

## Analiza rozkładu przepięć piorunowych w uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego

**Streszczenie.** Przepięcia piorunowe stanowią realne zagrożenie dla izolacji transformatorów energetycznych oraz ograniczenie ich niezawodności eksploatacyjnej. Bezpośrednie skutki ekonomiczne tych zjawisk wskazują na potrzebę rozpoznania rzeczywistych warunków oddziaływania przepięć na układy izolacyjne oraz analizę ich wpływu na pracę transformatorów. Przepięcia piorunowe w uzwojeniach transformatorów stanowią szczególnie ważne zagadnienie. W pracy przedstawiono wyniki analizy rozkładu przepięć piorunowych w eksperymentalnym uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego, wyposażonym w dwa ekrany elektrostatyczne. Analizowano wpływ ekranów na wartości maksymalne przepięć oraz ich przebiegi czasowe. Wyniki symulacji rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu warstwowym ekranowanym oraz nieekranowanym zostały również przedstawione w artykule.

**Abstract.** Surge overvoltages pose a threat to a power transformer insulation system and may lead to the transformer failure. Internal overvoltages in the windings are particularly dangerous due to their direct impact on condition of the winding insulation system. The analysis of surge overvoltages distribution in an experimental layer type winding of power transformer is presented in this paper. The influence of electrostatic shields on magnitude and waveforms of surge voltages in the winding is analyzed based on measurement results. The simulation results of initial voltage distributions for shielded and unshielded winding are also presented. (*Analysis of surge overvoltages in layer winding of power transformer*).

**Słowa kluczowe:** transformator, uzwojenie, przepięcia, początkowy rozkład napięcia.

**Keywords:** transformer, winding, overvoltages, initial voltage distribution.

### Wstęp

Transformatory w trakcie eksploatacji są narażone na oddziaływanie przepięć różnego pochodzenia – atmosferyczne, łączeniowe, długotrwałe. Przepięcia piorunowe, jakim poddawana jest izolacja transformatorów podczas prób odbiorczych lub w czasie wyładowań atmosferycznych w przewody linii zasilających, stanowią szczególnie istotne zagadnienie ze względu na duże stromości przebiegów udarowych oraz ich wartości maksymalne. Bezpośrednie skutki ekonomiczne zjawisk przepięciowych wskazują na potrzebę prowadzenia badań mających na celu określenie rzeczywistych warunków oddziaływania przepięć na układy izolacyjne transformatorów.

Fala udarowa docierająca do zacisków transformatora jest źródłem przepięć wewnątrz uzwojeń, które mogą prowadzić do uszkodzenia izolacji transformatora [1-5]. Narażenia przepięciowe izolacji uzwojeń są zależne od parametrów udaru napięciowego (wartość maksymalna, kształt, czas oddziaływania) oraz budowy samego uzwojenia. Odpowiedź uzwojenia na pojawiające się przepięcie jest uzależniona od pojemnościowych i indukcyjnych sprzężeń, które wynikają z jego mechanicznej konstrukcji. Z tego względu, uzwojenia o różnej konstrukcji zachowują się odmiennie podczas oddziaływania przebiegów udarowych [1-8]. Maksymalne wartości przebiegów piorunowych występujących w uzwojeniach są zależne również od tzw. początkowego rozkładu napięcia wzdłuż uzwojenia. Rozkład ten można poprawić przez zwiększenie pojemności szeregową uzwojenia, bądź zmniejszenie pojemności doziemnej.

W uzwojeniach o konstrukcji cewkowej, do poprawy początkowego rozkładu napięcia stosuje się przeplatanie zwojów w cewkach wg metod opisanych w pracach [9-11] lub wplatanie specjalnych zwojów ekranujących pomiędzy robocze zwoje uzwojenia [12]. Metody te bazują na koncepcji konstrukcyjnego zwiększenia pojemności szeregową uzwojenia, w celu ograniczenia wartości maksymalnych przepięć wewnętrznych. Wpływ zastosowania powyższych rozwiązań na ograniczenie wartości maksymalnych przepięć w uzwojeniach jest dobrze zbadany i szeroko opisany w literaturze [1-12].

W uzwojeniach warstwowym, do poprawy początkowego rozkładu napięcia, stosuje się specjalne

ekrany elektrostatyczne, które otaczają uzwojenie od strony wewnętrznej oraz zewnętrznej. Jeden z ekranów podłączony jest do zacisku liniowego transformatora, natomiast drugi do uziemionego punktu gwiazdowego [4,14,15]. Obecnie, uzwojenia tego typu stosuje się przeważnie w transformatorach rozdzielczych oraz transformatorach małych mocy [16] o napięciu znamionowym do 72,5 kV.

Powszechną praktyką producentów transformatorów jest stosowanie uzwojeń cewkowych w transformatorach wysokiego napięcia o większych mocach. Wynika to z faktu, że urządzenia elektroenergetyczne o wyższych mocach i poziomach napięć znamionowych, muszą być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby spełnić rygorystyczne wymagania elektryczne, mechaniczne oraz cieplne. Spełnienie tych wszystkich wymagań jest łatwiejsze w przypadku zastosowania uzwojeń cewkowych. Niemniej jednak, w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia transformatory wysokiego napięcia z uzwojeniami warstwowymi były z powodzeniem stosowane w eksploatacji [17]. W późniejszych latach uzwojenia te, pomimo prostszego procesu produkcji, zostały zastąpione uzwojeniami typu cewkowego. Dodatkowym powodem odejścia od stosowania uzwojeń warstwowym w transformatorach wysokiego napięcia był problem wykonania odpowiedniej izolacji ekranów, szczególnie na krawędziach. Wymagało to zastosowania dodatkowych pierścieni ekranujących na obu krańcach ekranów, co wiązało się ze zwiększeniem odległości pomiędzy uzwojeniem a ekranami. To z kolei, prowadziło do osłabienia korzystnego wpływu ekranów na ograniczenie wartości maksymalnych przepięć w uzwojeniu, przy jednoczesnym zwiększeniu wymiarów uzwojenia. Problemy te zostały później zminimalizowane przez zastosowanie ulepszonej konstrukcji ekranów [18].

W artykule przedstawiono wyniki analizy rozkładu przepięć piorunowych w eksperymentalnym uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego wyposażonym w dwa ekrany elektrostatyczne. Analizowano wpływ ekranów na wartości maksymalne przepięć oraz ich przebiegi czasowe. W pracy przedstawiono również wyniki symulacji rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu warstwowym ekranowanym oraz nieekranowanym.

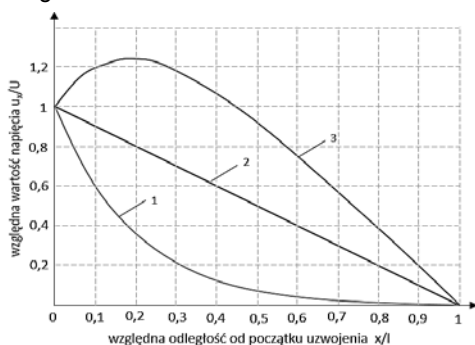
## Przebiegi w uzwojeniach transformatorów

Zagrożenie izolacji uzwojeń podczas oddziaływania przepięć, wynika nie tylko z kształtu, wartości maksymalnej i czasu oddziaływania przepięcia ale jest również uzależnione od odpowiedzi samego uzwojenia na pojawiającą się falę uderową. Przepięcia wewnętrzne są uzależnione od sprzężeń pojemnościowych oraz indukcyjnych w uzwojeniach. Wynikają one przede wszystkim ze sposobu ułożenia zwojów, warstw czy cewek uzwojenia względem siebie oraz względem uziemionych elementów wewnątrz kadzi [1-8,14].

Uzwojenie transformatora w początkowej fazie oddziaływania przebiegu uderowego wykazuje charakter pojemnościowy, który można określić za pomocą tzw. początkowego rozkładu napięcia (rys. 1). Kształt tego rozkładu jest nieliniowy i zależy od stosunku pojemności szeregowych  $C_s$  i doziemnych  $C_g$  uzwojenia; można go wyznaczyć korzystając z zależności (1) [1-4]:

$$(1) \quad U_x = U \left( \sinh \alpha \frac{x}{l} / \sinh \alpha \right)$$

gdzie:  $U_x$  – napięcie w punkcie  $x$  uzwojenia,  $U$  – wartość szczytowa uderu napięciowego,  $x$  – współrzędne punktu pomiarowego w uzwojeniu,  $l$  – całkowita długość uzwojenia,  $\alpha = \sqrt{C_g/C_s}$  – współczynnik określający kształt rozkładu początkowego.



Rys.1. Rozkłady napięcia w uzwojeniu transformatora: 1 – początkowy, 2 – końcowy, 3 – obwiednia maksymalnych przepięć doziemnych

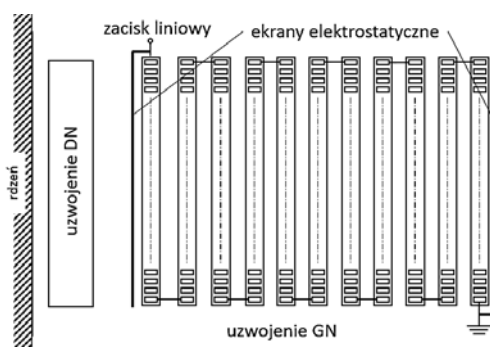
Rozkład początkowy napięcia zmienia się w czasie oddziaływania fali uderowej i w końcu osiąga wartość wynikającą ze sprzężeń indukcyjnych – tzw. końcowy rozkład napięcia, który jest liniowy (rys. 1). Uzwojenie jest tym bardziej narażone na negatywne skutki zjawisk przepięciowych, im rozkład początkowy jest bardziej nieliniowy i bardziej odbiega od rozkładu końcowego. W czasie pomiędzy stanem początkowym i końcowym, w uzwojeniu powstają drgania wyrównawcze mające charakter tłumionych oscylacji. W uproszczonych analizach przyjmuje się, że amplituda tych przebiegów przejściowych jest proporcjonalna do różnicy pomiędzy dwoma umownymi rozkładami napięcia - początkowym i końcowym. Przepięcia osiągają swoje wartości maksymalne w różnych fragmentach uzwojenia dla różnych chwil czasu. Znaczącymi wartościami maksymalnymi przepięć i ich rozkład wzdłuż uzwojenia można wyznaczyć obwiednię maksymalnych przepięć doziemnych [1-4].

Jakakolwiek zmiana geometrii transformatora, jego wymiarów, sposobu ułożenia zwojów czy zastosowanych materiałów, ma wpływ na wartości pojemności szeregowych oraz doziemnych uzwojenia. To prowadzi do mniej lub bardziej nieliniowego początkowego rozkładu napięcia, co z kolei przekłada się na zmianę wartości maksymalnych przepięć w uzwojeniu [1,2,4].

Znajomość charakteru, wartości maksymalnych oraz rozkładu przepięć w uzwojeniu jest kluczowe do prawidłowego zaprojektowania układu izolacyjnego transformatora. Dlatego też prowadzone są prace mające na celu rozpoznanie charakteru narażeń przepięciowych uzwojeń o różnych konstrukcjach oraz wpływu różnych czynników na wartości maksymalne przepięć. W artykule przedstawiono analizę rozkładu przepięć piorunowych w uzwojeniu warstwowym transformatora oraz rolę ekranów w ograniczaniu wartości maksymalnych przepięć wewnętrznych.

## Eksperymentalne uzwojenie warstwowe transformatora

Obiektem badań był eksperymentalny układ uzwojeń transformatora 63 MVA o znamionowej przekładni napięciowej 147 kV / 10,5 kV. Zawierał on uzwojenie wysokiego napięcia o konstrukcji wielowarstwowej oraz uzwojenie dolnego napięcia typu śrubowego. Uzwojenie wysokiego napięcia składało się z 11 warstw o jednakowej wysokości, po 92 zwoje w każdej. Poszczególne warstwy oddzielone były od siebie kanałami olejowymi. Uzwojenie było otoczone dwoma ekranami elektrostatycznymi. Ekran wewnętrzny był podłączony do zacisku liniowego transformatora, a zewnętrzny - do uziemionego punktu gwiazdowego. Uzwojenie dolnego napięcia zawierało 125 zwojów i było nawinięte przewodem o ciągłej transpozycji żył. W eksperymentalnym układzie uzwojeń, rdzeń został zastąpiony cylindrem wykonanym z blachy krzemowej umieszczonej wewnątrz tulei nawojowej uzwojenia dolnego napięcia. Uproszczony schemat przedstawiający geometrię układu uzwojeń przedstawiono na rysunku 2.



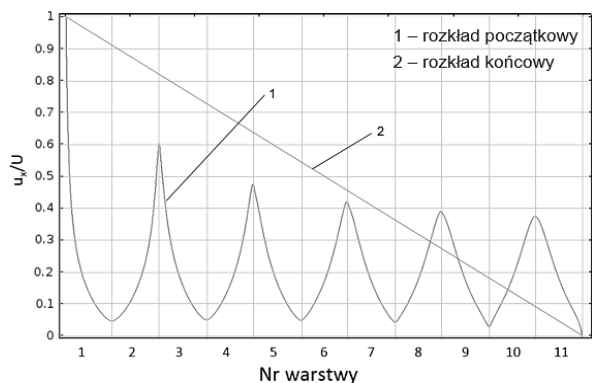
Rys.2. Uproszczony przekrój eksperymentalnego układu uzwojeń transformatora

## Początkowy rozkład napięcia w nieekranowanym oraz ekranowanym uzwojeniu warstwowym transformatora

Początkowy rozkład napięcia, obliczony metodą elementów skończonych (MES), w nieekranowanym uzwojeniu warstwowym przedstawiono na rysunku 3.

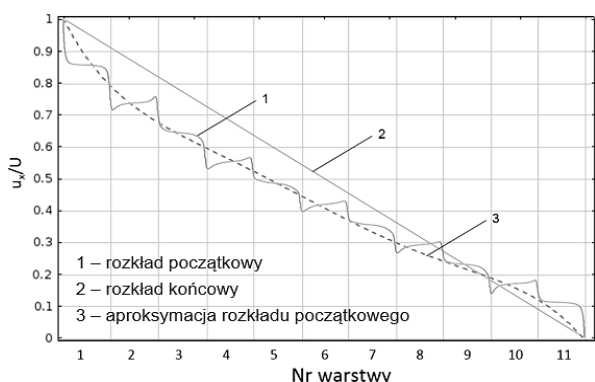
Jak widać, początkowy rozkład napięcia jest bardzo nieliniowy i różni się od rozkładów znanych z uzwojeń o budowie cewkowej. Wynika to z różnic w geometrii uzwojeń cewkowych i warstwowych - uzwojenie warstwowo cechuje się innym rozkładem pojemności szeregowych i doziemnych. Pierwsza warstwa nieekranowanego uzwojenia warstwowego posiada dużą wewnętrzną powierzchnię, silnie sprzężoną z uziemionym uzwojeniem dolnego napięcia, co ma dominujący wpływ na kształt rozkładu napięcia wzdłuż pierwszej warstwy. Ze względu na duży gradient potencjału wzdłuż pierwszej warstwy, jej izolacja zwojowa jest poddawana silnym naprężeniom elektrycznym. Zagrożona jest również izolacja pomiędzy dwoma pierwszymi warstwami uzwojenia.

Rozkład napięcia na kolejnych warstwach ma podobny charakter, ale naprężenia elektryczne są mniejsze ze względu na większą wartość pojemności szeregowych tych warstw w stosunku do pojemności doziemnej.



Rys.3. Początkowy i końcowy rozkład napięcia w nieekranowanym uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego

Zastosowanie dwóch ekranów elektrostatycznych otaczających uzwojenie i podłączonych odpowiednio do zacisku liniowego oraz uziemionego końca uzwojenia, znacząco poprawia kształt początkowego rozkładu napięcia (rys. 4).



Rys.4. Początkowy i końcowy rozkład napięcia w ekranowanym uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego

Rozkład początkowy w ekranowanym uzwojeniu warstwowym jest zbliżony do rozkładu końcowego, przez co można oczekiwać niewielkich wartości maksymalnych przebiegów przejściowych pojawiających się w uzwojeniu. W tym wypadku współczynnik  $\alpha \approx 1,5 - 2$ , a napięcie jest niemal równomiernie rozłożone pomiędzy kolejne warstwy uzwojenia.

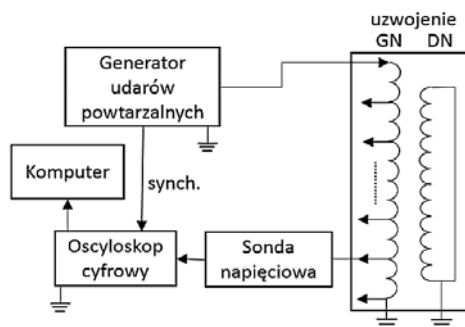
Wewnętrzny ekran podłączony do zacisku liniowego znacząco osłabia pojemnościowe sprzężenie początkowych warstw z ziemią. Sprzężenia pojemnościowe pozostałych warstw z ziemią są również niewielkie. Pojemność doziemna ekranowanego uzwojenia warstwowego jest reprezentowana głównie przez pojemności w przestrzeni jarzmowej oraz pojemności pomiędzy ostatnią warstwą uzwojenia a zewnętrznym ekranem.

### Badania rozkładu przepięć piorunowych w uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego

Badania przepięć w uzwojeniu warstwowym transformatora przeprowadzono metodą RSO (Recurrent Surge Oscillograph). Uproszczony schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 5. Do wytwarzania udarów napięciowych zastosowano niskonapięciowy generator udarów powtarzalnych. Udar napięciowy był doprowadzany do zacisku wejściowego uzwojenia wysokiego napięcia, a przebiegi przepięć rejestrowano metodą oscylograficzną, w punktach pomiarowych, które były zlokalizowane na początku, w środku i na końcu każdej warstwy uzwojenia.

Pomiary wykonano dla różnych konfiguracji ekranów względem uzwojenia – badano wpływ podłączenia bądź

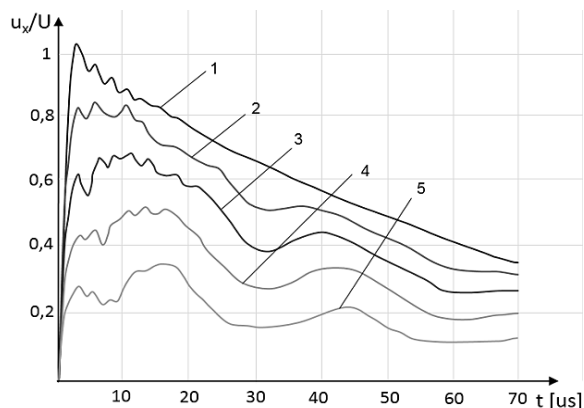
odłączenia ekranów na rozkład i wartości maksymalne przepięć wewnętrznych w uzwojeniu warstwowym.



Rys.5. Schemat blokowy układu pomiarowego do rejestracji przepięć metodą RSO

### Wyniki badań

Wyniki rejestracji przebiegów przepięć doziemnych w wybranych punktach uzwojenia warstwowego z podłączonymi dwoma ekranami, przy zaatakowaniu jego zacisku liniowego znormalizowanym udarem piorunowym  $1,2/50 \mu s$ , przedstawiono na rysunku 6. Ekrany były podłączone do uzwojenia zgodnie ze schematem z rysunku 2. Wartości napięć są wyrażone w jednostkach względnych, w odniesieniu do wartości szczytowej udaru piorunowego.

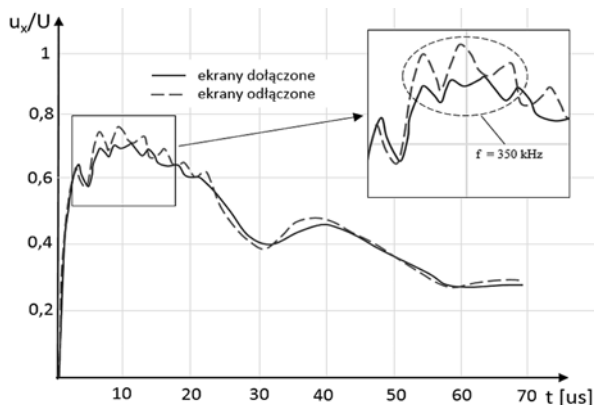


Rys.6. Przebiegi przepięć doziemnych w wybranych punktach uzwojenia warstwowego z dołączonymi dwoma ekranami: 1 – udar napięciowy, 2 – przepięcie na warstwie nr 2, 3 – przepięcie na warstwie nr 4, 4 – przepięcie na warstwie nr 6, 5 – przepięcie na warstwie nr 8

Na przebiegach przepięć doziemnych, w czasie pomiędzy 0 a  $20 \mu s$ , występują wysokoczęstotliwościowe oscylacje nałożone na drgania o niższej częstotliwości. Wartości maksymalne przepięć wewnątrz uzwojenia nie przekraczają wartości szczytowej udaru doprowadzonego.

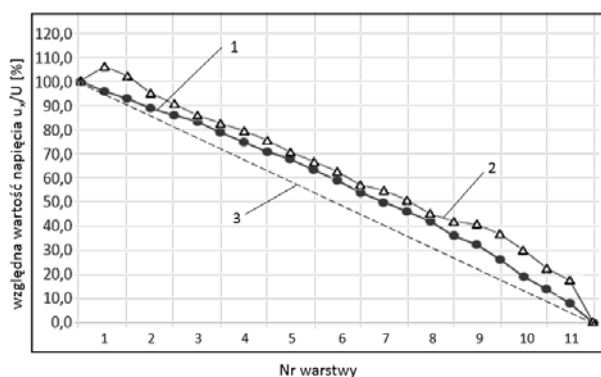
Wpływ podłączenia bądź odłączenia ekranów od uzwojenia, na przebiegi czasowe przepięć doziemnych, przedstawiono na rysunku 7, na przykładzie przebiegów napięcia w czwartej warstwie uzwojenia. Po odłączeniu, ekrany cały czas znajdowały się w badanym układzie ale były jedynie pojemnościowo sprzężone z uzwojeniem. Odpowiadało to sytuacji, w której ekran utracił kontakt elektryczny z uzwojeniem np. w trakcie transportu, czy też przez błędnie wykonane połączenie na etapie produkcji.

Jak można zauważyć, odłączenie ekranów spowodowało wzrost amplitudy wysokoczęstotliwościowych drgań. Częstotliwość tych oscylacji wynosiła ok. 350 kHz. Wartość maksymalna przepięć doziemnych w czwartej warstwie uzwojenia, po odłączeniu ekranów, wzrosła o ok. 5% w porównaniu do uzwojenia z podłączonymi dwoma ekranami.



Rys.7. Przebiegi czasowe napięć doziemnych w czwartej warstwie uzwojenia z ekranami dołączonymi (linia ciągła) oraz odłączonymi (linia przerywana) od uzwojenia

Wpływ odłączenia ekranów na wartości maksymalne napięć wzdłuż całego uzwojenia przedstawiono na rysunku 8.



Rys.8. Rozkład maksymalnych wartości napięć doziemnych w uzwojeniu z ekranami podłączonymi (1) oraz odłączonymi (2), (3) rozkład końcowy napięcia

Wartości maksymalne napięć wzdłuż uzwojenia z podłączonymi dwoma ekranami są niewiele wyższe od tych wynikających z rozkładu końcowego. Największa różnica pomiędzy tymi rozkładami występuje w połowie ósmej warstwy i wynosi ok. 12%. Odłączenie ekranów spowodowało wzrost napięć wewnętrznych w całym uzwojeniu. Odłączenie ekranu wewnętrznego osłabiło pojemność szeregową początku uzwojenia przez co wzrosły napięcia na pierwszej warstwie, a następnie przeniosły się do kolejnych warstw. Odłączenie ekranu zewnętrznego spowodowało dodatkowe wzmocnienie napięć w pobliżu uziemionego końca uzwojenia.

### Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono analizę rozkładu napięć piorunowych w uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego. Uzwojenie posiadało dwa ekrany, które były podłączane lub odłączane od zacisków uzwojenia. Badano wpływ ekranów na rozkład i wartości maksymalne napięć wewnętrznych w uzwojeniu warstwowym transformatora. W artykule przedstawiono również wyniki symulacji rozkładów początkowych napięcia w nieekranowanym oraz ekranowanym uzwojeniu warstwowym transformatora energetycznego.

Na podstawie przedstawionych wyników badań i analiz można stwierdzić, że uzwojenie warstwowe z podłączonymi dwoma ekranami, cechuje korzystny rozkład napięć piorunowych. Wykonane badania eksperymentalne potwierdziły oczekiwania wynikające z analizy obliczonych rozkładów początkowych napięcia w uzwojeniu,

o niewielkich wartościach maksymalnych napięć doziemnych w uzwojeniu z podłączonymi dwoma ekranami.

Odłączenie ekranów elektrostatycznych od zacisków uzwojenia (szczególnie ekranu wewnętrznego od zacisku liniowego) spowodowało wzrost maksymalnych wartości napięć wewnętrznych oraz amplitudy oscylacji wysokoczęstotliwościowych w uzwojeniu, dlatego też powinno się zwracać szczególną uwagę na wykonanie niezawodnego połączenia między uzwojeniem i ekranami.

**Autorzy:** mgr inż. Bartłomiej Adamczyk, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB w Krakowie, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, e-mail: bartlomiej.adamczyk@pl.abb.com  
dr hab. inż. Marek Florkowski, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB w Krakowie, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, e-mail: marek.florkowski@pl.abb.com

### LITERATURA

- [1] Florkowski M., Furgał J.: High frequency methods for condition assessment of transformers and electrical machines, *Wydawnictwa AGH*, ISBN 978-83-7464-614-7, 2013
- [2] Greenwood A.: Electrical Transients in Power Systems, *Wiley-Interscience*, 2nd ed., ISBN: 978-0-471-62058-7, 1991
- [3] Su C.Q.: Electromagnetic Transients in Transformer and Rotating Machine Windings, *IGI Global*, PA 17033, 2013
- [4] Bharat Heavy Electricals Limited (BHEL): Transformers, 2nd ed., *McGraw Hill*, ISBN: 9780070483156, 2003
- [5] Soloot A.H., Høidalen H., Gustavsen B.: Influence of the winding design of wind turbine transformers for resonant overvoltage vulnerability, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 22, No. 2, pp.1250-1257, 2015
- [6] Masdi H., Mariun N., Mohamed A., Wahab N.I.A.: Study of Impulse Voltage Distribution in Transformer Windings, *IEEE Int'l. Conf. Power and Energy (PECon)*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 379-383, 2010
- [7] Okabe S., Koto M., Ueta G., Saida T., Yamada S.: Development of High Frequency Circuit Model for Oil-immersed Power Transformers and its Application for Lightning Surge Analysis, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 18, No. 2, pp. 541-552, 2011
- [8] Theocharis A., Popov M.: Modelling of foil-type transformer windings for computation of terminal impedance and internal voltage propagation, *IET Electric Power Applications*, Vol. 9, No. 2, pp. 128-137, 2015
- [9] Steam G.F.: Improvements in inductive windings, British Patent No. 587997, 1947
- [10] Kratochwil Z.: Sposób wykonywania cylindrycznych uzwojeń transformatorów o zwiększonej wytrzymałości udarowej, Polski Patent Nr PL 43104, 1959
- [11] van Nuys R.: Interleaved high voltage transformer windings, *IEEE Trans. Power App. and Syst.*, Vol. 79, No. 5, pp. 1946-1954, 1978
- [12] Maliszewski A.: Zjawiska zachodzące w uzwojeniach splatanych i w uzwojeniach z ekranującymi zwojami wplatanymi, *Forum ABB Transformatory Energetyczne*, ISBN 978-83-924841-9-6, 2007, pp.79-95
- [14] Adamczyk B., Florkowski M.: Simulation of initial voltage distribution in layer type transformer winding, *19th Int. Sympos. High Voltage Eng. (ISH 2015)*, Pilsen, Czech Republic, Paper No. 220, 2015
- [15] Adamczyk B., Florkowski M., Świątkowski M.: Effect of Shielding on Surge Overvoltages in Multilayer type Windings of Power Transformer, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 23, No. 3, 2016
- [16] Harris D.L.: The Design and Performance of Circular Disc, Helical and Layer Windings for Power Transformer Applications, *Minnesota Power Syst. Conf.*, University of Minnesota, pp. 1-12, 2009
- [17] Maekawa S., Ohoka N., Hattori S.: 275 kV 230000 kVA „Fahbar” transformer for Higashi Osaka Substation of Kansai Electric Power Co. Inc., *Fuji Denki Review*, Vol. 7, No. 2, pp. 9-13, 1961
- [18] McNutt W.J.: Transient voltage distribution improving line shield for layer wound power transformer, U.S. Patent 4 153 891, May 8, 1979