

Transformatory prostownikowe

✎ Marcin Barański, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka

1. Wstęp

Transformator prostownikowy ma jedno z uzwojeń połączone z układem energoelektronicznym, a drugie uzwojenie połączone z siecią elektroenergetyczną. Transformatory prostownikowe są zainstalowane na podstacjach trakcyjnych PKP i miejskich, na farmach fotowoltaicznych i w elektrowniach wiatrowych pracujących ze zmienną prędkością obrotową oraz zasilających wszelkiego rodzaju urządzenia technologiczne o podwyższonej częstotliwości (piece indukcyjne) i układy napędowe dużej mocy o regulowanej częstotliwości. Każdy transformator może pracować jako transformator prostownikowy.

Transformator 3-fazowy połączony z prostownikiem 2-połówkowym przetwarza napięcie zmienne na napięcie stałe 6-pulsowe. W stanie jałowym, przy pełnymysterowaniu zaworów, różnica procentowa napięcia wyprostowanego między wartością maksymalną U_{DCmax} i minimalną U_{DCmin} , tzw. pulsacja, wynosi:

$$u_{DC\%} = \frac{U_{DCmax} - U_{DCmin}}{U_0} 100 \quad (1)$$

$$U_0 = \frac{3}{\pi} U_m \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sin \alpha d\alpha = \frac{3}{\pi} U_m \quad (2)$$

$$u_{DC\%} = \frac{U_m \left(1 - \sin \frac{\pi}{3}\right)}{\frac{3}{\pi} U_m} 100 = \frac{\pi}{3} \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) 100 = 14\% \quad (3)$$

a częstotliwości 300 Hz. Dla wielu odbiorników energii elektrycznej, np. silników prądu stałego, z uwagi na komutację prądu, nie jest to korzystne. W celu obniżenia pulsacji napięcia $u_{DC\%}$ budowane są układy prostownikowe o mniejszej pulsacji napięcia i większej częstotliwości. Układy te bazują na transformatrach 3-fazowych powielających liczbę faz $m_2 = 6, 9, 12$. Dobierając transformator do układu prostownikowego należy ocenić, które z rozwiązań transformatora jest korzystne w danej aplikacji.

Kryterium oceny i wyboru rozwiązania transformatora powinno uwzględniać: masę i cenę, sprawność, pulsacje napięcia oraz kompatybilność elektromagnetyczną sieci elektroenergetycznej THD_{IAC} prądu i THD_{UAC} napięcia. Przy obliczaniu wskaźników THD_U i THD_I należy mieć na uwadze Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska [3], w którym podano dla grup przyłączeniowych III–V tolerancje parametrów napięcia sieci, które wynoszą:

- wartość skuteczna napięcia $(1 \pm 0,1) U_N$,

Streszczenie: W artykule przedstawiono układy uzwojeń transformatora prostownikowego o liczbie faz $m_1 = 3$ i $m_2 = 3, 6, 9, 12$. Obliczano moc znamionową transformatora S_N przy założonej mocy P_{ON} prądu stałego. Transformatory o liczbie faz $m_2 = 3$ i 6 są standardowe. Transformatory o liczbie faz $m_2 = 9$ i 12 mają kilka wariantowych rozwiązań. W artykule przedstawiono tylko układy oszczędne, o najmniejszej mocy S_N . Napięcie wyprostowane U_{DC} jest pulsujące. Pulsacje napięcia $u_{DC\%}$ zależą od liczby faz m_2 oraz od jakości napięcia zasilania: składowej przeciwnej kolejności faz $u_{2\%}$ i współczynnika THD_U .

Słowa kluczowe: transformatory, prostowniki, moc znamionowa, pulsacje napięcia.

Rectifier transformers

Summary: The article presents the winding systems of a rectifier transformer with the number of phases $m_1 = 3$ and $m_2 = 3, 6, 9, 12$. The rated power of the S_N transformer was calculated at the assumed direct current power P_{ON} . Transformers with the number of phases $m_2 = 3$ and 6 are standard. Transformers with the number of phases $m_2 = 9$ and 12 have several variant solutions. The article presents only economical systems with the lowest power S_N . The rectified voltage U_{DC} is pulsating. The voltage pulsations $u_{DC\%}$ depend on the number of phases m_2 and the quality of the supply voltage: the negative component of the phase sequence $u_{2\%}$ and the coefficient THD_U .

Keywords: transformers, rectifiers, rated power, voltage pulsations.

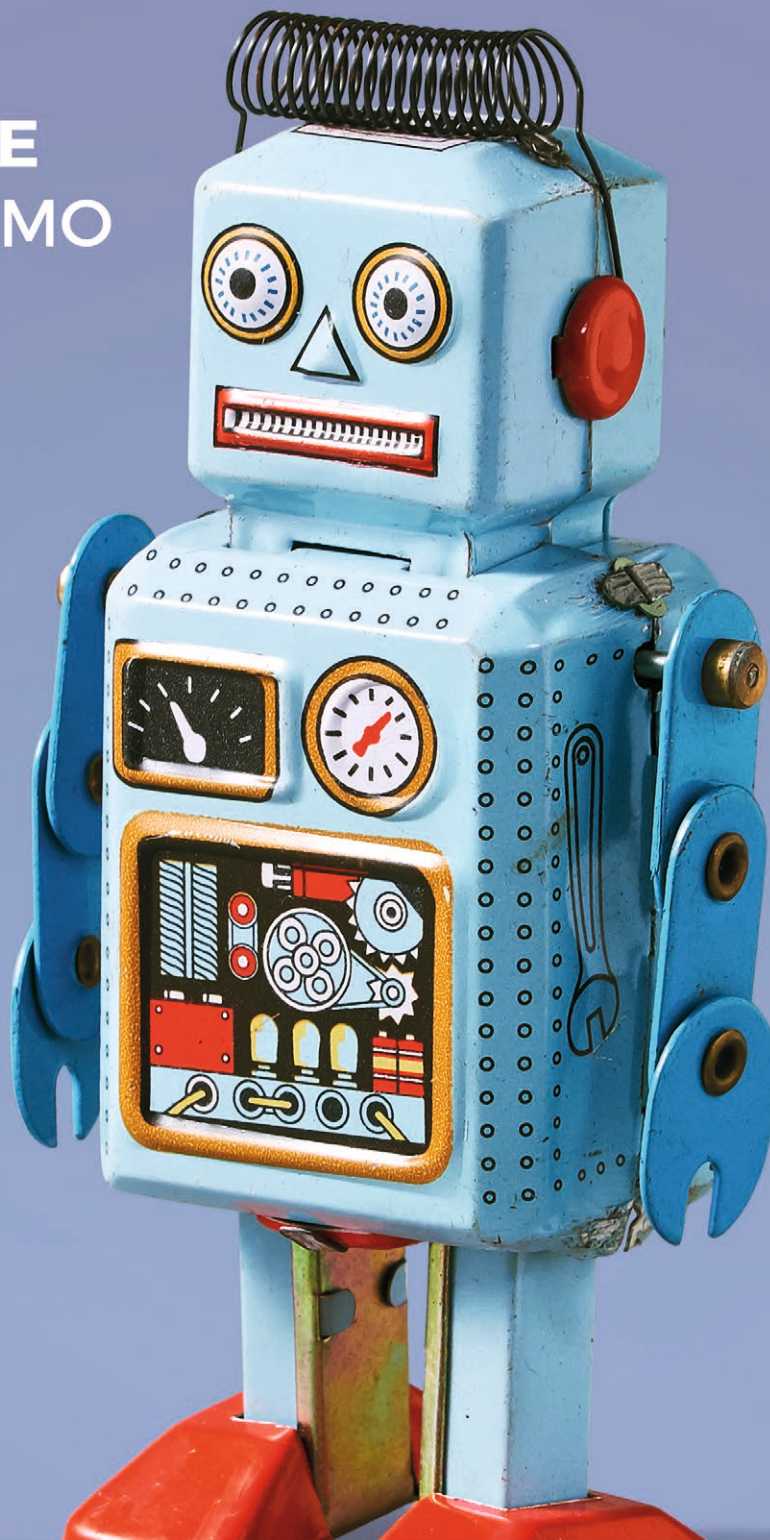
- w 3-fazowym napięciu zasilania składowa symetryczna kolejności przeciwnej $u_{2\%}$ zawiera się w przedziale od 0% do 2% wartości składowej kolejności zgodnej U_1 ,
- współczynnik odkształcenia napięcia zasilającego (THD_U), uwzględniający wyższe harmoniczne ($v = 2 \div 50$), jest mniejszy lub równy 8%, w tym 5. harmoniczna 6%, a 7. harmoniczna 5%.

We współczynniku $THD_U = 8\%$ udział ($v = 5$ i 7) harmonicznych jest dominujący, wynosić może 7,81%.

W warunkach eksploatacyjnych transformator może być zasilany napięciem 3-fazowym o parametrach zmieniających się w zakresach podanych w Rozporządzeniu. Zasilanie

DOVE C'È
AUTOMAZIONE
NOI CI METTIAMO
IL CUORE

www.phoeniximage.it

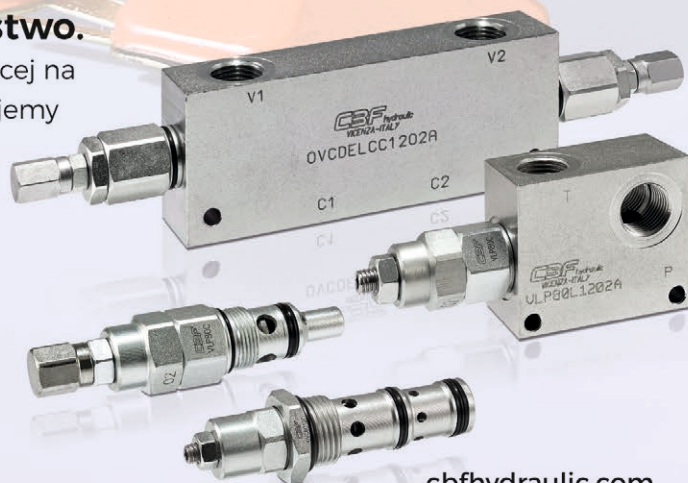


Nie tylko serce, ale także bezpieczeństwo.

Dzięki niezawodnej i rozległej sieci sprzedaży, działającej na wszystkich najważniejszych rynkach świata, gwarantujemy szybką i terminową dostawę oraz serwis.

CBF *hydraulic*[®]
HYDRAULIC VALVES AND COMPONENTS

W samym sercu pracy



cbfhydraulic.com

napięciem znamionowym U_N , symetrycznym ($u_{2\%} = 0$) i sinusoidalnym ($THD_{U_{AC}} = 0\%$) jest przypadkiem szczególnym, których nie mieliśmy nawet w laboratorium na Politechnice Śląskiej, badając układ prostownika 24-pulsowego. Aby stworzyć idealne warunki zasilania transformatora zmuszeni byliśmy uruchomić generator synchroniczny i dopiero z niego zasilany był badany układ.

Transformatory prostownikowe różnią się od transformatorów energetycznych:

- liczbą faz po stronie wtórnej $m_2 \geq 3$, przy liczbie faz po stronie pierwotnej $m_1 = 3$ i
- przy mocy znamionowej po stronie prądu stałego:

$$P_{0N} = U_{0N} I_{0N} \quad (4)$$

moc znamionowa uzwojeń po stronie pierwotnej i wtórnej wynosi:

$$S_{1N} = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \quad (5)$$

$$S_{2N} = m_2 U_{20} I_{2N} \quad (6)$$

a moc obliczeniowa transformatora determinująca wymiary okna rdzenia magnetycznego:

$$S_N = \frac{S_{1N} + S_{2N}}{2} \quad (7)$$

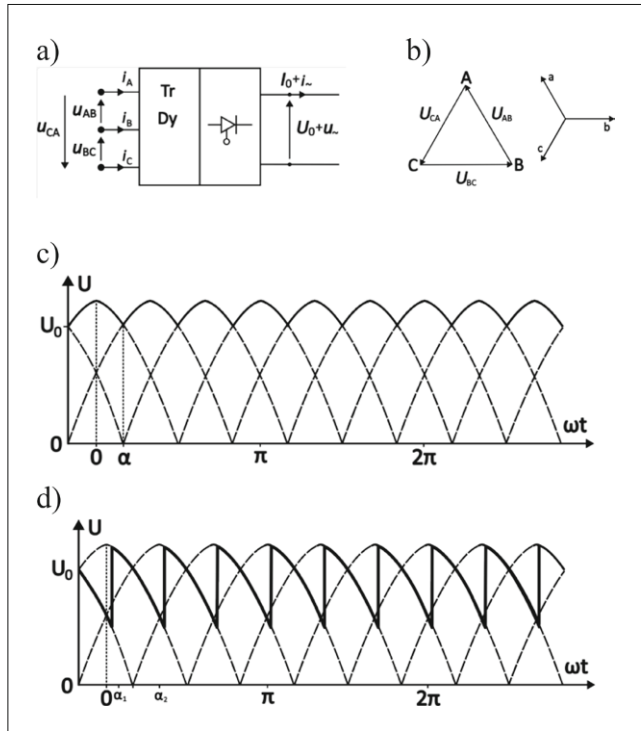
2. Transformator prostownikowy o liczbie faz $m_2 = 3$

Transformatory prostownikowe 3-fazowe są identyczne jak transformatory energetyczne o układzie połączenia uzwojenia Dy lub rzadziej Yd. Przyłączenie do transformatora prostownika 3-fazowego 2-połówkowego daje napięcie wyprostowane 6-pulsowe. Jest to najprostszy układ prostownikowy, o częstotliwość pulsacji napięcia wyprostowanego 300 Hz (rys. 1).

Sieć trakcyjna w Polsce ma napięcie wyprostowane U_0 o wartościach: $U_{0 \text{ PKP}} = 3 \text{ kV}$, $U_{0 \text{ metro}} = 750 \text{ V}$, $U_{0 \text{ tramwaj}} = 600 \text{ V}$, $U_{0 \text{ trolejbus}} = 600 \text{ V}$. Sieć trakcyjna jest zasilana z sieci elektroenergetycznej standardowo poprzez układ: transformator 3/3-fazowy lub 3/6-fazowy plus prostownik 2-połówkowy niesterowany, jest to układ prostownikowy 6-pulsowy (rys. 1) lub 12-pulsowy. W układach napędowych dużej mocy stosowane są układy 12-pulsowe (np. maszyny wyciągowe w kopalniach), a niekiedy 18-pulsowe i 24-pulsowe, w trakcji bardzo rzadko. W układzie $2m_2$ -pulsowym kąt przewodzenia prostownika w jednym półokresie wynosi (π/m_2), gdzie m_2 jest liczbą faz uzwojenia wtórnego transformatora. Przy zasilaniu transformatora napięciem znamionowym U_N sinusoidalnym (czystym, $U_{2\%} = 0$, $T_{HDU} = 0\%$), bez filtrów, bez obciążenia $I_0 = 0$ i prostownikach niesterowanych, wartość średnia napięcia wyprostowanego:

$$U_0 = \frac{1}{\alpha} U_{2m} \int_0^\alpha \cos \alpha d\alpha \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2m_2} \quad (9)$$



↑ Rys. 1 Układ prostownikowy 3-fazowy 2-połówkowy: a) schemat blokowy, b) wskazy napięć transformatora, c) przebieg napięcia wyprostowanego przy pełnym wysterowaniu zaworów i d) przy regulacji napięcia

Granice całkowania są tak wybrane (rys. 1c), aby otrzymać możliwie prosty wzór końcowy obejmujący rozpatrywane warianty rozwiązania transformatorów: 3/3, 3/6, 3/9, 3/12 fazowe:

$$U_0 = \frac{1}{\alpha} U_{2m} \sin \alpha \Big|_0^{\frac{\pi}{2m_2}} = \frac{2m_2}{\pi} U_{2m} \sin \frac{\pi}{2m_2} \quad (10)$$

Przy zadanym napięciu wyprostowanym U_0 , wartość skuteczna napięcia wtórnego międzyfazowego transformatora:

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}m_2 \sin \frac{\pi}{2m_2}} U_0 \quad (11)$$

$$\text{Dla } m_2 = 3, U_0 = 0,955 U_{2m}, U_2 = 0,740 U_0$$

Napięcia U_0 i U_2 dla rozpatrywanych układów prostownikowych zestawiono w tabeli 1.

Przebiegi prądu w uzwojeniach transformatora rozpatrujemy przy założeniu, że prąd wyprostowany ma wartość stałą $I_0 = \text{constans}$. Przy tym założeniu przebiegi prądów w układzie 3/3-fazowym na wejściu I'_1 i wyjściu I_2 transformatora mają przebieg jak na rys. 2. Prąd uzwojenia pierwotnego I'_1 jest sprowadzony na stronę napięcia U_2 w układzie Y.

Wartość skuteczna prądu przed I'_1 i za I_2 transformatorem sprowadzona na napięcie U_2 .

$$I_2 = I'_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{5\pi}{6}} i^2 d\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_0 \quad (12)$$



www.teseoair.com



SYSTEMY MODUŁOWE



ENERGY SAVING



ZOPTYMALIZOWANE
KOSZTY



PRODUKT EKOLOGICZNY



ZERO STRAT



NISKIE KOSZTY
ROBOCIZNY



HBS – HOLLOW BAR SYSTEM

Jest to pierwszy na świecie, niezawodny i przyjazny dla środowiska, system modułowy z wytłaczanych aluminiowych drażnionych prętów. Dzięki płytom i blozkom wyjściowym z systemem szybkiego mocowania system może być w każdej chwili zmodyfikowany lub sprawnie i bezpiecznie rozbudowany.



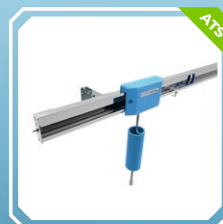
APS – MODULAR PIPING SYSTEM



Innowacyjny system do łatwego, intuicyjnego i wytrzymałego montażu inspirowanego zamykaniem na jaskółczy ogon.



Nowe wielozadaniowe terminale dla rur schodzących



ATS – Zasilanie z wykorzystaniem przesuwnego wózka



WBA – Stoły robocze pod ciśnieniem



SAB – Wsporniki z ramieniem obrotowym



AMS – Kolektory aluminiowe

**MODUŁOWE SYSTEMY ALUMINIOWE DO DYSTRYBUCJI ENERGII PŁYNÓW
SYSTEMY SPRĘŻONEGO POWIETRZA, PODCIŚNIENIA, AZOTU I PŁYNÓW TECHNICZNYCH**



NIESTANDARDOWE ROZWIĄZANIA ERGONOMICZNE

W 1988 r. **Teseo Srl** zapoczątkowała nowy rynek, projektując i wprowadzając do światowego przemysłu **innowacyjne aluminiowe systemy modułowe** do rozprowadzania sprężonego powietrza i nie tylko. Rewolucyjne systemy, **starannie zaprojektowane i wyprodukowane we Włoszech**, stworzono tak, aby były **szybkie** w instalacji, **trwałe** i **wydajne** w czasie: wszystko to z myślą o **rentowności**, zrównoważonym wykorzystaniu energii i ochronie środowiska.

Od tego czasu Teseo nie zaprzestała prac nad **tworzeniem i projektowaniem rozwiązań dostosowanych do potrzeb** każdego klienta, ale też nieustannie **odnawiała** swoją ofertę rozwiązań do rozprowadzania sprężonego powietrza i cieczy technologicznych pod ciśnieniem, dążąc do zyskania miana solidnego i niezawodnego **partnera** na odcinku od punktu wytwarzania do maszyny. Wszystko to z wykorzystaniem **doświadczenia i umiejętności**, którymi poszczycić mogą się **tylko ci, którzy** wymyślili produkt.

TESEO SRL

Via degli Oleandri, 1
25015 - Desenzano del Garda
BRESCIA - ITALY
T. +39 030 9150411

www.teseoair.com
teseo@teseair.com

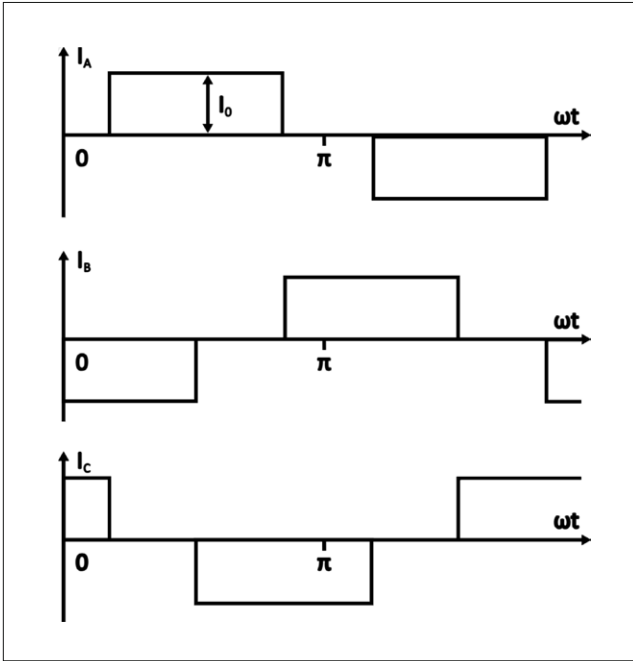


MADE IN ITALY



31 MARCA - 4 KWIECIEŃ

**HALA 5
STOISKO B44**



↑ Rys. 2. Przebiegi prądu transformatora $I_2 = I_1$ o liczbie faz $m_1 = m_2 = 3$

W obliczeniach mocy znamionowej transformatora zakładamy, że prostownik jest obciążony prądem stałym znamionowym I_{0N} , a jego napięcie $U_{0N} = \text{constans}$. Moc znamionowa prostownika wynosi:

$$P_{0N} = U_{0N} I_{0N} \quad (13)$$

Moc znamionowa uzwojenia wtórnego transformatora:

$$S_{2N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} = \sqrt{3} \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{2}} U_{0N} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{0N} = 1,01 P_{0N} \quad (14)$$

Moc znamionowa uzwojenia pierwotnego jest identyczna jak moc znamionowa uzwojenia wtórnego:

$$S_{1N} = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} \vartheta U_N \frac{1}{\vartheta} I_{2N} = S_{2N} = 1,01 P_{0N} \quad (15)$$

Rozpatrywane transformatory 3/3, 3/6, 3/9 i 3/12-fazowe mają uzwojenie pierwotne $m_1 = 3$ -fazowe. We wszystkich wymienionych transformatorach prąd znamionowy I_{1N} i moc znamionowa uzwojenia pierwotnego S_{1N} jest taka sama jak transformatora 3/3-fazowego.

Moc znamionowa transformatora S_N jest mocą średnią uzwojeń pierwotnego S_{1N} i wtórnego S_{2N} . Uzwojenia są umieszczone w oknie, zatem moc S_N determinuje wymiary rdzenia transformatora oraz gabaryty i masę, a także straty mocy w transformatorze.

3. Transformator prostownikowy o liczbie faz $m_2 = 6$

Transformator prostownikowy 3/6-fazowy ma przesunięte fazy między trójkątami napięć wtórnych o kąt $(\pi/6)$. Naturalne

przesunięcie fazy o kąt $(\pi/6)$ mają układy Yd w transformatorach Ydy i Dyd – rys. 3a. Transformator Ydy zasilany napięciem 3-fazowym, (czystym: $U_2 = 0$, $THD_u = 0$), plus prostownik 6-fazowy 2-pulsowy, ma napięcie wyprostowane 12-pulsowe. Transformatory 3/6-fazowe stosowane są także w energetyce do łączenia dwóch sieci o różnych napięciach. Transformator prostownikowy różni się od transformatora 3/6-fazowego energetycznym mocą znamionową uzwojeń wtórnych i rozmieszczeniem uzwojeń w oknie. W transformatorze energetycznym trójuzwojeniowym suma mocy uzwojeń wtórnych jest równa mocy uzwojenia pierwotnego i wszystkie uzwojenia w oknie transformatora mają jednakową wysokość, to powoduje, że napięcia zwarcia między uzwojeniami Yy i Yd są różne. W transformatorach prostownikowych wymagane jest takie samo napięcie zwarcia uzwojeń Yy i Yd. Wymóg ten determinuje takie ułożenie uzwojeń w oknie rdzenia magnetycznego, aby strumienie magnetyczne rozproszenia były identyczne – rys. 3b.

Amplitudy napięć międzyfazowych na uzwojeniach „y” i „d” transformatora prostownikowego powinny być identyczne, aby prostowniki można było łączyć równolegle bądź szeregowo. Otóż uzwojeń „y” i „d”, umieszczonych na tym samym rdzeniu transformatora, o identycznym napięciu wykonać się nie da, gdyż stosunek liczby zwojów N -tych uzwojeń jest liczbą niewymierną:

$$\frac{N_d}{N_y} = \sqrt{3} \quad (16)$$

Dla transformatora Yyd liczby zwojów uzwojeń wtórnych:

$$N_y = \frac{N_1}{\vartheta} = \text{l. c.} \quad (17)$$

$$N_d = \sqrt{3} \frac{N_1}{\vartheta} = \text{l. c.} \quad (18)$$

Przekładnia napięciowa:

$$\vartheta = \frac{U_1}{U_2} \quad (19)$$

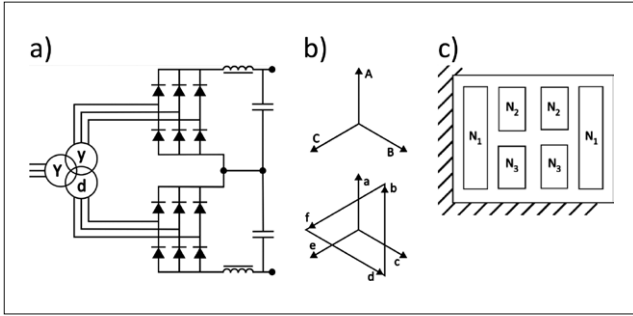
Liczbę zwojów N_1 uzwojenia pierwotnego Y lub D obliczamy projektując transformator na napięcie sieci U_1 . Napięcie U_2 uzwojenia $m_2 = 6$ fazowego:

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}m_2 \sin \frac{\pi}{2m_2}} U_0 = \frac{\pi}{2\sqrt{2} \cdot 6 \sin \frac{\pi}{12}} U_0 = 0,715 U_0 \quad (20)$$

Uzwojenia wtórne „y” i „d” są wykonane z liczbą zwojów całkowitą (l. c.). Ma to swoje konsekwencje, napięcia z prostowników U_{0y} i U_{0d} nie mają tej samej wartości. Wyjścia z prostowników korzystnie jest łączyć szeregowo – rys. 3a. Połączenie równoległe prostowników powoduje przepływ prądu wyrównawczego i w celu ograniczenia prądu wyrównawczego należy dodatkowo stosować dławiki. Dotyczy to wszystkich prostowników bazujących na transformatorze o liczbie faz $m_2 > 3$.

Rozpatrujemy jeden prostownik.

Wartość skuteczna prądu w przewodach między transformatorem a prostownikiem:



↑ **Rys. 3.** Transformator Yyd z prostownikiem i filtrem: a) szeregowo połączenie prostownika i filtra, b) wskaźniki napięć na uzwojeniach transformatora, c) rozmieszczenie uzwojeń transformatora w oknie

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} I_0^2 d\alpha} = \frac{I_0}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}m_2 \sin \frac{\pi}{2m_2}} U_0 = 0,715U_0 \quad (22)$$

$$S_{2N} = 2\sqrt{3} \cdot \frac{I_{0N}}{\sqrt{3}} 0,715U_{2N} = 1,43P_{0N} \quad (23)$$

Moc średnia:

$$S_N = \frac{1}{2}(S_{1N} + S_{2N}) = \frac{1}{2}(1,01 + 1,43)P_{0N} = 1,22P_{0N} \quad (24)$$

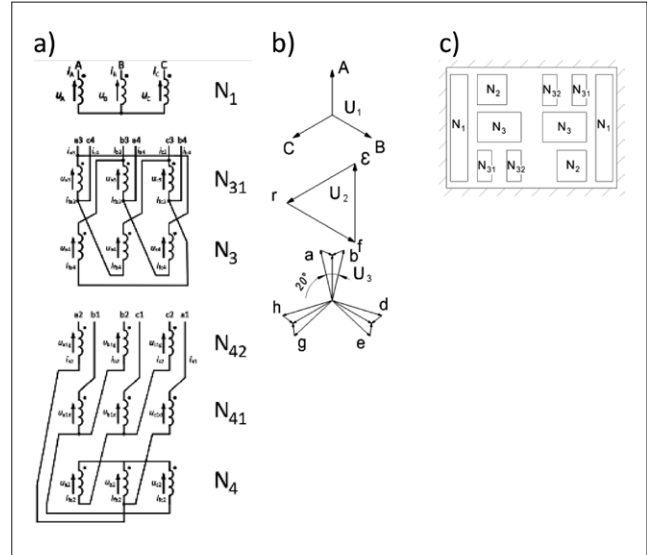
Transformatory prostownikowe Yyd lub Dyd są stosowane na podstacjach trakcyjnych, w grzejnictwie indukcyjnym w odlewniach i kuźniach oraz w układach napędowych pędu stałego dużej mocy, np. maszyn wyciągowych w kopalniach i maszyn walcowniczych w hutach. Transformator prostownikowy Yyd lub Dyd ma gabaryty i masę uzwojeń i rdzenia o 22% większą od transformatora energetycznego Yd lub Dy. Koszty wytworzenia transformatora prostownikowego Yyd są odpowiednio wyższe, a sprawność energetyczna niższa.

4. Transformator prostownikowy o liczbie faz $m_2 = 9$

Wariantów rozwiązania transformatora powiększającego liczbę faz z 3 na 9 jest kilka. Na rys. 4 przedstawiono układ Ydy_{z,z}. Jest to układ jednordzeniowy oszczędny pod względem zużycia miedzi. Kąty między trójkątami wskazów napięć na uzwojeniach ($N_3 + N_{31}$) i $N_3 + N_{32}$ wynoszą 20°, a wskaźniki napięć na uzwojeniu N_2 są skrócone o dalsze 20°. Jeśli transformator 3/9-fazowy jest zasilany napięciem 3-fazowym, (czystym – $U_2 = 0$, $THD_u = 0$) i jest połączony z prostownikiem 9-fazowym 2-pulsowym, to za prostownikiem jest napięcie stałe U_{DC} 18-pulsowe.

Napięcie przed prostownikiem U_2 , przy liczbie faz $m_2 = 9$:

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}m_2 \sin \frac{\pi}{2m_2}} U_0 = 0,711U_0 \quad (25)$$



↑ **Rys. 4.** Transformator 9-fazowy: a) układ połączenia uzwojeń, b) wskaźniki napięć w uzwojeniach, c) rozmieszczenie uzwojeń w oknie

Równania napięć uzwojeń:

$$U_2 = U_3 \cos 10^\circ + U_{31} \cos 50^\circ \quad (26)$$

$$U_3 \sin 10^\circ = N_{31} \sin 50^\circ \quad (27)$$

$$U_2 = U_3 \left(\cos 10^\circ + \frac{\sin 10^\circ}{\sin 50^\circ} \cos 50^\circ \right) = 1,138U_3 \quad (28)$$

$$U_3 = 0,906U_2 \quad (29)$$

$$U_{31} = 0,906U_2 \frac{0,1736}{7660} = 0,2053U_2 \quad (30)$$

$$U_{31} = U_{32} = 0,2053U_2 \quad (31)$$

Prądy w uzwojeniu N_2 przeliczonym na gwiazdę i w uzwojeniach: N_3 , N_{31} , N_{32} :

$$I_2 = I_{31} = I_{32} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{11}{18}\pi}^{\frac{17}{18}\pi} I_0^2 d\alpha} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_0 \quad (32)$$

$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{13}{18}\pi}^{\frac{15}{18}\pi} I_0^2 d\alpha} = \frac{2}{3} I_0 \quad (33)$$

Moc uzwojeń wtórnych:

$$S_2 = \sqrt{3}U_2(I_2 + \frac{U_3}{U_2}I_3 + 2\frac{U_{31}}{U_2}I_2) \quad (34)$$

$$S_2 = \sqrt{3} \cdot 0,711U_0 \left(\frac{\sqrt{2}}{3} + 0,906 \cdot \frac{2}{3} + 2 \cdot 0,2053 \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \right) I_0 \approx 1,56P_0 \quad (35)$$

Moc znamionowa uzwojenia pierwotnego:

$$S_{1N} = \sqrt{3}U_1 I_1 = 1,01P_0 \quad (36)$$

Moc znamionowa (obliczeniowa):

$$S_N = 1,28P_0 \quad (37)$$

5. Transformator prostownikowy o liczbie faz $m_2 = 12$

Wariantów rozwiązania transformatora powiększającego liczbę faz z 3 na 12 jest kilka. Na rys. 5 przedstawiono układ jednordzeniowy oszczędny $Yd_6 Y_{zz}$, to znaczy, że w tym rozwiązaniu stosunek mocy S_N/P_0 transformatora jest najmniejszy. Układ uzwojenia transformatora 12-fazowego bazuje na trójkącie N_3 i gwiazdzie N_4 . W uzwojeniu trójkąta N_3 między punkty wspólne $a_1 b_1$ jest włączona faza c uzwojenia N_{31} itd. Wskazy napięć na uzwojeniu N_3 są większe, a na uzwojeniu N_{31} są mniejsze, wspólnie tworzą zamknięty sześciobok, jak na rys. 5b. Uzwojenie N_4 jest połączone w gwiazdę, do fazy a uzwojenia N_4 jest dołączona faza b uzwojenia N_{41} i faza c uzwojenia N_{42} itd. Połączone uzwojenia tworzą układy: $(N_4 + N_{41})$ i $(N_4 + N_{42})$, a wskazy ich napięć dwa zygzaki y_{zz} . Kąty między sąsiednimi wskazami napięć międzyfazowych wynoszą 15° . Cztery trójkąty napięć międzyprzewodowych są względem siebie skręcone o kąty 15° . Jeśli transformator 3/12-fazowy jest zasilany napięciem 3-fazowym, (czystym – $U_2 = 0$, $THD_u = 0$) i jest połączony z prostownikiem 12-fazowym 2-pulsowym, to na wyjściu prostownika jest napięcie stałe $U_{DC} = U_0$ 24-pulsowe.

Napięcie U_2 przy liczbie faz $m_2 = 12$:

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}m_2 \sin \frac{\pi}{2m_2}} U_0 = 0,709U_0 \quad (38)$$

Równania napięć:

$$U_2 = U_4 \cos 7,5^\circ + U_{41} \cos 52,5^\circ \quad (39)$$

$$U_4 \sin 7,5^\circ = U_{41} \sin 52,5^\circ \quad (40)$$

$$U_2 = U_4 \left(\cos 7,5^\circ + \frac{\sin 7,5^\circ}{\sin 52,5^\circ} \cos 52,5^\circ \right) = 1,092U_4 \quad (41)$$

$$U_4 = U_3 = 0,9161U_2 \quad (42)$$

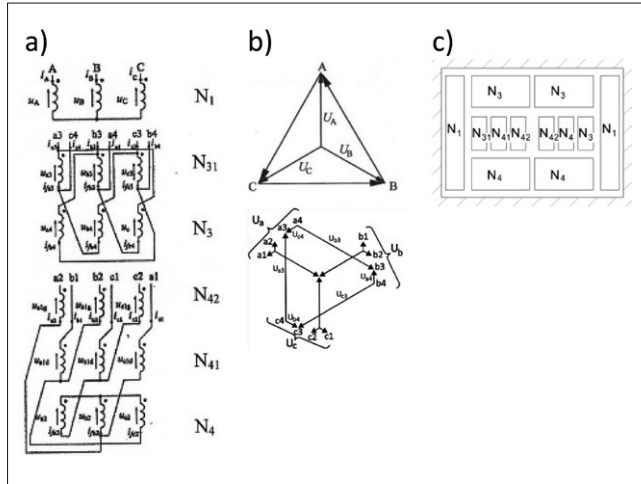
$$U_{41} = U_4 \frac{\sin 7,5^\circ}{\sin 52,5^\circ} = 0,1507U_2 \quad (43)$$

$$U_{41} = U_{42} = U_{31} = 0,1507U_2 \quad (44)$$

Prąd w uzwojeniach N_{41} , N_{42} i N_3 , N_{31} i N_4 i przeliczonym na gwiazdę;

$$I_{41} = I_{42} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{5}{12}\pi}^{\frac{7}{12}\pi} I_0^2 d\alpha} = \frac{1}{\sqrt{6}} I_0 \quad (45)$$

$$I_3 = I_{31} = I_4 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{7}{12}\pi}^{\frac{11}{12}\pi} I_0^2 d\alpha} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_0 \quad (46)$$



↑ Rys. 5. Transformator 12-fazowy: a) układ połączenia uzwojenia, b) wskazy napięć w uzwojeniach c) rozmieszczenie uzwojeń w oknie

Moc uzwojeń wtórnych:

$$S_2 = \sqrt{3}U_2 \left(I_3 \frac{U_3 + U_4 + U_{31}}{U_2} + I_{41} \frac{2U_{41}}{U_2} I_3 \right) \quad (47)$$

$$S_2 = \sqrt{3} \cdot 0,709U_0 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} (2 \cdot 0,91601 + 0,1507) + \frac{2}{\sqrt{6}} 0,1507 \right) I_0 = 1,56P_0 \quad (48)$$

$$S_{1N} = \sqrt{3}U_1 I_1 = 1,01P_0 \quad (49)$$

Moc znamionowa:

$$S_N = 1,28P_0 \quad (50)$$

6. Wpływ układu prostownika na kompatybilność elektromagnetyczną sieci elektroenergetycznej

W warunkach eksploatacyjnych napięcie 3-fazowe czyste ($U_2 = 0$, $THD_u = 0$) w sieci elektroenergetycznej jest przypadkiem szczególnym. Zgodnie z Rozporządzeniem [3] symetria napięcia 3-fazowego mieści się w tolerancji 2%, a odkształcenie przebiegu sinusoidalnego w tolerancji 8%. Wymienione tolerancje wpływają na pulsacje napięcia wyprostowanego, i współczynnik odkształcenia prądu THD_I pobieranego z sieci. Przy prądzie obciążenia prostownika ($I_0 = 0$) oddziaływanie transformatora prostownikowego na sieć elektroenergetyczną nie występuje.

Wpływ transformatora prostownikowego na THD_U sieci elektroenergetycznej zależy od: napięcia zwarcia sieci w miejscu przyłączenia transformatora $u_{z\%}$ sieci, i współczynnika odkształcenia prądu transformatora THD_I .

Przy obliczaniu wyższych harmonicznych prądu pobieranego z sieci I_v zakładamy:

- napięcie sieci elektroenergetycznej jest czyste,
- prąd prostownika ma wartość stałą ($I_{DC} = I_0$),

- pomijamy prąd stanu jałowego transformatora, tzn. że: ($\theta_\mu = 0, \Delta P_{Fe} = 0$),
- przebiegi prądu w fazach A, B, C są symetryczne.

W układzie $m_1 = 3$ -fazowym i jego wielokrotności mogą płynąć wyłącznie harmoniczne: $v = 1$ i $v = (6n \mp 1)$, gdyż dla harmonicznych parzystych ($v = 2n$) i dla harmonicznych ($v = 3n$) obwód elektryczny transformatora i sieci jest otwarty i te harmoniczne prądu płynąć nie mogą, $n > 0$ jest liczbą naturalną.

Na kolumnie transformatora, przy ($\theta_\mu = 0$) siła magneto-motoryczna (smm) uzwojenia pierwotnego θ_{1v} jest równa smm uzwojeń wtórnych θ_{2vk} .

$$\theta_{1v} = \sum_k \widehat{\theta_{kv}} \quad (51)$$

Jest to **suma geometryczna** k uzwojeń wtórnych na kolumnie rdzenia magnetycznego. Powyższa równość dotyczy każdej z harmonicznych $v = 1$ i $v = (6n \mp 1)$,

Dla transformatora Dy i Yd, $k = 1$, harmoniczne smm w uzwojeniach:

$$\theta_{1v} = N_1 I_{1v} = N_2 I'_{1v} = \theta_{2v} = N_2 I_{2v} \quad (52)$$

N_1 i N_2 liczby zwojów uzwojeń przeliczone na układ Yy.

Harmoniczne smm uzwojenia pierwotnego θ_{1v} i uzwojenia wtórnego θ_{2v} są równe, zatem harmoniczne prądu:

$$I_{1v} = \frac{1}{g} I_{2v} \quad (53)$$

Dla transformatora o liczbie faz $m_2 = 6$, o układzie połączenia uzwojeń Ydy lub Dyd, $k = 2$, harmoniczna $v = 1$ smm:

$$\theta_1 = \theta_{2y} \mp \theta_{2d} = \theta_{2y} \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 1,866 \theta_{2y} \quad (54)$$

natomiast harmoniczne $v > 1$ wynoszą:

$$\theta_{2v} = \theta_{yv} + \theta_{dv} e^{jv\pi/m_2} = \theta_{1v} \quad (55)$$

Harmoniczna $v = 5$

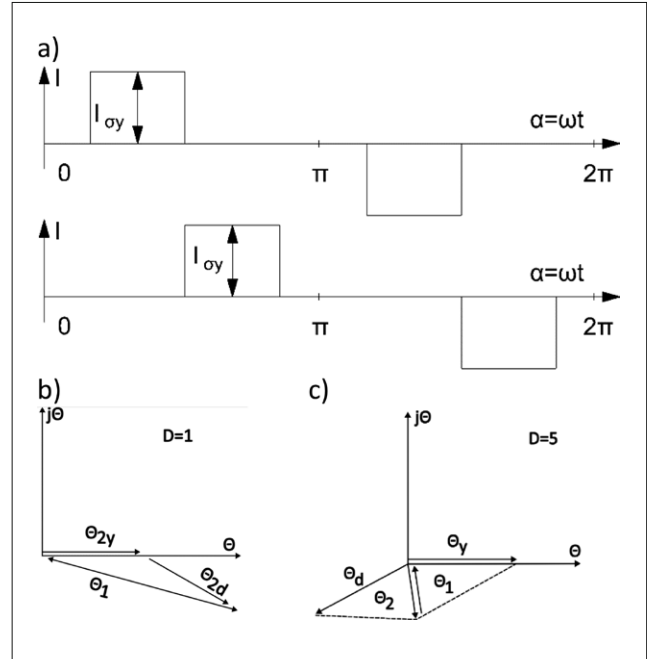
$$\begin{aligned} \theta_{1(v=5)} &= \theta_{2(v=5)} = \\ &= \theta_{2y(v=5)} (1 + \cos 150^\circ + j \sin 150^\circ) = \\ &= 0,5176 \theta_{y(v=5)} \end{aligned} \quad (56)$$

Smm układu $m_2 = 6$ -fazowego w stosunku do układu $m_2 = 3$ -fazowego:

$$\frac{\theta_{1(v=5)}}{\theta_{2(v=5)}} = 0,5 \cdot 0,5176 = 0,2588 \quad (57)$$

Harmoniczne prądu w uzwojeniu pierwotnym są mniejsze niż w uzwojeniu wtórnym:

$$I_{1(v=5)} = 0,2588 \frac{1}{g} I_{2(y+d)(v=5)} \quad (58)$$



↑ Rys. 6. a) - przebiegi prądu w uzwojeniach wtórnych yd oraz b) i c) - wektory smm, na płaszczyźnie liczb zespolonych, harmonicznej $v=1$ i harmonicznej $v=5$

Harmoniczna $v = 7$

$$\begin{aligned} \theta_{1(v=7)} &= \theta_{2(v=7)} = \\ &= \theta_{2y(v=7)} (1 + \cos 210^\circ + j \sin 210^\circ) = \\ &= 0,5176 \theta_{2y(v=7)} \end{aligned} \quad (59)$$

$$I_{1(v=5)} = 0,2588 \frac{1}{g} I_{2(y+d)(v=7)} \quad (60)$$

Na rysunku 6a przedstawiono przebiegi czasowe prądu w uzwojeniach wtórnych transformatora, a na rys. 6b i 6c przedstawiono, w układzie współrzędnych zespolonych, wektory smm harmonicznych $v = 1$ i $v = 5$.

Przeprowadzone przeliczenia wykazały, że transformator prostownikowy o liczbie faz $m_2 = 6$, zmniejsza największe harmoniczne $v = 5$ i 7 prądu blisko czterokrotnie. Transformator prostownikowy o liczbie faz $m_2 > 3$ działa jak filtr wyższych harmonicznych prądu generowanych przez prostownik.

Podobne obliczenia przeprowadza się dla transformatorów prostownikowych o liczbie faz $m_2 = 9$ i 12 .

Współczynnik odkształcenia prądu pobieranego z sieci spowodowany przez układ transformator-prostownik:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{v=5}^{50} I_v^2}}{I_1} \quad (61)$$

Współczynnik odkształcenia napięcia sieci wprowadzanego przez układ transformator-prostownik zależy od napięcia zwarcia sieci $u_{z\%seci}$ w punkcie przyłączenia transformatora:

$$u_{z\%seci} = \frac{S_{Ns}}{S_{zs}} 100 \quad (62)$$

S_{Ns} i S_{zs} – moc znamionowa i moc zwarcia sieci w punkcie przyłączenia transformatora.

Reaktancja zwarcia sieci:

$$X_{zs} \approx Z_{zs} = \frac{u_{zs\%}}{100} \frac{U_{Ns}}{\sqrt{3}I_{Ns}} \quad (63)$$

Wartość skuteczna napięcia harmonicznej U_v wynosi:

$$U_v = v X_{z\% \text{ sieci}} \frac{U_{1N}}{3} I_v \quad (64)$$

i współczynnik odkształcenia napięcia:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=5}^{50} U_v^2}}{U_{1N}} \quad (65)$$

7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono układy uzwojeń transformatora prostownikowego o liczbie faz $m_1 = 3$ i $m_2 = 3, 6, 9, 12$. Obliczano moc znamionową transformatora S_N przy założonej mocy P_{0N} prądu stałego. W transformatorze o liczbie faz $m_2 = 3$ uzwojenia są identyczne jak w transformatorach energetycznych, a moc znamionowa transformatora jest tylko o 1% większa od mocy znamionowej prądu stałego P_{0N} . Powielenie liczby faz uzwojenia wtórnego transformatora $m_2 > 3$, zwiększa moc znamionową S_N transformatora. Transformator ma większy gabaryt, jest droższy i ma większe straty mocy, zwiększa to koszt eksploatacyjny. W transformatorze o liczbie faz $m_2 = 6$ uzwojenie wtórne jest standardowe yd i nie ma układów alternatywnych. Uzwojenia y i d mają taką samą moc znamionową i w oknach transformatora są tak rozłożone, aby ich reaktancje były identyczne. Transformatory o liczbie faz $m_2 = 9$ i 12 mają kilka alternatywnych rozwiązań. W artykule przedstawiono tylko układy oszczędne, o najmniejszej mocy S_N . Wyniki obliczeń, wartości względnych, napięcia i mocy transformatorów zestawiono w tabeli 1.

Transformator prostownikowy jest dedykowany do zasilania prostowników AC/DC.

Napięcie wyprostowane U_{DC} powinno mieć wartość stałą U_0 . Składowe zmienne w napięciu wyprostowanym stanowią zakłócenia. Jakość napięcia wyprostowanego U_{DC} (pulsacje napięcia) zależą od liczby faz m_2 oraz od jakości napięcia zasilania: składowej przeciwnej kolejności faz $u_{2\%}$ i wyższych harmonicznych napięcia reprezentowanych przez współczynnik THD_U . W sieci elektroenergetycznej zarówno $u_{2\%}$ jak i THD_U występują w tolerancji zapisanej w Rozporządzeniu [3]. W każdym prostowniku składowa napięcia $u_{2\%}$ powoduje pulsacje o częstotliwościach mniejszych od częstotliwości $2m_2f$, gdzie $f = 50$ Hz, a harmoniczne napięcia THD_U przenoszą się na napięcie U_{DC} . Stosowanie liczby faz $m_2 > 3$ może być uzasadnione wymaganiami prostownika, np. dużym napięciem U_0 lub dużym prądem I_0 , przekraczającymi możliwości pojedynczych zaworów. Składowe zmienne w napięciu $u_{DC\%}$ w małym stopniu zależą od liczby faz $m_2 > 6$, wykazuje to wskaźnik pulsacji $u_{DC\%}$ przy $I_0 = 0$ – tabela 2. Przy $I_0 > 0$ pulsacja napięcia $u_{DC\%}$ jest mniejsza, gdyż indukcyjność uzwojenia transformatora ogranicza harmoniczne napięcia zasilania prostownika u_v :

$$u_{DC\%} = \frac{U_{DC \max} - U_{DC \min}}{U_0} 100 \quad (66)$$

Podana w tabeli 2 wartość $THD_U = 7,81\%$ napięcia sieci jest obliczona dla dwóch harmonicznych $u_{5\%} = 6\%$ i $u_{7\%} = 5\%$ o największych wartościach podanych w Rozporządzeniu [3], przy pozostałych harmonicznych $u_{(v=11 \div 50)\%} = 0$. W układach z falownikami AC/DC/AC napięcie prostownika U_{DC} jest regulowane ($U_{DC \min} \leq U_{DC} \leq U_{DC \max}$) kątem załączenia ($\alpha > 60^\circ$) zaworów, – rys. 1d, pulsacje napięcia $u_{DC\%}$ są większe od wartości podanych w tabeli 2.

Decydując się na wybór transformatora prostownikowego m_1/m_2 -fazowego należy wziąć pod uwagę koszt zakupu

↓ Tabela 1. Parametry transformatora

Układ	m_2	U_0/U_{2m}	U_2/U_0	S_{1N}/P_{0N}	S_{2N}/P_{0N}	S_N/P_{0N}
Dy i Yd	3	0,955	0,740	1,01	1,01	1,01
Ydy lub Dyd	6	0,989	0,715	1,01	1,43	1,22
Ydy _{z,z}	9	0,995	0,711	1,01	1,56	1,28
Yd ₆ y ₆	12	0,997	0,709	1,01	1,56	1,28

↓ Tabela 2. Współczynnik pulsacji napięcia $u_{DC\%}$ przy $I_0 = 1$ i pełnymysterowaniu zaworów

Napięcie zasilania	Liczba pulsów (2m2) napięcia U_{DC}			
	6	12	18	24
	$u_{DC\%}$ przy $I_0 = 0$			
$u_{2\%}=0, THD_U = 0$	4,93	1,12	0,50	0,3
$u_{2\%}=2\%, THD_U = 0$	6,93	3,12	2,50	2,30
$u_{2\%}=0, THD_U = 7,81\%$	10,93	7,12	6,50	6,30
$u_{2\%}=2\%, THD_U = 7,81\%$	12,93	9,12	8,50	8,30

i sprawność eksploatacyjną oraz wpływ na odkształcenie napięcia sieci, a dopiero w drugiej kolejności czystość napięcia stałego U_{DC} . Transformator prostownikowy o liczbie faz $m_2 > 3$ działa jak filtr wyższych harmonicznych prądu pobieranego z sieci, lecz ma większą moc znamionową, czyli większy gabaryt, większe straty mocy, jest droższy, a korzystną właściwością są mniejsze pulsacje napięcia U_{DC} i mniejszy współczynnik odkształcenia prądu pobieranego z sieci:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{v=5}^{50} I_v^2}}{I_1} \quad (67)$$

Dobierając transformator do stacji prostownikowej należy uwzględnić wszystkie wymienione wskaźniki, w tym także dla transformatorów o liczbie faz $m_2 = 9$ i 12 o innej konfiguracji uzwojeń od przedstawionych na rysunkach 4a i 5a.

Literatura

- [1] SZYMAŃSKI J.R.: *Harmoniczne prądów w sieci zasilania z 12-pulsowymi prostownikami diodowymi*. „Elektro.info” 7-8/2016.
- [2] KULESZ B.: *Transformatory prostownikowe podstacji trakcyjnych*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2009.
- [3] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego z dnia 22 marca 2023 r., (Dz.U.2023.0.819, rozdział 10, paragraf 45, punkt 5)

- [4] TUNIA H.: *Układy elektromagnetyczne prostowników wielopulsowych*. „Przegląd Elektrotechniczny” 9/2005.
- [5] GLINKA T.: *Maszyzny elektryczne i transformatory*. Wydawnictwo WNT 2018.
- [6] *Ramowa instrukcja eksploatacji transformatorów*. Wydawnictwo: ZPBE Energopomiar-Elektryka. Gliwice 2022.

✉ **Marcin Barański**, marcin.baranski@git.lukasiewicz.gov.pl

✉ **Stanisław Gawron**, stanislav.gawron@git.lukasiewicz.gov.pl

✉ **Tadeusz Glinka**, tadeusz.glinka@git.lukasiewicz.gov.pl

Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

Reklama

ROZWIĄZANIA DLA TECHNIKI MOBILNEJ

HYDAC

NOWOCZESNE NAPĘDY ELEKTRYCZNE ENGIRO DO MASZYN MOBILNYCH

- Silniki z magnesami trwałymi **PMSM**
- Zakres mocy od **5 – 540kW**
- Zakres napięcia **48 – 850V**
- Obroty od **0 do 8000 obr/min**
- Chłodzone powietrzem lub cieczą
- Wiele wariantów przeniesienia napędu i mocowania
- Inwertery plug and play, jako opcja, wstępnie skonfigurowane z silnikiem i dopasowane do wymagań aplikacji klienta

ENGIRO
HYDAC INTERNATIONAL



hydac.com.pl

