

Transformatory prostownikowe podstacji trakcyjnych

W artykule przedstawiono warianty rozwiązania transformatora prostownikowego podstacji trakcyjnej 3×3 fazowego o kącie przesunięcia napięć między przewodowych (między poszczególnymi grupami uzwojeń) 20°, 20°, 80° itd. oraz 4×3 fazowego o kątach przesunięcia napięć 15°, 15°, 15°, 75° itd.

Pierwszy z tych transformatorów prostownikowych będzie nazywać 9-fazowy 18-pulsowy, a drugi – 12-fazowy 24-pulsowy. Nazwa ta wynika z liczby pulsów napięcia wyprostowanego przypadającej na jeden okres napięcia sieci elektroenergetycznej (20 ms). Grupy uzwojeń 3-fazowych w transformatorze prostownikowym 9-fazowym 18-pulsowym i 12-fazowym 24-pulsowym poprzez układy prostowników pracują równolegle na sieć trakcyjną prądu stałego. Aby praca równoległa tych uzwojeń była poprawna, tzn. aby uzwojenia te obciążały się równomiernie, muszą być spełnione warunki pracy równoległej podane w normie [1]:

- napięcia powinny być równe (tolerancja $\pm 0,5\%$),
- przesunięcia fazowe między napięciami poszczególnych grup uzwojeń powinny być jednakowe (tolerancja $\pm 10'$),
- impedancja zwarcia każdej grupy uzwojeń wtórnych, liczona względem uzwojenia pierwotnego, powinna być taka sama (tolerancja $\pm 10\%$).

Pierwsze dwa warunki zależą od liczby zwojów poszczególnych uzwojeń. Biorąc pod uwagę liczbę zwojów każdego uzwojenia, należy tak dobrać napięcie przypadające na jeden zwój, aby podane tolerancje były zachowane. Największy problem w transformatorach wielouzwojeniowych konstruktor ma z takim rozłożeniem uzwojenia w oknie rdzenia, aby napięcia zwarcia uzwojeń były sobie równe. Problem ten z wymienionych warunków jest najtrudniejszy do rozwiązania. Transformatory prostownikowe zgodnie z normą [2] powinny poprawnie pracować, podobnie jak każde inne urządzenie elektryczne 3-fazowe, przy zasilaniu napięciem z sieci 3-fazowej o składowej symetrycznej przeciwnej wynoszącej do 1% składowej symetrycznej zgodnej i składowej syme-

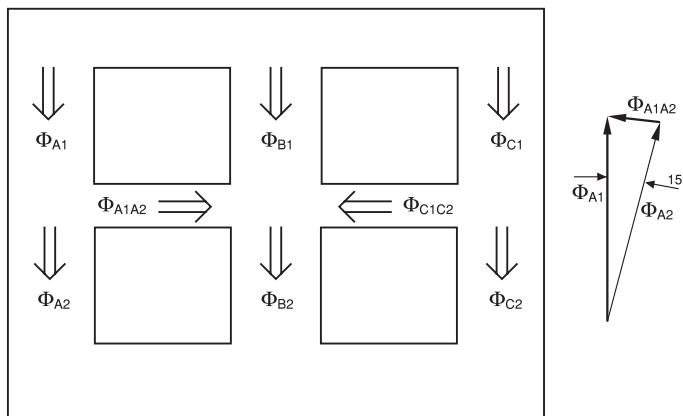
trycznej zerowej wynoszącej do 1% składowej symetrycznej zgodnej.

Transformator prostownikowy z uzwojeniami galwanicznie rozdzielonymi

Znanym i stosowanym w praktyce transformatorem prostownikowym 12-fazowym 24-pulsowym jest transformator dwurdzeniowy. Jeden z wariantów rozwiązania takiego rdzenia pokazano na rysunku 1. Rozwiązanie to charakteryzuje się wspólnym jarzmem środkowym, jest ono bardziej ekonomiczne od rozwiązania z rdzeniami całkowicie rozdzielonymi. Oszczędności uzyskuje się w zużyciu blachy transformatorowej na jarzmo środkowe. W transformatorze prostownikowym 12-fazowym 24-pulsowym o rdzeniach rozdzielonych masa jarzma środkowego wynosi 2 mj, a w przypadku rdzenia połączonego (zachowując tę samą wartość indukcji w jarzmie) masa jarzma środkowego wynosi tylko 0,26 mj. W transformatorze prostownikowym 12-fazowym 24-pulsowym przesunięcie fazowe 15° między strumieniami w kolumnach jednoimiennych uzyskuje się poprzez podzielenie uzwojenia pierwotnego na dwie części i odpowiednie ich połączenie, co zostało pokazane na rysunku 2. W tym przypadku uzwojenia wtórne są standardowe – gwiazda i trójkąt. Napięcia poszczególnych 3-fazowych grup uzwojeń strony wtórnej w tych dwóch transformatorach są przesunięte w fazie o kąty 15°, 15°, 15°, 75° itd. (rys. 2). Po wyprostowaniu tego napięcia uzyskuje się napięcie stałe, w których składowa zmienna ma częstotliwość 24f, gdzie f jest częstotliwością napięcia zmiennego. Dla transformatora 9-fazowego 18-pulsowego można konstruować rdzeń potrójny, a przesunięcie fazowe między grupami uzwojeń 20°, 20°, 80° można uzyskać poprzez:

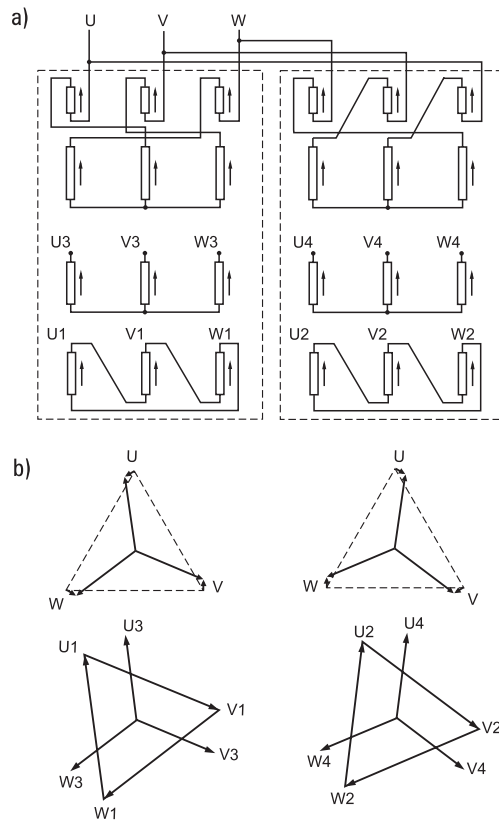
- podział uzwojeń pierwotnych, podobnie jak to zrobiono dla transformatora 12-fazowego;
- podział uzwojeń wtórnych.

W pierwszym przypadku uzwojenia pierwotne są dzielone i mogą być połączone w gwiazdę, a uzwojenia wtórne w trójkąt. Natomiast w drugim przypadku istnieje możliwość wykonania uzwojeń na jednym rdzeniu (rys. 3). Możliwe są także inne układy skojarzenia uzwojenia. Korzystne jest łą-

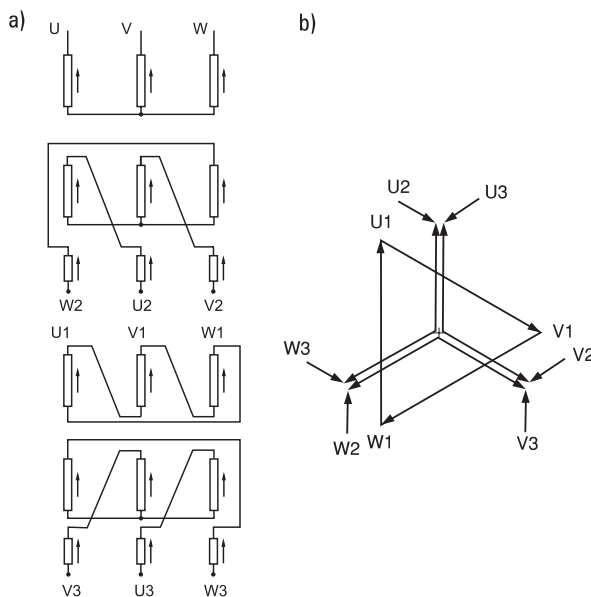


Rys. 1. Kształt rdzenia transformatora prostownikowego dwurdzeniowego i wykres wektorowy strumieni w kolumnie „A”

czenie uzwojenia pierwotnego w gwiazdę, gdyż jest to uzwojenie wysokonapięciowe i na tym uzwojeniu są zaczepty regulacyjne. Natomiast jedno z uzwojeń wtórnych (np. uzwo-



Rys. 2. Przykład rozwiązania transformatora prostownikowego 12-fazowego 24-pulsowego
a) schemat połączeń uzwojeń, b) wykresy wektorów napięć wskazowych



Rys. 3. Przykład rozwiązania transformatora prostownikowego jednorodzeniowego 9-fazowego 18-pulsowego
a) schemat uzwojeń, b) wykres wektorów napięć

jenie niedzielone) powinno być połączone w trójkąt (rys. 3). Uzwojenia połączone w trójkąt i gwiazdę mają naturalne przesunięcia napięć międzyfazowych wynoszące 30° . Aby uzyskać kąty przesunięcia fazowego między napięciami grup uzwojeń równe 20° , na jednym z uzwojeń gwiazdowych należy uzyskać, poprzez podział uzwojenia, przesunięcie $(+10^\circ)$, a na drugim (-10°) .

Wymóg połączenia jednego z uzwojeń w trójkąt w transformatorach prostownikowych wynika z nieliniowej charakterystyki magnesowania rdzenia. W układzie trójkąta zamykają się składowe symetryczne prądy o kolejności zerowej oraz wyższe harmoniczne prądu rzędu $3n$, co eliminuje strumienie magnetyczne odpowiadające tym składowym prądom. Są to strumienie, które we wszystkich kolumnach są w fazie, a więc wychodzą z rdzenia i zamykają się na zewnątrz. Strumienie te wpływają niekorzystnie na pracę transformatora, gdyż są źródłem strat dodatkowych w elementach konstrukcyjnych transformatora i generują hałas.

Cechą charakterystyczną przedstawionych transformatorów prostownikowych jest pełna separacja galwaniczna poszczególnych grup 3-fazowych uzwojeń wtórnych. Galwaniczna separacja grup uzwojeń umożliwia połączenie ich, poprzez układy prostownikowe, do pracy równoległej na sieć trakcyjną bez dodatkowych dławików. Praca równoległa uzwojeń, z uwagi na układ mostkowy prostowników, jest pracą typu sekwencyjnego, prąd obciążenia płynie przez to uzwojenie, które ma najwyższą (dodatnią lub ujemną) w danej chwili wartość napięcia. Przy niesymetrii napięcia zasilającego w granicach 1% [2] przewodzenie prądu przez poszczególne fazy uzwojenia nie będzie równomierne. Na przykład przy niesymetrii napięcia 1% fazy o wyższym napięciu będą przewodziły prąd 1,1 ms, a fazy o niższym napięciu 0,6 ms. Wynikiem tego będą nierównomierne pulsy napięcia wyprostowanego. Przy niesymetrii napięcia, wynoszącej około 3,5%, fazy o niższym napięciu w ogóle nie będą przewodziły prądu, a w napięciu wyprostowanym pojawią się pulsacje o częstotliwości $6f$ i $12f$.

Powyższe stwierdzenia obrazują układy idealne, w których pomija się komutację prostownika, a napięcie zwarcia jest równe zero.

Układy oszczędne

Opisane transformatory prostownikowe można zmodyfikować wykonując je na jednym rdzeniu oraz łącząc galwanicznie uzwojenia, tzn. łącząc punkty uzwojeń, których potencjały w czasie są identyczne. Na przykładzie transformatora 9-fazowego (rys. 3) widać, że potencjały punktów „dużej” gwiazdy w uzwojeniach „2” i „3” są identyczne, można je zatem połączyć. Wartość skuteczna prądu w uzwojeniu wtórnym transformatora z uzwojeniem rozdzielonym połączonym w gwiazdę:

- 9-fazowym 18-pulsowym: $I = \frac{1}{\sqrt{9}} I_o$

- 12-fazowym 24-pulsowym: $I = \frac{1}{\sqrt{12}} I_o$

Natomiast jeśli uzwojenia te się połączy, to w części wspólnej uzwojenia wartości prądu jest o $\sqrt{2}$ raza większa. Zatem część wspólna uzwojenia może mieć przekrój o $\sqrt{2}$ mniejszy od sumy przekrojów uzwojeń rozdzielonych. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykłady wykonania transformatora 12-fazowego 24-pulsowego i 9-fazowego 18-pulsowego. Zmniejszenie masy uzwojenia wtórnego transformatora w tych rozwiązaniach wynosi dla transformatora:

- 9-fazowego – 18%,
- 12-fazowego – 27%.

W takiej samej proporcji zmniejszy się przekrój okna, a co za tym idzie i długość oraz masa jarzma, przy niezmienionej masie kolumn. Transformator prostownikowy o zintegrowanym uzwojeniu wtórnym będzie miał wyższą sprawność, gdyż przy tej samej:

- indukcji w rdzeniu straty mocy są proporcjonalne do jego masy,
- gęstości prądu straty są proporcjonalne do masy uzwojenia.

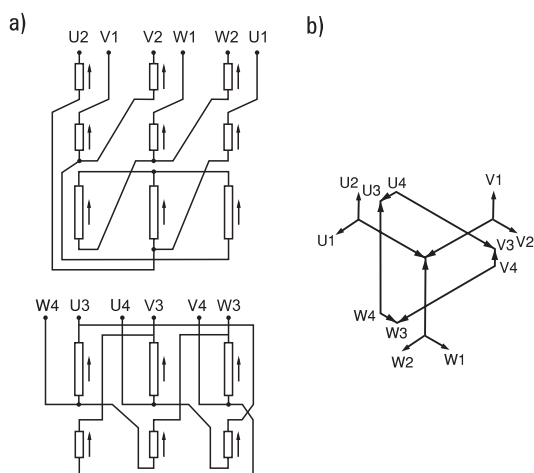
Niekorzystną cechą transformatora prostownikowego o zintegrowanym uzwojeniu wtórnym jest wzajemne oddziaływanie na siebie uzwojeń wewnętrznie galwanicznie połączonych, a zewnętrznie, poprzez układy prostowników, połączonych siecią trakcyjną. Praca tych uzwojeń na wspólną sieć trakcyjną wymaga zastosowania, po stronie prądu stałego, dławików. Zadaniem dławików jest ograniczanie pulsacji napięcia 6f.

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe przebiegi napięcia uzyskane na drodze symulacji komputerowej dla transformatora z rysunku 2 i 4. W pierwszym przypadku mamy pełną symetrię pulsacji napięcia, 24 pulsy napięcia na okres. W drugim przypadku na biegu jałowym pojawia się pulsacja dwa razy mniejsza, dopiero przy obciążeniu transformatora prądem $I > 0,1 I_N$ i przy pełnej symetrii napięcia występują 24 pulsy napięcia na okres.

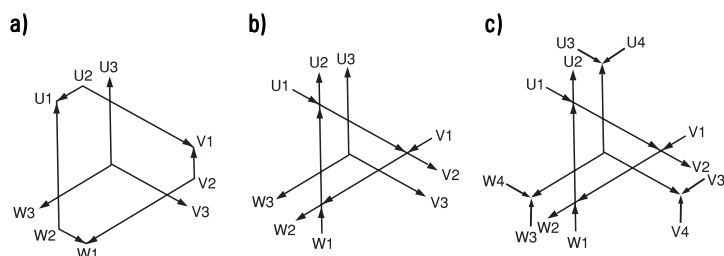
Transformator modelowy

W celu sprawdzenia poprawności działania transformatora prostownikowego wykonano specjalny transformator modelowy 3,3 kVA; 380 V (podwójna gwiazda) i uzwojenie wtórne 12×220 V w układzie połączeń jak na rysunku 4 [3]. Transformator ten można było wykorzystać także jako transformator 6-fazowy 12-pulsowy. Badanie pracy transformatora w układzie 12-fazowym 24-pulsowym przeprowadzono w układzie pomiarowym jak na rysunku 7. Jedno z uzwojeń zintegrowanych dołączono do sieci stałoprądowej poprzez dławik dwuuzwojeniowy z uzwojeniami przeciwsobnymi. Uzwojenia dławika włączono w przewód dodatni i ujemny w ten sposób, aby siła magnetomotoryczna od składowej stałej prądu była równa zero. Indukcyjność dławika wynosi 5,8 mH. Badania w układzie 6-fazowym przeprowadzono bez dławików. Pomiar porównawczy wykonano dla prądu obciążenia 10 A i 21 A. W układzie 24-pulsowym stwierdzono:

- 25% asymetrii obciążenia uzwojeń połączonych w trójkąt (3 i 4 rys. 4), przy zmianie kolejności faz asymetria odwróciła się. Uzwojenia połączone w gwiazdę (1 i 2) obciążały się praktycznie symetrycznie (różnica wynosiła 4%);



Rys. 4. Układ połączeń uzwojeń wtórných transformatora jednorodniowego 12-fazowego 24-pulsowego
a) schemat połączeń elektrycznych, b) wykres wektorów napięć fazowych



Rys. 5. Wektory napięć uzwojeń wtórných transformatora prostownikowego
a), b) – warianty rozwiązania 9-fazowego, 18-pulsowego, c) wariant rozwiązania 12-fazowego 24-pulsowego

- przy prądzie obciążenia 21 A wartość pulsacji napięcia stałego wynosiła 6%, a ich częstotliwość 1200 Hz, przy niesymetrii napięcia (około 1%) zmienia się częstotliwość pulsacji (na 12f lub 6f) i zmniejsza się ich amplituda do około 4%;
- najniższa harmoniczna w prądzie pobieranym z sieci wynosiła 23f, a jej amplituda miała wartość 4,3%, sumaryczna amplituda (liczona jako pierwiastek z sumy kwadratów) wyższych harmonicznych wynosiła 5,5%;
- prąd płynący przez pojedynczą diodę wynosi około 70% prądu stałego.

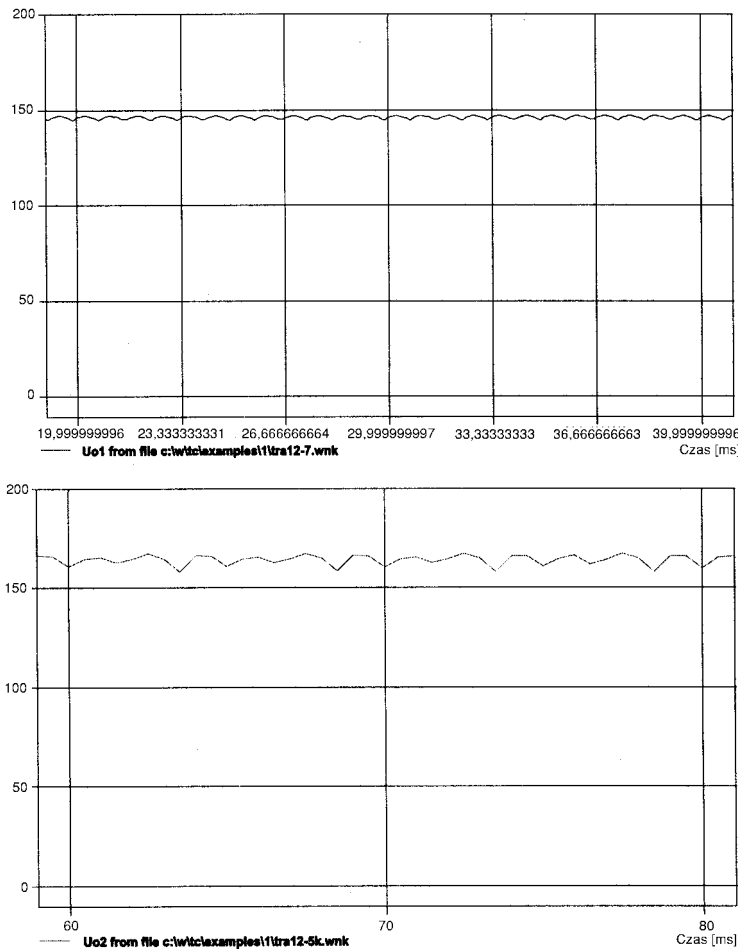
W układzie 12-pulsowym stwierdzono:

- równomierne obciążenie uzwojeń transformatora;
- niesymetria napięcia zasilania wpływa w znacznie mniejszym stopniu na równomierność obciążenia uzwojeń;
- prąd płynący przez pojedynczą diodę wynosi około 70% prądu stałego (w tym przypadku jest 12 diod, dwa razy mniej niż w układzie 24-pulsowym);
- pulsacja napięcia stałego wynosiła 5,5%, a ich częstotliwość 600 Hz;
- najniższa harmoniczna w prądzie pobieranym z sieci miała częstotliwość 550 Hz, jej wartość była równa 5,2%, a sumaryczna amplituda składowych zmiennych wynosiła 9,1% amplitudy podstawowej harmonicznej.

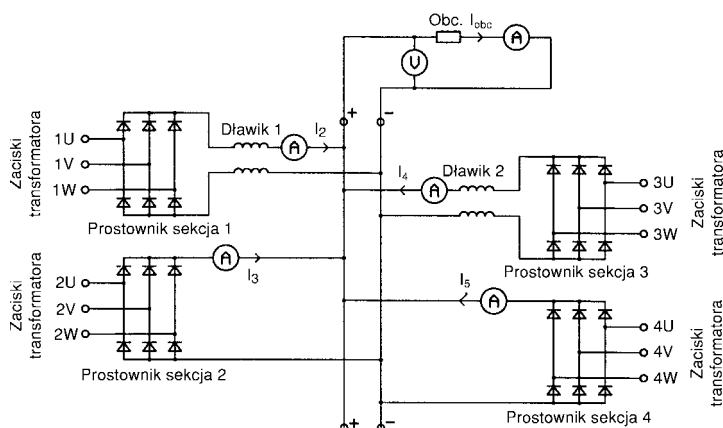
Badanie transformatora na podstacji trakcyjnej

Badania wykonano na transformatorze 24-pulsowym (wykonanym według schematu – rys. 4) o parametrach 1,2 MVA, 3×20 kV (podwójna gwiazda), 12×525 V [3].

Zakres wykonanych badań był ograniczony z uwagi na wielkość obiektu i warunki eksploatacyjne. Badania transformatora 24-pulsowego wykazały:



Rys. 6. Symulacja napięcia wyjściowego prostownika 24-pulsowego
a) z transformatorem jak na rys. 2, b) z transformatorem jak na rys. 4



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego modelu transformatora prostownikowego 24-pulsowego

- przy prądzie obciążenia 500 A, pulsacje napięcia (o częstotliwości 24f) wynosiły 8%, a przy prądzie 3000 A pulsacje napięcia osiągały wartość 15%,
- przy obciążeniu transformatora rezystorem i prądzie 80 A, pulsacje napięcia wynosiły 4,5%.

Przy zasilaniu podstacji trakcyjnej z układu prostownikowego 6-pulsowego i prądzie obciążenia 500 A, pulsacje napięcia wynosiły 7%. Przy pracy równoległej dwóch zespołów prostownikowych (6-pulsowego i 24-pulsowego) i prądzie obciążenia 500 A, pulsacje napięcia wynosiły 4%. Z uwagi na wartość napięcia (20 kV) nie wykonano pomiarów zawartości harmonicznych prądu pobieranego z sieci elektroenergetycznej.

Wnioski

Na podstawie analizy i wykonanych badań można stwierdzić, że najkorzystniejszym rozwiązaniem podstacji trakcyjnej jest zastosowanie dwóch transformatorów prostownikowych 12-pulsowych, wykonanych według schematu jak na rysunku 2. Przy pracy równoległej tych dwóch transformatorów otrzymuje się układ 24-pulsowy.

Układem równoważnym do tego typu układu jest układ dwóch transformatorów zbudowanych na wspólnym rdzeniu jak na rysunku 1. Gabaryt transformatora jest większy, nie mniej jego ogólna masa jest mniejsza od masy dwóch transformatorów.

Transformatory jednorodzeniowe 24-pulsowe mogą również poprawie pracować, jeśli mają galwanicznie rozdzielone grupy uzwojeń wtórnych; przykład rozwiązania pokazano dla transformatora 18-pulsowego na rysunku 3.

Układy oszczędne (rys. 4 i 5) charakteryzują się mniejszym gabarytem, lecz wymagają dławików. Wszystkie z prezentowanych układów charakteryzują się tym samym zużyciem materiałów czynnych (Fe, Cu) i taką samą sprawnością. Przy obciążeniu prostownikami zachowują się podobnie. Układy te są bardzo wrażliwe na symetrię napięcia. Włączenie dwóch dławików (rys. 7) zmienia impedancję gałęzi równoległych prostownika, co powoduje niesymetryczne obciążanie się transformatorów.

□

Autorzy:

Tadeusz Glinka, Romuald Grzenik,
Barbara Kulesz, Zygmunt Mołoń
Politechnika Śląska w Gliwicach

Janusz Sobota

ALSTOM T & D Transformer Sp. z o.o. Mikołów

Literatura

- [1] PN-E-06040;1983 (IEC 76;1976) *Transformatory. Wymagania ogólne.*
- [2] PN-IEC 34-1 *Maszyny elektryczne wirujące. Dane znamionowe i parametry.*
- [3] *Badanie transformatora prostownikowego 12-fazowego 24-pulsowego.* Raport wykonany przez Politechnikę Śląską dla firmy ALSTOM T & D Transformers Sp. z o.o. Gliwice, 2001 r.
- [4] Kurczewski W.: *Układy prostownikowe 18-pulsowe.* Przegląd Elektrotechniczny 4/2001.