

## WPŁYW PRACY ELEKTROTERMICZNYCH URZĄDZEŃ INDUKCYJNYCH NA SIEĆ ELEKTROENERGETYCZNĄ

### STRESZCZENIE

W artykule opisano wpływ urządzeń do nagrzewania indukcyjnego na sieć elektroenergetyczną; opisano wpływ pieca i nagrzewnicy indukcyjnej ze wsadem oraz całego urządzenia indukcyjnego ze źródłem zasilania.

**Słowa kluczowe:** nagrzewanie indukcyjne, źródła zasilania pieców i nagrzewnic indukcyjnych

### THE INFLUENCE OF THE OPERATION OF ELECTROHEAT INDUCTION EQUIPMENT ON POWER SYSTEM NETWORKS

This paper presents the influence of induction heating devices on power system networks. Article covers the influence of induction furnaces and heaters with charges as well as the whole induction device with source of supply.

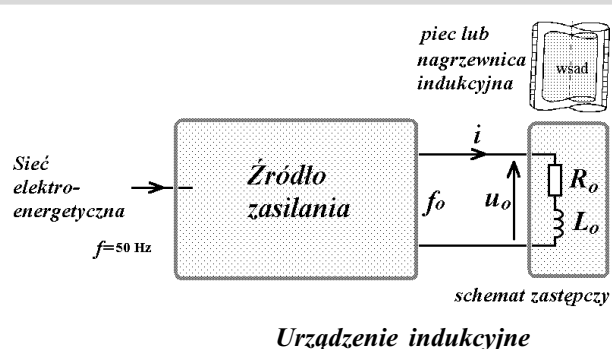
**Keywords:** induction heating, sources of supply of induction furnaces and heaters

### 1. WSTĘP

Wpływ pracy elektrotermicznych urządzeń indukcyjnych na sieć elektroenergetyczną jest pośredni, ponieważ piec lub nagrzewnica indukcyjna są najczęściej zasilane poprzez przekształtniki, transformatory oraz rzadziej silniki indukcyjne (przy generatorach maszynowych). Rzadko kiedy takie odbiorniki są zasilane wprost z sieci, a jeśli są, to i tak w układach kompensacyjno-symetryzacyjnych i filtracyjnych.

#### Urządzenie indukcyjne

W artykule opisano wpływ urządzeń do nagrzewania indukcyjnego na sieć elektroenergetyczną. Opisano wpływ pieca i nagrzewnicy indukcyjnej ze wsadem oraz całego urządzenia indukcyjnego ze źródłem zasilania, których schemat blokowy znajduje się na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy urządzenia indukcyjnego

Poniżej opisano sposoby zasilania nagrzewnic lub pieców indukcyjnych.

#### Źródła zasilania nagrzewnic i pieców indukcyjnych

Początkowo podstawowym źródłem zasilania nagrzewnic indukcyjnych była sieć przemysłowa. Jej wykorzystanie wiązało się z koniecznością stosowania transformatorów, autotransformatorów, regulatorów indukcyjnych i transduktorów. Jedynym źródłem średnich częstotliwości (do 10 kHz)

były generatory elektromaszynowe, a częstotliwości wielkich (rzędu setek kHz) – generatory lampowe. Wraz z wprowadzeniem w latach 70. XX w. do zasilania nagrzewnic indukcyjnych przekształtników półprzewodnikowych nastąpił przełom w możliwościach zastosowania tego typu nagrzewania. W zakresie średnich częstotliwości wyparły one generatory elektromaszynowe. Stałe zwiększanie parametrów wysokoczęstotliwościowych zaworów półprzewodnikowych, głównie tranzystorów mocy, sprawia, że przekształtniki półprzewodnikowe zaczynają stopniowo wypierać generatory lampowe w zakresie częstotliwości do setek kHz. Pierwsze zastosowania tranzystorów mocy w przemysłowym grzejnictwie indukcyjnym miały miejsce w połowie lat 80. XX w. Charakterystykę podstawowych źródeł zasilania nagrzewnic indukcyjnych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Stosowane częstotliwości, źródła zasilania grzejnictwa indukcyjnego, według [2]

Zakres częstotliwości	Źródła zasilania	Przykładowe zastosowania
10 Hz 50 Hz 450 Hz	cyklokonwertory 16÷25 Hz sieć energetyczna 50 (60) Hz stacyjne powielacze częstotliwości 150÷450 Hz	topienie metali wstępne, nagrzewanie kęsów, nagrzewanie rurociągów, nagrzewanie betonu, nagrzewanie kęsów przed walcowaniem, nagrzewanie blach przed prasowaniem
1 kHz 10 kHz	generatory elektromaszynowe przekształtniki statyczne	nagrzewanie kęsisk przed walcowaniem, hartowanie głębokie, topienie w piecach powietrznych i próżniowych
100 kHz 1 MHz 10 MHz	przekształtniki statyczne generatory lampowe	topienie lewitacyjne, oczyszczanie materiałów półprzewodnikowych, jonizacja gazów, brązowanie, plazmotrony, analiza chemiczna metali w próżni, nagrzewanie grafitu

\* Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

### Przyczyny i skutki pogarszania jakości sieci elektroenergetycznej

Spadki napięcia wywołane prądami wymienionych wcześniej źródeł zasilania odkształcają sinusoidę napięcia zasilającego, co powoduje dodatkowe straty przesyłu, może zakłócać pracę innych odbiorników, stwarzać niebezpieczeństwo rezonansu oraz przeciążać obwody zawierające pojemności.

Stosowanie dużej liczby takich źródeł, bez filtru prądu wejściowego, stanowi dla sieci zasilającej obciążenie nieliniowe o charakterze impulsowym o znacznej zawartości wyższych harmonicznych. Wyższe harmoniczne prądu pobieranego z sieci zasilającej przez odbiorniki nieliniowe są źródłem odkształcenia napięcia oraz powstawania dodatkowych strat cieplnych w linii zasilającej. Odkształcone napięcie sieci zasilającej może być powodem wadliwej pracy innych odbiorników energii elektrycznej zasilanych z tej sieci.

Celem eliminacji tych niepożądanych zjawisk stosuje się filtry pasywne indukcyjno-pojemnościowe lub znacznie lżejsze i mniejsze filtry aktywne. Prostowniki wyposażone w filtry aktywne pozwalają na pobór z sieci zasilającej prądu o przebiegu chwilowym bliskim sinusoidalnie zmiennemu i pozostającym w fazie przebiegiem napięcia zasilającego. Współczynnik mocy takich zasilaczy jest bliski jedności.

**Zniekształcenia i odchyłki napięcia w sieci zasilającej** powstają w wyniku procesu załączania i wyłączania odbiorników, są również powodowane przez nieliniowe i „niespokojne” odbiory. Rozróżnić można następujące odchyłki napięcia sieci zasilającej od wartości znamionowej:

- ustalone odchyłki napięcia;
- odchyłki napięcia trwające kilka sekund (tak zwane zapady), które wynikają z rozruchu silników indukcyjnych dużej mocy lub zwarć występujących w sieci zasilającej;
- zaniki napięcia o czasie trwania  $0,02 \div 60$  s wynikające z przełączeń w systemach zasilających;
- odchyłki zmieniające się okresowo, z częstotliwością zmian w zakresie od  $f = 0,1$  do 30 Hz, wpływające negatywnie na odbiorniki świetlne; wynikają one na przykład z cyklicznej zmiany obciążenia funkcjonujących silników.

Sinusoida napięcia może być odkształcona przez wyższe harmoniczne parzyste i nieparzyste, których częstotliwości są wielokrotnością częstotliwości podstawowej 50 Hz. Wynikają one z niesinusoidalnego poboru prądu przez odbiorniki takie, jak: przekształtniki, piece łukowe, niektóre typy lamp oświetleniowych lub z odkształconego przebiegu prądu magnesowania transformatorów.

W sieci trójfazowej mogą wystąpić zniekształcenia w symetrii napięć fazowych. Miarą tych zniekształceń jest zawartość składowych symetrycznych: przeciwnej i zerowej. Zniekształcenia te wynikają z asymetrycznego obciążenia sieci zasilającej. Wyjątkowo niekorzystnym przypadkiem jest awaryjne wyłączenie jednej fazy baterii kondensatorów przeznaczonych do poprawy współczynnika mocy.

Z rozważań tych wynika konieczność analizy wpływu **nagrzewania indukcyjnego** na:

- wahania napięcia sieci;
- gospodarkę mocą bierną;
- odkształcenie krzywej napięcia zasilającego.

## 2. NAGRZEWNICA I PIEC INDUKCYJNY ZASILANE JEDNOFAZOWO Z SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

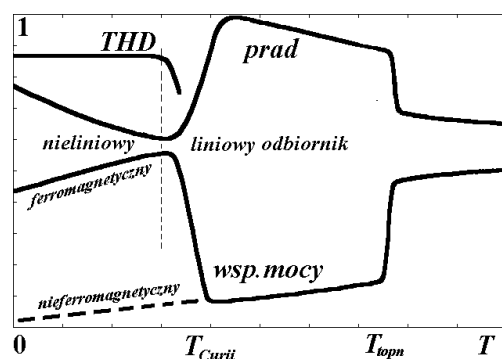
Nagrzewnica lub piec indukcyjny  $R_oL_o$  to układ wzбудnik-wsad (rys. 1), stanowiący dla źródła zasilania szczególnie rodzaj odbiornika.

Cechami charakterystycznymi nagrzewnic indukcyjnych jako odbiorników energii elektrycznej są:

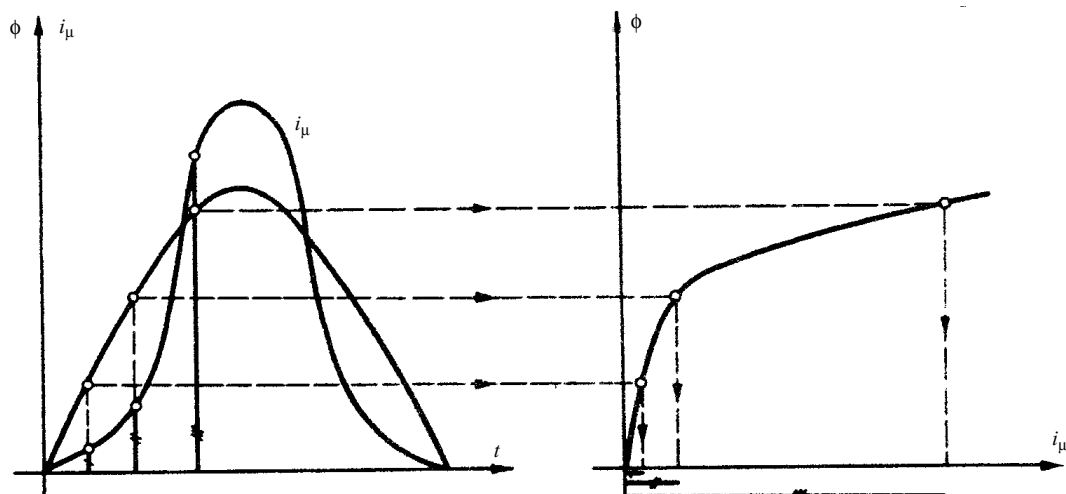
- ciągle zmiany rezystancji i indukcyjności nagrzewnicy w trakcie procesu nagrzewania, wynikające z zależności parametrów materiałowych wsadu od temperatury, natężenia pola magnetycznego i częstotliwości, ruchu wsadu (szczególnie wyjmowania i wkładania), rodzaju wsadu (ferromagnetyk czy nieferromagnetyk);
- nieliniowy charakter obciążenia, zwłaszcza przy nagrzewaniu ferromagnetyków;
- niski współczynnik mocy nagrzewnicy, co prowadzi do konieczności kompensacji mocy biernej poprzez włączanie baterii kondensatorów i tworzenia się obwodu rezonansowego  $RLC$  o dużej dobroci ( $Q = 2,5 \div 20$ ).

Mają one wpływ na parametry nagrzewnic indukcyjnych, które mogą zmieniać się także podczas pracy w szerokim zakresie: współczynnik mocy  $0,1 \div 0,8$ ; prądy zmieniają się o 25% dla wsadów nieferromagnetycznych, a o 100% ferromagnetycznych, zawartość wyższych harmonicznych zależy od stopnia nasycenia wsadu ferromagnetycznego polem magnetycznym.

Wolnozmiennie w czasie prądy będące przyczyną zmiany asymetrii, współczynnika mocy, liniowości (współczynnika harmonicznych THD) są spowodowane zmianą rezystywności i przenikalności magnetycznej względnej od temperatury nagrzewanego wsadu. Dwie charakterystyczne temperatury, kiedy nagle zmieniają się parametry, to  $T_{curie}$  (utrata własności magnetycznych) oraz  $T_{topn}$  (topnienia), pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Zmiany asymetrii prądu, współczynnika mocy, współczynnika THD od temperatury



Rys. 3. Zmiana prądu chwilowego, zniekształcenie sinusoidy prądu z powodu histerezy, według [10]

Podobnie duże zmiany są w funkcji ruchu wsadu (szczególnie jego wyjmowania i wkładania) oraz w funkcji rodzaju wsadu (wymiary w stosunku do wzbudnika, ferromagnetyk czy nieferromagnetyk)

Szybkozmiennie w czasie prądy są przyczyną odkształcenia prądu (wzrostu współczynnika harmonicznych THD) szczególnie dla ferromagnetyków. Wynika to z krzywej magnesowania (histerezy) ciał ferromagnetycznych  $B(H)$  (gdzie  $H$  – natężenie pola magnetycznego) (rys. 3).

Przeróżne układy do kompensacji i symetryzacji zmniejszają negatywny wpływ na sieć elektroenergetyczną, ale nie do końca z powodów wyżej opisanych dużych zmian podczas nagrzewania.

### Poprawa współczynnika mocy

Wartość współczynnika mocy jest mała w przypadku indukcyjnych układów wyposażonych w rdzenie ferromagnetyczne (szczególnie zamknięte), a dla układów bezrdzeniowych duża i wzrastająca wraz z grubością szczeliny powietrznej.

Reaktancje zastępcze indukcyjnych układów grzejnych są z reguły znacznie większe od ich rezystancji i dla pieców tyglowych  $Q > 10$ , dla nagrzewnic skośnych zwykle  $Q > 3$ . Z tego względu współczynniki mocy nagrzewnic i pieców przyjmują bardzo małe wartości, orientacyjnie dla:

częstotliwości = 50 i 150 Hz  $\cos\varphi = 0,2 \div 0,6$  (do 0,9 dla pieców i nagrzewnic z rdzeniami zamkniętymi dla pieców kanałowych);

częstotliwości = 0,5 ÷ 10 kHz  $\cos\varphi = 0,1 \div 0,5$ ;

częstotliwości > 60 kHz  $\cos\varphi = 0,01 \div 0,1$ .

Chęć ograniczenia strat mocy w przewodach zasilających układy grzejne i zminimalizowania mocy źródeł zasilania powoduje konieczność kompensowania mocy biernej, co odbywa się zdecydowanie najczęściej poprzez włączenie do układów kondensatorów statycznych. W celu osiągnięcia  $\cos\varphi \sim 1$  przeprowadza się kompensację mocy biernej indukcyjnej za pomocą kondensatorów statycznych,

włączanych do układu grzejnego szeregowo, równoległe lub szeregowo-równoległe.

W trakcie nagrzewania ciągłej zmianie ulegają właściwości wsadu, a więc również parametry schematu zastępczego  $R_o L_o$  i moc bierna układu grzejnego. Na skutek wzrostu jego rezystancji (wzrostu  $R_o$ ) rośnie  $\cos\varphi$ , a w przypadku przekroczenia przez wsady ferromagnetyczne punktu Curie ulega on gwałtownemu zmniejszeniu. Jest to widoczne zwłaszcza przy nagrzewaniu skośnym wsadów stalowych oraz topieniu metali. W tym celu baterię kondensatorów dzieli się na stopnie włączane lub wyłączane w miarę potrzeby w czasie procesu grzejnego.

### Układy symetryzujące

Indukcyjne układy grzejne częstotliwości sieciowej są z reguły jednofazowymi odbiornikami energii elektrycznej. Wyjątek stanowią trójfazowe piece tyglowe i nagrzewnice skośne, których zastosowanie jest ograniczone. Niesymetryczne obciążenie sieci trójfazowej, zwłaszcza przy dużych mocach pieców i nagrzewnic, wywiera ujemny wpływ na sieć elektroenergetyczną.

Zadaniem układu symetryzującego jest zlikwidowanie niesymetrii prądów przy zapewnieniu możliwie wysokiego współczynnika mocy. Są stosowane układy indukcyjno-pojemnościowe dławikowe i transformatorowe połączone w trójkąt lub gwiazdę.

## 3. TRANSFORMATORY I DŁAWIKI DO NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO

Transformatory i dławiki wprowadzają dużą indukcyjność, a więc współczynnik mocy jest niski, a jego wartość zależy od obciążenia transformatora. Im większe obciążenie, tym współczynnik mocy jest większy.

Transformatory są nieliniowym obciążeniem, zniekształcenie sinusoidy prądu z powodu histerezy występuje zgodnie z rysunkiem 3. Im większe obciążenie, tym współczynnik THD jest mniejszy, ale oprócz tego zależy, jaki jest stopień nasycenia rdzenia.

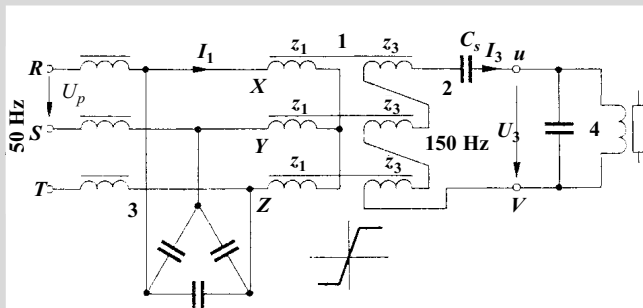
Jeżeli stosujemy transformatory trójfazowe, nie mamy problemów z asymetrią prądów, jeśli zaś jednofazowe, to problemy są podobne jak te, opisane w punkcie 2 tego artykułu.

Ze względu na dużą indukcyjność, wyłączenia w stanie, gdy płynie duży prąd, powstają przepięcia.

W nagrzewaniu indukcyjnym do wyższych częstotliwości niż 50 Hz stosuje się szczególny rodzaj transformatorów – transformatorowe powielacze częstotliwości.

#### Transformatorowe powielacze częstotliwości

Magnetyczne powielanie częstotliwości w układach zawierających dławiki lub transformatory o silnie nasyconych obwodach magnetycznych znane jest od dawna, lecz dopiero wprowadzenie blach transformatorowych zimnowalcowanych umożliwiło budowę powielaczy do celów energetycznych. W grzejnictwie indukcyjnym znalazły zastosowanie potrajacze częstotliwości typu transformatorowego (Spinelliego) przekształcające trójfazowy prąd częstotliwości sieciowej (50 Hz) na jednofazowy prąd częstotliwości potrojonej (150 Hz). Schemat ideowy potrajacza przedstawia rysunek 4.



**Rys. 4.** Schemat ideowy potrajacza transformatorowego, według [5]; 1 – transformatory o rdzeniach nasyconych, 2 – kondensator kompensujący reaktancję wewnętrzną, 3 – kondensatory i dławiki liniowe do kompensacji współczynnika mocy, 4 – obciążenie

Zasadniczym elementem potrajacza są trzy transformatory jednofazowe o silnie nasyconych rdzeniach (indukcja w rdzeniu  $B = 2,2 \div 2,3$  T). Uzwojenia pierwotne, połączone w gwiazdę, zasilane są z sieci o częstotliwości 50 Hz trójprzewodowo, wobec czego prądy magnesujące nie zawierają trzecich harmonicznych, które tworzą układ kolejności zerowej i mogą płynąć tylko w układzie z przewodem zerowym. Brak trzeciej harmonicznej prądu magnesującego powoduje odkształcenie strumienia magnetycznego. Siły elektromotoryczne częstotliwości podstawowej 50 Hz, indukowane w uzwojeniach wtórnych, dają w sumie zero,

Współczynnik mocy na zaciskach pierwotnych X, Y, Z potrajacza wynosi zwykle  $0,35 \div 0,4$  i praktycznie nie zależy od współczynnika mocy obciążenia. Ze względu na silnie odkształcony przez piątą i siódmą harmoniczną prąd pierwotny, kompensacja współczynnika mocy do wartości  $0,8 \div 0,9$  oprócz kondensatorów statycznych wymaga stosowania dławików o liniowej charakterystyce prądowo-napięciowej. Zastosowanie samych kondensatorów umożliwia kompensację mocy biernej pierwszej harmonicznej prądu, moc bierna wyższych harmonicznych przy sinusoidalnym napięciu sieci nie może być skompensowana. Moc bierna kondensatorów kompensujących wynosi około 1,6 mocy czynnej wyjściowej. Magnetyczne potrajacze częstotliwości w skali przemysłowej do zasilania indukcyjnych urządzeń grzejnych konkurują skutecznie z urządzeniami częstotliwości sieciowej 50 Hz, przede wszystkim dzięki symetrycznemu obciążeniu sieci trójfazowej przy jednofazowym obciążeniu po stronie 150 Hz. Zagadnienie symetryzacji obciążenia nastęrcza znaczne trudności w urządzeniach częstotliwości sieciowej. Obecnie niektóre znane firmy (Siemens, AEG, Junker) produkują potrajacze częstotliwości o mocach wyjściowych  $200 \div 1000$  kW.

4. SILNIKI INDUKCYJNE  
NAPĘDZAJĄCE GENERATORY MASZYNOWE

#### 4. SILNIKI INDUKCYJNE NAPĘDZAJĄCE GENERATORY MASZYNOWE

Do źródeł średnich częstotliwości (tab. 1) należą generatory maszynowe, które najczęściej napędzane są przez silniki indukcyjne. Wprowadzają one dużą indukcyjność, współczynnik mocy jest niski, zwłaszcza przy biegu jałowym i jego wartość zależy od obciążenia. Im większe obciążenie, tym współczynnik mocy jest większy i znamionowo wynosi 0,9.

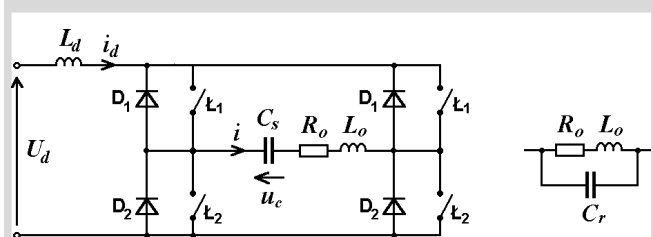
Silniki indukcyjne są nieliniowym obciążeniem, zniekształcenie sinusoidy prądu z powodu histerezy występuje zgodnie z rysunkiem 3. Im większe obciążenie, tym współczynnik THD jest mniejszy, ale oprócz tego zależy, jaki jest stopień nasycenia rdzenia.

Silniki te są trójfazowe symetryczne, więc nie mamy problemów z asymetrią prądów.

Przy załączeniu (rozruch) płynie duży prąd kilkakrotnie większy od znamionowego.

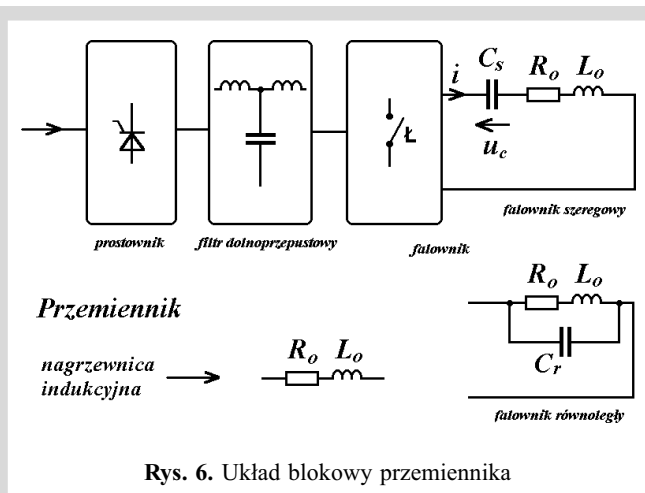
#### 5. PRZEMIENNIKI Z FALOWNIKAMI DO NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO

Podstawowe układy stosowanych źródeł dla średnich i wielkich częstotliwości (patrz tab. 1) przedstawione są na rysunku 5. Układ grzejny  $R_o L_o$  łączony jest szeregowo lub równoległe z kondensatorem oscylacyjnym.



**Rys. 5.** Podstawowy układ falownika do nagrzewania indukcyjnego

Prąd odbiornika  $R_o L_o$  przy szeregowym układzie zawiera dużo wyższych harmonicznych (duże THD), zaś przy równoległym małą. Jednak to nie wpływa szkodliwie na sieć, bo falownik zasilany jest poprzez filtr i prostownik, tak jak to blokowo pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Układ blokowy przemiennika

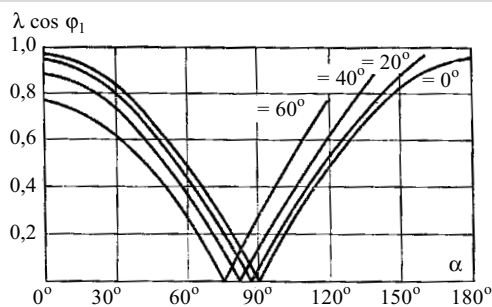
Dlatego zły wpływ przemienników na sieć elektroenergetyczną jest spowodowany ich przekształtnikami prostownikowymi.

## 6. PRZEKSZTAŁTNIKI

### Oddziaływanie przekształtnika na sieć zasilającą

Zasilanie regulowanych przekształtników, a szczególnie przekształtników dużej mocy, stwarza wiele poważnych problemów technicznych. Przekształtnik, w przeciwieństwie do przetwornicy wirującej, nie ma zdolności magazynowania energii, co sprawia, że udarowe zmiany obciążenia muszą być w całości pokrywane przez sieć. Drugą charakterystyczną i niekorzystną cechą przekształtników statycznych jest przesuwanie fazy podstawowej harmonicznej prądu pobieranego z sieci względem fazy napięcia przy zmianie kąta wysterowania łączników oraz w wyniku zjawiska komutacji. Zasilanie regulowanych przekształtników statycznych stwarza więc problemy dla gospodarki mocą bierną. Nie zawsze przy tym jest możliwa jej kompensacja za pomocą kondensatorów. Dalsze trudności powoduje kształt krzywej prądu pobieranego z sieci przez przekształtnik. Prąd ten nie ma charakteru sinusoidalnego, lecz postać zbliżoną do trapezu lub krzywej schodkowej. Przekształtnik stanowi więc źródło prądów o częstotliwości wyższej od podstawowej.

Wypadkowy współczynnik mocy w 6-taktowym układzie mostkowym pokazano na rysunku 7.

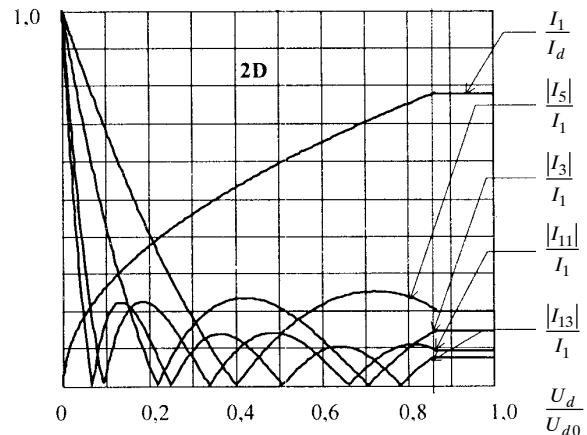


Rys. 7. Zależność wypadkowego współczynnika mocy przekształtnika od kąta wysterowania  $\alpha$  przy różnych wartościach kąta komutacji  $q$ , według [6]

Z wykresu widoczne jest wyraźnie zmniejszenie wypadkowego współczynnika mocy wraz ze wzrostem kąta komutacji  $q$ , np. w przypadku zastosowania transformatora o dużym napięciu zwarcia lub przy przeciążeniach.

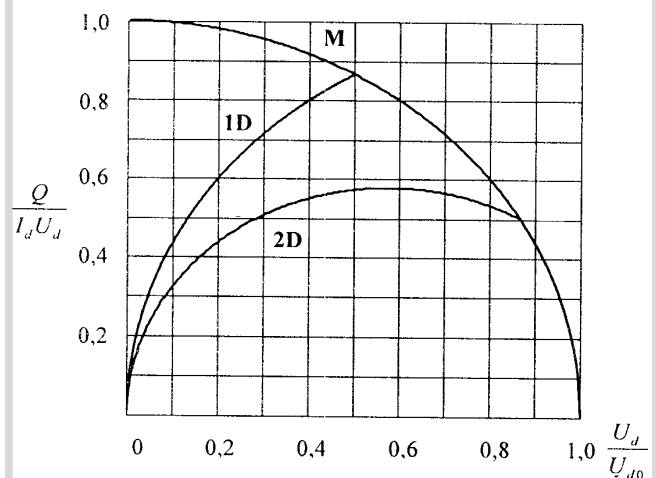
W sprzedaży oferowane są przemienniki do nagrzewania indukcyjnego o  $\cos\varphi = 0,7$ .

Na rysunku 8 przedstawiono względną wartość prądu 5., 7., 11., i 13. harmonicznych, w odniesieniu do podstawowej harmonicznej, jako funkcje względnego napięcia wyjściowego prostownika 2D.



Rys. 8. Względna zawartość wyższych harmonicznych w prądzie źródła zasilającego, odniesiona do wartości podstawowej harmonicznej prądu, trójfazowego mostkowego prostownika tyrystorowego dwoma diodami rozładowniczymi (2D), w funkcji względnego napięcia wyprostowanego, według [7]

Mocy bierna w funkcji względnej wartości napięcia wyprostowanego dla podstawowych prostowników regulowanych 6-pulsowych pokazana jest na rysunku 9 na podstawie pracy [7].



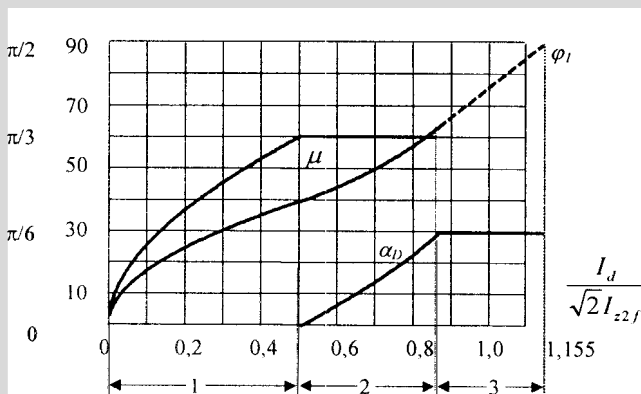
Rys. 9. Względna wartość mocy biernej (w odniesieniu do mocy pozornej przekształtnika obciążonego prądem obciążenia) w funkcji względnej wartości napięcia wyprostowanego dla mostkowego prostownika tyrystorowego bez diod rozładowniczych (M), jedną diodą rozładowniczą (1D) i z dwoma diodami rozładowniczymi (2D), według [7]

Z porównania tych charakterystyk wynika, że stosowanie diod rozładowczych do trójfazowych mostkowych prostowników tyrystorowych zmniejsza obciążenie bierno wnoszone przez przekształtnik w całym zakresie napięć wyjściowych. Wprawdzie prostowniki z diodami generują wyższe harmoniczne o większej wartości niż prostownik bez tych diod, ale zwiększenie to nie jest duże, szczególnie w przypadku prostownika 2D.

### Oddziaływanie trójfazowego mostkowego prostownika diodowego na źródło energii

Proces komutacji w prostowniku diodowym ( $\alpha = 0$ ) trwa dłużej niż w prostowniku tyrystorowym, gdyż odbywa się przy mniejszej różnicy napięć pomiędzy komutującymi fazami. Zawartość poszczególnych harmonicznych dla prostownika diodowego (duża wartość kąta komutacji  $\mu$ ) jest mniejsza niż dla prostownika tyrystorowego.

Rysunek 10 ilustruje kąty komutacji  $\mu$ , przesunięcia fazowego pomiędzy podstawowymi harmonicznymi napięcia i prądu źródła  $\varphi_1$  i kąt opóźnienia w trzech zakresach obciążenia.



**Rys. 10.** Zależność kąta komutacji  $\mu$ , przesunięcia fazowego pomiędzy podstawowymi harmonicznymi napięcia i prądu źródła  $\varphi_1$  i kąt opóźnienia (mierzony od punktu naturalnej komutacji) załączania diod dla trójfazowego diodowego prostownika mostkowego w całym zakresie obciążenia (od biegu jałowego do zwarcia), według [7]

## 7. WNIOSKI

Obwody wejściowe indukcyjnego urządzenia elektrotermicznego mają istotny wpływ na sieć elektroenergetyczną. Natomiast sam piec lub nagrzewnica indukcyjna ma małe

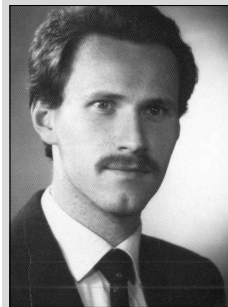
znaczenie, jeśli nie jest połączona bezpośrednio do sieci elektroenergetycznej. A jeśli nawet tak jest, to i tak te odbiorniki w praktyce nie są same, bo łączone są w układach kompensacyjno-symetryzacyjnych i filtracyjnych.

## Literatura

- [1] Hauser J.: *Podstawy elektrotermicznego przetwarzania energii*. Poznań, Zakład Wydawniczy K. Domke 1996
- [2] Hering M.: *Podstawy elektrotermii, cz. II*. Warszawa, WNT 1998
- [3] Hering M.: *Poradnik inżyniera elektryka*. T. 1, rozdz. 13, Elektrotermia. Wyd. 2. Warszawa, WNT 1996
- [4] Kurbiel A.: *Indukcyjne urządzenia elektrotermiczne*. Kraków, Skrypt Uczelniany AGH, nr 1308, 1992
- [5] Liwiński W.: *Nagrzewnice indukcyjne skośne*. Warszawa, WNT 1968
- [6] Manitius J., Zygmunt H.: *Projektowanie przekształtników tyrystorowych*. Warszawa, WNT 1974
- [7] Piróg S.: *Energoelektronika: negatywne oddziaływania układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczenia*. Kraków, UWND AGH 1998
- [8] Sajdak C., Samek E.: *Nagrzewanie indukcyjne*. Katowice, Wyd. Śląsk 1985
- [9] Skoczkowski T.: *Nagrzewanie indukcyjne*. Przegląd Elektrotechniczny, r. LXXII, nr 10, 1996
- [10] Skwarczyński J., Tertil Z.: *Maszyny elektryczne*. Kraków, Skrypt Uczelniany AGH, nr 967, 1985
- [11] Supronowicz H., Dimbalengi M.: *Zasilacz napięcia stałego z pośredniczącym rezonansowym obwodem wysokiej częstotliwości*. AC/DC High Frequency Resonant Converter. Jakość i użytkowanie energii elektrycznej, t. 3, z. 1, PUH TECHNET Kraków 1997
- [12] Turowski J.: *Elektrodynamika techniczna*. Warszawa, WNT 1968

Wpłynęło: 28.02.2007

Roman KIEROŃSKI



Urodził się 26.05.1963 roku w Krakowie. Studia odbył na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej ukończył w 1990 roku. Pracę magisterską wykonywał z zakresu elektrotermii. Jest doktorantem Wydziału Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki AGH. Pracuje w Katedrze Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych AGH w Krakowie. Zajmuje się tematyką nagrzewania indukcyjnego.

e-mail: kieronsk@tsunami.kaniup.agh.edu.pl; kieronski@op.pl