

Andrzej KSIAŹKIEWICZ*
Marcin RACŁAW**

DOBÓR PRZEKROJU PRZEWODÓW OBCIĄŻONYCH PRĄDEM ZAWIERAJĄCYM WYŻSZE HARMONICZNE

W wyniku przekształcenia funkcji poprzez transformatę Fouriera uzyskuje się widmo prążkowe analizowanego sygnału z podziałem na poszczególne harmoniczne. Korzystając z metody składowych symetrycznych można wykazać, że poszczególne harmoniczne odpowiadają składowym zgodnym, przeciwnym i zerowym. Występowanie składowych odpowiadających składowym zerowym jest najbardziej niebezpieczne, ponieważ harmoniczne te sumują się w przewodzie neutralnym instalacji elektrycznej. W artykule przedstawiono sposób doboru przewodów z uwzględnieniem wyższych harmonicznych, wyniki pomiarów prądu pobieranego przez zasilacz komputerowy, a także zaprezentowano działanie arkusza kalkulacyjnego, pozwalającego na dobór przekroju przewodów w zależności od parametrów zasilanego obwodu.

SŁOWA KLUCZOWE: wyższe harmoniczne, dobór przekroju przewodów, przekształcenie Fouriera

1. SZEREG FOURIERA

W elektrotechnice najczęściej wykorzystywanym sygnałem do opisu zjawisk zachodzących w obwodach elektrycznych jest sygnał sinusoidalny. Najczęściej jednak, ze względu na nieliniowy charakter obwodów odbiorczych, pobierany prąd z sieci zostaje odkształcony od pierwotnej sinusoidy. Z tego względu zachodzi potrzeba wykorzystania aparatu matematycznego pozwalającego na analizę niesinusoidalnych wymuszeń i odpowiedzi. W tym celu stosowane jest przekształcenie Fouriera, pozwalające na opis funkcji niesinusoidalnej za pomocą szeregu funkcji sinus i cosinus.

Każdą funkcję okresową, spełniającą warunki Dirichleta można przedstawić za pomocą wzoru [1]:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} F_k \sin(k\omega_1 t + \psi_k) \quad (1)$$

Z kolei harmoniczną rzędu k można zapisać jako:

* Politechnika Poznańska.

** Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Oddział w Poznaniu.

$$F_k \sin(k\omega_1 t + \psi_k) = F_k (\sin k\omega_1 t \cos \psi_k + \cos k\omega_1 t \sin \psi_k)$$

Oznaczając:

$$A_k = F_k \sin \psi_k$$

$$B_k = F_k \cos \psi_k$$

Równanie (1) przybiera postać:

$$f_n(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos k\omega_1 t + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k\omega_1 t \quad (2)$$

gdzie: k – rząd harmonicznej ($k + 1, 2, 3, \dots$), F_k – współczynnik szeregu trygonometrycznego Fouriera, interpretacja fizyczna: amplituda harmonicznej rzędu k , $a_0/2$ – składowa stała, składowa szeregu niezależna od argumentu $\omega_1 t$, $F_1 \sin(k\omega_1 t + \psi_k)$ – podstawowa harmoniczna (pierwsza harmoniczna), $F_k \sin(k\omega_1 t + \psi_k)$ – harmoniczna rzędu k (wyższe harmoniczne), ψ_k – faza początkowa k -tej harmonicznej.

Ponadto, wśród funkcji okresowych, można wyróżnić trzy typy symetrii:

- symetrię względem osi odciętych OX,
- symetrię względem osi rzędnych OY,
- symetrię względem początku układu współrzędnych (0,0).

Korzystając z tablic matematycznych łatwo odczytać właściwości poszczególnych funkcji. W przypadku funkcji symetrycznej względem osi OX zachodzi równość:

$$f(x) = -f(x + \pi) \quad (3)$$

Dlatego funkcja (2) przybiera postać:

$$f(x) = F_1 \sin(x + \psi_1) + F_3 \sin(x + \psi_3) + F_5 \sin(x + \psi_5) + \dots \quad (4)$$

Funkcję spełniającą warunek (3) nazywa się funkcją antysymetryczną. W rozkładzie takiej funkcji w szereg Fouriera pojawią się wyłącznie składowe harmoniczne nieparzyste. Generowanie przebiegów opisanych wzorem (4) jest dość typowym zjawiskiem dla obwodów nieliniowych.

Z kolei w przypadku funkcji symetrycznej względem osi OY prawdziwa będzie równość:

$$f(x) = f(-x) \quad (5)$$

Wówczas funkcję (2) można zapisać jako:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos k\omega_1 t \quad (6)$$

Funkcję spełniającą równanie (5) nazywa się funkcją parzystą. Oznacza to, że rozkładzie trygonometrycznym Fouriera wystąpią wyłącznie czynniki zawierające funkcję cosinus.

Natomiast funkcję spełniającą warunek:

$$f(x) = -f(-x) \quad (7)$$

nazywa się funkcją niesymetryczną. W takim przypadku wzór (2) można przedstawić jako:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k\omega_1 \quad (8)$$

Oznacza to, że szereg Fouriera będzie składał się wyłącznie z czynników zawierających funkcję sinus.

2. ANALIZA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA SYGNAŁU

Istotą przedstawienia widma amplitudowego jest analiza zmiany amplitudy w zależności od częstotliwości badanej harmonicznej danego sygnału [1]. Sygnały elektryczne można zatem analizować w dwóch dziedzinach:

- w dziedzinie czasu,
- w dziedzinie częstotliwości.

Pierwsza pozwala na uzyskanie funkcji opisującej wartości poszczególnych parametrów obwodu, druga zaś pozwala na wyznaczenie funkcji określającej, jaka moc przypada na daną częstotliwość oraz jak zmienia się kąt fazowy przy zmianie częstotliwości. Aby wyznaczyć funkcję, pozwalającą na analizę częstotliwościową funkcji, określonej w dziedzinie czasu, należy skorzystać z zależności:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (9)$$

Przy czym funkcja $f(t)$ musi spełniać warunki dostateczne rozwinięcia jej w szereg Fouriera.

Korzystając z przekształceń matematycznych można zauważyć, że w przypadku dyskretnych zmian kąta ω funkcja $F(j\omega)$ również będzie przyjmować wartości dyskretne. Uzyskana w ten sposób charakterystyka będzie stanowiła widmo prążkowe, nazywane też widmem dyskretnym.

3. DOBÓR PRZEKROJU PRZEWODU Z UWZGLĘDNIENIEM UDZIAŁU WYŻSZYCH HARMONICZNYCH

3.1. Procedura doboru przekroju przewodu

Istotnym zagadnieniem w procedurze doboru przewodów jest ich długotrwała obciążalność prądowa. Chcąc wyznaczyć prąd roboczy w obwodzie jednofazowym należy skorzystać z zależności:

$$I_B = \frac{P_N}{U_f \cos \varphi} \quad (10)$$

gdzie: I_B – wartość prądu obliczeniowego, P_N – wartość mocy obwodu jednofazowego zapotrzebowanej po uwzględnieniu współczynnika jednoczesności, U_f – wartość napięcia fazowego, $\cos\varphi$ – współczynnik mocy.

W obwodzie trójfazowym prąd roboczy wyznacza się ze wzoru:

$$I_B = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos\varphi} \quad (11)$$

gdzie: I_B – wartość prądu obliczeniowego, P_N – wartość mocy obwodu trójfazowego zapotrzebowanej po uwzględnieniu współczynnika jednoczesności, U_f – wartość napięcia sieci, $\cos\varphi$ – współczynnik mocy.

Kluczowe jest, aby prąd I_B obwodu jednofazowego spełniał zależność:

$$I_B \leq I_{DD} \quad (12)$$

gdzie: I_B – wartość prądu obliczeniowego, I_{DD} – wartość prądu dopuszczalnego długotrwale, podana w katalogu producenta przewodów.

Należy zwrócić uwagę, że w obecnych instalacjach elektrycznych znaczną część odbiorów stanowią odbiory nieliniowe. Jako przykład można wymienić lampy fluorescencyjne, ładowarki urządzeń elektronicznych, zasilacze komputerowe itd. Ze względu na swą nieliniowość odbiorniki te pobierają odkształcony prąd z sieci, co przyczynia się do generowania przez nie harmonicznych. Szczególnie niebezpieczna jest tu trzecia harmoniczna i jej wielokrotność.

Korzystając z metody składowych symetrycznych można wykazać, że składowe zgodne oraz przeciwne będą się wzajemnie znosić, zaś składowe zerowe dodają się. Tym samym zjawisko dodawania się harmonicznych odpowiadających składowym zerowym będzie zachodziło w przewodzie neutralnym. Oznacza to, że w układzie trójfazowym, nawet pomimo zachowanej symetrii obciążeń, w przewodzie neutralnym popłynie prąd będący sumą algebraiczną trzeciej harmonicznej oraz jej wielokrotności.

Przepływ prądu przez przewód neutralny, będzie powodował jego dodatkowe nagrzewanie się. Może to doprowadzić do przekroczenia dopuszczalnej temperatury pracy przewodu, a w skrajnych wypadkach może nawet skutkować zapłonem izolacji. Dlatego w przypadku, gdy zawartość harmonicznych odpowiadających składowym zerowym w prądzie jest znaczna, konieczne jest uwzględnienie ich podczas procedury doboru przewodów. W tym celu wprowadza się współczynnik THD (ang. *Total Harmonic Distortion*):

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_k^2}}{I_1} \quad (13)$$

gdzie: I_1 – podstawowa harmoniczna prądu (pierwsza harmoniczna), I_k – harmoniczna prądu rzędu k (wyższe harmoniczne).

Norma PN-IEC 60364-5-523 [2] podaje w charakterze informacyjnym współczynniki zmniejszające dla wyższych harmonicznych dla instalacji odbiorczych 4- i 5-żyłowych o napięciu nie wyższym niż 1 kV. W przypadku, gdy udział trzeciej harmonicznej nie przekracza 15% prądu fazowego, doboru przewodu dokonuje się na podstawie wartości prądu fazowego. Dla udziału 15-33% harmonicznych w prądzie fazowym stosuje się współczynnik korygujący 0,86. Z kolei w przypadku, gdy zawartość trzeciej harmonicznej przekracza 33% prądu fazowego, stosuje się analogiczne współczynniki, jednak doboru dokonuje się na podstawie prądu przewodu neutralnego. W tabeli 3.1 zostały przedstawione współczynniki zmniejszające obciążalność prądową przewodów dla wyższych harmonicznych w instalacjach 4- i 5-żyłowych [2]. Dodatkowo, w przypadku, gdy spodziewane są wartości 9-tej i 12-tej harmonicznej powyżej 10% należy stosować niższe współczynniki zmniejszające.

Tabela 3.1. Współczynniki zmniejszające obciążalność prądową przewodów dla wyższych harmonicznych w instalacjach 4- i 5-żyłowych

Udział trzeciej harmonicznej w prądzie fazowym %	Współczynnik zmniejszający k	
	Dobór przekroju żył przewodu na podstawie wartości prądu fazowego	Dobór przekroju przewodu na podstawie wartości prądu przewodu neutralnego
0-15	1,00	-
15-33	0,86	-
33-45	-	0,86
>45	-	1,00

Procedura doboru przewodu ze względu na obciążalność prądową będzie wyglądać następująco:

1. Określenie prądu roboczego I_B .
2. Zweryfikowanie czy udział trzeciej harmonicznej w prądzie fazowym nie przekroczy 33% i określenie czy dobór będzie odbywał się na podstawie przewodu neutralnego czy fazowego?
3. Wybór współczynnika zmniejszającego.
4. Obliczenie prądu roboczego I_B' po uwzględnieniu współczynnika korygującego k (wzory (14), (15), (16))
5. Zweryfikowanie czy spodziewane wartości 9-tej i 12-tej harmonicznej przekraczają 10%?
6. W razie konieczności obliczenie prądu I_B'' z wykorzystaniem niższego współczynnika korygującego.

Dobór przewodu na podstawie obciążalności wskazanej w katalogu producenta, z uwzględnieniem współczynników korygujących:

$$I'_B = \frac{I_B}{k} \quad (14)$$

lub

$$I_N = 3I_B \frac{I_{3h\%}}{100} \quad (15)$$

$$I'_B = \frac{I_N}{k} \quad (16)$$

gdzie: k – współczynnik zmniejszający wybrany z tabeli 3.1, I_N – wartość prądu przewodu neutralnego, $I_{3h\%}$ – procentowa zawartość prądu trzeciej harmonicznej w prądzie fazowym.

3.2. Procedura doboru przekroju przewodu obciążonego

Dla zilustrowania powyższych rozważań przedstawione zostaną cztery przypadki praktycznego doboru przewodów, w przypadku, gdy wartości 9-tej i 12-tej harmonicznej nie przekraczają 10% (tj. uwzględniany jest wyłącznie współczynnik korygujący z tabeli 3.1).

Dany jest obwód trójfazowy, instalacja wykonana jest sposobem B2 (przewody wielożyłowe ułożone w kanałach izolacyjnych na ścianie). Prąd roboczy I_B obwodu wynosi 25 A, zaś zawartość trzeciej harmonicznej w prądzie fazowym wynosi 30%. Należy zatem dokonać doboru przewodów na podstawie przewodu fazowego i zastosować współczynnik korygujący 0,86. Korzystając ze wzoru (14) otrzymujemy:

$$I'_B = \frac{25}{0,86} = 29 \text{ [A]}$$

Oznacza to, że dla prowadzenia przewodów sposobem B2 należy dobrać przewód o przekroju 6 mm^2 , mimo, że dla prądu roboczego o wartości 25 A w warunkach pracy bez udziału harmonicznych odpowiedni przekrój to 4 mm^2 .

W przypadku, gdy zawartość harmonicznych w prądzie fazowym wynosić będzie 40%, dobór przewodów należy wykonać na podstawie przewodu neutralnego. Zastosowanie będą miały wzory (15) oraz (16):

$$I_N = 3 \cdot 25 \cdot \frac{40}{100} = 33,75 \text{ [A]}$$

$$I'_B = \frac{33,75}{0,86} \approx 39,24 \text{ [A]}$$

Korzystając zatem z tabeli obciążalności prądowej długotrwałej zawartej w PN-IEC 60364-5-523 [2], przekrój przewodu dla prądu $I_B = 25 \text{ A}$ dla sposobu B2 wynosiłby 4 mm^2 , zaś po uwzględnieniu zawartości trzeciej harmonicznej w prądzie fazowym prąd $I'_B = 39,24 \text{ A}$. Należy zatem dobrać przewód o przekroju 10 mm^2 .

Następnym rozpatrywanym przypadkiem będzie przykład, gdzie zawartość trzeciej harmonicznej w prądzie fazowy wynosi 70%. Podobnie jak w powyższym przypadku dobór przewodu odbywać się będzie na podstawie przekroju przewodu neutralnego. Zastosowanie jednak będzie miał tylko wzór (15), ponieważ współczynnik korekcyjny k , dla obwodów, w których prąd trzeciej harmonicznej stanowi więcej niż 45% jest równy jedności:

$$I_N = 3 \cdot 25 \cdot \frac{70}{100} = 52,4 \text{ [A]}$$

Oznacza to, że pomimo obliczonego prądu roboczego $I_B = 25\text{A}$, wartość prądu przewodu neutralnego I_N wyniesie aż 52,5 A. Tym samym, dobierając przekrój przewodu konieczne będzie zastosowanie przewodów o przekroju 16 mm². Oznacza to, że należy dobrać przewód o przekroju aż 3 rzędy większym niż dokonano by tego wyłącznie na podstawie obciążenia przewodu fazowego.

4. WYNIKI POMIARÓW PRĄDU POBIERANEGO PRZEZ ZASILACZ KOMPUTEROWY

4.1. Opis badania

Badana jednostka PC została wyposażona w zasilacz o mocy 400 W. Cała procedura została podzielona na dwie części:

- badanie komputera bez obciążenia procesora,
- badanie komputera przy 100% obciążeniu procesora.

W obydwu częściach badane były parametry zasilania jednostki, a także harmoniczne prądu. Obciążenie procesora uzyskano za pomocą programu OCCT 4.4.0 [3] z wykorzystaniem metody Large Data Set. Podczas pomiarów mierzone były prąd przewodu neutralnego oraz napięcie fazowe. Do badania wykorzystano:

- oscyloskop cyfrowy GWINSTEK GDS-3154,
- sondę napięciową GWINSTEK GDP-100,
- sondę prądową Chauvin Arnoux E3N.

4.2. Badanie komputera bez obciążenia

Badanie to zostało przeprowadzone przy uruchomionym wyłącznie systemie operacyjnym. Badanie to miało stanowić punkt odniesienia w dalszych analizach prądu pobieranego przez odbiornik. W tabeli 4.1 zestawiono parametry zasilania badanej jednostki. Z kolei tabela 4.2 ukazuje zestawienie harmonicznych prądu zasilającego badany komputer. Parzyste harmoniczne oraz harmoniczne powyżej 29. zostały pominięte ze względu na ich nikły udział. Warty zaznaczenia jest tu udział trzeciej harmonicznej i jej krotności. Udział trzeciej harmonicznej w prądzie fazowym stanowi aż 72% prądu, zaś dziewiątej 12%.

Tabela 4.1. Zestawienie parametrów zasilania badanego komputera bez obciążenia

U_{RMS}	I_{RMS}	P	Q	S	f	$\cos\varphi$	ϕ	kk_U	kk_I	THD _I
[V]	[mA]	[W]	[var]	[VA]	[Hz]	[-]	[°]	[-]	[-]	[%]
231	285	49.9	43.7	66.1	50.01	0.75	138	1.38	2.52	86.7

Tabela 4.2. Zestawienie harmonicznych prądu zasilającego jednostkę PC bez obciążenia

Rząd harmonicznej	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
Amplituda harmonicznej [%]	99	72	39	20	12	5	5	4	3	4	1	3	2	2	3

4.3. Badanie komputera pod obciążeniem

Analogiczne badanie zostało wykonane dla jednostki pracującej ze 100% obciążeniem procesora. Tabela 4.3. zestawiono parametry zasilania badanej jednostki pod obciążeniem.

Tabela 4.3. Zestawienie parametrów zasilania badanego komputera pod obciążeniem

U_{RMS}	I_{RMS}	P	Q	S	f	$\cos\varphi$	ϕ	kk_U	kk_I	THD _I
[V]	[mA]	[W]	[var]	[VA]	[Hz]	[-]	[°]	[-]	[-]	[%]
231	400	70	91	57	50.01	0.78	141	1.38	2.41	80.7

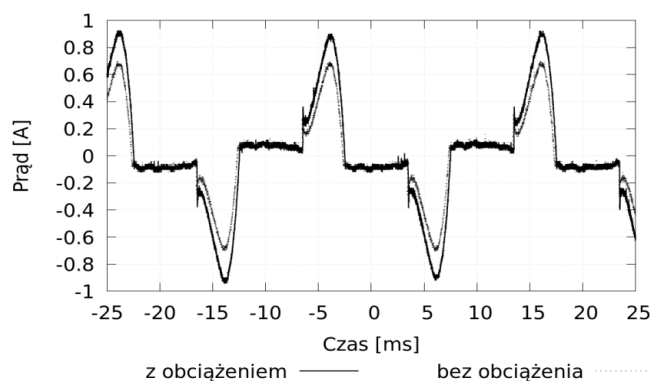
Należy zauważyć, że obciążenie zasilacza większą mocą powoduje poprawę współczynnika mocy, współczynnika szczytu prądu oraz współczynnika THD_I. Ma to również swoje bezpośrednie odzwierciedlenie w rozkładzie prądu na poszczególne harmoniczne, który został przedstawiony w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Zestawienie harmonicznych prądu zasilającego jednostkę PC pod obciążeniem

Rząd harmonicznej	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
Wartość harmonicznej [%]	100	70	33	16	11	4	5	2	3	4	1	3	2	2	2

Podobnie jak w pierwszym przypadku parzyste harmoniczne oraz harmoniczne powyżej 29. zostały pominięte ze względu na niski ich udział w prądzie fazowym. Zmniejszenie współczynnika THD I można zauważyć już na podstawie trzeciej i dziewiątej harmonicznej, są one odpowiednio mniejsze o 2 i 1%.

Na rysunku 4.1 przedstawione zostały przebiegi prądu badanego komputera w stanie nieobciążonym i przy obciążeniu procesora. Można zauważyć, że pomimo zwiększenia dopasowania energetycznego zawartość harmonicznych, w szczególności trzeciej i dziewiątej nieznacznie różnią się od stanu niedopasowania (przypadek, gdy komputer pracuje w stanie nieobciążonym).



Rys. 4.1. Przebiegi prądu badanego komputera w stanie nieobciążonym oraz obciążonym

Rozpatrzony zostanie przypadek trzech komputerów pracujących każdy na osobnej fazie o mocy znamionowej $P_N = 400$ W. Chcąc wartość prądu roboczego, należy przyjąć założenia, że uśredniona wartość współczynnika $\cos\varphi$ wynosi około 0,8, zaś wartość mocy wykorzystywana w obliczeniach to moc znamionowa zasilacza. Dlatego na podstawie wzoru 10:

$$I_B = \frac{400}{230 \cdot 0,8} \approx 2,20 \text{ [A]}$$

Biorąc pod uwagę dominującą zawartość trzeciej harmonicznej (powyżej 33%) doboru przewodu należy dokonać na podstawie prądu przewodu neutralnego. Korzystając z wzoru 15 i przyjmując średnią zawartość trzeciej harmonicznej na poziomie około 70%:

$$I_N = 3 \cdot 2,20 \cdot \frac{70}{100} = 4,62 \text{ [A]}$$

Zgodnie z tabelą 3.1 dla prądów odkształconych o zawartości trzeciej harmonicznej nie należy stosować współczynnika zmniejszającego, jednak niezbędnym jest uwzględnienie udziału dziewiątej harmonicznej, której zawartość w prądzie wynosi powyżej 10%. W obliczeniach przyjęto współczynnik zmniej-

szający na poziomie 0,95. Wykorzystując wzór 16 wyznaczono wartość prądu pobieranego przez odbiornik:

$$I'_B = \frac{4,62}{0,95} = 4,86 \text{ [A]}$$

Obliczony prąd roboczy po uwzględnieniu wpływu trzeciej i dziewiątej harmonicznej różni się zatem o 2,66 A, co stanowi różnicę ponad 50% w stosunku do ostatecznej wartości prądu.

W przypadku zasilania jednego komputera różnica jest praktycznie niezauważalna. Dla obydwu prądów wystarczający bowiem byłby przewód 1,5 mm² dla sposobu prowadzenia B2. Zgoła inna sytuacja wystąpi w miejscu, gdzie zasilanych jest wiele jednostek. Rozpatrzony zostanie przypadek biura zasilanego trójfazowo symetrycznie, gdzie odbiory stanowią komputery z zasilaczami o mocy $P_N = 400 \text{ W}$, 10 jednostek na fazę, $\cos\varphi = 0,8$, zawartość trzeciej harmonicznej wynosi 70%, a dziewiątej 10%. Odbiory zatem również są symetryczne. Korzystając z równania (11) wyznaczono prąd fazowy:

$$I_B = \frac{12000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,95} \approx 21,65 \text{ [A]}$$

Następnie, ze względu na wysoką zawartość trzeciej harmonicznej, na podstawie wzoru 15 wyznaczono prąd płynący w przewodzie neutralnym:

$$I_N = 3 \cdot 21,65 \cdot \frac{70}{100} \approx 45,47 \text{ [A]}$$

Uwzględniając obecność dziewiątej harmonicznej na poziomie 10% z równania 16 prąd odbiornika uległ dalszemu zwiększeniu:

$$I'_B = \frac{45,47}{0,95} \approx 47,86 \text{ [A]}$$

W rezultacie korzystając z tablic zawartych w normie [2], dla sposobu prowadzenia przewodów B2, dobierając przewód na podstawie prądu roboczego I_B należałoby zastosować przewód o przekroju 4 mm². Z kolei po uwzględnieniu wpływu trzeciej harmonicznej przekrój przewodu wyniósłby 10 mm², zaś z uwzględnieniem wpływu 9-tej harmonicznej koniecznym byłoby zastosowanie przewodu o przekroju 16 mm².

5. AUTORSKI ARKUSZ DOBORU PRZEWODÓW

Na podstawie powyższych rozważań stworzony został arkusz kalkulacyjny (rys. 5.1) pozwalający na dobór przewodów z uwzględnieniem wpływu harmonicznych w prądzie fazowym.

Program pozwala na edycję pierwszych ośmiu pól określających rodzaj odbiornika. Użytkownik może wybrać napięcie znamionowe obwodu (230 V lub 400 V), sposób prowadzenia przewodów (A1, A2, B1, B2, C, D), a także wpisać

pozostałe parametry charakteryzujące obwód odbiorczy. W przypadku wpisania nieprawidłowej wartości użytkownik zostanie poinformowany o błędzie. Następnie program na podstawie obliczeń oraz tabeli obciążalności długotrwałej przewodów (opracowanej na podstawie normy [2]) przedstawia propozycję doboru przewodów bez uwzględnienia harmonicznych, z uwzględnieniem wpływu trzeciej harmonicznej oraz z uwzględnieniem wpływu 9-tej i 12-tej harmonicznej.

P_N	U_f	$\cos \varphi$	$I_{3h\%}$	$I_{9h\%}$	$I_{12h\%}$	k	Sposób prowadzenia przewodów	I_B	I'_B	I''_B	Zaproponowany przekrój przewodu na podstawie I_B	Zaproponowany przekrój przewodu na podstawie I'_B	Zaproponowany przekrój przewodu na podstawie I''_B
[W]	[V]	[-]	[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[A]	[A]	[A]	[mm ²]	[mm ²]	[mm ²]
12000	400	0,8	70	11	0	0,95	B2	21,65	45,47	47,86	2,5	6	10

Rys. 5.1. Widok arkusza doboru przewodów opracowanego przez autora

Zastosowane oznaczenia:

P_N – moc znamionowa obwodu, U – napięcie, $\cos \varphi$ – współczynnik mocy, $I_{3h\%}$ – procentowa zawartość prądu trzeciej harmonicznej w prądzie fazowym, $I_{9h\%}$ – procentowa zawartość prądu dziewiątej harmonicznej w prądzie fazowym, $I_{12h\%}$ – procentowa zawartość prądu dziesiątej harmonicznej w prądzie fazowym, k – współczynnik zmniejszający, Sposób prowadzenia – sposób prowadzenia przewodów wynikający z normy [2], I_B – prąd roboczy, I'_B – prąd roboczy z uwzględnieniem trzeciej harmonicznej, I''_B – prąd roboczy z uwzględnieniem dziewiątej i dwunastej harmonicznej.

6. PODSUMOWANIE

Dobór przekroju przewodów wymaga uwzględnienia wielu czynników. Jednym z nich jest zawartość harmonicznych w prądzie fazowym. Udział 3-ej harmonicznej może wpłynąć na dobór przewodu o przekroju o jeden rząd wyżej niż sugerowałby prąd roboczy odbioru nieodkształconego, zaś wpływ 9-ej i 12-ej harmonicznej może spowodować konieczność doboru przewodu aż o 2 rzędy wyższego niż miałyby to miejsce w przypadku odbiornika liniowego. Oznacza to, że skutek cieplny spowodowany przepływem harmonicznych nie może być pomijany przy projektowaniu instalacji elektrycznej. Ponadto czynniki takie jak dodatkowe źródła ciepła lub przewody prowadzone równoległe będą powodowały dodatkowe nagrzewanie się przewodów. Doboru należy jednak dokonywać z dużą dozą wyczucia. Wpływ 9-ej i 12-ej harmonicznej w przypadku odbiorów niesymetrycznych może być niwelowany, ze względu na niższe obciążenie pozostałych faz. Projektując instalację należy zachować daleko idącą ostrożność,

aby jednocześnie nie narazić wykonawcy na zbędne koszty, a także zapewnić bezpieczeństwo użytkowania jej.

LITERATURA

- [1] Bolkowski S.: Teoria obwodów elektrycznych. WNT, W-wa 2008.
- [2] PN-IEC 60364-5-523, Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Obciążalność prądowa długotrwała przewodów.
- [3] OCCT 4.4.0, <http://www.pcworld.pl/ftp/pobierz/pc/74198.html> [dostęp: 25.01.2017 r.].

CHOOSING CROSS SECTION OF THE CABLE FOR CURRENTS CONSISTING HIGHER HARMONICS

The result of Fourier transform is a line spectrum of analyzed signal. By using method of symmetrical components it is possible to show that specified harmonics can be presented as positive, negative and zero components. The occurrence of harmonics which refers to zero components is the most dangerous, because they sum in the neutral wire and cause its additional heating. The article presents a method of choosing cross section of the cable, which conducts currents consisting higher harmonics, presents the result of measurements of current in computer power supply and also possibilities of the spreadsheet program that lets select the cross-section of the neutral wire, depending on parameters of supplied appliance.

(Received: 17. 02. 2017, revised: 28. 02. 2017)