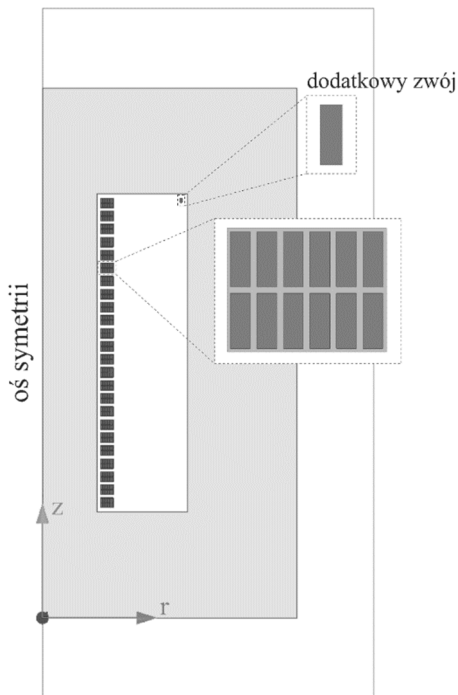


Rys. 3. Połączenie szeregowo-równoległe N cewek modelu o strukturze T



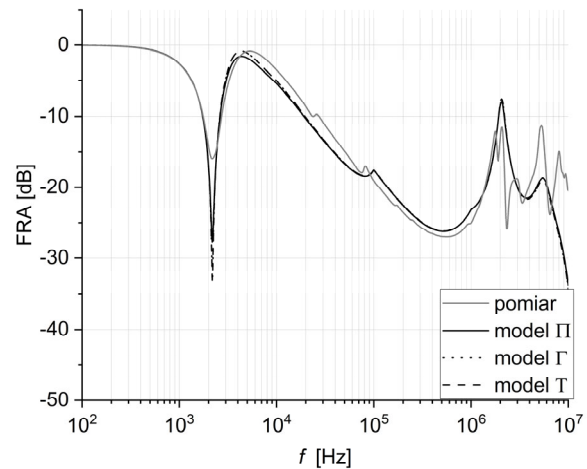
Rys.4. Testowane uzwojenie szeregowo-równoległe transformatora rozdzielczego 800 kVA, 15/0,4 kV (po lewej)

Model połowy został przygotowany w oprogramowaniu ANSYS Maxwell 2D na podstawie dokładnych wymiarów geometrycznych uzwojenia. Model przedstawiony na rysunku 5, składa się z analizowanego uzwojenia o 288 zwojach, rdzenia ferromagnetycznego oraz dodatkowego zwoju wraz z kondensatorem, które reprezentują wpływ uzwojenia GN osadzonego na tej samej kolumnie rdzenia na przeprowadzany pomiar FRA. Metodyka modelowania z uwzględnieniem wpływu innych uzwojeń badanej jednostki na przeprowadzany pomiar została opisana w [3].



Rys.5. Model 2D badanego uzwojenia szeregowo-równoległego w oprogramowaniu MES

Poniżej na rysunku 6 przedstawione zostały przebiegi odpowiedzi częstotliwościowej testowanego uzwojenia zamodelowane przy pomocy zaproponowanych algorytmów obwodowych zestawione z wynikiem pomiarów FRA. Większa amplituda pierwszego rezonansu, który pochodzi od uzwojenia WN wraz z pojemnościami doziemnymi tego uzwojenia, wynika ze sposobu modelowania uzwojenia WN za pomocą jednego zwoju. Rzeczywiste oddziaływanie pomiędzy uzwojeniami ma bardziej rozproszony charakter, dlatego dobroć modelowanego rezonansu jest wyższa, niż rzeczywistego. Różnice w działaniu opisanych trzech modeli są bardzo nieznaczne i wynikają głównie z charakteru wejścia i wyjścia modelu, które dla modelu Π są pojemnościowe, dla T indukcyjne, natomiast dla modelu Γ mieszane. Doświadczenia zebrane w [4] oraz w niniejszej pracy wskazują na najmniejsze błędy symulacji przy zastosowaniu modelu Π .



Rys.6. Przebiegi odpowiedzi częstotliwościowej zamodelowane przy pomocy algorytmów obwodowych w konfiguracjach Π , Γ oraz T zestawione z wynikami pomiarów FRA dla uzwojenia z połączeniami równoległymi

Autorzy: prof. dr hab. inż. Konstanty Marek Gawrylczyk, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki, E-mail: kmg@zut.edu.pl; dr inż. Katarzyna Treła, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki, E-mail: katarzyna.trela@zut.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Tenbohlen S. et al., Transformer Reliability Survey, Technical Brochure 642, Paris, France, 2015
- [2] Treła K., Gawrylczyk K. M., FEM modelling of the influence of the remaining windings on the frequency response of the power transformer, *Applied Sciences*, vol. 10(2020), no. 21
- [3] Banaszak S., Gawrylczyk K. M., Treła K., Frequency response modelling of transformer windings connected in parallel, *Energies*, vol. 16 (2020), no. 3
- [4] Gawrylczyk K., Porównanie modeli obwodowych uzwojeń transformatorów energetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, Zeszyt 10 (2022), ss. 205-208