

Ryszard NAWROWSKI\*  
Zbigniew STEIN\*  
Maria ZIELIŃSKA\*

## HARMONICZNE W PRĄDZIE ZASILAJĄCYM WYBRANE URZĄDZENIA MAŁEJ MOCY I ICH WPŁYW NA STRATY MOCY

W referacie przedstawiono, przy wykorzystaniu programu Mcad, zagadnienia wyższych harmonicznych prądów występujących w obwodach elektrycznych małej mocy i ich wpływ na straty mocy w przewodach. Charakterystykę przedstawiono ze względu na odbiorniki różnych klas oraz z uwzględnieniem różnego rodzaju klas sieci. Przeprowadzono analizę wyżej wymienionych prądów harmonicznych.

SŁOWA KLUCZOWE: kompatybilność elektromagnetyczna w obwodach elektrycznych, harmoniczne w prądach i napięciach

### 1. WPROWADZENIE

Coraz większym problemem w sieciach elektroenergetycznych są harmoniczne w prądach i napięciach. Przyczyną tych harmonicznych są w większości przypadków urządzenia energoelektroniczne. Dopuszczalne największe wartości tych harmonicznych są określone w obowiązujących przepisach czyli normach i zarządzeniach. Aktualnie w przepisach największe znaczenie mają harmoniczne w napięciu, które należą do parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej. Zwykle od wartości harmonicznych w napięciu zależą natężenia prądów poszczególnych harmonicznych. Szczególnym przykładem są harmoniczne w napięciach, które w obwodach z kondensatorami wymuszają niekiedy natężenia prądów o wartościach wpływających w znaczący sposób na działanie instalacji elektrycznej. Kondensatory są tym szczególnym przypadkiem, w którym im wyższy jest rząd harmonicznej tym natężenie prądu, ze względu na malejącą wartość reaktancji, może osiągać duże wartości. W wielu przypadkach, dla ograniczenia prądów w obwodach z kondensatorami, konieczne jest włączanie specjalnych dławików. Wg obowiązujących przepisów wartości napięć poszczególnych harmonicznych są ograniczone, niezależnie od

---

\* Politechnika Poznańska.

tę, że ogranicza się kompleksową zawartość wszystkich harmonicznym, wprowadzając pojęcie tzw. współczynnika THD. Wartość tego współczynnika jest określana dla poszczególnych klas odbiorców. Dla odbiorców klasy 1 wartość tego współczynnika nie może przekraczać 5%, dla odbiorców klasy 2 wartości 8% natomiast dla odbiorców klasy 3 10%, przy czym równocześnie nie mogą być przekroczone dopuszczalne wartości napięć dla poszczególnych harmonicznym.

## 2. CHARAKTERYSTYKA ZAGADNIENIA DOTYCZĄCA HARMONICZNYCH DLA ODBIORNIKÓW RÓŻNYCH KLAS

W sieciach elektroenergetycznych dostawca energii jest zobowiązany zapewnić wymaganą przez przepisy wartość  $THD_u$  oraz wartość napięć poszczególnych harmonicznym. Inaczej jest traktowana, wymagana przez przepisy, wartość harmonicznym prądu. W obwodach mniejszych mocy, producent urządzeń czy odbiorników, jest zobowiązany dostarczać takie wyposażenie, które nie będzie wymuszało prądów poszczególnych harmonicznym o wartościach większych niż dopuszczają przepisy. W odniesieniu do odbiorników, w których fazowy prąd odbiornika jest mniejszy lub równy 16 A, w przepisach są podane maksymalne wartości prądów poszczególnych harmonicznym. Równocześnie w przepisach podano, że harmoniczne  $< 0,6\%$  prądu zasilającego lub  $< 5$  mA są pomijalne. Ze względu na harmoniczne prądu rozróżnia się odbiorniki w 4 klasach A, B, C oraz D. Do odbiorników klasy A zalicza się symetryczne odbiorniki trójfazowe i wszystkie z wyjątkiem należących do klas B, C oraz D. Do klasy B zalicza się narzędzia przenośne, do klasy C zawiera się sprzęt oświetleniowy, natomiast do klasy D wlicza się sprzęt, w którym kształt przebiegu czasowego prądu jest specyficzny, a odbiornik pobiera moc nie większą od 600 W.

Dla sprzętu klasy A, dla poszczególnych harmonicznym prądu, obowiązują następujące wartości maksymalne:

- dla harmonicznym 3 dopuszczalna wartość prądu harmonicznym to 2,3 A,
- dla harmonicznym 5 dopuszczalna wartość prądu harmonicznym to 1,14 A,
- dla harmonicznym 7 dopuszczalna wartość prądu harmonicznym to 0,77 A,
- dla harmonicznym 9 dopuszczalna wartość prądu harmonicznym to 0,40 A,
- dla harmonicznym 11 dopuszczalna wartość prądu harmonicznym to 0,33 A,
- dla harmonicznym 13 dopuszczalna wartość prądu harmonicznym to 0,21 A,
- dla harmonicznym od 15 do 39 dopuszczalną wartość prądu harmonicznym określa się wg wzoru  $0.15 \cdot 15/n$  A.

Dla harmonicznym parzystych obowiązują wartości prądów harmonicznym:

- dla harmonicznym 2 wartość 1,08 A,
- dla harmonicznym 4 wartość 0,43 A,

- dla harmonicznej 6 wartość 0,30 A,
- dla harmonicznych od 8 do 40 dopuszczalną wartość prądu harmonicznej określa się wg wzoru  $0,23 \cdot 8/n$  A.

Dla sprzętu klasy B, dla poszczególnych harmonicznych prądu, obowiązują wartości maksymalne jak dla sprzętu klasy A, ze współczynnikiem 1,5. Dla sprzętu klasy C, dla poszczególnych harmonicznych prądu, obowiązują wartości maksymalne określone w % stosunku prądu dopuszczalnego dla danej harmonicznej do harmonicznej pierwszej. Wartość tego stosunku dla harmonicznej drugiej wynosi 2. Dla harmonicznej 3 wartość dopuszczalną określa się jako iloczyn 30 razy  $\lambda$ , gdzie  $\lambda$  jest współczynnikiem mocy obwodu. Dla harmonicznej 5 wartość dopuszczalna to 10%, dla harmonicznej 7 wartość dopuszczalna to 7%, dla harmonicznej 9 to 5%, dla pozostałych harmonicznych do 39, ale tylko nieparzystych, wartość dopuszczalna to 3%. W tabeli 1, dla sprzętu klasy D, podano wartości maksymalne dla poszczególnych harmonicznych prądu.

Tabela 1. Wartości maksymalne dla poszczególnych harmonicznych prądu dla sprzętu klasy D

Rząd harmonicznych	Maksymalne dopuszczalne wartości prądów poszczególnych harmonicznych w przeliczenia na [W]	Maksymalne dopuszczalne wartości prądu harmonicznych [A]
3	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,4
11	0,35	0,33
$13 \leq n \leq 39$ (tylko nieparzyste)	$3,85/n$	$0,15 \cdot 15/n$

### 3. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA DLA ODBIORNIKÓW RÓŻNEJ KLASY

W przypadku sprzętu klasy A, uwzględniając tylko harmoniczne znaczące o wartościach podanych w tabeli 1, natężenie prądu w przewodzie zasilającym określa zależność (1):

$$I_A = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_2^2 + I_4^2 + I_6^2} \quad (1)$$

przy największych wartościach poszczególnych harmonicznych, otrzyma się:  
 $I_1 = 16$ ,  $I_3 = 2,3$ ,  $I_5 = 1,14$ ,  $I_7 = 0,77$ ,  $I_9 = 0,4$ ,  $I_{11} = 0,33$ ,  $I_{13} = 0,21$ ,  $I_2 = 1,08$ ,  
 $I_4 = 0,43$ ,  $I_6 = 0,3$ .

$$I_A = 16,277.$$

Stratę mocy  $\Delta P$  dla tej wartości prądu można obliczyć przyjmując umowną wartość rezystancji odcinka linii R oraz jako prąd znamionowy, wartość określoną w umowie o dostawie energii elektrycznej czyli 16 A. Prąd w przewodzie to prąd znamionowy plus prądy harmoniczných, czyli razem 16,277A. Strata mocy dla sprzętu klasy A to umowna wartość rezystancji, czyli strata mocy  $\Delta P_A = R \cdot 265$  W.

W przypadku sprzętu klasy B, uwzględniając tylko harmoniczne znaczące o wartościach podanych w tabeli 1, przy współczynniku 1.5 jak dla klasy A, natężenie prądu w przewodzie zasilającym będzie miało wartość  $I_B = 24,4$  A. Strata mocy na umownej rezystancji R będzie miała wartość  $\Delta P_B = R \cdot 595$  W.

Dla sprzętu klasy C uwzględniając harmoniczne do rzędu 9 o wartościach podanych w tabeli 1, natężenie prądu w przewodzie zasilającym będzie miało wartość:

$$I_C = \sqrt{1,0^2 + 2^2 + (0,30 \cdot 0,8)^2 + 0,1^2 + 0,07^2 + 0,05^2 + 0,03^2}$$

$$I_C = 2,253 \cdot I_n$$

$$I_C = 36 \text{ [A]}$$

Strata mocy na umownej rezystancji R sprzętu klasy C wynosi:

$$\Delta P_C = R \cdot 1296 \text{ [W]}$$

Dla sprzętu klasy D uwzględniając harmoniczne do rzędu 11 o wartościach podanych w tabeli 1, natężenie prądu w przewodzie zasilającym będzie miało wartość:

$$I_D = \sqrt{16^2 + 2,3^2 + 1,14^2 + 0,77^2 + 0,4^2 + 0,33^2 + 0,21^2}$$

$$I_D = 16,23 \text{ [A]}$$

natomiast strata mocy wynosi:

$$\Delta P_D = R \cdot 264 \text{ [W]}$$

Porównując wartości strat mocy dla wszystkich czterech przypadków odbiorników klas A, B, C oraz D otrzymuje się:

$$\Delta P_A = R \cdot 265 \text{ [W]}$$

$$\Delta P_B = R \cdot 593 \text{ [W]}$$

$$\Delta P_C = R \cdot 36 \text{ [W]}$$

$$\Delta P_D = R \cdot 264 \text{ [W]}$$

Łatwo zauważyć, że największa wartość strat mocy w przewodzie zasilającym wszystkie cztery klasy odbiorników spowodowana prądami wyższych harmoniczných występuje w przypadku odbiorników klasy B, obejmującej narzędzia przenośne, dla których dopuszcza się najwyższe wartości harmoniczných prądu.

#### 4. ZAGADNIENIA HARMONICZNYCH ZE WZGLĘDU NA KLASY SIECI

Źródłami wyższych harmoniczných prądów są odbiorniki o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej lub innego rodzaju odbiorniki. Wśród występujących w systemie energetycznym źródeł harmoniczných prądów można wyróżnić:

- urządzenia elektroniczne i energoelektroniczne,
- urządzenia z rdzeniami magnetycznymi, np. transformatory,
- urządzenia łukowe.

Od napięcia w sieci zależy czy np. transformatory są znaczącymi źródłami harmoniczných. Przy wzrostach napięć transformatory mogą być znaczącymi źródłami harmoniczných prądu.

Dla przykładu podano wartości poszczególných harmoniczných występujących w transformatorze podczas spawania:

$$I_1 = 20, I_3 = 12, I_5 = 4, I_7 = 0,7, I_9 = 0,6, I_{11} = 0,33, I_{13} = 0,11, I_2 = 7,98, I_4 = 5,3, I_6 = 2,7.$$

Natężenie prądu w przewodzie oblicza się wg. wzoru (2):

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_2^2 + I_4^2 + I_6^2} \quad (2)$$

Obliczona wartość prądu to 25,7 A.

Aktualnie istotnymi źródłami harmoniczných są wyładowcze źródła światła. Jakkolwiek pojedyncze źródło nie stanowi dla sieci istotnego zaburzenia, to jednak znaczne ilości tych źródeł, są dla sieci istotnym zagrożeniem. Największym jednak zagrożeniem dla sieci, jeśli chodzi o wyższe harmoniczne prądów są przekształtniki, charakteryzujące się dużymi wartościami THD. Jako źródeł wyższych harmoniczných nie można pomijać sprzętu czy urządzeń informacyjnych a także takich urządzeń jak telewizory. Wpływ tych urządzeń na sieć zasilającą jest szczególnie widoczny podczas wieczornego szczytu obciążenia. Duża liczba tych urządzeń ma istotne znaczenie dla harmoniczných prądów w sieci. Wiele odbiorników energii elektrycznej toleruje wyższe harmoniczne prądów, jednak zawsze należy zwracać uwagę na ich szkodliwe skutki. Szczególnie dotyczy to urządzeń sterujących i pomiarowych. Ze względu na harmoniczne prądów często pojawiają komplikacje przy eksploatacji baterii kondensatorów stosowanych do poprawy współczynnika mocy, przy czym należy pamiętać że od wypadkowego prądu w przewodzie zależą straty mocy. Kondensatory są zwykle tak projektowane, że wytrzymują (cieplnie) prądy o wartościach 1,3 lub 1,5 razy większych od prądów znamionowych. Oczywiście im większą wartość prądu kondensatory wytrzymują tym ich cena jest wyższa.

Dla przykładu podano wartości harmoniczných w prądach dopływających do kondensatora załączonego do trójfazowej sieci niskiego napięcia w układzie

trójprzewodowym. Przyjęto, że dla kompensacji mocy biernej pojemność kondensatora na fazę przy połączeniu w gwiazdę wynosi  $C = 52 \mu\text{F}$ .

Przedstawiono natężenia prądów dla dwóch klas sieci, dla każdej z klas obowiązują inne wartości dopuszczalnych wartości napięć harmonicznnych.

Dla sieci klasy 2 dopuszczalne procentowe napięcia harmonicznnych wynoszą: dla harmonicznej 5 dopuszczalna wartość napięcia to 6%, dla harmonicznej 7 wartość napięcia to 5%, dla harmonicznej 11 to 3,5%, dla harmonicznej 13 to 3%, dla harmonicznej 17 to 2%. Podanym wartościom procentowym odpowiadają wartości napięć, które wymuszają prądy harmoniczne: harmonicznej piątej to 13,87 V, harmonicznej 7 to 11,56 V, harmonicznej 11 to 8,09 V, harmonicznej 13 to 6,94 V oraz harmonicznej 17 to 4,62 V. Te wartości napięć wymuszają następujące prądy harmoniczne:

- harmonicznej pierwszej, wymuszanej przez napięcie o wartości znamionowej, to 3,77 A,
- harmonicznej piątej wymuszanej przez napięcie o wartości 13,87 V, to 1,13 A,
- harmonicznej siódmej wymuszanej przez napięcie 11,56 V, to 1,32 A,
- harmonicznej jedenastej wymuszanej przez napięcie 8,09 V, to 1,45 V,
- harmonicznej trzynastej wymuszanej przez napięcie 6,94 V, to 1,47 A
- harmonicznej siedemnastej wymuszanej przez napięcie 4,62 V, to 1,28 A.

Wartość skuteczna prądu  $I = 4,81 \text{ A}$ .

Stosunek znamionowego prądu kondensatora wynoszącego 3,77 A do natężenia prądu dopływającego do baterii wynosi  $4,81/3,77 = 1,27 < 1,3$ . Wskaźnik 1,3 informuje, że kondensator wytrzyma przepływ harmonicznnych o obliczonych wartościach. Z powyższego wynika, że kondensator może pracować w sieci bez dodatkowego zabezpieczenia.

Dla sieci klasy 3 dopuszczalne procentowe napięcia harmonicznnych wynoszą: dla harmonicznej 5 dopuszczalna wartość napięcia to 8%, dla harmonicznej 7 wartość napięcia to 7%, dla harmonicznej 11 to 5%, dla harmonicznej 13 to 4,5%, dla harmonicznej 17 to 4%. Podanym wartościom procentowym odpowiadają wartości napięć które wymuszają prądy: harmonicznej piątej to 18,5 V, harmonicznej 7 to 16,18 V, harmonicznej 11 to 11,56 V, harmonicznej 13 to 10,4 V oraz harmonicznej 17 to 9,25 V. Te wartości napięć wymuszają prądy harmoniczne:

- harmonicznej pierwszej, wymuszanej przez napięcie o wartości znamionowej, to 3,77 A,
- harmonicznej piątej wymuszanej przez napięcie o wartości 18,5 V, to 1,51 A,
- harmonicznej siódmej wymuszanej przez napięcie 16,18V, to 1,85 A,
- harmonicznej jedenastej wymuszanej przez napięcie 11,56 V, to 2,08 A,
- harmonicznej trzynastej wymuszanej przez napięcie 10,4 V, to 2,21 A
- harmonicznej siedemnastej wymuszanej przez napięcie 9,25 V, to 2,57 A.

Wartość skuteczna prądu  $I = 5,98$  A.

Stosunek natężenia prądu dopływającego do baterii (5,98) do znamionowego prądu kondensatora (3,77) wynosi  $5,98/3,77 = 1,58 > 1,3$ . Wskaźnik  $1,58 > 1,3$  informuje, że kondensator nie wytrzyma przepływu prądów harmonicznym o obliczonych wartościach. Z powyższego wynika, że kondensator nie może pracować w sieci bez dodatkowego zabezpieczenia, czyli np. dodatkowego dławika. Warunków pracy kondensatora w sieci klasy 1 nie trzeba sprawdzać, bo skoro dla klasy 1 dopuszczalne wartości harmonicznym są niższe niż dla klasy 2 to kondensator spełni warunki wyznaczone przez przepisy.

## 5. WNIOSKI

Z przeprowadzonej dyskusji wynika, że obliczanie spadków napięć bardzo komplikują wyższe harmoniczne w prądach. Problem ten jest jeszcze bardziej złożony, gdy trzeba uwzględniać współpracę wielu różnych odbiorników nieliniowych. Zwykle zagadnienie spadków napięć upraszcza się obliczając je jak w zwykłym obwodzie bez harmonicznym.

## LITERATURA

- [1] Polskie Normy. PN-EN 61000-3-2 Kompatybilność Elektromagnetyczna. Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznym prądu. (Fazowy prąd zasilający odbiornika  $< 16$  A.
- [2] Stein Z., Zielińska M.: Zagadnienia kompetencji mocy biernej pobieranej z sieci elektroenergetycznej przez trójfazowe silniki indukcyjne z uwzględnieniem harmonicznym w napięciu. Materiały X Konferencji ZKwE, Poznań – Kiekrz 2005.
- [3] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy, z dnia 20 grudnia 2004 w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznej, ruch i eksploatacja tych sieci.

## HARMONIC COMPONENTS OF THE SUPPLY CURRENT OF SELECTED LOW-POWER DEVICES AND THEIR EFFECT ON THE POWER LOSSES

The paper presents the problem of higher harmonic components of the currents flowing in low power electric circuits and their impact on the power losses arising in the conductors. The problem is solved with the help of the Mcad software. The characteristics is presented with regard to various classes of the receivers and with consideration of various classes of the networks. Analysis of the above mentioned harmonic currents has been carried out.

*(Received: 8. 02. 2016, revised: 29. 02. 2016)*