Seria: ELEKTRYKA z. 177

Nr kol. 1501

Lesław GOŁĘBIOWSKI¹⁾ Jerzy LEWICKI²⁾, Witold POSIEWAŁA³⁾

WPŁYW NASYCENIA I HISTEREZY NA PRACĘ PROSTOWNIKA 12-PULSOWEGO Z AUTOTRANSFORMATOREM

Streszczenie. Algorytmy symulacyjne stosowane w analizie układów energoelektronicznych zaniedbują zjawiska związane z nasycaniem i histerezą obwodów magnetycznych. W artykule przeprowadzona zostanie analiza pracy układu prostownika 12-pulsowego z autotransformatorem z uwzględnieniem nasycania i histerezy rdzenia autotransformatora i dławików wyrównawczych.

INFLUENCE OF SATURATION AND HYSTERESIS ON 12-PULSE RECTIFIER WITH AUTOTRANSFORMER

Summary. The simulation algorithms used for analyses of power electronic circuits neglect the effects connected with saturation and hysteresis of magnetic circuits. In this paper an analysis of 12-pulse rectifiers with autotransformer will be presented. The simulation model comprises the hysteresis and eddy currents in autotransformer magnetic core and interphase reactors.

Współczesne normy międzynarodowe wymagają, aby urządzenia energoelektroniczne podłą-

Key words: multipulse rectifiers, autotransformers, saturation, hysteresis

1. PROSTOWNIK 12-PULSOWY Z AUTOTRANSFORMATOREM

Rys.1. Prostownik 12-pulsowy z autotransformatorem Fig.1. 12-pulse rectifier with autotransformer

czane do sieci energetycznei minimalizowały swoje negatywne oddziaływanie na sieć. W artykule przeprowadzono analize prostownika 12pulsowego (rys. 1), który dzieki zastosowaniu autotransformatora jest znacznie tańszy i lżejszy. Układy 12pulsowe charakteryzują się współczynnikiem THD w pradach sieciowych równym około 10%. Po zastosowaniu dodatkowych podobwodów można znacznie obniżyć to negatywne oddziaływanie nawet do poziomu 2%. Układ ten, jeżeli zostanie wyposażony w dodatkowe źródło pradu, realizujące aktywną redukcie harmonicznych, pozwala obniżyć zawartość wyższych harmonicznych w prądach sieciowych do poziomu 1%.

¹⁾ Dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska,prof. PRz, 178651330, golebiye@prz.rzeszow.pl

²⁾ Dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, prof. PRz, 178651219

³⁾ Dr inż., Politechnika Rzeszowska, 178651294, wposiew@prz.rzeszow.pl

Zastosowanie modelu liniowego pozwala określić zasadę działania przetwornika oraz wyznaczyć charakterystyczne harmoniczne występujące w prądach obwodowych. Badanie jednak układu w stanach niesymetrii lub w stanach dynamicznych wymaga zastosowania modelu symulacyjnego. Aby przedstawić dokładne (optymalne) zalecenia konstrukcyjne oraz eksploatacyjne konieczne jest badanie układu z uwzględnieniem parametrów obwodów magnetycznych, w tym ich nasycenia. Wyniki przedstawione w niniejszym artykule otrzymano za pomocą modelu symulacyjnego opracowanego przez autorów. Model symulacyjny został zweryfikowany pomiarami wykonanymi na modelu laboratoryjnym.

2. WPŁYW NASYCANIA SIĘ DŁAWIKÓW WYRÓWNAWCZYCH

Dławiki wyrównawcze zastosowane w układzie prostownika mają za zadanie wyrównywać prądy płynące z prostowników mostkowych [1, 4]. Skuteczność wyrównywania tych prądów zależy od reluktancji obwodu magnetycznego dławików.



 $n_d i_{g1} - n_d i_{d1} = R_{\mu d} \varphi_d \ .$

Prady mostków moga sie różnić od siebie, a ich różnica zależy od reluktancji dławików. Skutkiem niewyrównania pradów ia1, id1 jest pojawienie się w prądach mostków trzeciej harmonicznej. Na rys. 2 przedstawiono przebieg prądów obciążających autotransformator przy nasycaniu się obwodu magnetycznego dławików wyrównawczych. Przy dużej reluktancji lub przy nasyceniu następuje częściowe przejmowanie przewodzenia zaworów pochodzących z różnych mostków. Jest ono zależne od chwilowej wartości napiecia wyjściowego z autotransformatora. Jeżeli dławiki nasycają sie, to w widmie prądu sieciowego można odnaleźć harmoniczne 5, 7, 17 i 19, które w

układzie z nienasyconymi (idealnymi) dławikami są eliminowane. Napięcie na uzwojeniach dławików to napięcie wyrównawcze. Spadek napięcia magnetycznego w rdzeniach dławików powoduje obciążanie mostków prądem magnesującym rdzenie dławików. Trzecia harmoniczna tego prądu zaznaczona jest na rys. 2. Ze względu na to, że napięcie indukujące się w uzwojeniach dławików



Rys. 3. a) Zmiana kąta przewodzenia zaworów w funkcji prądu obciążenia, b) charakterystyka zewnętrzna Fig. 3. a) Variation of valve conduction angle with load current, b) load curve

wyrównawczych w przybliżeniu nie jest zależne od prądu obciążenia, spadek napięcia magnetycznego w rdzeniach dławików wyrównawczych nie zależy od obciążenia prostownika. Wraz ze zmniejszeniem się prądu obciążenia w prądzie obciążającym mostki zaczyna dominować trzecia

(1)

harmoniczna prądu magnesującego rdzenie dławików wyrównawczych. Jeżeli połowa prądu obciążenia jest większa od wartości szczytowej prądu magnesującego, to kąt przewodzenia diod wynosi 120°. Przy mniejszych wartościach prądu obciążenia następuje stopniowe zmniejszenie kąta przewodzenia diod (rys. 3a). Przy obniżeniu prądu obciążenia do stanu jałowego napięcie wyrównawcze spada do zera, a kąt przewodzenia zaworów wynosi 60°. Zmniejszenie kąta przewodzenia powoduje podwyższenie składowej zmiennej oraz stałej napięcia odbiornika. Należy się więc liczyć z tym, że przy obciążeniach zbliżonych do jałowego napięcie odbiornika może być wyższe nawet o 20% od napięcia odbiornika przy obciążeniu znamionowym. Pokazuje to charakterystyka zewnętrzna przedstawiona na rys. 3b.

3. NASYCANIE SIĘ RDZENIA AUTOTRANSFORMATORA - ZJAWISKO NIERÓWNOMIERNEGO OBCIĄŻANIA UKŁADÓW MOSTKOWYCH

Jeśli dławiki nasycają się (lub są bez nasycenia, ale z dużą reluktancją), można dodatkowo zauważyć zjawisko nierównomiernego obciążania układów mostkowych. Po pominięciu indukcyjności rozproszenia uzwojenia trójkąta autotransformatora ale z uwzględnieniem jego rezystancji można otrzymać zależność napięć wyjściowych autotransformatora od prądu płynącego przez uzwojenie trójkąta:

$$u_{a1} = u_{c} + \frac{n_{2}}{n_{1}} u_{AB} - R_{n1} \frac{n_{2}}{n_{1}} i_{AB}; \qquad u_{a2} = u_{c} + \frac{n_{2}}{n_{1}} u_{AB} + R_{n1} \frac{n_{2}}{n_{1}} i_{AB},$$
(2)

gdzie: Rn1 - rezystancja uzwojeń trójkąta, uc - napięcie fazy C,

uAB - napięcie przewodowe (pomiędzy fazą A i B).

$$n_1 n_2 = \sqrt{3} t_g (\pi/12)$$
 - dla zapewnienia wymaganego przesunięcia fazowego napięć wyjścio-

wych z autotransformatorem względem napięć zasilających o kąt $\pi/12$

Jeżeli uwzględnimy - zgodnie z prawem Ampère'a - w przebiegu prądu trójkąta wpływ spadku napięcia magnetycznego w kolumnie autotransformatora:

$$i_{AB} = \frac{1}{n_1} \left[u_m + n_2 (i_{a1} - i_{a2}) + R_{\mu a} \phi_a \right],$$
(3)

gdzie: u_m - napięcie magnetyczne pomiędzy punktami gwiazdowymi jarzm autotransformatora, R_{ua} - reluktancja kolumny autotransformatora,

to w przebiegu prądu trójkąta można zauważyć wyraźnie zarysowany przebieg strumienia płynącego w rdzeniu, w kolumnie, na której nawinięte jest to uzwojenie (rys. 4a). Porównując przebieg prądu trójkąta oraz zależności (2), można zauważyć, że spadek napięcia na rezystancji trójkąta wpływa na zwiększenie napięcia wyjściowego z autotransformatora zasilającego mostek M1.



Rys. 4. a) Prąd uzwojenia trójkąta i spadek napięcia magnetycznego, b) napięcia wyjściowe z atotransformatora u_{s1}, u_{s2} oraz prąd uzwojenia trójkąta

Fig. 4. a) Triangle winding current and magnetic voltage, b) autotransformer output voltages ua1, ua2 and triangle winding current

Dla napięć wyjściowych z autotransformatora zasilających mostek drugi wpływ spadku napięcia na rezystancji jest odwrotny. Stad wynika niesymetryczne zasilanie obu mostków i w konsekwencji nierównomierne obciążanie się tych mostków. Zjawisko zwiekszania lub zmniejszania napieć uat. u_{a2} (wzór (2)) występuje w zakresie maksymalnych wartości napieć zasilających mostki M1 i M2 i dlatego bardzo wpływa na ich pracę. Człony 1/n1(um+Ruada) prądu trójkąta, pojawiające się w pobliżu maksymalnych wartości napieć ua1, ua2 (co widać na rys. 4b), wydatnie wpływają na napiecja ua1, ua2. Decydujące znaczenie ma tu przebieg prądu trójkąta w poblizu np. czasu t=0.98 s. Na rys. 5a przedstawiono prądy wyjściowe autotransformatora, w których widoczna jest wyraźna różnica amplitud spowodowana różnicą napięć ∆u z rys. 4b. Na rys. 5b przedstawiono zależność różnicy wartości skutecznych prądów z obu grup mostków od wartości rezystancji uzwojenia trójkąta i reluktancji obwodu magnetycznego. Można zauważyć więc, że zarówno rezystancja trójkąta Rnt. jak też reluktancja kolumn autotransformatora R $_{\mu}$ wpływają niekorzystnie na prace rozpatrywanego układu, ponieważ powodują nierównomierne obciążanie obu mostków. Niezależnie od obu tych wielkości ogromny wpływ na stopień równomiernego obciążania mostków ma reluktancja obwodów magnetycznych dławików. W przypadku idealnym, gdy reluktancja dławików jest zerowa, zjawisko nierównomiernego obciążania się mostków nie wystąpi.



Rys. 5. a) Prądy wyjściowe autotransformatora i_{a1}, i_{a2} z różnicą amplitud, b) procentowa zależność różnicy wartości skutecznych, R_{n1} - rezystancja gałęzi trójkąta, R_µ - reluktancja kolumny autotransformatora

Fig. 5. a) Autotransformer output currents i_{a1}, i_{a2} with unbalance of amplitudes, b) expended differences of RMS values in 0/0, R_{n1} – resistance of triangle limb, R_µ - magnetic reluctance of autotransformer column

W rzeczywistych jednak obwodach dławiki charakteryzuje nieliniowa reluktancja. Należy zwrócić uwagę, że nierówne napięcia wyjściowe z autotransformatora powodują dodatkowo nasycanie się obwodów magnetycznych dławików, a tym samym pogłębiają nieskuteczność wyrównywania prądów mostkowych przez dławiki. Podczas projektowania dławików napięcie wyrównawcze, będące podstawą do obliczeń parametrów dławików [4], jest obliczane przy założeniu równych amplitud napięć wyjściowych z układów mostkowych.

4. ELIMINACJA ZJAWISKA NIERÓWNOMIERNEGO OBCIĄŻANIA SIĘ MOSTKÓW

Wpływ członu u_m+R_{µa} ϕ_a w równaniu (3) powodującego nierównomierne obciążanie się mostków można zredukować przez wstawienie w tym równaniu dodatkowego przepływu n_ki_k. W wyrażeniu tym i_k to prąd dodatkowego, korekcyjnego uzwojenia o liczbie zwojów n_k, nawiniętego na rdzeniu autotransformatora. Uzwojenia takie muszą być umieszczone na każdej kolumnie autotransformatora. Równanie (3) będzie wówczas miało postać:

$$i_{AB} = \frac{1}{n_1} \left(u_m + n_2 (i_{a1} - i_{a2}) + R_{\mu a} \phi_a + n_k i_k \right)$$
(4)

Przepływ nkik powinien być taki, aby minimalizował wyrażenie:

 $u_m + R_{\mu a} \phi_a + n_k i_k = \min .$

236

(5)



Na podstawie wykresu wskazowego prądów, napięć i strumieni dla 1 harmonicznej można zaproponować schemat zmodyfikowanego układu uzwojeń, który pokazuje rys. 6. Pomijając składową napięcia *um pochodzącą od trzeciej harmonicznej* można podać przybliżoną zależność na liczbę zwojów uzwojenia kompensującego:

$$n_{k} = \frac{1.2R_{\mu a}}{\omega n_{1z} I_{dN}} \left(1 - 0.2 \frac{a_{1} - 1}{a_{i}} \right),$$
(6)

gdzie:

n_{1z} - liczba zwojów na 1 V, I_{dN} - prad znamionowy odbiornika,

Rua - reluktancja kolumny zewnętrznej,

 a) - stosunek długości kolumny zewnetrznej do środkowej.

Z tak dobraną liczbą zwojów uzwojenia kompensującego przeprowadzono obliczenia w warunkach jak poprzednio (wówczas uzyskano prądy zasilające mostki jak na rys. 5a). Prądy zasilające mostki w obwodzie z uzwojeniami kompensującymi przedsta-

Rys. 6. Układ uzwojeń kompensujących Fig. 6. The circuit of compensating windings

wia rys. 7. Widać na nim wyraźną poprawę obciążania się mostków. Wartość reluktancji, którą należy zastosować w zależności (6), można wyznaczyć przez aproksymację liniową charakterystyki magnesowania rdzenia autotransformatora. Wadą układu z dodatkowymi uzwojeniami kompensującymi jest wpływ na ich pracę kolejności faz napięć zasilających.

5. WPŁYW HISTEREZY

Dokonano obliczeń obwodu prostownika z uwzględnieniem histerezy. Do obliczeń wzięto pod uwagę trzy przypadki z różną szerokością pętli. Zachowano jednakowe indukcje nasycenia oraz nachylenia pierwotnych charakterystyk magnesowania. Na wykresach z rys. 8 H1, H2, H3 oznaczają odpowiednio wąską, średnią i szeroką pętlę histerezy. Wykresy te przedstawiają histerezowe straty mocy czynnej w dławikach wyrównawczych i autotransformatorze. Rdzeń autotransformatora ma znacznie większe gabaryty niż rdzenie dławików wyrównawczych. Podczas projektowania autotransformatora zakłada się, że wartość maksymalna indukcji ma się znajdować blisko kolana charakterystyki magnesowania - w przypadku dławików wyrównawczych maksymalną indukcje ustala się znacznie niżej (około 2 razy mniejszą). Wydawać by się więc mogło, że straty mocy na



Rys. 7. Prądy zasilające mostek w układzie z uzwojeniami kompensującymi

Fig. 7. Bridge supply currents in circuit with compensation windings histereze w autotransformatorze powinny być większe. Jednak ze względu na to, że częstotliwość strumienia w autotransformatorze jest trzykrotnie mniejsza niż częstotliwość strumieni w dławikach wyrównawczych, straty mocy okazuja sie mniejsze (porównaj rys. 8a i 8b). Przedstawione na rys. 8 straty mocy na histerezę charakteryzują prostownik o mocy 1.86 kW, stąd sumaryczny udział procentowy strat w przypadku najszerszej pętli jest na poziomie 2% mocy odbiornika. Petla histerezy powoduje pojawienie się 3 harmonicznej w prądach wyjściowych z autotransformatora oraz 5 i 7 harmonicznej w pradzie sieciowym, ale jej wpływ na pojawienie się tych harmonicznych jest znacznie mniejszy niż nasycanie się obwodów magnetycznych.



Rys.8. Straty mocy na histerezę: a) w dławikach wyrównawczych b) w autotransformatorze Fig.8. Hysteresis losses: a) in interphase reactors b) in autotransformer

WPŁYW NASYCENIA I PĘTLI HISTEREZY NA PRACĘ UKŁADÓW Z DODATKOWĄ REDUKCJĄ HARMONICZNYCH

Układ z aktywną redukcją harmonicznych (rys. 9a) wyposażony jest w dodatkowe źródło prądu piłokształtnego dołączone do obwodu prostownika przez sprzężenie magnetyczne realizowane na dławikach wyrównawczych. Zostało to opisane w pracach [3, 4].



Rys. 9. Prostownik z redukcją harmonicznych: a) z dodatkowym źródłem J_x , b) z dodatkowym rezystorem Fig. 9. Rectifier with harmonic reduction: a) with additional source J_x , b) with additional resistor

Na rys. 9b pokazany jest układ uproszczonej redukcji harmonicznych, w którym źródło prądowe zastąpione jest rezystorem.

To	hol	0	4
l d	Dei	id.	- 1

Zestawienie wyników symulacji układów z redukcją harmonicznych			
	Układ ze źródłem prądu J _x	Układ z rezystorem R _x	
Charakterystyka obwodów magnetycznych	THD w prądzie sieciowym	THD w prądzie sieciowym	
Głęboko nasycający się rdzeń autotrans- formatora, dławiki o dużej reluktancji i szerokiej pętli histerezy	4.38%	7.2%	
Po dodaniu uzwojeń kompensujących	3.42%	5.69%	
Bez kompensacji lepsze rdzenie dławików	3.6%	5.67%	
Bez kompensacji mniejsze nasycanie rdzenia autotransformatora	1.56%	2.56%	

Układ z rezystorem przy zastosowaniu liniowego, bezreluktancyjnego modelu prostownika działa tak samo jak układ ze źródłem prądu. Pozwala obniżyć zawartość wyższych harmonicznych w prądzie sieciowym do poziomu 2%. Wyniki analizy układów z redukcją harmonicznych zestawione są w tabeli 1. Pokazują one, że większą czułością na nasycanie się obwodów magnetycznych charakteryzuje się układ z dodatkowym rezystorem. Zmieniając szerokość pętli histerezy stwierdzono, że:

- zmiana szerokości pętli histerezy autotransformatora dla układu ze źródłem sterowanym nie powoduje istotnej zmiany jakości redukcji harmonicznych,
- nieco większy wpływ ma zmiana szerokości pętli histerezy dławików wyrównawczych, przy czym większy wpływ zanotowano dla układu z rezystorem (THD zmieniło się od 2.05% do 2.43%),
- zmiana szerokości pętli histerezy dławików spowodowała dodatkowo powiększenie około 15% mocy dodatkowego źródła prądu.

7. WNIOSKI

Uwzglednienie parametrów magnetycznych, w tym nasycenia i histerezy wybranego układu przekształtnikowego, ujawniło zjawiska, które znacznie wpływają na jego pracę. Nasycanie się dławików wyrównawczych prowadzi do obciążenia mostków prądem magnesującym, który przy małych obciążeniach powoduje zmiane kata przewodzenia zaworów, co odzwierciedla sie także znacznym 20% wzrostem napięcia odbiornika. Należy to uwzględnić podczas projektowania obciążenia. Nasycanie się autotransformatora wywołuje zjawisko nierównomiernego obciążania się mostków. Należy zaznaczyć, że niesymetria obciążania się mostków powoduje dodatkowe podmagnesowanie rdzeni dławików pogłebiając nieskuteczność dławików. Powiększanie pola przekroju dławików wyrównawczych oraz stosowanie blach o dobrych parametrach magnetycznych powoduje jednak podwyższenie kosztów prostownika. Problem nierównomiernego obciażania sie mostów diodowych można zmniejszyć przez zastosowanie do nazwajania uzwojeń trójkąta drutu nazwajania o wiekszej średnicy. Wiąże się to jednak z koniecznością stosowania rdzeni o większym, niż wymagane ze względów obciążeniowych polu okna rdzenia autotransformatora. Zmniejszenie rezystancji uzwojenia trójkąta można uzyskać także poprzez takie rozmieszczenie uzwojeń autotransformatora, aby długość zastosowanego drutu dla uzwojeń trójkąta była jak najmniejsza. Taki sposób prowadzenia uzwojeń wymaga, aby uzwojenie trójkata znajdowało się jak najbliżej kolumny rdzenia. Uzwojenia gwiazd będą wówczas oddzielone od kolumny tym uzwojeniem. Spowoduje to powiększenie ich indukcyjności rozproszeń. Wzrost indukcyjności rozproszeń uzwojeń gwiazdy ma pozytywny wpływ na obniżenie zawartości harmonicznych w prądzie sieciowym. Zastosowanie uzwojeń kompensujących pozwala na wyeliminowanie zjawiska nierównomiernego obciążania się mostków, przy czym koszt tych uzwojeń jest niewielki. Uzwojenia spełniają swoją rolę w największym stopniu przy obciażeniu znamionowym prostownika. Największy wpływ na pracę układów z redukcją harmonicznych ma nasycanie się rdzenia autotransformatora. Większą czułością na to zjawisko wykazał się układ z rezystorem w układzie redukcji harmonicznych. Układ z aktywną redukcją harmonicznych po uwzględnieniu histerezy pracuje poprawnie. Uwzględnienie histerezy powoduje jednak zwiększenie mocy źródła prądu piłokształtnego.

LITERATURA

- 1. Derek A.: Paice, Power Electronic Converter Harmonic, IEEE Pres 1996.
- Gołębiowski L., Posiewała W.: Układ prostownikowy 12-pulsowy. IV Konferencja Awaryjność i diagnostyka w energetyce, Solina "JAWOR', 1998, s. 63-73.
- 3.Posiewała W.: Analiza układu prostownika 12-pulsowego z aktywną redukcją harmonicznych, IV ZKwE Poznań-Kiekrz, 1999.
- 4. Posiewała W.: Układy prostowników wielopulsowych o małej zawartości wyższych harmonicznych zasilane z autotransformatorów – Rozpr. doktorska, Instytut elektrotechniki, 2000, 1-179.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Władysław Paszek

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 2001 r.

Abstract

In this paper there are presented the results of a numerical model developed to Illustrate the effects of saturation and hysteresis in the transformer magnetic core of a 12-pulse rectifier. System of a 12-pulse rectifier with an autotransformer is characterized by low costs of realization. The core required for the autotransformer construction corresponds to that of the transformer with the output power smaller by 82 %. The autotransformer supplying the 12-pulse rectifier is shown in Fig. 1. The 12 pulse system are characterized by THD factor of 10% in line currents, In the system with active harmonic reduction described in [4] the THD factor can be reduced (at negligible loss of circuit performance) to a 2% level. It is important to answer the following question: How much would line current spectrum change if nonlinearity of magnetization characteristic of the autotransformer core were considered?

In paragraph 2 the influence of saturation of the interphase reactors is presented. The saturation of the reactor magnetic core causes large variations of the valve conduction angle. For low load current values the conduction angle decreases from 120 degrees to 60 degrees. (see Fig. 3a). These variations also cause a rise in the load voltage (Fig. 3b.). This can be dangerous for the load. When the magnetic core of an interphase reactor is saturated the 5th, 7th, 17th and 19th harmonics can be found in the line currents.

In the next paragraph the influence of saturation of the autotransformer magnetic core is determined. The autotransformer magnetic core saturation produces the unbalance of autotransformer output currents (Fig. 5a.). This unbalance is also connected with the value of a triangle limb resistance (see Fig. 5b). Therefore the autotransformer winding size should be designed so as to minimize this resistance. The unbalance of the autotransformer output currents increases the saturation of the interphase reactors. An arrangement of additional windings eliminating this unprofitable occurrence is proposed. The efficiency of these windings is presented in Fig. 7. The number of turns of compensating windings is specified by expression (6). The parameters of this expression can be calculated by linear approximation of the autotransformer core magnetization characteristic.

The influence of hysteresis is presented in paragraph 5. In Fig. 8 the evaluated losses are shown. A simulation was performed for three widths of the hysteresis loop. Fig. 8a presents the hysteresis losses in the interphase reactors, whereas Fig. 8b shows the hysteresis losses of the autotransformer magnetic cores. The hysteresis losses in interphase reactors are higher. The hysteresis also produces the third harmonic in autotransformer output currents and 5th and 7th harmonics in the converter line currents, but their influence is less significant than that of saturation.

The systems with harmonic reduction is presented in Fig. 9. The circuit in Fig. 9a. is a system of active harmonic reduction obtains of with current source, whereas in Fig. 9b a simplified system of harmonic reduction is presented. These systems have been described in [4]. The simulations results are grouped in Table 1. The THD factors are stored for both harmonic reduction systems. Detailed studies of the influence of saturation and hysteresis of the both systems show that the most sensitive is the system with simplified harmonic reduction.

The simulation model used for conducting the analyses has been verified by experimental examinations. The tests concerrning the magnetic core saturation influence have been performed in a static and dynamic states.