



Politechnika Wroclawska

Wydział Elektryczny,
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Laboratorium Przetwarzania i Analizy Sygnałów Elektrycznych
(bud A5, sala 310)

Wydział/Kierunek	Nazwa zajęć laboratoryjnych	Nr zajęć
Elektryczny/ AiR	Badanie i Poprawa Jakości Energii Elektrycznej	2
Elektryczny/ ETK	Badanie Jakości Energii Elektrycznej	2

Tytuł:

**ANALIZA HARMONICZNYCH PRZEBIEGÓW
PRĄDOWYCH ODBIORNIKÓW ENERGII**

1 Cel ćwiczenia

W czasie zajęć badane są odkształcenia prądu wprowadzane do sieci zasilającej przez odbiorniki nieliniowe, układy prostownikowe jedno i trójfazowe. Analiza harmonicznym wymienionych układów umożliwia poznanie efektu sumowania się harmonicznym nieparzystych podzielnych przez 3 prądów fazowych w przewodzie neutralnym oraz efekt kompensacji wyższych harmonicznym uzyskany dzięki ich przesunięciom fazowym w różnych odbiornikach. Znajomość kątów przesunięć fazowych poszczególnych harmonicznym względem harmonicznej podstawowej dla różnych odbiorników podkreśla istotę tego parametru i wskazuje pewien sposób kompensacji. Analiza harmonicznym mocy czynnej pozwala na identyfikację odbiorników energii wprowadzających harmoniczne do sieci elektroenergetycznej.

Celem ćwiczenia jest:

- poznanie typów odbiorników i spektrum harmonicznym prądu.
- pomiar emisji harmonicznym prądu i porównanie z wymaganiami standardów.
- poznanie efektów powiązanych z harmonicznymi występujących w odbiornikach i sieciach trójfazowych.

2 Wymagania ogólne i warunki badań emisji harmonicznym – część 1 :odbiorniki o prądzie znamionowym <16A

Wymagania dotyczące badań emisji harmonicznym przez odbiorniki elektryczne oraz dopuszczalne poziomy emisji precyzuje normy EN 61000-3-2.

2.1 Klasyfikacja sprzętu

Różnorodność odbiorników elektrycznych, a tym samym różny charakter obciążeń sieci wywołują emisję harmonicznym o bardzo zróżnicowanych wartościach, częstotliwościach i przesunięciach fazowych. Z tego względu norma [1] w celu odpowiedniego ograniczenia harmonicznym prądu wprowadza następującą klasyfikację:

Klasa A – symetryczne, trójfazowe odbiorniki i wszystkie inne z wyjątkiem wymienionych w jednej z poniższych klas,

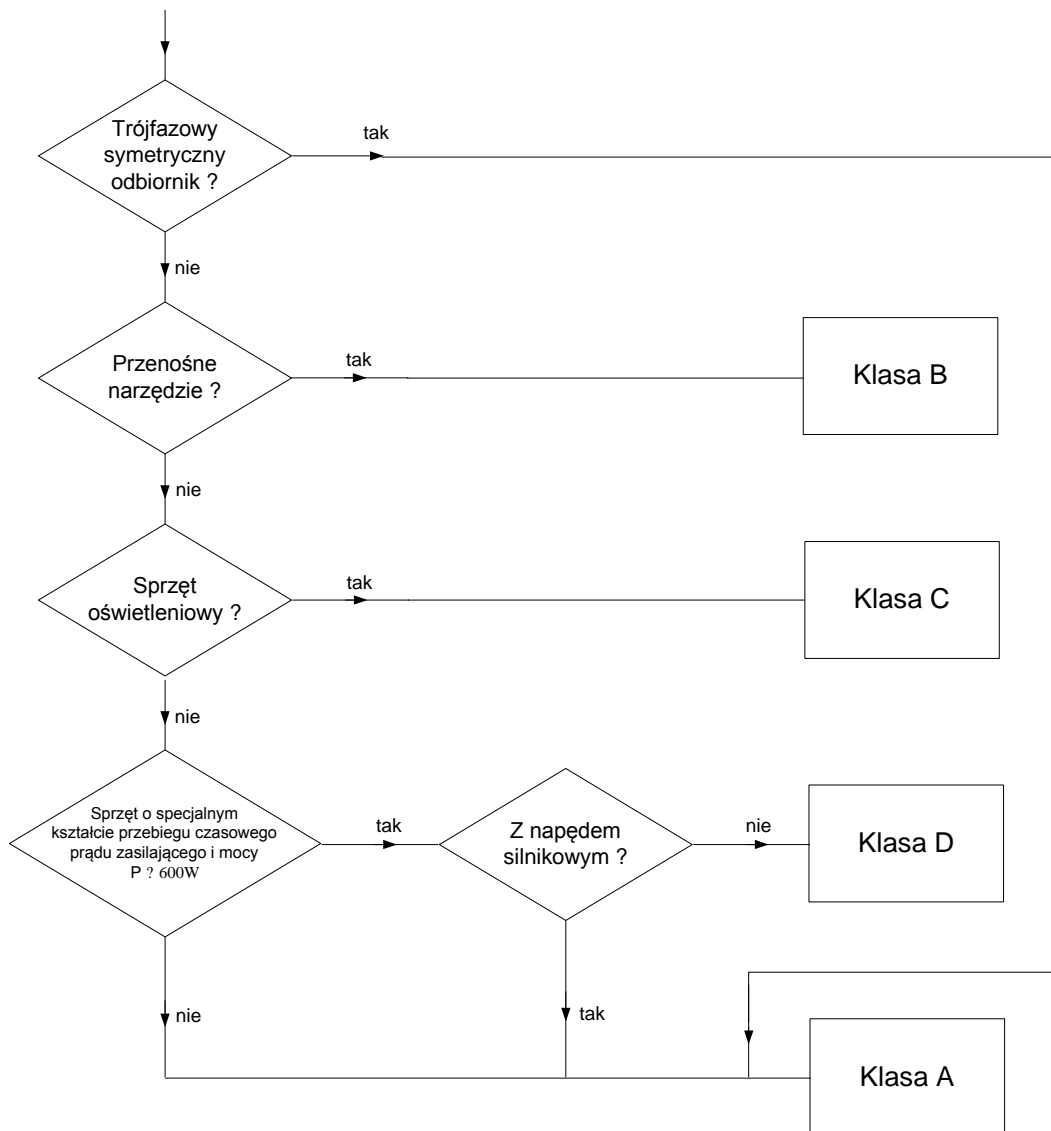
Klasa B – narzędzia przenośne,

Klasa C – sprzęt oświetleniowy wraz ze ściemniaczami,

Klasa D – sprzęt o wejściowej mocy czynnej P mniejszej lub równej 600W, następującego rodzaju:

- komputery osobiste i monitory do tych komputerów,

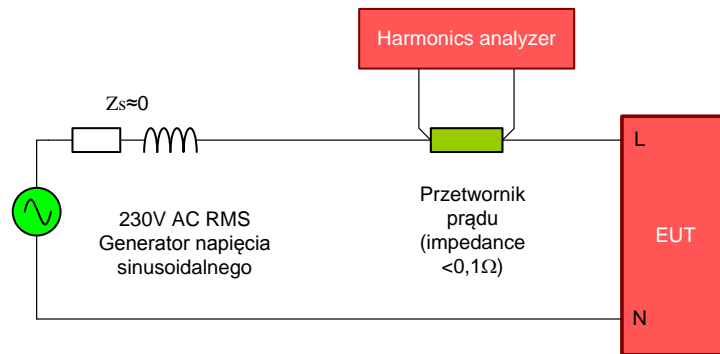
- odbiorniki telewizyjne,
- lodówki i zamrażarki mające regulowaną prędkość obrotową silnika kompresora.



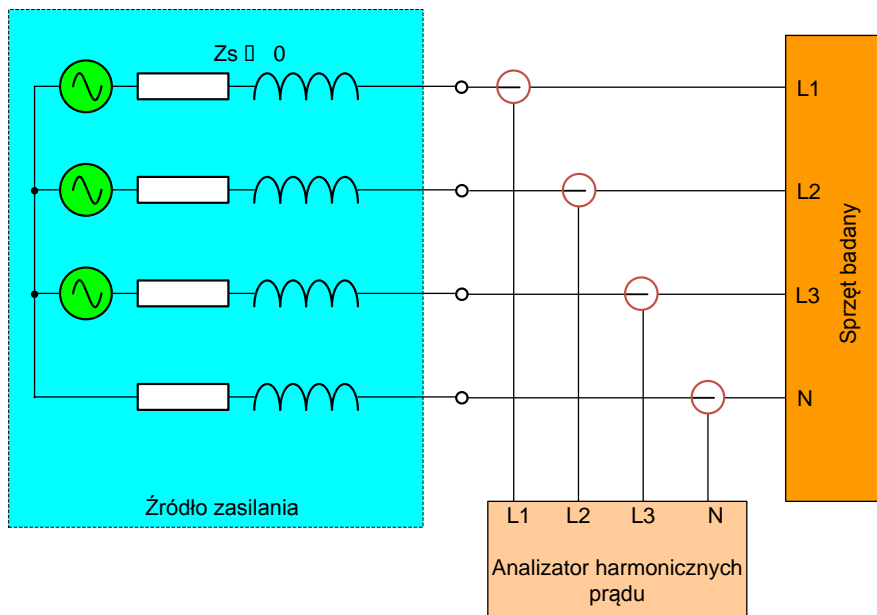
Rys. 1. Algorytm klasyfikacji urządzenia badanego (EUT) do klasy.

2.2 Układ pomiarowy

Układ pomiarowy składa się ze źródła napięcia sinusoidalnego zasilającego odbiornik. Dla zasilania jednofazowego schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 2, natomiast dla trójfazowego na rysunku 3. Impedancja wewnętrzna źródła Z_s oraz impedancja powinna być jak najmniejsza.



Rys.2 Schemat układu pomiarowego do badań urządzeń jednofazowych



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego do badania emisji prądu przez odbiorniki trójfazowe

2.3 Parametry źródła zasilania

Norma określa również wymogi dotyczące źródła zasilania odbiorników w czasie badań. Wymogi te dotyczą takich parametrów jak: impedancja wewnętrzna, asymetria, wartość skuteczna, częstotliwość oraz dopuszczalne wartości wyższych harmoniczných w napięciu źródła.

Wymagania elektryczne źródła – harmoniczne w napięciu zasilania:

0,9% dla harmoniczných 3 rzędu,

0,4% dla harmoniczných 5 rzędu,

0,3% dla harmoniczných 7 rzędu,

0,2% dla harmoniczných 9 rzędu,

0,2% dla harmoniczných parzystych rzędów z przedziału od 2 do 10,

0,1% dla harmoniczných o rzędach z przedziału od 11 do 40.

2.4 Poziomy dopuszczalne harmonicznych prądu

W czasie zajęć laboratoryjnych badane są odbiorniki energii quasi-stacjonarne.

Wartości uśrednione poszczególnych prądów harmonicznych powinny być równe lub mniejsze od limitów podanych dla danych klas urządzeń. Limity przedstawiono w tabelicy 1. Należy zwrócić uwagę na warunki badań oraz stosowalność limitów – szczegóły w rozdziale 7 normy[1] dostępnej na stanowisku.

Tablica 1. Poziomy emisji dla poszczególnych klas sprzętu.

Harmoniczna	Klasa A	Klasa B	Klasa C	Klasa D
-	A	A	%	ma/W
2	1,08	1,62	2%	-
3	2,3	3,45	30%*PF	3,4mA/W
4	0,43	0,645	-	-
5	1,14	1,71	10%	1,9mA/W
6	0,3	0,45	-	-
7	0,77	1,155	7%	1mA/W
9	0,4	0,6	5%	0,5mA/W
11	0,33	0,495	3%	0,35mA/W
13	0,21	0,315	3%	0,296mA/W
15≤n≤39 (nieparzyste)	0,15*15/n	0,225*15/n	3%	3,85/n [mA/W]
8≤n≤40 (parzyste)	0,23*8/n	0,345*8/n	-	-

2.5 Przebieg ćwiczenia – część 1: - odbiorniki o prądzie znamionowym <16A

1. Sprawdzić parametry napięcia zasilania.

W ćwiczeniu do zasilania odbiornika jest wykorzystywane napięcie sieciowe, stąd konieczność przeprowadzonej analizy harmonicznych napięć w celu wyznaczenia różnic dotyczących wartości harmonicznych z dopuszczalnymi. Znajomość tych różnic jest konieczna przy końcowej ocenie emisji harmonicznych przez badany odbiornik.

2. Zakwalifikować sprzęt do klasy.

3. Wykonać pomiar harmonicznych.

W ćwiczeniu ograniczyć się do 13 harmonicznej. Dodatkowo zapisać wartości współczynnika szczytu CF (*ang - Crest Factor*), całkowitego współczynnika zniekształceń harmonicznych THD (*ang - Total Harmonics Distortion*) oraz harmoniczne mocy czynnej.

4. Porównać wyniki z limitami i wydać ocenę o zgodności/niezgodności urządzenia z wymaganiami normy EN 61000-3-2.

3 **Badań emisji harmonicznych – część 2 :odbiorniki o prądzie znamionowym >16A i <75A oraz harmoniczne w nieliniowych układach trójfazowych**

Wymagania dotyczące badań emisji harmonicznych przez odbiorniki elektryczne oraz dopuszczalne poziomy emisji precyzuje norm EN 61000-3-12.

3.1 *Wybrane terminy i definicje zastosowane w normie [2]*

Wpływ harmonicznych, wprowadzanych przez odbiorniki, na parametry jakościowe napięcia zasilającego jest zależna od impedancji sieci. Im niższa impedancja tym wpływ zaburzeń mniejszy. Przy określaniu stopnia emisji harmonicznych do sieci przez odbiorniki poza wartością harmonicznej stosuje się:

a) *Współczynnik zawartości harmonicznych.*

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}$$

gdzie I_n to wartość n - tej harmonicznej prądu.

b) *Częściowo ważony współczynnik odkształcenia harmonicznego*

$$PWHHD = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} n \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} .$$

Limity poziomu harmonicznych oraz współczynnika THD i PWHHD zależą od współczynnika zwarciovego R_{scc} obliczanego z mocy zwarciovowej S_{sc} i znamionowej mocy pozornej odbiornika S_{equ} .

Wartość trójfazowej mocy zwarciovowej obliczana na podstawie znamionowego napięcia międzyfazowego $U_{nominal}$ i impedancji linii Z systemu zasilającego w wspólnym punkcie połączenia z siecią publiczną (PCC):

$$S_{sc} = \frac{U_{nominal}^2}{Z}.$$

Współczynnik zwarciovowy dla odbiornika jednofazowego wynosi:

$$R_{scc} = \frac{S_{sc}}{3S_{equ}}$$

dla odbiornika zasilanego międzyfazowo:

$$R_{scc} = \frac{S_{sc}}{2S_{equ}}$$

natomiast dla odbiornika trójfazowego

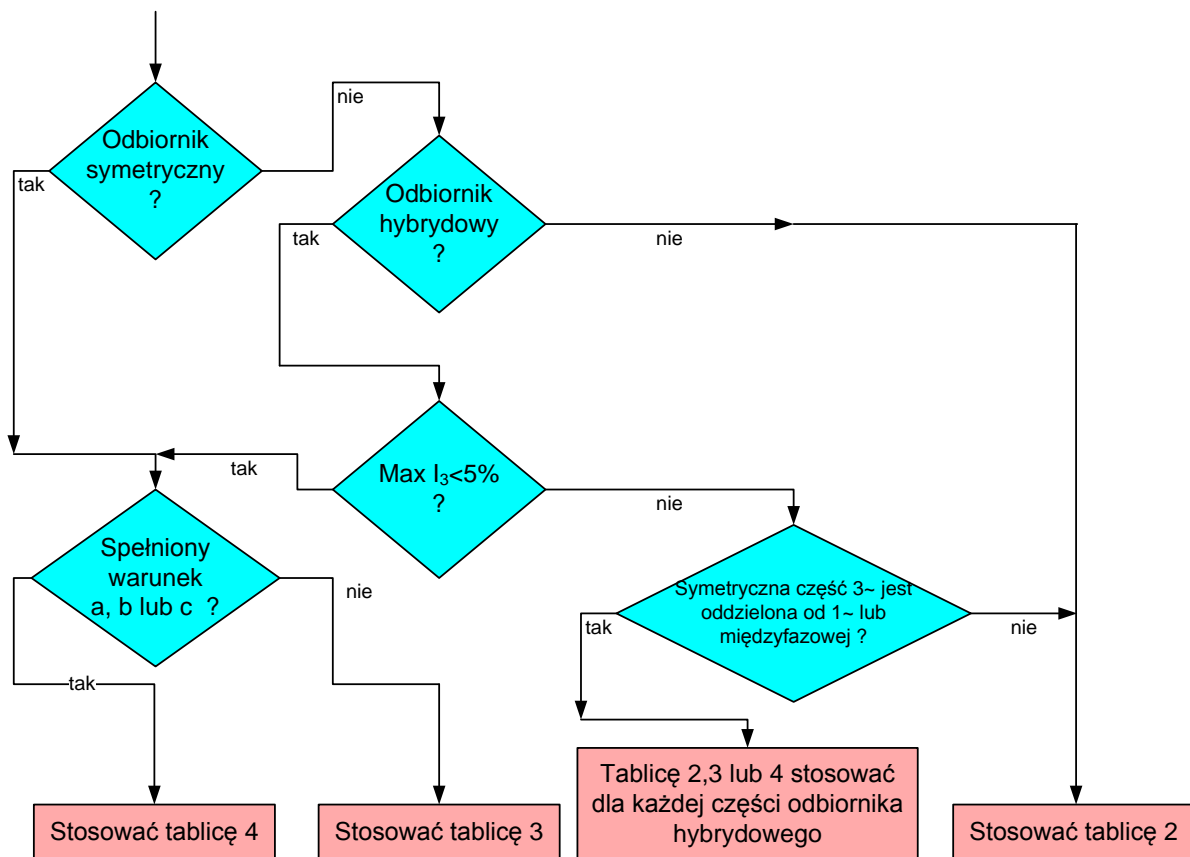
$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{S_{equ}}$$

Parametry dotyczące stanowiska pomiarowego odbiorników o prądzie $>16A$ i $<75A$ są takie same jak dla odbiorników o wartościach mniejszych od $16A$.

3.2 Poziomy dopuszczalne harmonicznych prądu

W czasie zajęć laboratoryjnych symulowane są badania odbiorników quasi-stacjonarnych.

Wartości uśrednione poszczególnych prądów harmonicznych powinny być równe lub mniejsze od limitów podanych dla danych typów urządzeń. Limity w normie [3] przedstawiono w 3 tablicach. Należy zwrócić uwagę stosowalność limitów – szczegóły w rozdziale 5 normy [2] dostępnej na stanowisku. Przydatny może być algorytm



Rys. 4. Algorytm procedury testowania odbiornika i wyboru tablicy z limitami

Warunek a) Podczas całego okresu pomiaru kąt fazowy 5. harmonicznej prądu odniesiony do podstawowej harmonicznej napięcia fazowego zawarty jest w przedziale od 90° do 150° .

Warunek b) Odbiornik jest zaprojektowany w taki sposób, że kąt fazowy 5. harmonicznej prądu nie ma w czasie żadnej preferowanej wartości i może przyjąć dowolną wartość z przedziału $[0^\circ, 360^\circ]$.

Warunek c) Podczas całego okresu pomiaru każda z harmonicznymi o rzędach 5. i 7. jest mniejsza niż 5 % podstawowego prądu odniesienia (I_1)

Tabela 2: Tablica 2 normy 61000-3-12 – Poziomy dopuszczalne wartości harmonicznymi prądu dla odbiorników innych niż symetryczne odbiorniki trójfazowe

Minimalna wartość	Dopuszczalne wartości harmonicznymi prądu [%]						Współczynniki harmonicznego odkształcenia prądu [%]	
	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}	THD	PWHD
R_{sce}								
33	21,6	10,7	7,2	3,8	3,1	2	23	23
66	24	13	8	5	4	3	26	26
120	27	15	10	6	5	4	30	30
250	35	20	13	9	8	6	40	40
>350	41	24	15	12	10	8	47	47

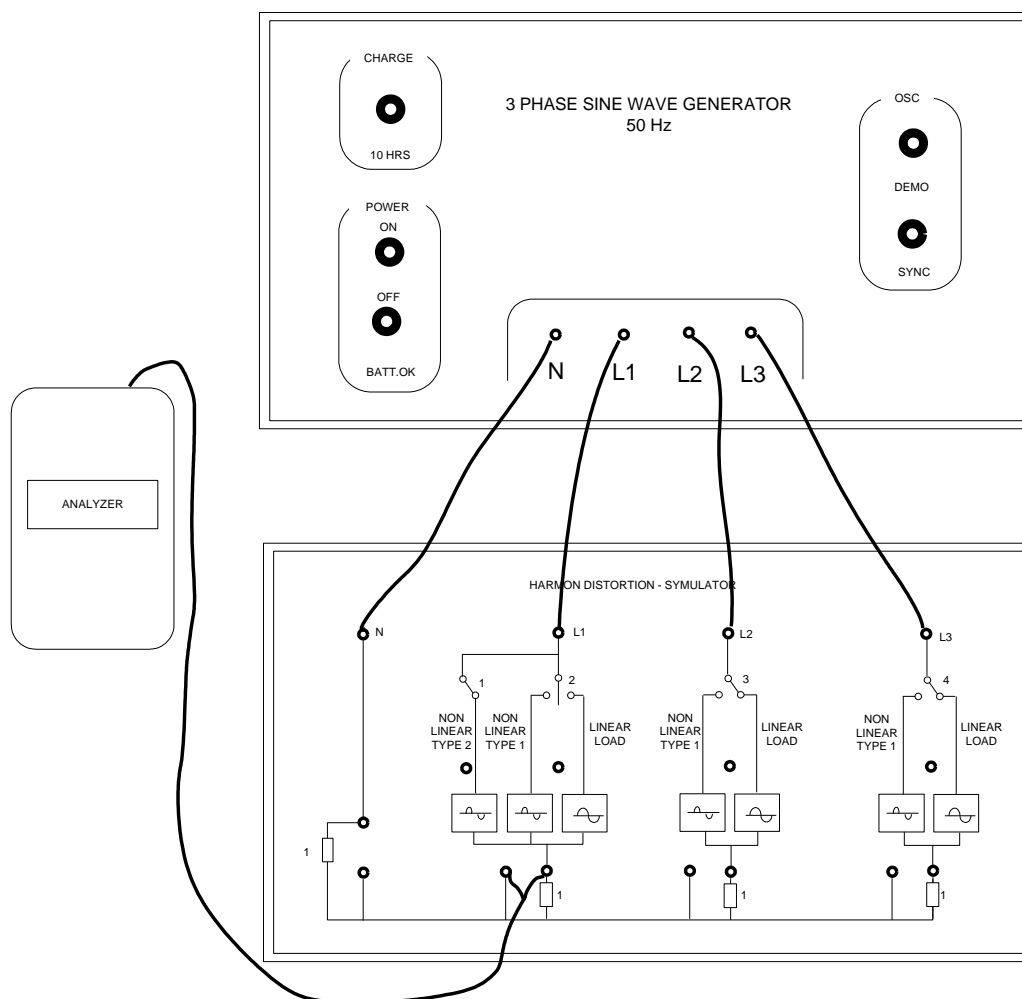
Tabela 3: Tablica 3 normy 61000-3-12 – Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznymi prądu dla symetrycznych odbiorników trójfazowych

Minimalna wartość	Dopuszczalne wartości harmonicznymi prądu [%]				Współczynniki harmonicznego odkształcenia prądu [%]	
	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	THD	PWHD
R_{sce}						
33	10,7	7,2	3,1	2	13	22
66	14	9	5	3	16	25
120	19	12	7	4	22	28
250	31	20	12	7	37	38
>350	40	25	15	10	48	46

Tabela 4: Tablica 4 normy EN 61000-3-12 – Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznymi prądu dla symetrycznych odbiorników trójfazowych pracujących w określonych warunkach

Minimalna wartość	Dopuszczalne wartości harmonicznymi prądu [%]				Współczynniki harmonicznego odkształcenia prądu [%]	
	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}	THD	PWHD
R_{sce}						
33	10,7	7,2	3,1	2	13	22
>120	40	25	15	10	48	46

Wartości względne parzystych harmonicznymi do 12. nie powinny przekraczać $16/n$ %. Parzyste harmoniczne o rzędach większych niż 12. są uwzględniane w THD i PWHD w taki sam sposób jak harmoniczne o rzędach nieparzystych.



Rys. 5. Zestaw laboratoryjny do demonstracji zjawisk zachodzących w nieliniowych obwodach trójfazowych.

3.3 Przebieg ćwiczenia – część 2: - odbiorniki o prądzie znamionowym $>16A$ i $<75A$ oraz nieliniowe układy trójfazowe

1. Wyznaczanie harmonicznych prądów pobieranych przez odbiorników trójfazowe.

- A. w układzie połączeń jak na rys. 5 ustawić przełączniki 2, 3, 4 w pozycje „linear load”, przełącznik 1 w pozycje swobodną. Przebiegi fazowe obserwowane na ekranie analizatora są nieodkształcone, symetryczne obciążenie powoduje zerową wartość prądu w przewodzie neutralnym (przełączyć zaciski analizatora na pomiar prądu w przewodzie N)
- B. ustawić przełączniki 2, 3, 4 w pozycje „nonlinear load”. Obciążeniami w tej sytuacji są układy prostownikowe. Należy zaobserwować kształty przebiegów w kolejnych fazach, zapisać wartości skuteczne poszczególnych harmonicznych (do 13harm.), THD oraz wartości prądów fazowych. Przełączyć zaciski analizatora na pomiar prądu

w przewodzie N. Zaobserwować kształt przebiegu, częstotliwość oraz wartość skuteczną prądu. Porównanie wartości tego prądu z sumą wartości prądów fazowych wykazuje efekt sumowania się wartości prądów wyższych harmonicznych nieparzystych, podzielnych przez trzy w przewodzie neutralnym. Należy również zwrócić uwagę na współczynnik „K-Factor” związany z możliwością przegrzewania się transformatorów, oraz na kąty przesunięć fazowych poszczególnych harmonicznych w stosunku do harmonicznej podstawowej.

- C. włączyć analizator na zaciski pomiaru prądu w fazie L1. Ponownie zaobserwować przebieg prądu oraz zapisać wartość współczynnika THD i wartość prądu i fazy 3. harmonicznej przy włączonym odbiorniku „nonlinear load 1”. Wyłączyć ten odbiornik (pozycja środkowa przełącznika 2) i włączyć odbiornik „nonlinear load 2”. Zaobserwować kształt przebiegu prądowego, zapisać wartość THD i wartość prądu i fazy 3. harmonicznej.
- D. Włączyć oba odbiorniki nieliniowe (przełączniki skierowane do siebie) i dokonać obserwacji i pomiarów j.w.
- E. W tej części ćwiczenia obserwujemy zmniejszenie zawartości harmonicznych. Wartość współczynnika THD i wartość prądu 3. harmonicznej zmniejszyły się zdecydowanie. Jest to efekt kompensacji harmonicznych (kąty fazowe). Trzecia harmoniczna przy tego rodzaju odbiorników jest harmoniczna dominującą. Efekt kompensacji w różnym stopniu dotyczy również innych harmonicznych.

2. Wybór tabeli z limitami.

Dla symetrycznego obciążenia nieliniowego (przełączniki 2, 3, 4 w pozycje „nonlinear load”) dokonać wyboru tabeli pomiarowej zgodnie z algorytmem na rysunku 4.

3. Wykonać pomiar harmonicznych.

Pomiary można pominąć jeżeli zapisano wartości w punkcie 1.B. W razie potrzeby, powtórnie wykonać pomiar harmonicznych w jednej z faz. W ćwiczeniu ograniczyć się do 13 harmonicznej. Dodatkowo zapisać wartości współczynnika szczytu CF (*ang - crest factor*), całkowitego współczynnika zniekształceń harmonicznych THD (Total harmonics distortion) oraz harmoniczne mocy czynnej.

4. Porównać wyniki z limitami i wydać ocenę o zgodności/niezgodności urządzenia z wymaganiami normy EN 61000-3-12. Do obliczeń przyjąć wartość mocy zwarciowej $S_{sc}=1000\text{kVA}$ oraz znamionowe parametry urządzenia : prąd fazowy 30A, napięcie 230V.

4 Załączniki - literatura

- [1].Norma PN-EN- 61000-3-2 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 3-2:
Poziomy dopuszczalne – Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika $<$ lub $= 16A$)
- [2].Norma PN-EN- 61000-3-12 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 3-2:
Poziomy dopuszczalne – Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu dla odbiorników o znamionowym prądzie fazowym $>16A$ i $<75A$ przyłączanych do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia
- [3].Instrukcja – opis oprogramowania analizatora FLUKE 41