

Rozkład fali napięciowej na uzwojeniu transformatora przy zaburzeniach piorunowych

The voltage wave distribution on a transformer winding during lightning incidents

Izolacja uzwojenia transformatorów energetycznych jest standardowo papierowo-olejowa. Izolację tę charakteryzują dwie pojemności: główna C_g i międzyzwojowa C_z i dwie rezystancje: główna R_g i międzyzwojowa R_z . Pojemność C_g i rezystancja R_g są parametrami izolacji głównej między uzwojeniem a kadzią transformatora.

Znany jest sposób pomiaru pojemności C_g , wykonuje się go napięciem przemiennym o częstotliwości 50 Hz, przyłączając źródło napięcia między uzwojenie badane i kadź transformatora, zwykle uziemioną wraz z uzwojeniami pozostałymi zwartymi do kadzi [5-7]. Znany jest także sposób pomiaru rezystancji R_g , mierzy się ją napięciem stałym przyłączając źródło napięcia między uzwojenie badane i kadź transformatora, zwykle uziemioną wraz z uzwojeniami pozostałymi [5-7]. Pomiar rezystancji R_g najczęściej wykonuje się induktorem. Pomiar pojemności izolacji międzyzwojowej C_z nie jest łatwy. Można próbować zasilać uzwojenie badane napięciem o częstotliwości, przy której składowa pojemnościowa prądu jest znacznie większa od składowej indukcyjnej prądu, np. napięciem o częstotliwości 10^4 Hz. Nie ma jednak fizycznej możliwości rozdzielania składowych prądu indukcyjnej od pojemnościowej, a tym samym określenia jednoznacznie wartości prądu składowej pojemnościowej. Pomiar jest także trudny w realizacji w warunkach eksploatacyjnych w elektrowni bądź w rozdzielni, z uwagi na źródło napięcia o odpowiednio dużej mocy [2,3]. Sposób pomiaru pojemności C_z został zarejestrowany w Urzędzie Patentowym [4]. Producenci transformatorów ograniczają się zwykle tylko do obliczania pojemności międzyzwojowej C_z . Rezystancja izolacji międzyzwojowej R_z determinuje wytrzymałość napięciową izolacji zwojowej i jej odporność na zwarcia zwojowe. Natomiast stosunek pojemności C_g do pojemności C_z w potęgde $0,5 [C_g/C_z]^{0,5}$ determinuje rozkład fali napięciowej na uzwojeniu, indukowanej przez wyładowania atmosferyczne w czasie burzy [1,8]. Największe napięcie występuje na pierwszych zwojach, od strony wyprowadzenia uzwojenia i przyłączenia do linii elektroenergetycznej, dlatego też izolacja międzyzwojowa pierwszych zwojów

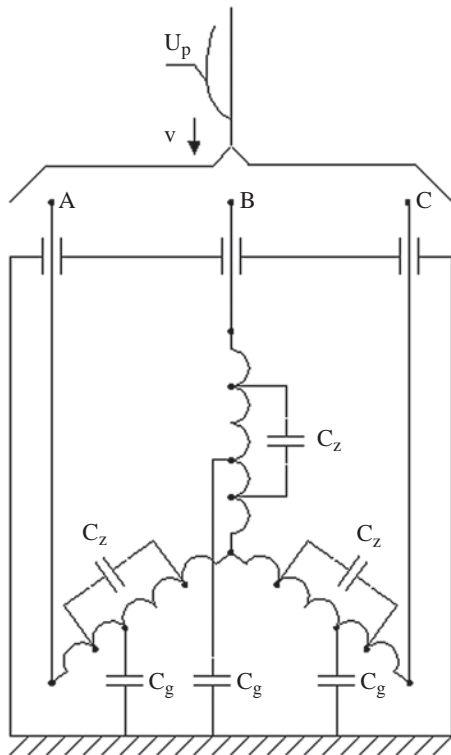
jest najbardziej narażona na uszkodzenie, spowodowane zaburzeniami napięciowymi. W sieci elektroenergetycznej występują także przebiegi łączeniowe. Odporność izolacji międzyzwojowej transformatora na przebicie spowodowane przebiegami łączeniowymi zależy w dużym stopniu od pojemności C_z i rezystancji R_z .

Celem artykułu jest wykazanie, że w czasie różnego rodzaju przebiegów działających na transformator rozkład napięcia na uzwojeniu jest determinowany przez stosunek pojemności izolacji głównej transformatora C_g do pojemności izolacji międzyzwojowych C_z .

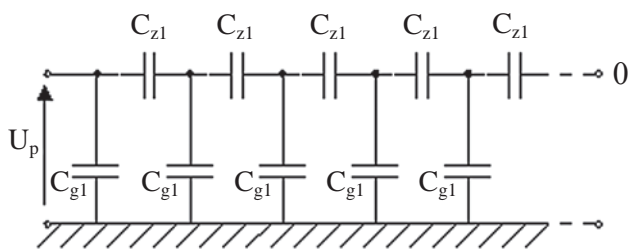
Rozkład fali napięciowej na uzwojeniu transformatora

Transformatory energetyczne przyłączone do sieci elektroenergetycznej są narażone na działanie fal napięciowych U_p wzbudzanych w tych sieciach przez wyładowania atmosferyczne i przez zaburzenia spowodowane przez wyłączenia dużych odbiorów o charakterze indukcyjnym, np. transformatorów. Fala napięciowa u_p dochodząca do izolatorów przepustowych transformatora charakteryzuje się dużą stromością narastania (rys. 1).

Układy izolacyjne izolatora przepustowego i uzwojenia transformatora dla fali napięciowej mają parametry rozłożone. Rozkład napięcia na uzwojeniu, po wejściu fali napięciowej, jest niejednorodny i ta jednorodność jest zmienna w czasie. Obliczenie rozkładu napięcia na uzwojeniu przeprowadza się na podstawie schematu zastępczego układu izolacyjnego o parametrach rozłożonych, przy czym zarówno struktura schematu zastępczego jak i jego parametry zmieniają się w czasie. Dla pierwszej chwili wejścia czoła fali napięciowej U_p ($t = 0$) transformator zachowuje się jak czysta pojemność. Schemat zastępczy transformatora, dla ($t = 0$), odwzorowuje układ kaskadowy n pojemności izolacji głównej C_{gI} i n pojemności izolacji międzyzwojowych C_{zI} (rys. 2).



Rys. 1. Wejście fali napięciowej u'_p na uzwojenie transformatora



Rys. 2. Schemat zastępczy izolacji uzwojenia transformatora dla $u_{p(t=0)}$

W sumie pojemności te dają pojemność wypadkową C_w . Napięcie u_A i prąd i_A na zaciskach wejściowych uzwojenia transformatora

$$u_A = u'_A + u''_A \quad (1)$$

$$i_A = i'_A - i''_A \quad (2)$$

gdzie:

u'_A i i'_A – składowe napięcia i prądu fali padającej,

u''_A i i''_A – składowe napięcia i prądu fali odbitej.

Impedancja falowa linii elektroenergetycznej z_f wiąże relacje napięć i prądów fali padającej i odbitej:

$$u'_A = i'_A z_f \quad (3)$$

$$u''_A = i''_A z_f \quad (4)$$

Mnożąc równanie (2) przez z_f otrzymamy:

$$i_A z_f = u'_A - u''_A \quad (5)$$

$$u_A = 2u'_A - i_A z_f \quad (6)$$

Z drugiej strony

$$u_A = \frac{1}{C_w} \int_0^t i_A dt = 2u'_A - i_A z_f \quad (7)$$

Zakładając, że $u'_A \approx \text{constans}$ i różniczkując równanie (7) otrzymuje się:

$$\frac{di_A}{i_A} = -\frac{dt}{z_f C_w} \quad (8)$$

Równanie (8) ma rozwiązanie:

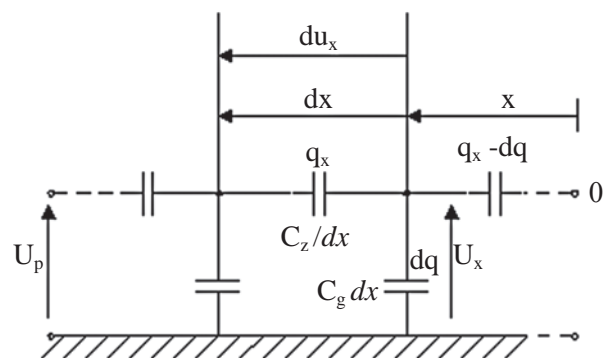
$$i_A = \frac{2u'_A}{z_f} e^{-\frac{t}{z_f C_w}} \quad (9)$$

Podstawiając równanie (9) do równania (6) otrzymuje się:

$$u_A = 2u'_A \left(1 - e^{-\frac{t}{z_f C_w}} \right) \quad (10)$$

Z równania (10) widać, że w pierwszej chwili ($t = 0$) wejścia fali napięciowej napięcie na uzwojeniu transformatora jest równe zero, gdyż impedancja pojemności $C_w(t=0)$ jest równa zero. Dla czasu $t > 0$ pojemność C_w ładuje się i napięcie rośnie do podwójnej wartości w stosunku do napięcia wejściowego. Czas ładowania pojemności C_w jest bardzo krótki. Czas ten można oszacować przyjmując wartość impedancji falowej linii elektroenergetycznej $z_f \approx 500 \Omega$ i wartość pojemności $C_w = (10^{-10} \div 10^{-11})$. Stała czasowa $z_f C_w = (0,05 \div 0,005) \mu s$. Napięcie na uzwojeniu po czasie ($t = 3z_f C_w \approx 0,1 \mu s$) osiąga wartość $u_A \approx 1,95 u'_A$, czyli prawie podwójną wartość fali wejściowej.

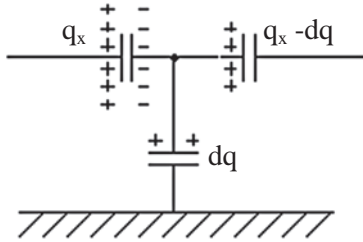
Rozkład fali napięciowej wzdłuż uzwojenia, w okresie początkowym, zależy od rozkładu pojemności między poszczególnymi sekcjami uzwojenia (rys. 2). Analizę przeprowadzimy dla względnej długości uzwojenia ($l = 1$). Oznaczmy pojemność główną izolacji uzwojenia do kadzi przez C_g , a pojemność izolacji międzyzwojowej przez C_z . Rozpatrzymy element uzwojenia o długości dx położony w odległości x od końca uzwojenia (rys. 3).



Rys. 3. Schemat zastępczy do obliczenia początkowego rozkładu napięcia na uzwojeniu

W punkcie x napięcie w stosunku do kadzi (uziemionej) wynosi u_x , a na elemencie dx napięcie wynosi du_x (rys. 3). Pojemności elementów dx do masy, na całej długości uzwojenia, są połączone równolegle, a suma ich wynosi C_g , zatem pojedynczy

element dx ma pojemność ($C_g dx$). Pojemności elementów dx między sekcjami uzwojenia są połączone szeregowo, a ich suma wynosi C_z , zatem pojemność pojedynczego elementu dx jest równa C_z/dx . Ładunek elektryczny q jest rozłożony na pojemności wzdłuż uzwojenia. Na brzegach elementu dx ładunek elektryczny wynosi q_x i ($q_x - dq$), zatem na pojemności ($C_g dx$) ładunek jest równy dq , co pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Rozłożenie ładunków na pojemnościach uzwojenia transformatora

Ogólna zależność między ładunkiem, pojemnością i napięciem:

$$u = \frac{q}{c} \quad (11)$$

Wykorzystując tę zależność w obwodzie z pojemnościami ($C_g dx$) i (C_z/dx) otrzymuje się:

$$u_x = \frac{1}{c_g} \frac{dq}{dx} \quad (12)$$

$$\frac{du_x}{dx} = \frac{u_x}{c_z} \quad (13)$$

Różniczkując równanie (13) i wstawiając go do równania (12) otrzymuje się

$$\frac{d^2 u_x}{dx^2} - \frac{c_g}{c_z} u_x = 0 \quad (14)$$

Rozwiązaniem równania (13) jest funkcja

$$u_x = U_1 e^{\alpha x} + U_2 e^{-\alpha x} \quad (15)$$

gdzie:

$$\alpha = \sqrt{c_g/c_z}.$$

Stałe całkowania U_1 i U_2 wyznacza się z warunków granicznych na końcach uzwojenia. Warunki graniczne z nieziemionym punktem zerowym uzwojenia transformatora (jest to układ standardowy dla transformatorów energetycznych):

$$\begin{aligned} x=0, q=0 \\ x=1, u_x = U_A \end{aligned}$$

Z pierwszego warunku granicznego i równania (12) wynika

$$\left. \frac{du_x}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (16)$$

Z równań (15) i (14) wynika, że $U_1 = U_2$.

Z drugiego warunku granicznego i równania (14) wynika, że

$$U_1 = U_2 = \frac{U_A}{e^\alpha + e^{-\alpha}} \quad (17)$$

Podstawiając równanie (17) do równania (15) otrzymuje się

$$u_x = U_A \frac{\text{ch}\alpha x}{\text{ch}\alpha} \quad (18)$$

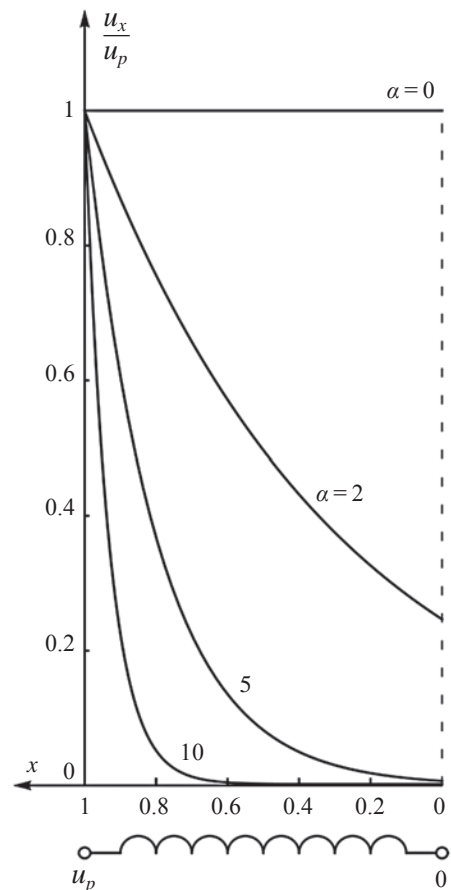
Początkowy rozkład napięcia na uzwojeniu zależy od współczynnika α .

Dla $\alpha = 0$, $u_{x=1} = u_p$.

Gradient napięcia na początku uzwojenia:

$$\left. \frac{du_x}{dx} \right|_{x=1} = U_A \frac{\text{sh}\alpha}{\text{ch}\alpha} = U_A \text{th}\alpha \approx U_A \alpha \quad (19)$$

Dla chwili ($t = 0$) wejścia fali napięciowej na rozkład napięcia na uzwojeniu, przy różnych wartościach α , przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Początkowy ($t = 0$) rozkład napięcia na uzwojeniu transformatora dla kilku wartości α

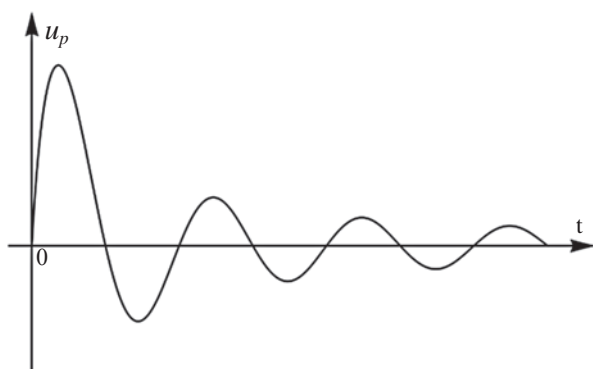
Przy $\alpha = 0$ napięcie na całym uzwojeniu jest jednakowe. Całe napięcie jest na izolacji głównej. Gradient napięcia na izolacji międzyzwojowej jest równy zero. Jest to układ korzystny. Dla $\alpha > 0$ rozkład napięcia na uzwojeniu jest mniej korzystny. Największy gradient napięcia jest na początku uzwojenia, izolacja międzyzwojowa początkowych zwojów jest najbardziej narażona na przebicie. Czym α jest większe, tym narażenie izolacji międzyzwojowej na przebicie jest większe.

Przeprowadzona analiza opiera się na uproszczonym modelu układu izolacyjnego i daje tylko pogląd jakościowy przebiegu zjawiska oddziaływania fali napięciowej u'_p na transformator

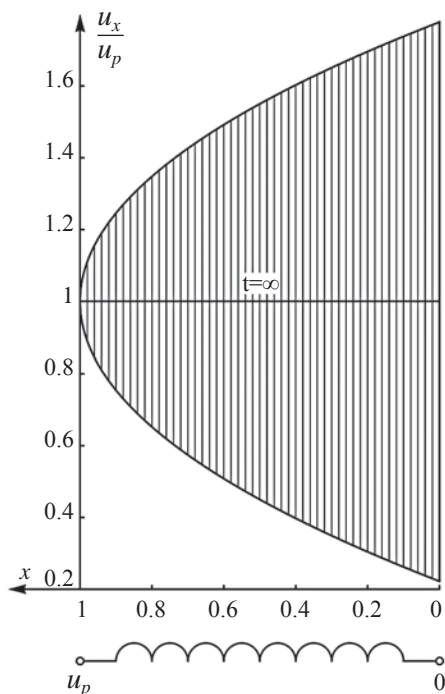
w chwili $t = 0$. Dla czasu $t > 0$ przebieg zjawiska rozkładu napięcia zależy także od indukcyjności i rezystancji uzwojenia oraz stratności układu izolacyjnego. Do analizy należy przyjmować inny schemat zastępczy układu izolacyjnego transformatora, bardziej rozbudowany. Indukcyjność uzwojenia L i rezystancja uzwojenia R , a także rezystancja izolacji powodują, że fala napięciowa u'_p wzbudza drgania tłumione (zanikające).

Na rysunku 6 pokazano przykładowy przebieg napięcia u_p w punkcie początkowym uzwojenia $x = l$.

Rozłożenie amplitudy drgań napięcia u_p wzdłuż uzwojenia, bez uwzględnienia tłumienia, przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 6. Oscylacyjny przebieg napięcia u_p na uzwojeniu transformatora



Rys. 7. Obwiednia zmiany napięcia u_p na uzwojeniu transformatora w czasie

Jest to rozkład teoretyczny. Fala napięciowa udarowa u'_p generowana przez pioruny jest impulsowa. W teorii wysokich napięć impuls napięcia piorunowego u'_p znormalizowano przyjmując czas narastania napięcia $1,2 \mu\text{s}$ i czas zanikania napięcia do połowy wartości maksymalnej $50 \mu\text{s}$. Dla tak krótkich przedziałów czasowych działania fali napięciowej przeprowadzona anali-

za jakościowo jest poprawna. Krótki czas trwania fali napięciowej u'_p oraz tłumienie powodują szybki zanik drgań napięcia i prądu. Rozkład teoretyczny napięcia na uzwojeniu, przedstawiony na rysunku 7, pokazuje, że największy gradient napięcia w całym przedziale czasu trwania zaburzenia jest na początkowych zwojach uzwojenia i tym miejscu najczęściej dochodzi do zwarcia zwojowego uzwojenia.

Drugi rodzaj generacji fal napięciowych to przebiegi łączeniowe. Przebiegi łączeniowe występują zawsze podczas przełączeń w sieci elektroenergetycznej. Indukcyjności, pojemności i rezystancje sieci elektroenergetycznej powodują, że przebiegi łączeniowe mają charakter oscylacji tłumionych. Częstotliwość oscylacji mieści się w przedziale od 10^3 Hz do 10^4 Hz , a czas zanikania oscylacji wynosi około 5 ms . Przebiegi łączeniowe w teorii wysokich napięć charakteryzuje się przez udar napięcia do szczytu $T_p = 250 \mu\text{s}$ i czas spadku napięcia do półszczytu $T_2 = 2500 \mu\text{s}$. Z tego widać, że czas trwania przebiegów łączeniowych jest wielokrotnie dłuższy od czasów impulsów piorunowych. Przebiegi oscylacyjne tłumione o dłuższym czasie trwania mają na ogół łagodniejszy rozkład gradientu napięcia na uzwojeniu.

Podsumowanie

Transformatory i przekładniki pomiarowe połączone z siecią energetyczną są narażone na działanie różnego rodzaju przebiegów. Przebiegi w sieci elektroenergetycznej są generowane przez wyładowania piorunowe oraz w czasie różnego rodzaju przełączeń. Czas działania przebiegów piorunowych nie przekracza $100 \mu\text{s}$, czas przebiegów łączeniowych jest rzędu $0,5 \text{ ms}$, przy czym przebiegi łączeniowe są zwykle oscylacyjne o częstotliwości rzędu 10 kHz . Napięcie fali napięciowej rozkłada się nierównomiernie wzdłuż uzwojenia transformatora. Maksymalny gradient napięcia występuje na początku uzwojenia. Gradient maksymalny zależy od współczynnika $\alpha = [C_g/C_z]^{0,5}$, gdzie C_g oznacza pojemność izolacji głównej, a C_z pojemność izolacji zwojowej.

Pomiar rezystancji R_g i pojemności C_g izolacji głównej uzwojenia transformatorów jest znany i wykonywany od dziesiątków lat, głównie w celach diagnostycznych. Pomiar rezystancji R_z i pojemności C_z izolacji zwojowej uzwojenia jest złożony [4]. Ważne jest zatem, aby pojemności te umieć pomiarowo wyznaczyć.

PIŚMIENICTWO

- [1] Glinka T.: Maszyny elektryczne i transformatory. *Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka*. Wydawnictwo Instytutu Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL 2015, ss. 287, ISBN 978-83-931909-1-1.
- [2] Glinka T., Sikora A., Bernatt J., Polak A.: Badanie izolacji zwojowej transformatorów prądem stałym. *Przegląd Elektrotechniczny* 2015, nr 10, s. 39-42, ISSN 0033-2097.
- [3] Glinka T., Polak A., Decner A., Sikora A.: Equivalent circuits used in the diagnostics of insulation in power transformers. *Czasopismo Techniczne – Technical Transactions. Elektrotechnika – Electrical Engineering* 2015, s. 421-432, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, ISSN 0011-4561.

- [4] Glinka T., Bernatt J., Polak A.: Sposób pomiaru pojemności i rezystancji izolacji międzyzwojowej w transformatorach energetycznych. Zgłoszenie patentowe P.407562 z dnia 17 kwietnia 2014 r.
- [5] Kazimierski M., Olech W.: Diagnostyka techniczna i monitoring transformatorów. Wyd. *Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o.*, Gliwice 2013.
- [6] Polska norma PN-EN 60076-3: 2014-02 (wersja angielska) *Transformatory – Część 3: Poziomy izolacji, próby wytrzymałości elektrycznej i zewnętrzne odstępstwa izolacji w powietrzu*. PN-

-EN 60076-5: 2009 (wersja polska) *Transformatory – Część 5: Wytrzymałość zwarcia*.

- [7] *Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów*. ZPBE Energopomiar-Elektryka, Gliwice 2012, ISBN 83-916040-04.
- [8] Васютинский С. Б.: Вопросы теории и расчета трансформаторов. (Глава 7-4 Перенапряжения в трансформаторах. Стр. 310-325). Издательство „Энергия” 1970.



Przemysław Gawliczek, Maksymilian Przygodzki
Politechnika Śląska
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów

Praktyczne aspekty eksploatacji wybranych transformatorów energetycznych najwyższych napięć

Practical aspects of selected UHV power transformers operation

Charakterystyka transformatorów energetycznych eksploatowanych w badanym obszarze Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE)

KSE składa się z sieci elektroenergetycznych oraz przyłączonych do nich odbiorców i źródeł wytwórczych. Sieci ze względu na swój charakter i pełnioną funkcję w systemie dzieli się na przesyłowe i dystrybucyjne [5]. Sieć przesyłowa najwyższych napięć (w Polsce 220 kV lub 400 kV) jest własnością operatora systemu przesyłowego (OSP), a zasady jej funkcjonowania określono w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej [2].

Infrastrukturę sieci przesyłowej można spotkać w obszarze całej Polski, przy czym jej gęstość nie jest jednakowa we wszystkich częściach kraju. Ma to związek z industrializacją oraz rozwojem aglomeracji miejskich, a także z lokalizacją elektrowni zawodowych. Sieć ta zatem tworzy zasadniczą przestrzeń przesyłu mocy na duże odległości. Jest to element łańcucha dostaw energii do odbiorców, którzy w znakomitej liczności korzystają z przyłączy na poziomie sieci co najwyżej wysokich napięć. Połączenia pomiędzy siecią najwyższego napięcia a siecią wysokiego napięcia (sporadycznie średnich napięć) realizowane są przez transformatory energetyczne dużej mocy. W związku z tym znaczenie tychże transformatorów jest kluczowe dla prawidłowego działania systemu i zapewnienia ciągłości dostaw

energii do odbiorców. Wspomniane transformatory zainstalowane są w stacjach elektroenergetycznych o górnym napięciu 220 kV i 400 kV.

W niniejszym artykule odniesiono się do zagadnień eksploatacyjnych wybranej populacji transformatorów energetycznych zainstalowanych w obszarze KSE o największej gęstości sieci przesyłowej i sieci 110 kV.

W rozpatrywanym obszarze KSE zainstalowanych jest 50 jednostek transformatorowych o górnym napięciu 220 kV lub 400 kV i mocach znamionowych od 100 MVA do 500 MVA. Większość stanowią autotransformatory 220/110 kV o mocy 160 MVA (tab. 1).

Średni wiek jednostki transformatorowej w rozpatrywanym obszarze to 29 lat, przy czym wiele jednostek przekroczyło już wiek 40 lat. Można zwrócić uwagę, że podobny wiek mają wszystkie transformatory energetyczne eksploatowane w KSE. Należy przy tym zauważyć, że znaczna część tych jednostek przewidywana jest nadal do pracy w KSE. Decyzje takie podjęte są pozytywnymi wynikami badań diagnostycznych. Jednostki transformatorowe o złych wynikach badań zostały już wycofane z eksploatacji, tak więc wiek nie jest najważniejszym kryterium decydującym o przyszłości jednostki transformatorowej. Rysunek 1 zawiera zestawienie historycznego rozwoju liczby jednostek transformatorowych instalowanych w rozpatrywanym obszarze KSE.