

Analiza zawartości wyższych harmonicznych w prądach i napięciach maszyny elektrycznej współpracującej z siecią zasilającą

Krzysztof Ludwinek¹, Arkadiusz Siedlarz²

¹Katedra Maszyn Elektrycznych i Systemów Mechatronicznych, Politechnika Świętokrzyska

²Pilkington Automotive Poland Sp. z o.o.

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę zawartości wyższych harmonicznych w prądach i napięciach fazowych twornika podczas współpracy maszyny synchronicznej z trójfazową siecią zasilania zarejestrowane w komputerowym stanowisku. Dzięki opracowanemu w środowisku LabVIEW programom komputerowym można przeprowadzać analizę wpływu niesymetrii i odkształcenia napięcia zasilania na zawartość i udział wyższych harmonicznych w prądach pobieranych lub oddawanych do sieci przez odbiorniki jedno-, dwu- i trójfazowe. Program pozwala na wizualizację przebiegów czasowych napięć i prądów oraz odpowiadających im mocy chwilowych. Umożliwia wyznaczanie mocy czynnych, biernych, pozornych i pozornych liniowych, odkształceń oraz współczynniki: THD, PWH, IHD, niesymetrii oraz współczynniki mocy $\cos\phi$ i $\text{tg}\phi$, a także umożliwia analizę zarejestrowanych wcześniej przebiegów czasowych napięć i prądów np. za pomocą kart A/C, oscyloskopów, analizatorów itp.

Słowa kluczowe: maszyna synchroniczna, środowisko graficzne, LabVIEW, wyższe harmoniczne, THD, IHD

Wstęp

W związku z uwolnieniem rynku energetycznego w Polsce, wytwórcy i użytkownicy coraz więcej uwagi poświęcają jakości energii elektrycznej i niezawodności zasilania. Niedotrzymanie określonych w przepisach [1] wartości parametrów dostarczanej energii elektrycznej do odbiorców może: powodować zakłócenia pracy odbiorników, być przyczyną poważnych awarii prowadzących do kosztownych przestoju, ograniczać produkcję zakładów w przypadku nieplanowanych wyłączeń, powodować szybsze zużycie maszyn itp. Problem jakości zasilania dotyczy nie tylko odbiorców przemysłowych, lecz również odbiorców indywidualnych. Zjawiska takie jak: migotania światła, utrata danych w komputerach, niewłaściwe zadziałania wyłączników instalacyjnych nadprądowych i urządzeń różnicowoprądowych oraz przegrzewanie się maszyn i urządzeń elektrycznych, to jedynie kilka przykładów świadczących o tym, jak duży jest problem wpływu odkształcenia i niesymetrii napięć zasilania sieci oraz odbiorników nieliniowych na jakość energii elektrycznej. W związku z powyższym na rynku polskim rośnie zapotrzebowanie na specjalistów w zakresie jakości energii. W programach nauczania, uczelnie poświęcają zbyt mało miejsca i czasu na praktyczną edukację studentów w tym zakresie. Dlatego też do celów dydaktycznych w Katedrze Maszyn Elektrycznych i Systemów Mechatronicznych (KMEiSM) Politechniki Świętokrzyskiej stworzono komputerowe stanowiska, za pomocą których, możliwa jest analiza

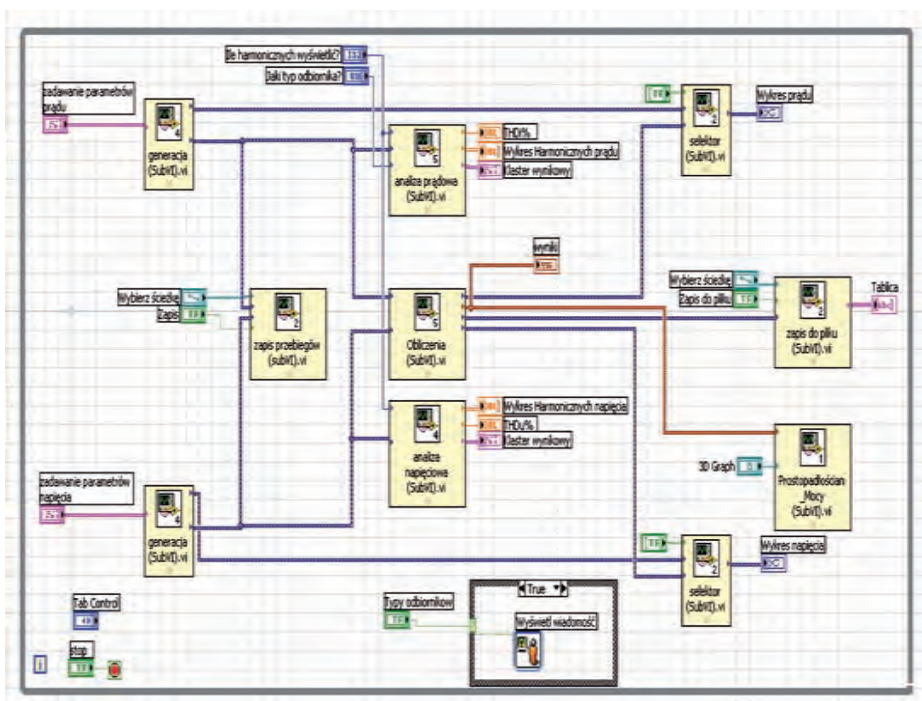
parametrów napięć i prądów wpływających na jakość energii elektrycznej zasilającej zarówno odbiorniki jedno-, dwu- jak i trójfazowe. Możliwa jest wizualizacja przebiegów czasowych napięć, prądów i odpowiadających im mocom oraz możliwe jest przeprowadzenie badań symulacyjnych wpływu niesymetrii i odkształcenia napięć i prądów na jakość energii [8].

Komputerowe stanowisko do analizy zawartości wyższych harmonicznych

W skład komputerowego stanowiska umożliwiającego przeprowadzenie analizy zawartości wyższych harmonicznych w prądach i napięciach zasilających odbiorniki jedno-, dwu- i trójfazowe wchodzi: stanowisko badawcze i opracowane programy komputerowe (przy współpracy w ramach realizacji pracy dyplomowej) [8]. Opracowane programy komputerowe w środowisku graficznym LabVIEW umożliwiają rejestrację oraz przeprowadzenie analizy wpływu niesymetrii i zawartości wyższych harmonicznych napięć i prądów na jakość energii elektrycznej w czasie rzeczywistym lub na podstawie zarejestrowanych wcześniej przebiegów czasowych napięć i prądów. Ponadto ważną zaletą opracowanych programów jest możliwość przeprowadzenia badań symulacyjnych wpływu niesymetrii oraz udziału wyższych harmonicznych na odkształcenie przebiegów czasowych napięć i prądów, na wartości współczynników *THD*, *PWH*, *IHD*, współczynnika mocy, a także umożliwienie obliczenia mocy czynnej, biernej (wynikającej z przesunięcia fazowego między napięciem i prądem), pozornej i pozornej części liniowej. Oprócz badań symulacyjnych i pracy w trybie rzeczywistym, programy umożliwiają również zapisywanie do pliku przebiegów czasowych napięć i prądów w wybranej chwili lub po przekroczeniu ustawionych wartości progowych *THD*, *IHD* i $\cos\phi$. W przypadku badań eksperymentalnych stanowisko badawcze wyposażone jest w zaprojektowane i wykonane w KMEiSM cztery przetworniki do rejestracji przebiegów chwilowych napięć oraz cztery przetworniki do rejestracji przebiegów chwilowych prądów [7].

Symulator wpływu niesymetrii i odkształcenia napięć i prądów na jakość energii elektrycznej

W przypadku pracy komputerowego stanowiska jako symulatora wpływu niesymetrii i odkształcenia napięć i prądów na jakość energii elektrycznej poprzez odpowiednie ustawienie (za pomocą suwaków lub wpisanie wartości z klawiatury) amplitud i faz poszczególnych



Rys. 1. Schemat blokowy programu „Symulator.vi” utworzony w środowisku LabVIEW dla jednej fazy

Fig. 1. Block Diagram of the Simulator.vi application for one phase analysis made in LabVIEW

harmonicznych (w artykule, w celu lepszej widoczności, ograniczono się tylko do 25. harmonicznej) istnieje możliwość kształtowania dowolnego przebiegu czasowego napięć i prądów. Zaletą graficznego środowiska programowego LabVIEW jest proste tworzenie i rozbudowa dowolnego programu (program w LabVIEW tworzony jest w dwóch oknach tj. w oknie Blok Diagram, gdzie tworzony jest schemat blokowy programu oraz w oknie Front Panel gdzie tworzony jest panel użytkownika).

Dzięki pracy programu jako symulatora można dokonać następujących badań symulacyjnych:

- analiza wpływu niesymetrii i zawartości wyższych harmonicznych napięć i prądów na jakość energii elektrycznej zgodnie z polskimi normami [1–3],
- wpływ wartości i fazy napięć i prądów składowych podstawowych i wyższych harmonicznych na kształt przebiegów czasowych trójfazowych napięć i prądów oraz mocy chwilowych,
- w zależności od udziału poszczególnych harmonicznych od zadanych napięć i prądów można obliczyć odpowiadające im moce czynne, bierne, pozorne i odkształceń, zmiany mocy czynnej, biernej, pozornej i odkształceń, jak również współczynniki THD , $PWHD$, IHD , mocy $\cos\phi$ i $tg\phi$.

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy programu graficznego „Symulator.vi” opracowanego w środowisku LabVIEW dla jednej fazy (dla pozostałych faz program jest taki sam).

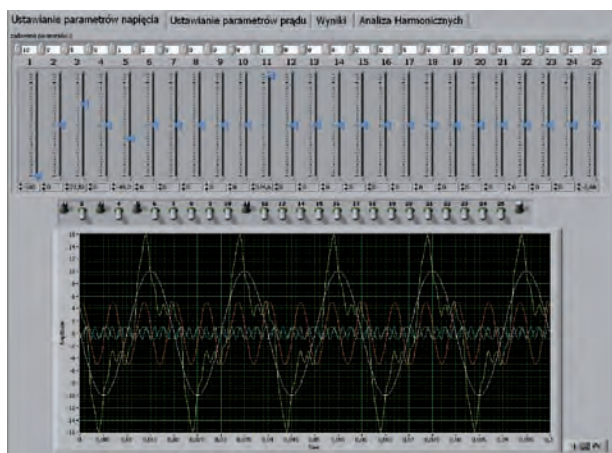
Program składa się z kilku oddzielnych aplikacji pracujących jako podprogramy. Podprogramy te realizują następujące zadania:

- „Generacja.vi” – generuje czasowe przebiegi odkształcone dla zadanych harmonicznych napięć lub prądów,

- „Obliczenia.vi” – dokonuje obliczeń mocy czynnej, biernej, pozornej i odkształceń oraz współczynników: THD , $PWHD$, IHD , niesymetrii napięć i prądów oraz współczynników mocy $\cos\phi$ i $tg\phi$,
- „Analiza prądowa.vi”, „Analiza napięciowa.vi” – na podstawie zadanego przebiegu odkształconego dokonuje analizy zawartości wyższych harmonicznych i dokonuje obliczenia ich udziału w napięciach i prądach obliczając współczynniki THD , $PWHD$, IHD oraz sygnalizuje ewentualne przekroczenie wartości progowych dla wybranej klasy odbiorników,
- „Selektor.vi” – umożliwia wybór wyświetlanych na ekranie panelu użytkownika przebiegów czasowych wyższych harmonicznych napięć i prądów,

- „Prostopadłościan mocy.vi” – przedstawia graficznie wartości mocy czynnej, biernej, pozornej, pozornej części liniowej i odkształceń,
- „Zapis przebiegów.vi”, „Zapis do pliku.vi” – umożliwia zapis przebiegów czasowych wejściowych i obliczonych do pliku, którego ścieżkę dostępu podaje użytkownik programu.

Na rys. 2 przedstawiono „Panel użytkownika”, który posiada cztery zakładki. Pierwsze dwie służą do ustawiania symulowanych odkształconych przebiegów czasowych napięcia i prądu. W tych zakładkach użytkownik może indywidualnie ustawiać wartości amplitudy oraz przesunięcia fazowego każdej wybranej harmonicznej. W panelu tym dodano szereg przełączników, przy czym ostatni z prawej strony umożliwia załączenie lub wyłączenie wypadkowego przebiegu odkształconego wynikającego z sumy przebiegów czasowych poszczególnych



Rys. 2. Widok na panel użytkownika „Symulator.vi”

Fig. 2. Front Panel of the Simulator.vi

harmonicznym odpowiednio dla prądu i napięcia. Wartość fazy i amplitudę danej harmonicznej można zadać z klawiatury lub nastawić je za pomocą suwaków. W przedstawionym na rys. 2 „Panelu użytkownika”, w zakładce „Ustawianie parametrów prądu” widoczne są przebiegi czasowe wyższych harmonicznych prądów z różnymi nastawami faz początkowych i wartościami amplitud. Rys. 2 przedstawia składową podstawową, harmoniczne 3, 5 i 11 oraz przebieg czasowy będący ich sumą. Na podobnej zasadzie pracuje się z zakładką „Ustawianie parametrów napięcia”.

W trzeciej zakładce – „Wyniki” prezentowane są wyniki obliczeń. Podawane są wartości skuteczne napięcia i prądu oraz moce: pozorna – S , moc pozorna części liniowej – $|S|$, czynna – P , bierna – Q i odkształceń – T oraz współczynnik mocy – PF i $tg\phi$. Poszczególne moce oraz współczynniki liczone są dla zadanej ilości harmonicznych (np. 40) z zależności (1)–(8). Korzystając z definicji mocy czynnej jako średniej wartości za okres, moce poszczególnych harmonicznych P_n określa się jako:

$$P_n = U_n I_n \cos \phi_n \quad (1)$$

oraz całkowitą moc czynną, liczoną jako sumę mocy poszczególnych harmonicznych napięcia i prądu rzędu n :

$$P = A_{0i} A_{0u} + \sum_{n=1}^k U_n I_n \cos \phi_n = P_0 + \sum_{n=1}^{50} U_n I_n \cos \phi_n \quad (2)$$

gdzie: U_n, I_n – wartości skuteczne harmonicznych napięcia i prądu, A_{0i}, A_{0u} – składowe stałe napięcia i prądu.

Dla określonego $\cos \phi_n$ można wyznaczyć wartość $\sin \phi_n$ i moce dla poszczególnych harmonicznych powszechnie określane jako moce bierne wynikające z przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem i prądem:

$$Q_n = U_n I_n \sin \phi_n \quad (3)$$

oraz moc bierną całkowitą liczoną jako sumę mocy poszczególnych harmonicznych napięcia i prądu rzędu n :

$$S = U \cdot I = \left(\sum_{n=0}^{50} U_n^2 \sum_{n=0}^{50} I_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

W literaturze [5] stosuje się pojęcie mocy modułowej określonej jako:

$$|S|^2 = P^2 + Q^2 \quad (5)$$

oraz mocy pozornej części liniowej:

$$S = U \cdot I = \left(\sum_{n=0}^{50} U_n^2 \sum_{n=0}^{50} I_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

W przypadku przebiegów odkształconych zależność (6) nie może być stosowana bo daje niepoprawne wyniki. Moce określone zależnościami (5) i (6) nie są sobie równe, a ich różnica została uzupełniona wg teorii Budenau tzw. mocą dystorsji (odkształcenia) i oznaczona przez T . Związek poszczególnych mocy wg teorii Budenau jest określony jako:

$$S^* = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2} \quad (7)$$

Jak wykazano m.in. w [4] wyrażenie (7) budzi wiele kontrowersji. W opracowanych programach występowanie mocy czynnej P_n i biernej Q_n (moc przesunięcia fazowego)

dla poszczególnych harmonicznych wyznacza się oddzielnie na podstawie znajomości wartości harmonicznych prądu i napięcia oraz współczynników $\cos \phi_n$ i $\sin \phi_n$. Współczynnik mocy PF określony jest jako:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{50} U_n \cdot I_n \cdot \cos \phi_n}{U \cdot I} \quad (8)$$

W poszczególnych okienkach zakładki „Wyniki” wyświetlane są wartości skuteczne napięć i prądów, moce czynna, bierna, pozorna i odkształceń, współczynnik mocy przebiegu odkształconego, współczynnik $tg\phi$ oraz wykreślony jest prostopadłościan mocy $P, Q, S, |S|, T$. W zakładce tej możliwy jest również zapis prezentowanych wyników do pliku podanego przez użytkownika.

Zawartość wyższych harmonicznych w prądach i napięciach w podprogramie „Obliczenia.vi” określa się za pomocą współczynników $THD, IHD, PWHd$, które obliczane są następująco [1], [2], [3], [5]:

Całkowita zawartość wyższych harmonicznych THD w prądach i napięciach obliczana jest:

– w odniesieniu do składowej podstawowej prądu lub napięcia:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \quad THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \quad (9)$$

– w odniesieniu do składowej podstawowej znamionowej prądu:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_{N1}} \quad (10)$$

Udział poszczególnych wyższych harmonicznych IHD w prądach i napięciach obliczany jest:

– w odniesieniu do składowej podstawowej prądu lub napięcia:

$$IHD_I = \frac{I_n}{I_1} 100 \quad (11)$$

– w odniesieniu do składowej podstawowej znamionowej prądu:

$$IHD_I = \frac{I_n}{I_{N1}} 100 \quad (12)$$

Częściowa ważona zawartość wyższych harmonicznych $PWHd$ w prądach i napięciach obliczana jest:

– w odniesieniu do składowej podstawowej prądu lub napięcia:

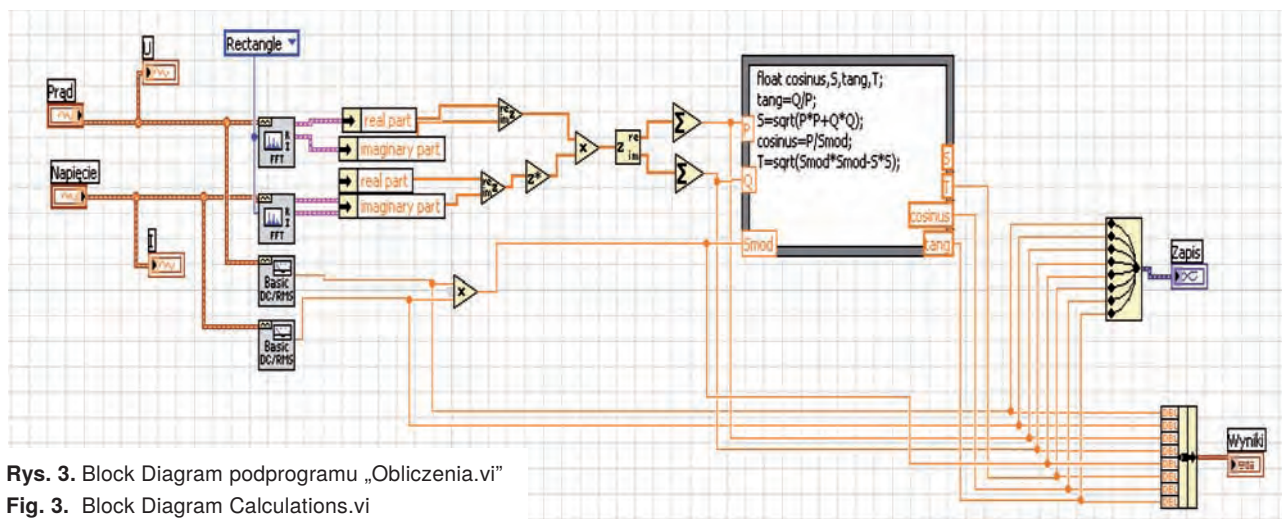
$$PWHd_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=14}^{40} n I_n^2}}{I_1} \quad PWHd_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=14}^{40} n U_n^2}}{U_1} \quad (13)$$

– w odniesieniu do składowej podstawowej znamionowej prądu:

$$PWHd_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=14}^{40} n I_n^2}}{I_{N1}} \quad (14)$$

Na rys. 3 przedstawiony jest Blok Diagram umożliwiający realizację programową zależności (6–8), będący fragmentem opracowanego podprogramu „Obliczenia.vi”.

W zakładce czwartej (rys. 2) – „Analiza Harmonicznych” przeprowadzana jest analiza udziału poszczególnych harmonicznych w przebiegach czasowych napięć i prądów za pomocą współczynników IHD, THD i $PWHd$. Wykresy w postaci



Rys. 3. Block Diagram podprogramu „Obliczenia.vi”

Fig. 3. Block Diagram Calculations.vi

Tab. 1. Dopuszczalna procentowa zawartość poszczególnych harmonicznych w napięciach zasilania wg [3]

Tab. 1. Allowable percentage of the individual harmonic voltages by [3]

Wartości poszczególnych harmonicznych (do 25) napięcia w złączu sieci elektroenergetycznej odbiorcy, wyrażone w procentach U_n					
Nieparzyste harmoniczne				Parzyste harmoniczne	
Nie będące krotnością 3		Będące krotnością 3			
Rząd harmonicznej	Względna wartość napięcia [%]	Rząd harmonicznej	Względna wartość napięcia [%]	Rząd harmonicznej	Względna wartość napięcia [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2	>21	0,2		
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				
>25					

Tab. 2. Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu przez odbiorniki w zależności od jego klasy wg [1]

Tab. 2. Limits for harmonic current emissions for equipment depending on its class by [1]

Rząd harmonicznej	Klasa odbiornika			
	A	B	D	C
	Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznej [A]			Maksymalny dopuszczalny prąd harmonicznej [%]
Harmoniczne nieparzyste				
3	2,30	3,45	2,30	$30\cos\phi$
5	1,10	1,65	1,14	10
7	0,77	1,16	0,77	7
9	0,40	0,6	0,40	5
11	0,33	0,5	0,33	3
13	0,21	0,32	0,17	3
$13 < n \leq 39$	$0,15 \frac{15}{n}$	$0,23 \frac{15}{n}$	$0,23 \frac{8}{n}$	3
Harmoniczne parzyste				
2	1,08	1,62	Nie dotyczy	Nie dotyczy
4	0,43	0,65		
6	0,30	0,45		
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \frac{8}{n}$	$0,35 \frac{8}{n}$		

słupków widoczne na rys. 4 przedstawiają przykładowy rozkład widmowy symulowanych przebiegów odkształconych napięć i prądów w jednej z faz z możliwością wyboru liczby wyświetlanych harmonicznych. Ponadto w zakładce „Analiza Harmonicznych” wyświetlana jest procentowa zawartość każdej harmonicznej w odniesieniu do wartości składowej podstawowej lub składowej podstawowej znamionowej napięcia i prądu. Program został również wyposażony w sygnalizację, która zapala się w przypadku, gdy zostanie przekroczona procentowa zawartość danej harmonicznej w odniesieniu do napięć wg [1] lub prądów wg [3] w zależności od klasy odbiornika [2], [3].

Ponadto użytkownik, poprzez naciśnięcie przycisku „Typy odbiorników”, może zapoznać się z podziałem odbiorników na klasy wg [3] oraz dokonać odpowiedniego wyboru zmieniając ustawienia zadajnika „Jaki typ odbiornika?”. Dodatkowo, poprzez ustawienie zadajnika „Ile harmonicznych wyświetlić?” można dokonać wyboru liczby harmonicznych uwzględnianych w obliczeniach i wyświetlanych na wykresie widmowym. Sygnalizacja przekroczenia dopuszczalnych wartości harmonicznych w napięciach i prądach została zdefiniowana zgodnie z wymaganiami norm [1], [2] i [3]. W tab. 1 podano dopuszczalne procentowe zawartości poszczególnych harmonicznych napięć zasilania określone w [1], w oparciu o które ustawiono sygnalizację procentowego przekroczenia zawartości danej harmonicznej [3].



Rys. 4. Panel użytkownika Simulator.vi z wybraną zakładką „Analiza Harmonicznych”

Fig. 4. Front Panel of the Simulator.vi – chosen menu items Harmonic Analysis

W tab. 2 przedstawiono dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu w zależności od klasy odbiornika wg [3], w oparciu o które ustawiono sygnalizację procentowego przekroczenia zawartości danej harmonicznej [1].

Analizator wpływu niesymetrii i odkształceń napięć i prądów zasilania na jakość energii elektrycznej

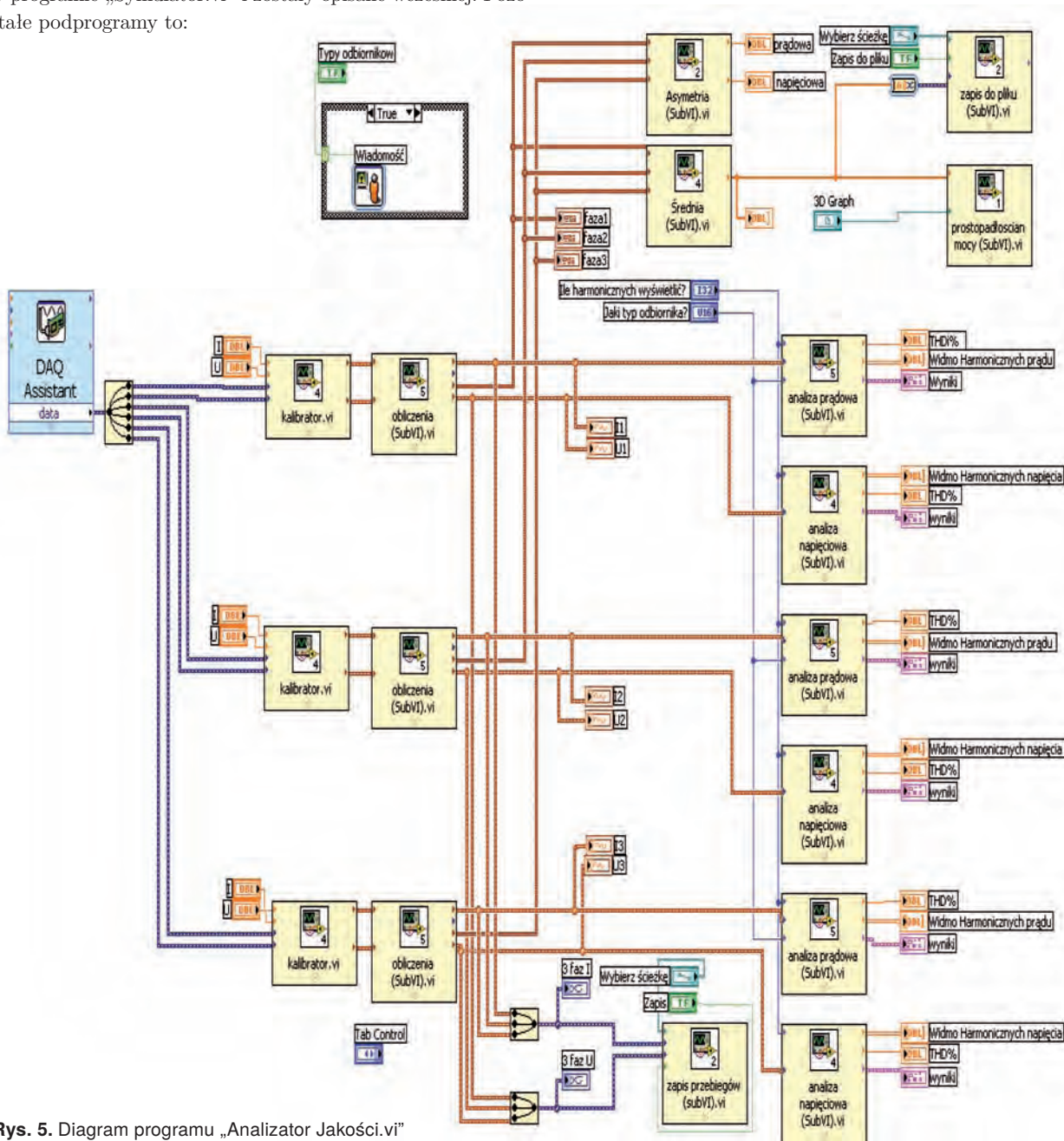
Podstawą pracy komputerowego stanowiska jako analizatora jest program opracowany w języku graficznym LabVIEW – „Analizator jakości.vi”, który umożliwia przeprowadzenie analizy oraz wizualizacji wpływu niesymetrii i odkształceń napięć i prądów zasilania na jakość przepływu energii elektrycznej. Program „Analizator jakości.vi”, którego schemat przedstawiony jest na rys. 5, składa się z 17 aplikacji działających jako podprogramy. Niektóre z nich wykorzystano w programie „Symulator.vi” i zostały opisane wcześniej. Pozostałe podprogramy to:

- „Kalibrator.vi” – umożliwia kalibrację i skalowanie sygnałów z przetworników prądowych i napięciowych,
- „Średnia.vi” – dokonuje obliczeń średniej wartości napięcia, prądu płynącego w poszczególnych fazach i współczynnika mocy, oraz oblicza moce pobierane przez odbiornik elektryczny,
- „Asymetria.vi” – dokonuje obliczeń procentowych współczynników asymetrii napięciowej ϵ_u i prądowej ϵ_i układu trójfazowego zgodnie z zależnościami:

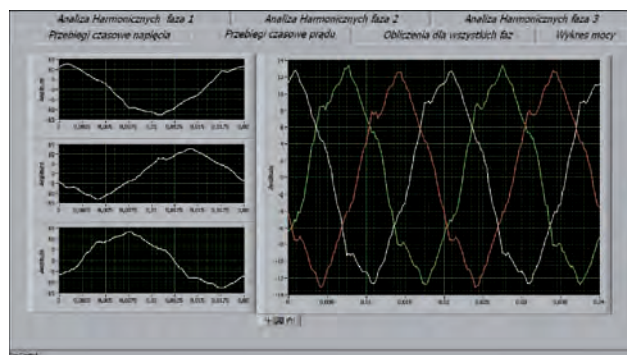
$$\epsilon_u = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100 \tag{15}$$

gdzie: U_1, U_2 – składowe zgodna i przeciwna napięcia, I_1, I_2 – składowe zgodna i przeciwna prądu.

- „DAQ Assistant” – umożliwia odczyt sygnałów z karty pomiarowej A/C.



Rys. 5. Diagram programu „Analizator Jakości.vi”
 Fig. 5. Block Diagram of the Quality Analyser.vi program



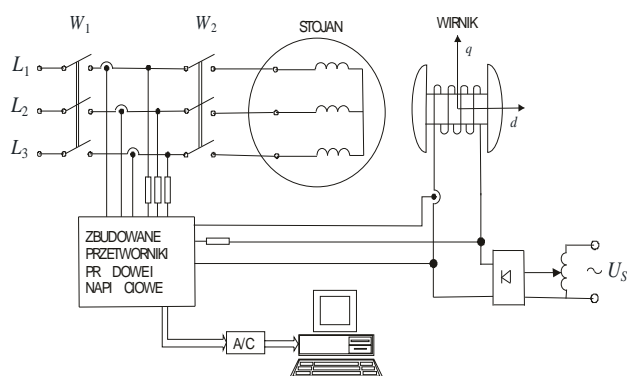
Rys. 6. Zarejestrowane przebiegi czasowe prądów fazowych pobieranych przez generator synchroniczny – zakładka „Przebiegi czasowe prądu” programu „Analizator jakości.vi”

Fig. 6. The waveforms of the registered 3-phase armature currents of the synchronous generator – menu item Current waveforms of the Quality Analyser.vi program

Przebiegi czasowe zarejestrowanych prądów fazowych pobieranych przez generator synchroniczny dla oddawanej do sieci mocy czynnej $P = 1,1$ kW i biernej $Q = -5,2$ kVar przedstawione na rys. 6 są dostępne w zakładce „Przebiegi czasowe prądu” programu „Analizator jakości.vi”. Panel użytkownika programu „Analizator jakości.vi” składa się z siedmiu zakładek. Widok zakładki „Przebiegi czasowe prądu” tego programu przedstawiony jest na rys. 6.

Analiza zawartości wyższych harmoniczných w prądach i napięciach zasilania maszyny synchronicznej współpracującej z siecią zasilającą

Analizę zawartości wyższych harmoniczných w prądach i napięciach zasilania przeprowadzono dla trójfazowej maszyny synchronicznej o danych: $P_N = 8,5$ kW, $U_N = 380$ V, $\cos \phi_N = 0,85$, $n_N = 3000$ obr/min współpracującej z siecią zasilającą 230/400 V. Badania przeprowadzono w warunkach utrzymania stałej mocy czynnej oddawanej do sieci i różnych wartościach prądu wzbudzenia od stanu niedowzbudzenia występującego dla $Q = -5,2$ kVar do stanu przewzbudzenia występującego dla $Q = 3,8$ kVar. Analizy współpracy trójfazowej maszyny synchronicznej z siecią zasilania dokonano przy wykorzystaniu omówionego już programu „Analizator jakości.vi” na podstawie zarejestrowanych przebiegów czasowych napięć i prądów w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 7.

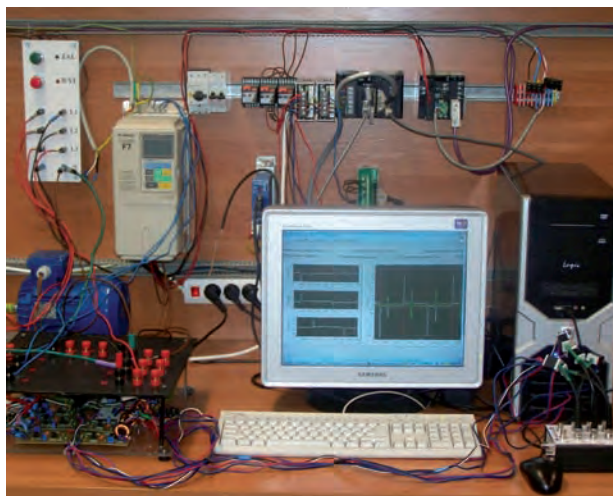


Rys. 7. Schemat układu pomiarowego
Fig. 7. Diagram of the measuring system

Widok stanowiska pomiarowego przedstawiony jest na rys. 8. Stanowisko to umożliwia realizację badań zawartości wyższych harmoniczných w napięciach i prądach pobieranych przez odbiorniki jedno-, dwu- jak i trójfazowe.

W skład stanowiska pomiarowego wchodzi:

- generator synchroniczny o parametrach znamionowych $P_N = 8,5$ kW, $U_N = 380$ V, $\cos \phi_N = 0,85$, $n_N = 3000$ obr/min wraz z układem zasilania układu wzbudzenia,
- układ 8 przetworników do pomiaru chwilowych wartości napięć i prądów zbudowanych na liniowych przetwornikach Halla typu A3515LUA (cztery przetworniki napięciowe i cztery przetworniki prądowe) [7], [8],
- dwa niezależne wyłączniki W_1 i W_2 ,
- komputer klasy PC wraz z kartą A/C typu NI – 6009 i oprogramowaniem graficznym w środowisku LabVIEW.

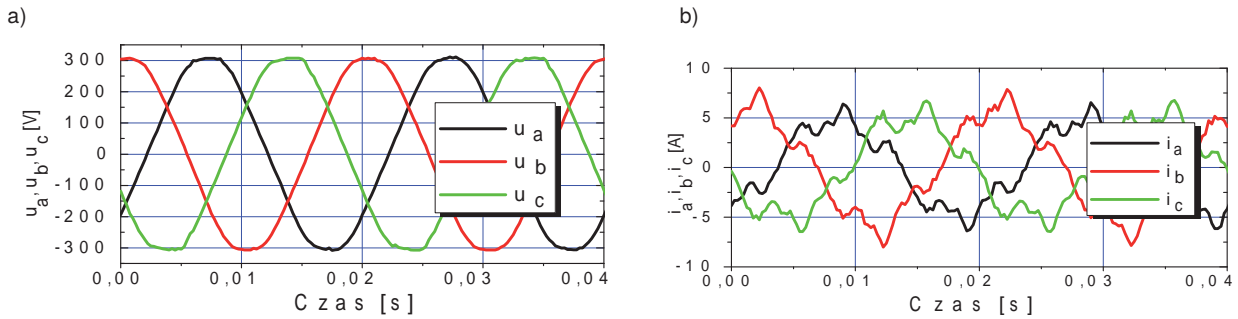


Rys. 8. Widok stanowiska badawczego
Fig 8. View of the measuring system

Zarejestrowane przebiegi czasowe napięć i prądów fazowych w fazie L1 pokazano na rys. 9–13. W pozostałych fazach L2 i L3 przebiegi czasowe prądów i napięć, udział poszczególnych harmoniczných (określony współczynnikiem IHD) oraz całkowita zawartość harmoniczných (określona współczynnikiem THD) są podobne. Dlatego w dalszej części artykułu procentowy udział najbardziej znaczących harmoniczných w prądach i napięciach zostanie przedstawiony dla fazy L1.

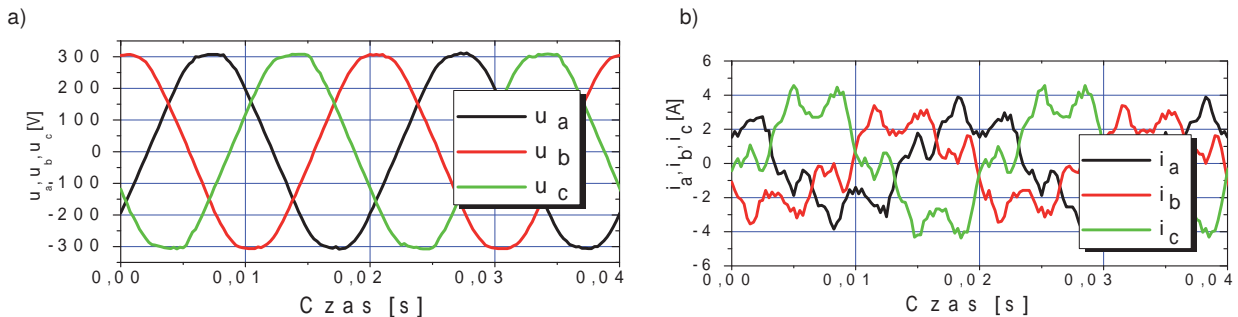
Rejestrację przebiegów czasowych napięć i prądów fazowych przeprowadzono dla generatora synchronicznego pracującego od stanu niedowzbudzenia do przewzbudzenia i dla oddawanej do sieci mocy czynnej $P = 1,1$ kW i następujących mocy biernych: w stanie niedowzbudzenia $Q = 5,2$ kVar, $Q = -2,3$ kVar, $Q = -0,5$ kVar, oraz w stanie przewzbudzenia $Q = 0,7$ kVar i $Q = 3,8$ kVar. Moc pobieraną z sieci przez generator synchroniczny (stan niedowzbudzenia) oznaczono z „-”, aby zaznaczyć pobór mocy biernej indukcyjnej przez trójfazowy generator synchroniczny.

Przedstawione na rys. 9–13 przebiegi czasowe napięć i prądów poddano analizie Fouriera za pomocą programu „Analizator jakości.vi”. W tab. 3 przedstawiono procentowy udział najbardziej znaczących harmoniczných wynikających ze współczynnika IHD oraz obliczoną całkowitą zawartość harmoniczných wyznaczoną współczynnikiem THD (do 40. harmoniczných) w fazie L1 w prądach fazowych twornika dla mocy $P = 1,1$ kW i $Q = 5,2$ kVar, $Q = -2,3$ kVar oraz



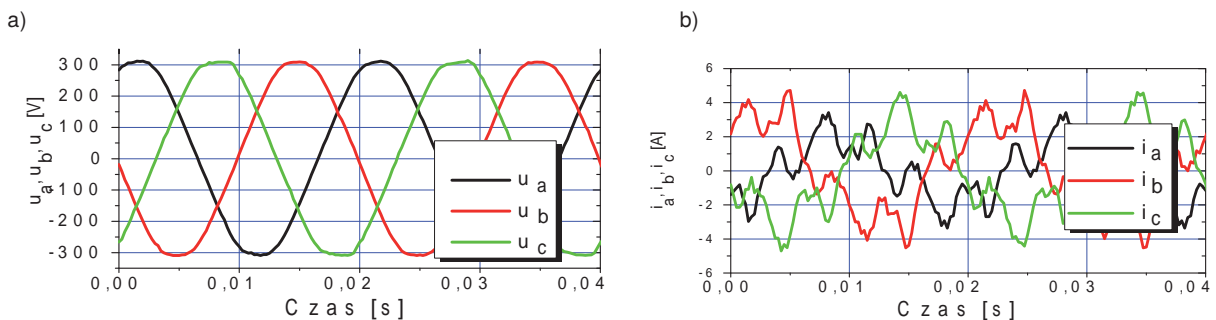
Rys. 10. Przebiegi czasowe a) napięć, b) prądów fazowych twornika dla mocy $P = 1,1 \text{ kW}$ i $Q = -2,3 \text{ kVAr}$

Fig. 10. Waveforms of a) voltages, b) armature currents for $P = 1,1 \text{ kW}$ and $Q = -2,3 \text{ kVAr}$



Rys. 11. Przebiegi czasowe a) napięć, b) prądów fazowych twornika dla mocy $P = 1,1 \text{ kW}$ i $Q = -0,5 \text{ kVAr}$

Fig. 11. Waveforms of a) voltages, b) armature currents for $P = 1,1 \text{ kW}$ and $Q = -0,5 \text{ kVAr}$



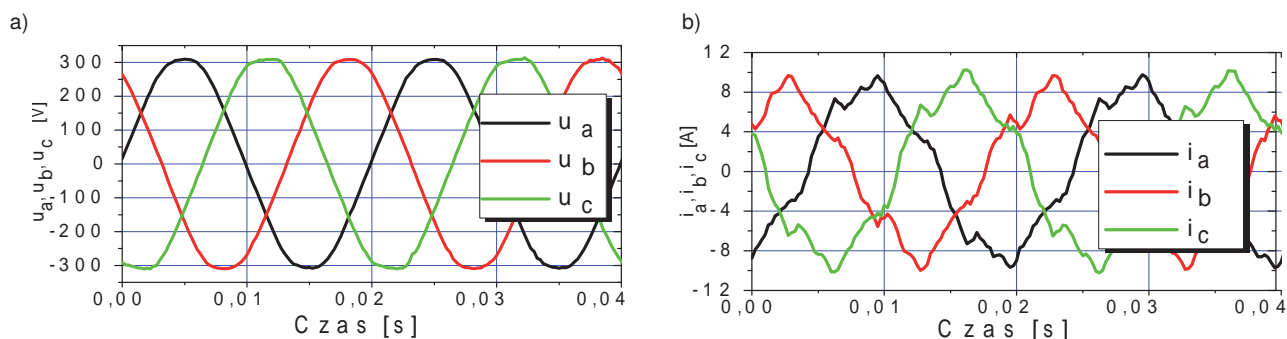
Rys. 12. Przebiegi czasowe a) napięć, b) prądów fazowych twornika dla mocy $P = 1,1 \text{ kW}$ i $Q = 0,7 \text{ kVAr}$

Fig. 12. Waveforms of a) voltages, b) armature currents for $P = 1,1 \text{ kW}$ and $Q = 0,7 \text{ kVAr}$

Tab. 3. Udział najbardziej znaczących harmonicznych do 40 rzędu

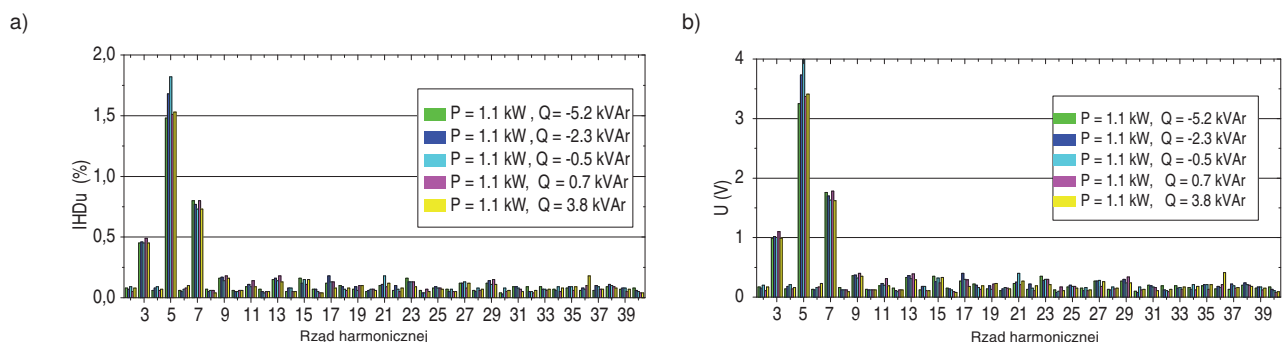
Tab. 3. Setting-up of IHD and THD up to 40th harmonics

Rząd harm.	$P = 1,1 \text{ kW}$ $Q = -5,2 \text{ kVAr}$				$P = 1,1 \text{ kW}$ $Q = -2,3 \text{ kVAr}$				$P = 1,1 \text{ kW}$ $Q = -0,5 \text{ kVAr}$			
	IHDi	I	IHDu	U	IHDi	I	IHDu	U	IHDi	I	IHDu	U
	[%]	[A]	[%]	[V]	[%]	[A]	[%]	[V]	[%]	[A]	[%]	[V]
1	100	7,99	100	219,5	100	3,84	100	222,2	100	1,90	100	222
3	2,17	0,17	0,45	0,99	4,33	0,17	0,46	1,02	8,70	0,16	0,45	1,00
5	8,07	0,64	1,48	3,25	20,4	0,78	1,68	3,73	47,29	0,86	1,82	4,03
7	0,99	0,08	0,80	1,76	2,32	0,09	0,77	1,70	5,43	0,10	0,73	1,63
9	0,39	0,03	0,16	0,36	0,83	0,03	0,17	0,37	1,56	0,03	0,14	0,32
11	2,59	0,21	0,09	0,19	5,55	0,21	0,11	0,23	11,44	0,21	0,09	0,20
13	2,80	0,22	0,15	0,33	5,62	0,21	0,16	0,36	11,21	0,20	0,14	0,31
15	0,20	0,02	0,16	0,35	0,27	0,01	0,12	0,26	1,21	0,02	0,15	0,32
17	0,68	0,05	0,12	0,27	1,33	0,05	0,18	0,40	2,04	0,04	0,13	0,30
19	0,30	0,02	0,07	0,14	0,77	0,03	0,09	0,19	1,66	0,03	0,06	0,13
35	0,94	0,08	0,08	0,19	1,85	0,07	0,09	0,21	3,23	0,06	0,09	0,21
37	1,18	0,09	0,06	0,13	2,54	0,10	0,10	0,22	5,34	0,10	0,09	0,19
THD do 40 harm. [%]	9,51		1,84		22,88		2,00		51,71		2,1	



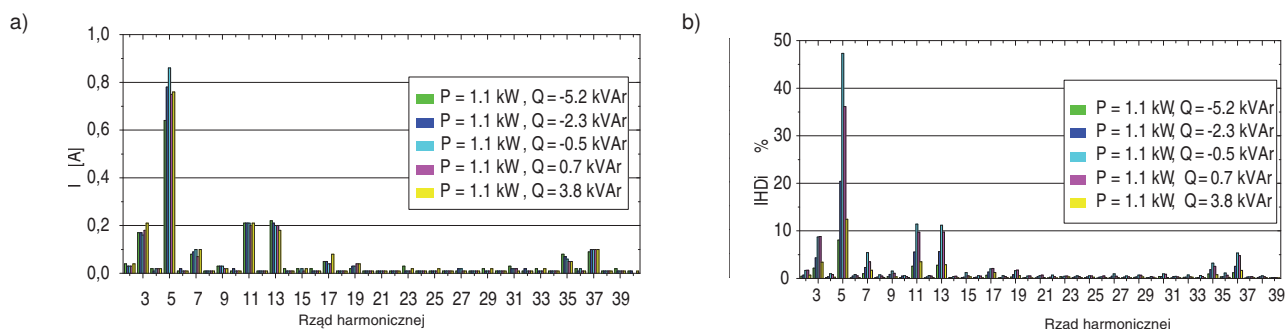
Rys. 13. Przebiegi czasowe a) napięć, b) prądów fazowych twornika dla mocy $P = 1,1 \text{ kW}$ i $Q = 3,8 \text{ kVAr}$

Fig. 13. Waveforms of a) voltages, b) armature currents for $P = 1,1 \text{ kW}$ and $Q = -3,8 \text{ kVAr}$



Rys. 14. Zestawienie zbiorcze a) procentowych wartości $IHD_{U\%}$, b) wartości skutecznych harmonicznych napięcia od 2 do 40 rzędu jakie wystąpiły w czasie przeprowadzonych badań

Fig. 14. Percentage participation of a) voltage harmonics and b) armature current harmonics in relation to fundamental harmonic



Rys. 15. Zestawienie zbiorcze: a) wartości skutecznych harmonicznych prądu, b) procentowych wartości IHD_i w odniesieniu do składowej podstawowej

Fig. 15. Participation of a) RMS harmonic currents and b) percentage participation of IHD_i in relation to fundamental harmonic

$P = 1,1 \text{ kW}$ $Q = 0,7 \text{ kVAr}$				$P = 1,1 \text{ kW}$ $Q = 3,8 \text{ kVAr}$			
IHD _i	I	IHD _u	U	IHD _i	I	IHD _u	U
[%]	[A]	[%]	[V]	[%]	[A]	[%]	[V]
100	2,10	100	222,9	100	6,10	100	222,8
8,81	0,18	0,49	1,10	3,42	0,21	0,45	0,99
36,14	0,75	1,51	3,37	12,44	0,76	1,53	3,41
3,50	0,07	0,80	1,78	1,74	0,10	0,73	1,62
1,08	0,02	0,18	0,40	0,34	0,02	0,16	0,35
9,71	0,20	0,14	0,31	3,52	0,21	0,09	0,19
9,74	0,20	0,18	0,39	2,91	0,18	0,13	0,29
0,56	0,01	0,11	0,24	0,35	0,02	0,15	0,33
2,13	0,04	0,13	0,29	1,26	0,08	0,08	0,18
1,78	0,04	0,10	0,22	0,59	0,04	0,10	0,23
2,55	0,05	0,06	0,13	0,78	0,05	0,09	0,21
4,80	0,10	0,07	0,15	1,70	0,10	0,07	0,16
40,49		1,87		14,41		1,82	

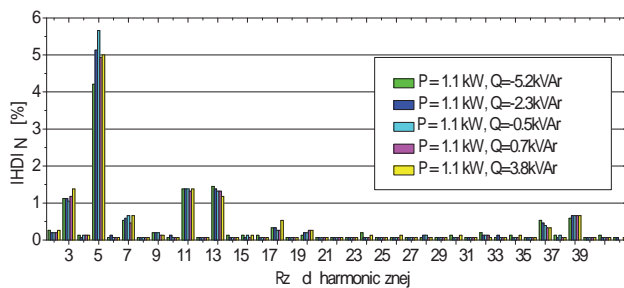
$Q = -0,5 \text{ kVAr}$ pracującego przy niedowzbudzeniu oraz dla mocy $P = 1,1 \text{ kW}$ i $Q = 0,7 \text{ kVAr}$ oraz $Q = 3,8 \text{ kVAr}$ pracującego przy przewzbudzeniu.

Na rys. 14 przedstawiono zestawienie zbiorcze procentowych wartości IHD_u oraz wartości skuteczne poszczególnych harmonicznych napięć od 2 do 40 jakie wystąpiły w czasie przeprowadzonych badań dla mocy czynnej $P = 1,1 \text{ kW}$ i mocy biernej zmieniającej się od stanu niedowzbudzenia $-5,2 \text{ kVAr}$ do przewzbudzenia $3,8 \text{ kVAr}$ (rys. 9–13) dla fazy L1. Na rys. 14–16 pominięto składową podstawową napięcia.

Z przedstawionego na rys. 14 zestawienia zbiorczego harmonicznych napięć sieci zasilającej wynika, że podczas przeprowadzania badań eksperymentalnych, poszczególne harmoniczne napięcia sieci charakteryzują się prawie stałą wartością. Jedynie dla 5. harmonicznej, napięcia zmieniały się od $3,25 \text{ V}$ do $4,03 \text{ V}$. Na rys. 15 przedstawiono zestawienie zbiorcze

procentowych wartości IHD_1 oraz wartości skuteczne poszczególnych harmonicznych prądu od 2. do 40. rzędu jakie wystąpiły w czasie przeprowadzonych badań dla mocy czynnej $P = 1,1$ kW i mocy biernej zmieniającej się od stanu niedowzbudzenia – 5,2 kVAr do przewzbudzenia 3,8 kVAr (rys. 9–13) dla fazy L1.

Z przedstawionego na rys. 15 zestawienia zbiorczego harmonicznych prądu wynika, że w czasie trwania badań, poszczególne harmoniczne prądu twornika charakteryzują się prawie stałą wartością. Zaobserwowano niewielkie zmiany, które nie przekraczały 0,2 A i występują dla 5. harmonicznej i wynikają z niewielkich zmian wartości 5. harmonicznej w napięciu fazowym sieci w czasie badań [6, 9]. Natomiast jeśli te harmoniczne zostaną odniesione zgodnie z normą [3] do składowej podstawowej prądu, wówczas wartość IHD_1 np. dla 5. harmonicznej różni się nawet o kilkadziesiąt procent, jak to jest zestawione w tab. 3. Dlatego na rys. 16 przedstawiono porównanie udziału poszczególnych harmonicznych w odniesieniu nie do składowej podstawowej prądu, jak to często spotyka się w podręcznikach, publikacjach, ale do wartości skutecznej składowej podstawowej prądu znamionowego badanego generatora synchronicznego, jak to zostało przyjęte w normie [3] dla odbiorników o prądzie >16 A i <75 A.



Rys. 16. Porównanie procentowego udziału poszczególnych harmonicznych w odniesieniu do znamionowego prądu twornika

Fig. 16. Comparison of percentage participation of individual harmonics in relation to nominal fundamental harmonic of armature current

Z przedstawionego na rys. 16 zestawienia zbiorczego udziału wartości harmonicznych, które odniesiono do wartości skutecznej składowej podstawowej prądu znamionowego generatora synchronicznego, wynika, że w czasie trwania badań, wartość współczynnika IHD_1 dla poszczególnych harmonicznych prądu twornika zmienia się w takim stopniu, jak zmieniają się wartości skuteczne harmonicznych prądu [6], [8], [9]. Wartości te nie zależą od stanu obciążenia generatora synchronicznego.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę zawartości wyższych harmonicznych w prądach i napięciach fazowych twornika podczas współpracy maszyny synchronicznej z trójfazową siecią zasilającą w zbudowanym komputerowym stanowisku, z wykorzystaniem opracowanych komputerowych programów „Symulator.vi” i „Analizator jakości.vi”. Programy te zapro-

jektowano w środowisku LabVIEW z wykorzystaniem języka graficznego. Przedstawione w pracy programy pozwalają na wizualizację przebiegów czasowych trójfazowych napięć i prądów oraz odpowiadających im mocom chwilowym. Ponadto umożliwiają wyznaczanie mocy czynnych, biernych, pozornych i pozornych liniowych, odkształceń oraz współczynniki: THD , $PWHD$, IHD , niesymetrii napięcia, prądu oraz mocy. Opracowany program „Analizator jakości.vi” umożliwia również przeprowadzenie analizy zarejestrowanych wcześniej przebiegów czasowych napięć i prądów np. za pomocą kart A/C, oscyloskopów cyfrowych, analizatorów itp.

Z analizy widma harmonicznego prądów twornika prądnicy synchronicznej współpracującej z siecią zasilającą, wynika, że największy udział w prądach mają wyższe harmoniczne rzędu 3, 5 oraz 7. Badana prądnica spełnia wymogi normy [3] odnośnie generowania dopuszczalnych harmonicznych prądów do sieci zasilającej. Norma ta w zależności od klasy odbiornika definiuje dopuszczalne wartości poszczególnych harmonicznych ale niezbyt dokładnie precyzuje względem jakiej wielkości należy dokonać porównania poszczególnych harmonicznych czy do składowej podstawowej prądu, czy do wartości skutecznej składowej podstawowej prądu znamionowego jak podaje norma [2].

W przypadku indywidualnej pracy maszyny elektrycznej (lub zespołu maszyn pracujących synchronicznie w szerokim zakresie zmian obciążenia) na sieć zasilającą, powszechnie stosowany całkowity współczynnik odkształcenia prądu THD_1 oraz IHD_1 odniesiony do składowej podstawowej prądu nie daje jednoznacznych informacji dotyczących zawartości harmonicznych z uwagi na duże zmiany składowej podstawowej. Przeprowadzone badania prądnicy synchronicznej dowiodły, iż współczynniki THD_1 oraz IHD_1 przyjmują różne wartości zależne od stopnia obciążenia maszyny jak to pokazano na rys. 9–13 oraz zestawiono w tab. 3 przy jednoczesnych niewielkich zmianach wartości skutecznych poszczególnych harmonicznych. Przy obciążonym generatorze dla stanu $P = 1,1$ kW i $Q = -5,2$ kVAr (pobierana moc bierna indukcyjna z sieci) całkowity współczynnik THD_1 wyniósł 9,5 %, natomiast gdy zmniejszono obciążenie mocą bierną współczynnik ten gwałtownie wzrastał osiągając wartość 51,7 % dla mocy $P = 1,1$ kW i $Q = -0,5$ kVAr. Natomiast wartości skuteczne prądów poszczególnych harmonicznych w całym zakresie badań pozostawały prawie stałe, a niewielkie ich zmiany były wynikiem zmian wartości harmonicznych w napięciach sieci zasilającej. Podobne zmiany współczynników THD_1 oraz IHD_1 wystąpiły podczas przewzbudzenia maszyny synchronicznej. Na rys. 15 porównano wartości wyższych harmonicznych dla różnych obciążeń mocą bierną w odniesieniu do wartości skutecznej składowej podstawowej prądu znamionowego badanego generatora synchronicznego. Z porównania tego jednoznacznie wynika, że w przypadku indywidualnej pracy maszyny elektrycznej (indukcyjnej i synchronicznej) na sieć zasilającą, bardziej miarodajne informacje na temat zawartości wyższych harmonicznych (odkształcenia prądu pobieranego lub oddawanego przez maszynę elektryczną) jest odniesienie tych harmonicznych dla współczynników THD_1 oraz IHD_1 do wartości prądu znamionowego niż tylko do składowej podstawowej.

Bibliografia

1. PN-EN 50160:2010 *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.*
2. PN-EN 61000-3-12:2007 *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 3-12: Poziomy dopuszczalne. Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych prądu dla odbiorników o znamionowym prądzie fazowym $>16\text{ A}$ i $<75\text{ A}$ przyłączonych do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia.*
3. PN-EN 61000-3-2:2007 *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Część 3-2: Poziomy dopuszczalne. Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika $<$ lub $= 16\text{ A}$).*
4. Czarnecki L. S.: *Moc bierna i deformacji według definicji Budenau i przyczyny bezużyteczności tych wielkości w elektrotechnice.* ZNPŚL, Elektryka 107, Gliwice 1989, ss. 41–51.
5. Kowalski Z.: *Jakość Energii elektrycznej.* Politechnika Łódzka, Monografia. Łódź 2007.
6. Ludwinek K.: *Wpływ niesymetrycznego i odkształconego zasilania sieci na przebiegi czasowe prądów w obwodzie twornika maszyny synchronicznej,* Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Zeszyt Elektryka 42, Kielce 2005, ss. 251–266.
7. Ludwinek K.: *Measurement of momentary currents by Hall linear sensor.* Electrical review, No. 10, 2009. pp. 182–187.
8. Siedlarz A.: *Analiza oraz wizualizacja wpływu niesymetrii i odkształcenia napięć i prądów zasilania sieci na jakość energii elektrycznej z wykorzystaniem środowiska graficznego LabVIEW.* Praca dyplomowa. Politechnika Świętokrzyska. Kielce 2008.
9. Wiak S., Nadolski R., Ludwinek K., Staszak J.: *Influence of the Synchronous Cylindrical Machine Damping Cage on Content of Higher Harmonics in Armature Currents During Co-Operation with the Distorted and Asymmetrical Electric Power System Computer Engineering in Applied Electromagnetism,* IOS Press, 2006, pp. 520–527. ■

Harmonic distortion analysis in armature currents of synchronous machine during co-operation with the power system in graphical programming environment

Abstract: In the article an analysis of harmonic distortion in armature currents in synchronous machine during co-operation with electric power system is presented. This article is the result of the master thesis project carried out at Kielce University of Technology. The analysis is carried out thanks to the computer applications designed in LabVIEW – graphical programming environment. The applications allow to simulate and carry out the analysis of the influence of voltage asymmetry and harmonic distortion on the power quality and to display on screen the non-sine waveforms of the voltages and currents taken by electrical equipment. Moreover, the programs display the RMS values of active, reactive and apparent power as

well as power of distortion and coefficients: THD, PWHD, IHD, power factor and voltage unbalance. In addition, the applications allow to record the signals from A/C measuring devices or oscilloscopes and save them to file for further analysis.

Keywords: synchronous machines, graphical environment, LabVIEW, higher harmonics, THD, IHD

dr inż. Krzysztof Antoni Ludwinek

Absolwent Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki o specjalności automatyka i metrologia. Od 2002 r. pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Maszyn Elektrycznych i Systemów Mechatronicznych. W pracy naukowo-badawczej i dydaktycznej zajmuje się jakością energii elektrycznej, sterowaniem maszyn elektrycznych z wykorzystaniem techniki mikroprocesorowej, procesorów DSP, sterowników PLC, falowników i urządzeń łagodnego rozruchu oraz wpływem niesymetrii i odkształcenia napięcia zasilania na pracę maszyn i urządzeń elektrycznych. Jest promotorem kilkudziesięciu prac dyplomowych z w/w tematyki oraz opiekunem Studenckiego Koła Naukowego „Elektron”. Jest autorem i współautorem licznych publikacji o zasięgu międzynarodowym i krajowym oraz na konferencjach: ICEM, ISEF, SME, REM, SENE, ECB, PPEE oraz rozdziału w monografii IJEET. Jest członkiem SEP i PTETiS.

e-mail: k.ludwinek@tu.kielce.pl



mgr inż. Arkadiusz Siedlarz

Absolwent Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki o specjalności Przetwarzanie i Użytkowanie Energii Elektrycznej. Autor pracy magisterskiej *Analiza oraz wizualizacja wpływu niesymetrii i odkształcenia napięć i prądów zasilania sieci na jakość energii elektrycznej z wykorzystaniem środowiska graficznego LabVIEW.* Współautor publikacji *Harmonic distortion analysis in armature currents of synchronous machine during co-operation with the power system,* ZPME No 84, Komel 2009. Od 2008 r. pracuje w dziale badawczo-rozwojowym w firmie Pilkington Automotive Poland Sp. z o. o.

e-mail: arkadiusz.siedlarz@gmail.com

