

WPLYW PRĄDU ODKSZTAŁCONEGO NA PARAMETRY NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO PRZY ZASILANIU RÓŻNYMI ŹRÓDŁAMI CZĘSTOTLIWOŚCI

STRESZCZENIE

Źródła częstotliwości stosowane w grzejnictwie indukcyjnym dają różne odkształcenia prądów. Dla różnych źródeł podano wyższe harmoniczne prądu i wykreślono ich przebiegi. Oceniono wpływ prądu odkształconego na zmianę parametrów nagrzewania indukcyjnego.

Słowa kluczowe: nagrzewanie indukcyjne, źródła częstotliwości, prąd odkształcony parametry pieców i nagrzewnic indukcyjnych

THE EFFECT OF DEFORMED CURRENT ON THE PARAMETERS OF INDUCTION HEATING SUPPLIED FROM VARIOUS SOURCES OF FREQUENCY

Sources of frequency for induction heating are non-sinusoidal so the current is deformed. Higher harmonics of the current are given for various sources. Their courses traced. The effect of deformed current on the parameters of induction heating has been assessed.

Keywords: induction heating, sources of frequency, deformed current, parameters of induction furnaces and heaters

1. WSTĘP

Prąd nagrzewnicy indukcyjnej zasilanej z różnych źródeł jest odkształcony. Aby ocenić wpływ tego prądu na zmianę parametrów układu wzbudnik-wsad, konieczna jest znajomość zawartości wyższych harmonicznych (wh) występujących w takich prądach.

2. WPLYW PRĄDU ODKSZTAŁCONEGO NA PARAMETRY NAGRZEWNICY INDUKCYJNEJ

Odkształcenie prądu od sinusoidy powoduje zmianę głębokości wnikania δ fali elektromagnetycznej zarówno do wsadu, jak i do uzwojeń wzbudnika, czyli także zmianę rezystancji, która zależy od tej głębokości.

Założmy że wsadem jest walec. Dla przypadku sinusoidalnego prądu o częstotliwości drgań własnych równej $\omega_o = \frac{2\pi}{T_o} = \frac{1}{\sqrt{L_o C_s}}$ obwodu rezonansowego o indukcyjności L_o i pojemności C_s głębokość wnikania δ_1 wynosi:

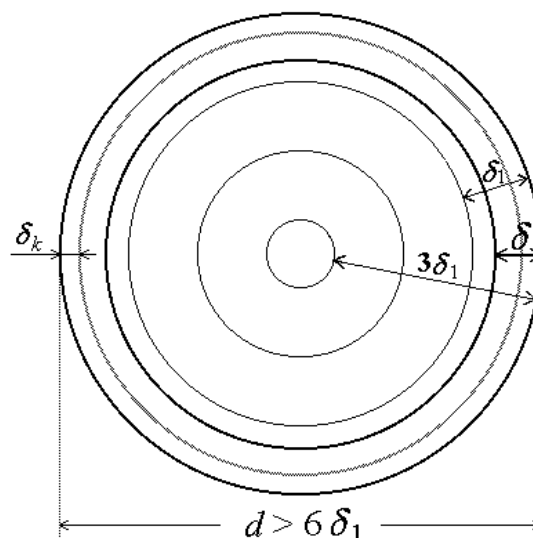
$$\delta_1 = \sqrt{\frac{2}{\omega_o \gamma \mu}} \quad (1)$$

gdzie:

- γ – konduktywność wsadu,
- μ – przenikalność magnetyczna wsadu.

W walcu o średnicy $d \geq 6\delta_1$ wydziela się praktycznie cała moc P_w nagrzewająca wsad. Falę cylindryczną padającą na

taki wsad można wówczas traktować jako falę płaską. Na rysunku 1 według [8, 9] zobrazowano głębokości wnikania. Przy zasilaniu sinusoidalnym jest głębokość δ_1 , zaś przy odkształconym głębokość δ jest mniejsza od δ_1 i oczywiście od δ_k k -tej harmonicznej.



Rys. 1. Głębokości wnikania δ , δ_k dla przypadku k -tych harmonicznych prądu odkształconego oraz δ_1 – dla sinusoidalnego przebiegu prądu wzbudnika nagrzewnicy

Rezystancja nagrzewnicy zależy od głębokości wnikania δ [3], czyli odkształcenie prądu płynącego przez nagrzewnicę lub piec indukcyjny powoduje zmianę rezystancji.

* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych

Wzór na iloraz R/R_1 wynosi:

$$\frac{R}{R_1} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{k} I_k^2}{I^2} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{k} I_k^2}{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{k} \left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2}{\sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2} = \frac{1 + \sum_{k=2}^{\infty} \sqrt{k} (HR_{Ik})^2}{1 + \sum_{k=2}^{\infty} (HR_{Ik})^2} \quad (2)$$

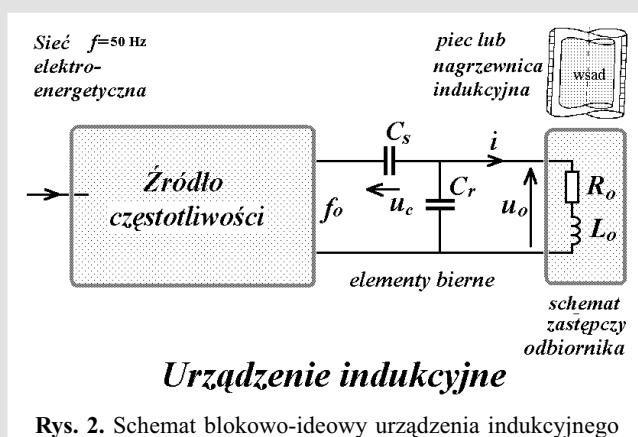
gdzie:

- R – rezystancja odbiornika indukcyjnego, przez który płynie prąd odkształcony,
- R_1 – rezystancja odbiornika indukcyjnego, przez który płynie prąd sinusoidalny,
- I_k – k -ta harmoniczna wartości skutecznej prądu odbiornika,
- I_1 – pierwsza harmoniczna wartości skutecznej prądu odbiornika,
- I – wartość skuteczna prądu odbiornika,
- HR_{Ik} – współczynnik udziału w prądu.

Wzór (2) jest ważny dla dowolnego prądu odkształconego nagrzewającego wsad. Dany prąd odkształcony wcześniej trzeba poddać analizie Fouriera w celu wyznaczenia k -tych harmonicznym prądu. Efektem zmiany rezystancji jest zmiana innych parametrów nagrzewania: parametru charakteryzującego tłumienie, współczynnika mocy sprawności.

3. ŹRÓDŁA CZĘSTOTLIWOŚCI

W urządzeniu indukcyjnym pokazanym na rysunku 2 źródło częstotliwości oraz odbiornik nawzajem wpływają na siebie.



Rys. 2. Schemat blokowo-ideowy urządzenia indukcyjnego

Źródła zależą w dużym stopniu od ich odbiorników, ponieważ każda zmiana parametrów odbiornika wpływa na źródło zasilania oraz odwrotnie zmiana zasilania (np. częstotliwości, wH, mocy) zmienia parametry odbiornika. Dlatego stosujemy pojemnościowe elementy biernie pośredniczące, połączone tak jak na rysunku 2.

Źródła częstotliwości odbiorników indukcyjnych (nagrzewnic lub pieców indukcyjnych) można podzielić ogólnie na 2 grupy:

1) Przetwarzające – dające napięcie lub prąd o przebiegu quasi-sinusoidalnym. Napięcie i częstotliwość 50 Hz sieci elektroenergetycznej przetwarzane na niższe aby osiągnąć większe prądy w samym odbiorniku. Częstotliwość 50 Hz jest przetwarzana na wyższą (tzw. niską lub średnią), ponieważ lepiej wchłania energię czynną do wsadu nagrzewnicy. Do tych źródeł zasilania należą: transformatory, autotransformatory, dławiki, potrajacze transformatorowe, generatory maszynowe (maszyna synchroniczna). Te źródła wprowadzają dużą indukcyjność, dlatego dodatkowo wprowadza się pojemności (rys. 2).

Główną rolą elementów biernych – C_s , C_r (rys. 2) jest poprawa jakości energii elektrycznej pobieranej z sieci elektroenergetycznej, czyli symetryzacja i kompensacja.

2) Przelączające – to układy impulsowe z łącznikami elektronicznymi (tranzystorami, tyrystorami, a dawniej lampowymi) dającymi na wyjściu napięcie lub prąd o przebiegu prostokątnym średniej oraz wielkiej częstotliwości. Dawniej stosowano układy z łącznikami mechanicznymi tzw. iskrowniki.

Główną rolą elementów biernych – C_s , C_r jest zapewnienie drgań (z wyjątkiem przemiennika sześciopulsowego, w którym element C służy do kompensacji mocy biernej, a nie generacji oscylacji), dlatego falownik napięcia szeregowy posiada tylko C_s ($C_r = 0$), zaś falownik prądu równoległy – C_r (C_s nieskończoność) (rys. 2). Jeśli nie zastosujemy elementów biernych – C_s , C_r ($C_r = 0$, $C_s =$ nieskończoność) (rys. 2), to prąd odbiornika jest eksponentą.

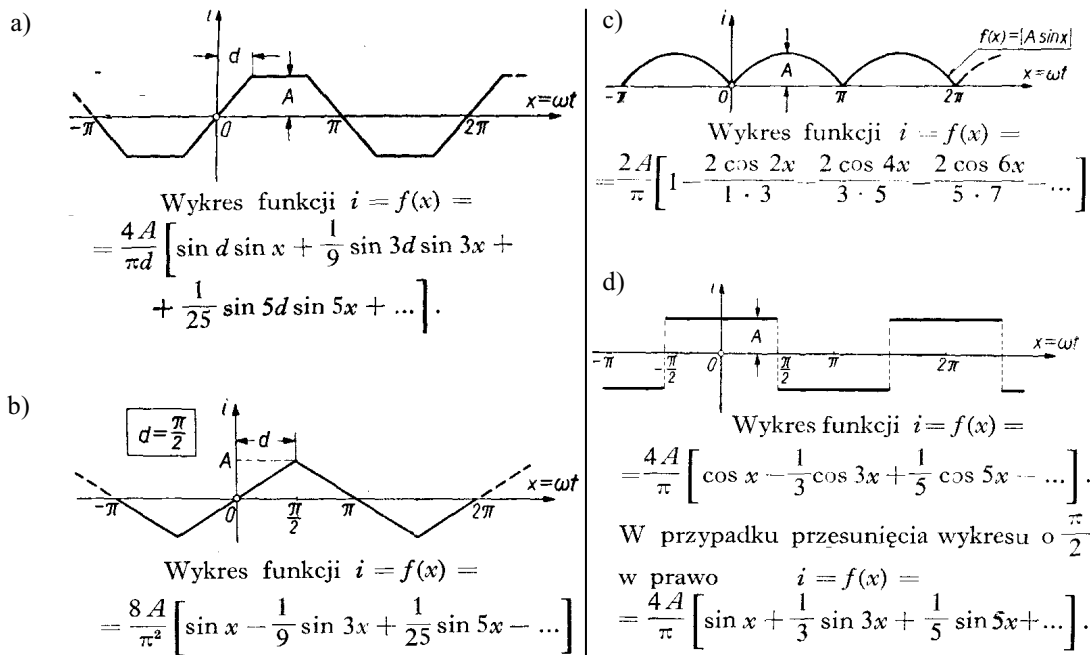
4. WYŻSZE HARMONICZNE WYKRESÓW SPOTYKANYCH PRZY NAGRZEWANIU INDUKCYJNYM

Wykres o kształcie trapezu może mieć różny kąt d , jak to pokazano na rysunku 3.

Przy kącie $d = 0^\circ$ wykres staje się prostokątny, zaś przy kącie $d = 90^\circ$ – trójkątny. Trapez o kącie $d = 30^\circ$ występuje przy generatorze maszynowym oraz transformatorowym potrajaczu częstotliwości. Wykres prostokątny posiadają na wyjściu układy przelączające (np. falowniki), opisane dalej w rozdziale 6.

W tabeli 1 zestawiono podstawowe wykresy spotykane przy nagrzewaniu indukcyjnym.

Przykładowo widzimy, że dla potrajacza częstotliwości 3. harmoniczna ma największą wartość. W ostatniej rubryce pokazano, ile razy zmienia się rezystancja odbiornika indukcyjnego, przez który płynie dany prąd odkształcony. Ciekawe jest, że w przypadku prostokątnego przebiegu ta zmiana rezystancji jest największa.



Rys. 3. Rozkład na sinusoidy podstawowych wykresów spotykanych przy nagrzewaniu indukcyjnym

Tabela 1. Ilorazy I_k/I_1 k-tych harmonicznych dla różnych kształtów przebiegów

Kształt przebiegu	Ilorazy I_k/I_1 k-tych harmonicznych									$\frac{R}{R_1}$
	1	2	3	4	5	6	7	9		
trójkąt (trapez 90°)	1		0,111		0,040		0,020			1,026
trapez 30°	1		0,222		0,040		0,020			1,090
prostokąt (trapez 0°)	1		0,333		0,200		0,143			1,336
mostek dwufazowy	1	0,2	0,086	0,048	0,030	0,021	0,015	0,009		1,078
histereza z pamięcią	1		0,263		0,048					1,125
sieciowy 6-pulsowy	1						0,229	0,167		1,222
histereza lub prąd łuku el.	1		0,125		0,050		0,025			1,034
napięcie łuku elektrycznego	1		0,300		0,175		0,125			1,266
sinusoida	1									1,000

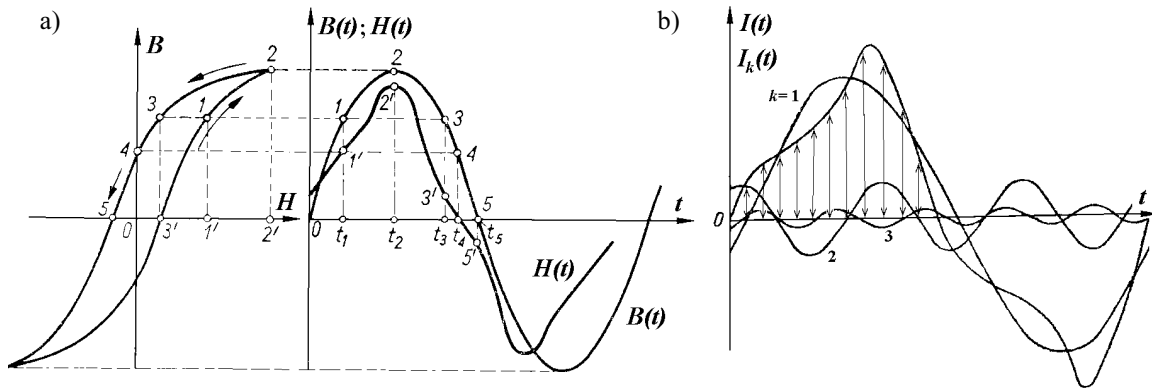
5. ZASILANIE POPRZEZ PRZETWARZAJĄCE ŹRÓDŁO CZĘSTOTLIWOŚCI

5.1. Nagrzewnica lub piec indukcyjny jako odbiornik $R_o L_o$

Nagrzewnica lub piec indukcyjny $R_o L_o$ to układ wzбудnik-wsad (rys. 2). Cechą charakterystyczną nagrzewnicy indukcyjnej jako odbiornika energii elektrycznej jest nieliniowy charakter obciążenia, zwłaszcza przy nagrzewaniu ferromagnetyków, co jest przyczyną powstawania prądu odkształconego (wzrostu współczynnika harmonicznych THD) w tym odbiorniku. Wynika to z krzywej magnesowa-

nia (histerezy) ciał ferromagnetycznych $B(H)$ (gdzie H – natężenie pola magnetycznego). Dlatego krzywa prądu (rozłożona na sinusoidy) jest taka jak na rysunku 4 według [1, 7], a jej I_k/I_1 jak w tabeli 1.

To wpływa na zmianę następujących parametrów nagrzewnicy: R_o, L_o, X_o (rys. 2), głębokości wnikania δ , parametru nagrzewnicy p , współczynnika mocy, sprawności, które mogą zmieniać się także podczas pracy w szerokim zakresie, np.: współczynnik mocy od 0,1–0,8; prądy zmieniają się o 25% dla wsadów nieferromagnetycznych, a o 100% ferromagnetycznych, zawartość wyższych harmonicznych zależy od stopnia nasycenia wsadu ferromagnetycznego polem magnetycznym.



Rys. 4. Przebiegi czasowe w rdzeniu stalowym dławika. Zniekształcenie sinusoidy natężenia pola magnetycznego z powodu pętli histerezy, według [10] (a), oraz rozłożenie krzywej prądu chwilowego tegoż dławika na sinusoidy (b)

5.2. Transformatory oraz dławiki

Transformatory oraz 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 4 [1]. Im większe obciążenie, tym współczynnik THD jest mniejszy, ale oprócz tego zależy od stopnia nasycenia rdzenia.

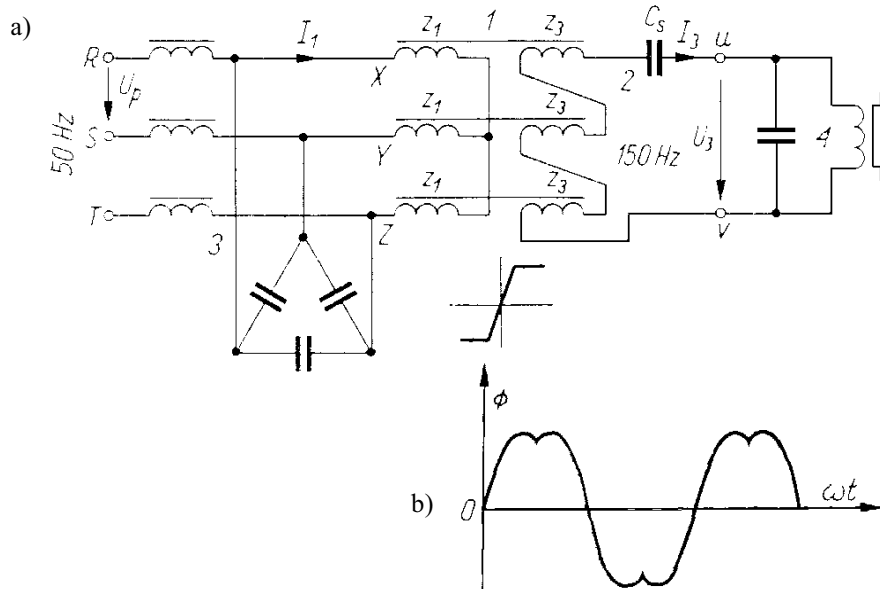
W nagrzewaniu indukcyjnym do wyższych częstotliwości niż 50 Hz stosuje się szczególnie rodzaj transformatorów – transformatorowe powielacze częstotliwości.

5.3. 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 zimnowalco-

wanych 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 potrójonej (150 Hz). Schemat ideowy potrajacza [5] przedstawia rysunek 5a.

Zasadniczym elementem potrajacza są trzy transformatory jednofazowe o silnie nasyconych rdzeniach (indukcja w rdzeniu $B = 2,2\text{--}2,3$ 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 (rys. 5b) i można go porównać do wykresu na rysunku 3a dla kąta $d = 30^\circ$ i rozłożyć na harmoniczne wg tabeli 1. Siły elektromotoryczne podstawowej 50 Hz, indukowane w uzwojeniach wtórnych, dają w sumie zero.



Rys. 5. Schemat ideowy potrajacza transformatorowego, według [5] (a); 1 – transformatory o rdzeniach nasyconych, 2 – kondensator kompensujący reaktancję wewnętrzną, 3 – kondensatory i dławiki liniowe do kompensacji współczynnika mocy, 4 – obciążenie; oscylogram strumienia magnetycznego w rdzeniach transformatorów potrajacza (b)

5.4. Generatory maszynowe

Do źródeł średnich częstotliwości należą generatory maszynowe, które najczęściej napędzane są przez silniki indukcyjne. W zakresie częstotliwości 500–600 Hz stosuje się generatory synchroniczne z wystającymi biegunami, działające tak jak generatory częstotliwości sieciowej. Przy większych częstotliwościach budowa takich generatorów nastęrcza poważne trudności. Częstotliwość prądu generatora synchronicznego budowy klasycznej określona jest wzorem

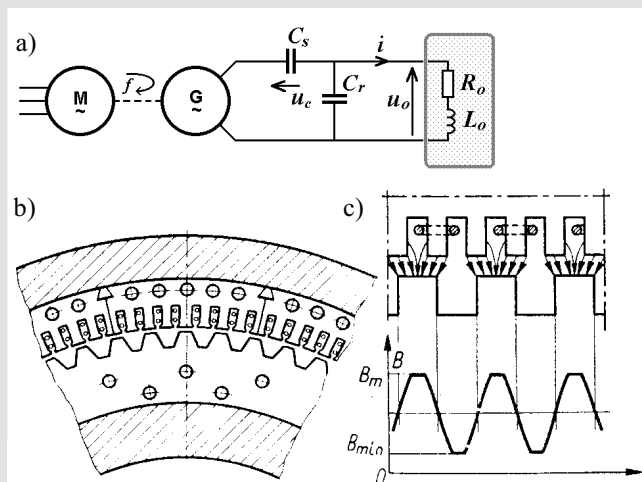
$$f = pn/60 \quad (3)$$

w którym:

- p – liczba par biegunów wirnika;
- n – prędkość obrotowa w obr./min.

Przy największej możliwej prędkości obrotowej napędzającego silnika asynchronicznego $n = 3000$ obr./min jedynym sposobem zwiększenia częstotliwości jest powiększenie liczby biegunów. Duża liczba biegunów wymaga dużej średnicy wirnika, co powoduje poważne trudności na skutek występowania dużych sił odśrodkowych w elementach wirnika. Trudności te rozwiązano przez wynalezienie generatora tzw. induktorowego lub reluktancyjnego. Opracowanie przemysłowych konstrukcji tych generatorów, które z niewielkimi zmianami stosowane są i dziś, jest wynikiem prac Lorenza (USA), Wołogdina (wtedy ZSRR), Schmidta (Niemcy), Guya i innych.

Zasada konstrukcji generatora Lorenza [5] pokazana jest na rysunku 6.



Rys. 6. Generator Lorenza (unipolarny):
 a) konstrukcja; b) rozkład indukcji w szczelinie

Uzębiony wirnik generatora odkuty ze stali nie ma żadnych uzwojeń. Strumień magnetyczny wytwarzany jest przez uzwojenie wzbudzenia w postaci pierścieniowej cewki, umieszczonej współosiowo z wirnikiem, zasilanej prądem stałym. Liczba żłobków stojana (twornika) jest dwukrotnie większa od liczby zębów wirnika. Zezwój uzwojenia roboczego umieszczone są w sąsiednich żłobkach.

Dzięki uzębieniu wirnika strumień magnetyczny w szczelinie nie jest rozłożony równomiernie. Nad zębami wirnika indukcja magnetyczna jest większa niż nad żłobkami. W rezultacie otrzymuje się rozkład indukcji w szczelinie pokazany na rysunku 6b. Przebieg ma podobny do trapezu i można go porównać do wykresu na rysunku 3a dla kąta $d = 30^\circ$. Składowa stała tego strumienia nie indukuje sił elektromotorycznych, składowa zmienna indukuje siłę elektromotoryczną o częstotliwości

$$f = zn/60 \quad (4)$$

gdzie z – liczba zębów wirnika.

Przy częstotliwości ok. 10 kHz żłobki są rzędu kilku milimetrów.

Wszystkie typy generatorów maszynowych działają na zasadzie wykorzystania różnicy przewodności magnetycznej żelaza i powietrza, stąd ich nazwa – reluktancyjne.

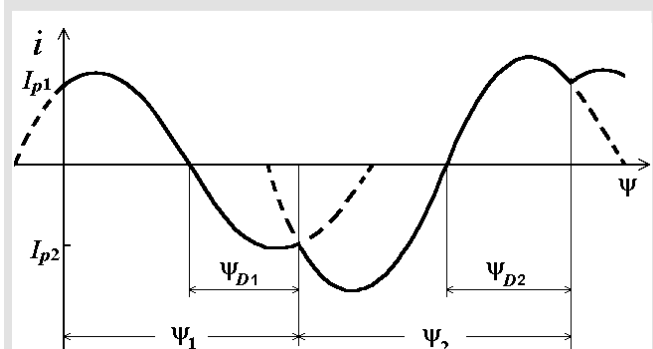
6. ZASILANIE POPRZEZ PRZEŁĄCZAJĄCE ŹRÓDŁO CZĘSTOTLIWOŚCI

6.1. Przemienne z falownikami

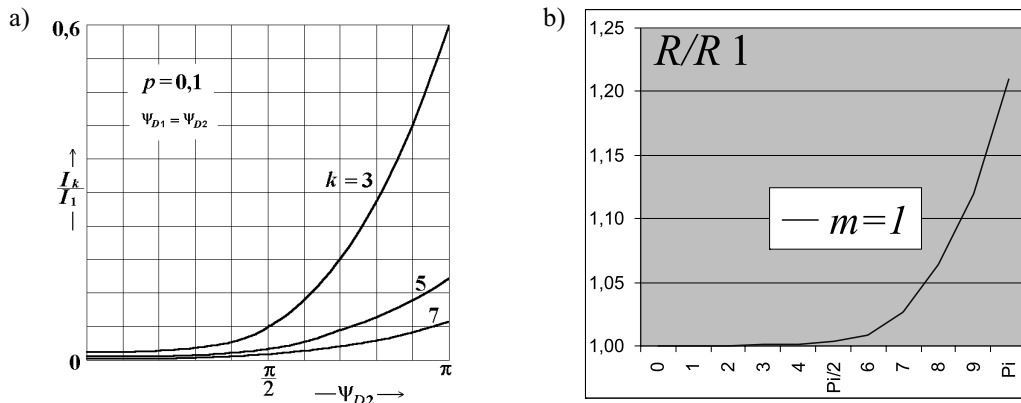
Podstawowe układy falownikowe stosowanych źródeł dla średnich i wielkich częstotliwości posiadają 1, 2 lub 4 łączniki. Charakterystyczne dla tych układów jest to, że posiadają najczęściej 4 łączniki łączone w układ mostkowy, zaś przy mniejszej mocy łączone są w układzie z dwoma łącznikami, a rzadziej jednym [3]. Układ grzejny $R_o L_o$ łączony jest szeregowo lub równoległe z kondensatorem oscylacyjnym C_s .

Prąd odbiornika $R_o L_o$ przy szeregowym układzie najczęściej ma przebieg jak na rysunku 7 i zawartość wyższych harmonicznych jest tym większa, im większe są kąty ψ_{D1} , ψ_{D2} , co jest przykładowo zobrazowane na rysunku 8a w funkcji kąta ψ_{D2} przy $\psi_{D1} = \psi_{D2}$. Przebieg ten dla szczególnego przypadku kąta $\psi_{D2} = 3\pi/4$ jest podobny do trapezu o kącie $d = 30^\circ$ (rys. 3a, tab. 1). Na rysunku 8b jest wykreślona zmiana rezystancji na skutek wyższych harmonicznych.

Przy równoległym połączeniu $R_o L_o$ z C_s prąd jest prawie sinusoidalny [3].



Rys. 7. Przebieg prądu odbiornika w falowniku mostkowym

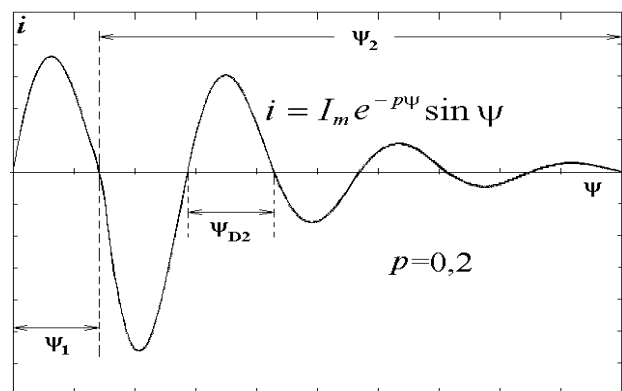


Rys. 8. Zależności ilorazu I_k/I_1 k -tej ($k = 3, 5, 7$) harmonicznej prądu do pierwszej harmonicznej w funkcji kąta ψ_2 dla parametru nagrzewnicy $p = 0,1$ (a); wpływ wyższych harmonicznych na rezystancję odbiornika (b)

6.2. Dwutaktowe falowniki napięcia

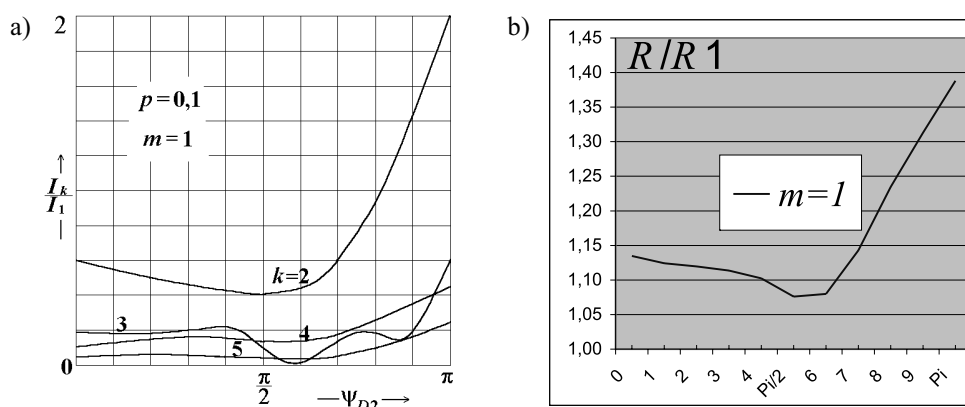
Jest wiele układów falownika napięcia do nagrzewania indukcyjnego posiadających dwa taktory pracy: dostarczania energii oraz taktory wydzielania tej energii na odbiorniku. Wtedy przebieg prądu odbiornika jest taki, że w pierwszym taktory energia jest dostarczana do kondensatora (ładowanie kondensatora) obwodu połówką sinusoidy tłumionej, zaś w drugim taktory następuje wydzielanie tej energii na odbiorniku w obwodzie RLC dzięki rozładowywaniu kondensatora poprzez nagrzewnicę tak jak przedstawiono to na rysunku 9 (wg [2]).

W obwodzie rozładowywania, przebieg prądu przyjmuje charakter drgań oscylacyjnych tłumionych o tłumieniu p i częstotliwości zależnej od parametrów tego obwodu. Liczbę oscylacji m możemy dowolnie ustawiać na stałe lub zmieniać w trakcie pracy falownika w celu regulacji mocy. W artykule rozważono przypadek szczególny, taki że dla długości poszczególnych taktory: $\psi_1 = \pi$, $\psi_2 = 2m\pi$, czyli cały cykl trwa przez kąt $(2m+1)\pi$. Wtedy przebieg prądu ma kształt taki jak na rysunku 9 przykładowo dla tłumienia $p = 0,2$ oraz dla $m = 3$ oscylacji w drugim taktory pracy. Taki przebieg prądu można rozłożyć na szereg trygonometryczny Fouriera w celu wyznaczenia k -tej harmonicznej prądu.

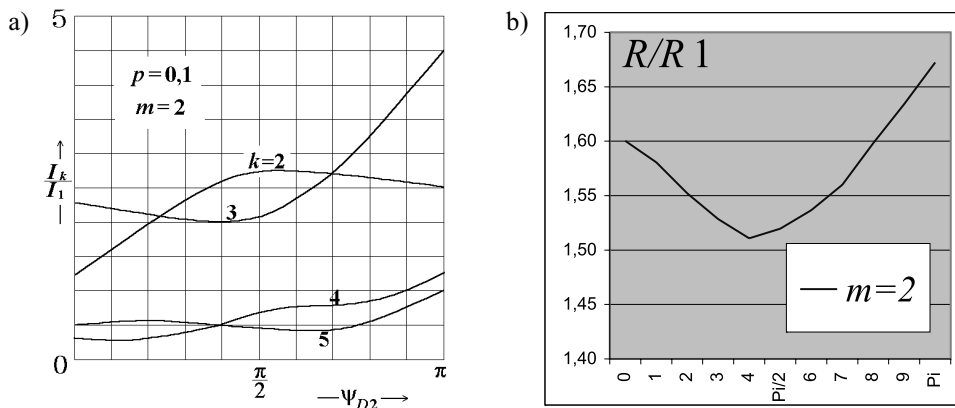


Rys. 9. Przebieg prądu odbiornika w falownikach dwutaktowych

Ilorazy I_k/I_1 poszczególnych harmonicznych prądu zależą od liczby oscylacji m i od parametru nagrzewnicy p . Zależności ilorazu I_k/I_1 k -tej harmonicznej prądu do pierwszej harmonicznej w funkcji kąta ψ_{D2} oraz ich wpływ na rezystancję odbiornika dla jednej i dwóch oscylacji oraz parametru nagrzewnicy $p = 0,1$ pokazano odpowiednio na rysunkach 10 i 11.

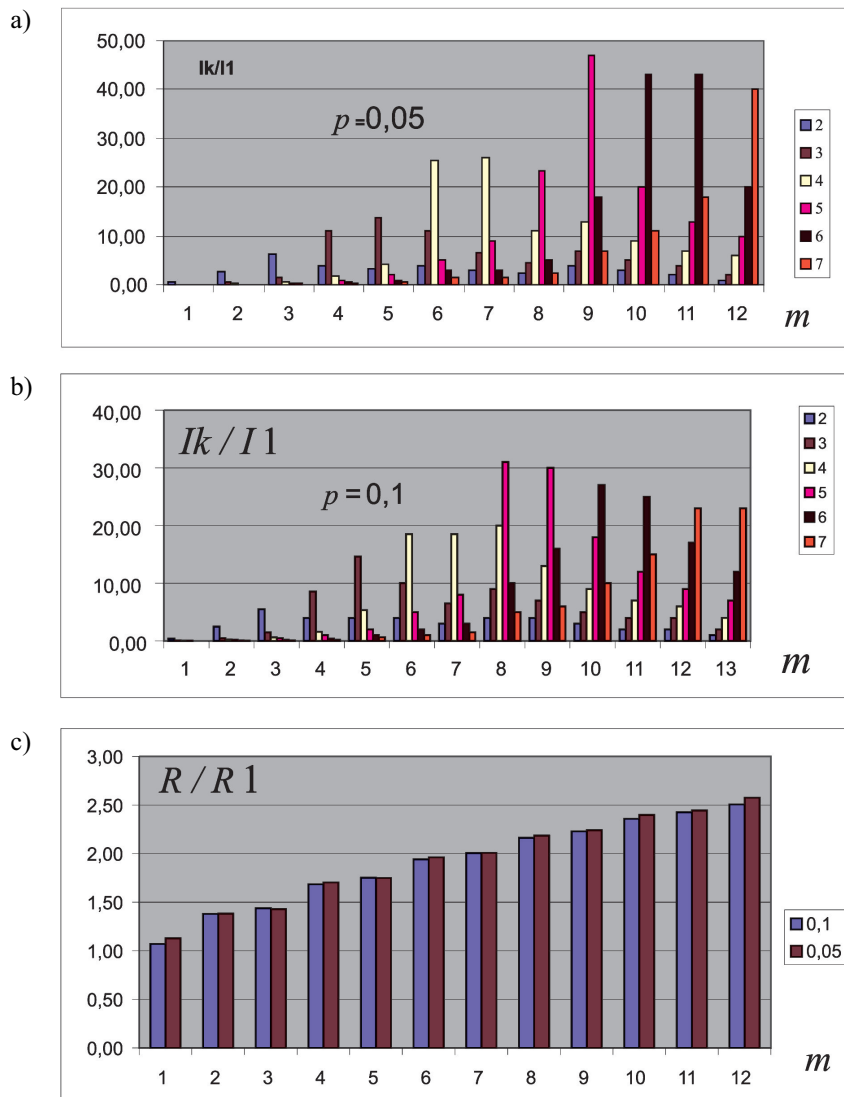


Rys. 10. Zależności ilorazu I_k/I_1 k -tej ($k = 2, 3, 4, 5$) harmonicznej prądu do pierwszej harmonicznej w funkcji kąta ψ_2 dla jednej oscylacji ($m = 1$) oraz parametru nagrzewnicy $p = 0,1$ (a); wpływ wyższych harmonicznych na rezystancję odbiornika (b)



Rys. 11. Zależności ilorazu I_k/I_1 k -tej ($k = 2, 3, 4, 5$) harmonicznej prądu do pierwszej harmonicznej w funkcji kąta ψ_2 dla dwóch oscylacji ($m = 2$) oraz parametru nagrzewnicy $p = 0,1$ (a); wpływ wyższych harmonicznych na rezystancję odbiornika (b)

Ilorazy I_k/I_1 w funkcji liczby oscylacji m są przedstawione graficznie na rysunku 12 na podstawie wyników liczbowych z tabel 2 i 3.



Rys. 12. Ilorazy I_k/I_1 k -tych harmonicznych w funkcji liczby oscylacji m dla parametru nagrzewnicy: a) $p = 0,05$; b) $p = 0,1$; c) wpływ wyższych harmonicznych na rezystancję odbiornika

Tabela 2. Ilorazy I_k/I_1 k -tych harmonicznich w funkcji liczby oscylacji m dla parametru nagrzewnicy $p = 0,05$

$\varphi_1 = \pi$ $\varphi_2 = 2m\pi$	Ilorazy I_k/I_1 k -tych harmonicznich dla parametru nagrzewnicy $p = 0,05$						
m	1	2	3	4	5	6	7
1	1,00	0,63	0,13	0,08	0,03	0,03	0,03
2	1,00	2,75	0,50	0,25	0,10	0,05	0,05
3	1,00	6,20	1,50	0,60	0,30	0,20	0,10
4	1,00	4,00	11,00	1,80	1,00	0,60	0,40
5	1,00	3,25	13,75	4,25	2,00	1,00	0,50
6	1,00	4,00	11,00	25,50	5,00	3,00	1,50
7	1,00	3,00	6,50	26,00	9,00	3,00	1,50
8	1,00	2,50	4,50	11,00	23,50	5,00	2,50
9	1,00	4,00	7,00	13,00	47,00	18,00	7,00
10	1,00	3,00	5,00	9,00	20,00	43,00	11,00
11	1,00	2,00	4,00	7,00	13,00	43,00	18,00
12	1,00	1,00	2,00	6,00	10,00	20,00	40,00

Tabela 3. Ilorazy I_k/I_1 k -tych harmonicznich w funkcji liczby oscylacji m dla parametru nagrzewnicy $p = 0,1$

$\varphi_1 = \pi$ $\varphi_2 = 2m\pi$	Ilorazy I_k/I_1 k -tych harmonicznich dla parametru nagrzewnicy $p = 0,1$						
m	1	2	3	4	5	6	7
1	1,00	0,42	0,10	0,05	0,03	0,02	0,02
2	1,00	2,50	0,50	0,25	0,20	0,10	0,05
3	1,00	5,50	1,50	0,60	0,50	0,20	0,10
4	1,00	4,00	8,60	1,60	1,00	0,40	0,20
5	1,00	4,00	14,67	5,33	2,00	1,00	0,67
6	1,00	4,00	10,00	18,50	5,00	2,00	1,00
7	1,00	3,00	6,50	18,50	8,00	3,00	1,50
8	1,00	4,00	9,00	20,00	31,00	10,00	5,00
9	1,00	4,00	7,00	13,00	30,00	16,00	6,00
10	1,00	3,00	5,00	9,00	18,00	27,00	10,00
11	1,00	2,00	4,00	7,00	12,00	25,00	15,00
12	1,00	2,00	4,00	6,00	9,00	17,00	23,00
13	1,00	1,00	2,00	4,00	7,00	12,00	23,00

Z przebiegów widać, że każda liczba m ma jedną harmoniczną znacznie większą od pozostałych.

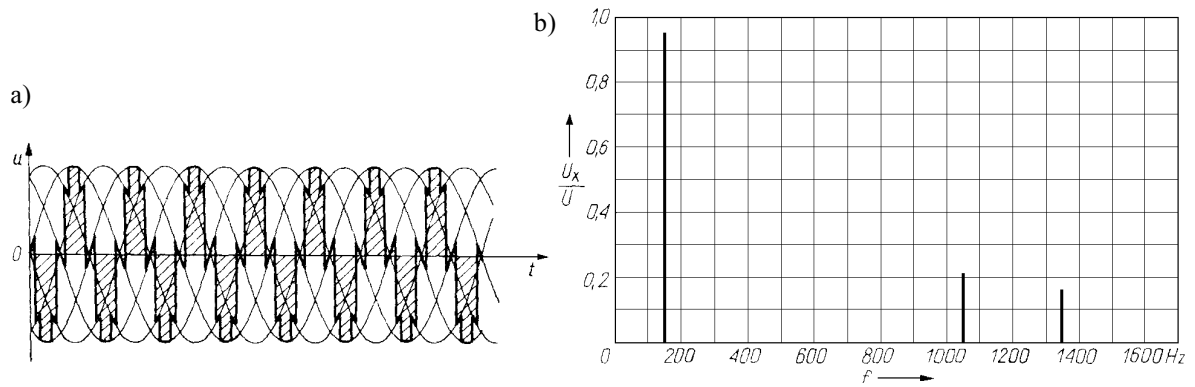
Z przeprowadzonych rozważań wynika, że:

- zawartość harmonicznich prądu zależy głównie od liczby m oraz parametru p ,
- występują zarówno parzyste, jak i nieparzyste harmoniczne prądu,
- każda liczba m ma jedną harmoniczną znacznie większą od pozostałych,
- im parametru p jest mniejszy tym zawartość wh w prądzie odbiornika jest większa dla $m > 1$.

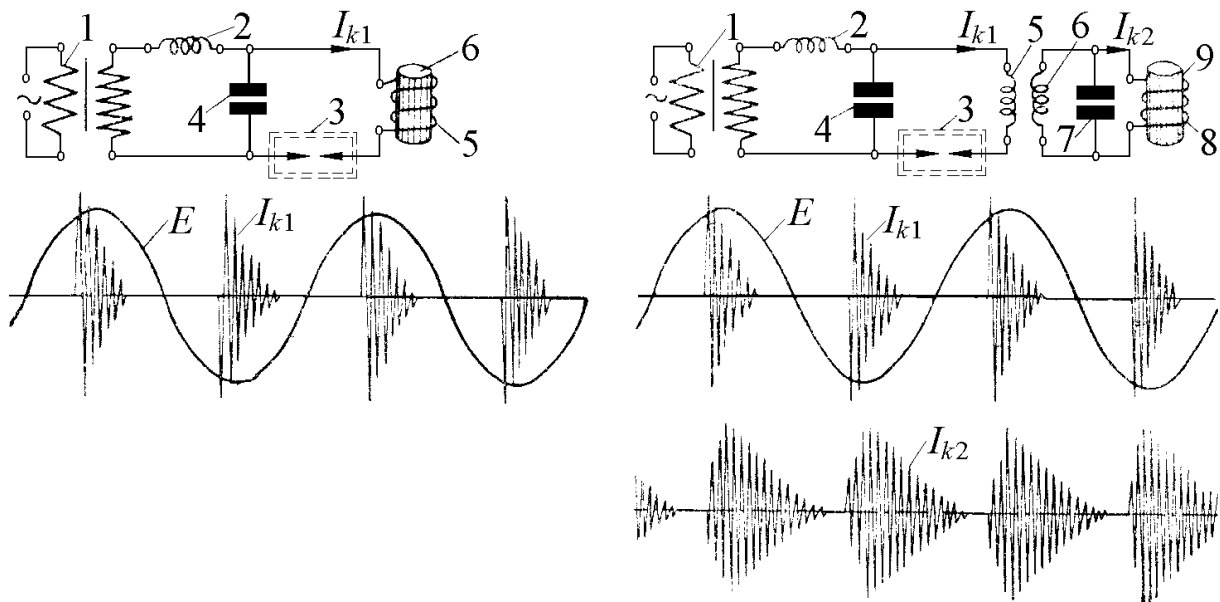
6.3. Sześciopulsowy przemiennik częstotliwości

Zasilany z trójfazowej sieci elektroenergetycznej sześciopulsowy przemiennik może dawać różne częstotliwości od 16 2/3 do 150 Hz. Przykładowo łączniki tego przemiennika można tak przełączać, że na wyjściu jest częstotliwość podstawowa $f = 150$ Hz, czyli 3 razy większa od częstotliwości wejściowej f_1 , co jest zobrazowane na rysunku 13 (wg [11]).

Oczywiście z powodu istnienia łączników przebieg jest odkształcony, a jego widmo jest na rysunku 13b, zaś z tabeli 1 widzimy, że 7. i 9. harmoniczne są na tyle duże, że zmieniają rezystancję aż 22%.



Rys. 13. Sześciopulowy przebieg częstotliwości o komutacji wewnętrznej: napięcia wyjściowego o częstotliwości $f = 3f_1$ (a); widmo częstotliwości napięcia wyjściowego (b)



Rys. 14. Generator iskrowy – podstawowy schemat elektryczny: a) jednooczkowy i przebiegi napięcia E i prądu I_{k1} ; b) dwuoczkowy i przebiegi napięcia E i prądów oczkowych I_{k1} , I_{k2}

6.4. Generator iskrowy

Dawniej stosowano generatory iskrowe, które posiadały małą sprawność – mniejszą niż 50%. Rozkład wyższych harmonicznych jest podobny jak opisany powyżej w dwutaktowych falownikach napięcia (rys. 9–12).

Na rysunku 14 znajduje się podstawowy schemat elektryczny generatora iskrowego wg [6] jednooczkowy, dwuoczkowy i przebiegi napięcia E i prądów oczkowych I_{k1} , I_{k2} .

7. WNIOSKI

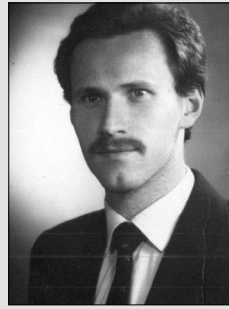
Zjawiska elektryczne występujące we wsadzie nagrzewanym prądami odkształconymi powodują zmianę parametrów układu wzbudnik-wsad. Przetwarzające źródła częstotliwości powodują wzrost R/R_1 do 34% (tab. 1). Największe zmiany R/R_1 nawet 2,5 – krotny wzrost (rys. 12c) wprowadzają źródła częstotliwości przełączające.

Przetwarzające źródła częstotliwości są proste w budowie elektromechanicznej, mniej awaryjne, lecz tylko do częstotliwości kilku kHz, jednocześnie są to ciężkie maszyny elektryczne, często hałaśliwe (choćby z powodu tych częstotliwości pracy). Źródła częstotliwości przełączające mogą być na wielkie częstotliwości, lecz wrażliwe są na przepięcia i przetężenia, a przez to bardziej awaryjne i wiele bardziej skomplikowane w budowie układów elektronicznych sterowania łącznikami i zabezpieczeń.

Literatura

- [1] Cholewicki T.: *Elektrotechnika teoretyczna*. WNT, Warszawa 1967
- [2] Kieroński R.: *Wpływ prądu odkształconego na proces powierzchniowego nagrzewania indukcyjnego w dwutaktowych falownikach napięcia*. *Elektrotechnika i Elektronika (półrocznik AGH)*, t. 24, z. 2, 2005, s. 158–164
- [3] Kurbiel A.: *Indukcyjne urządzenia elektrotermiczne*. Kraków, Wyd. AGH 1992

- [4] Kurbiel A., Kieroński R.: *Dwutyristorowy falownik napięcia do nagrzewania indukcyjnego*. Przegląd Elektrotechniczny, Rok LXIX, 1993, Nr 3
- [5] Liwiński W.: *Nagrzewnice indukcyjne skośne*. Warszawa, WNT 1968
- [6] Łozinskij M.G.: *Hartowanie powierzchniowe i nagrzewanie indukcyjne stali*. Moskwa, Maszgiz 1949
- [7] Okorokow N.B.: *Elektryczne piece topne w metalurgii żelaza*. Moskwa, Metallurgizdat 1945
- [8] Pasternak J., Kieroński R.: *Prąd odkształcony w dwulącznikowym falowniku napięcia do powierzchniowego nagrzewania indukcyjnego*. Materiały V Sympozjum nt.: „Symulacja, pomiary i diagnostyka w elektrotermii”, Hołny Mejera 25–28.09.1996, Politechnika Białostocka
- [9] Pasternak J., Kieroński R.: *Wpływ prądu odkształconego na proces powierzchniowego nagrzewania indukcyjnego*. Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, t. 2, z. 2, listopad 1996, 61–69
- [10] Sajdak C., Samek E.: *Nagrzewanie indukcyjne*. Katowice, Wyd. Śląsk 1985
- [11] Tunia H., Winiarski B.: *Podstawy energoelektroniki*. Warszawa, WNT 1987



Wpłynęło: 9.09.2008

Roman KIEROŃSKI

Urodził się 26 maja 1963 roku w Krakowie. Studia na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej ukończył w 1990 roku. Pracę magisterską wykonywał z zakresu elektrotermii. Jest doktorem 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