

Politechnika Lubelska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

**Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń**

Laboratorium Sieci Elektroenergetycznych

Ćwiczenie nr 7

**Badanie zawartości harmonicznych w obiektach elektroenergetycznych.**

## 1. Cel i założenia pomiarów na stanowisku badawczym

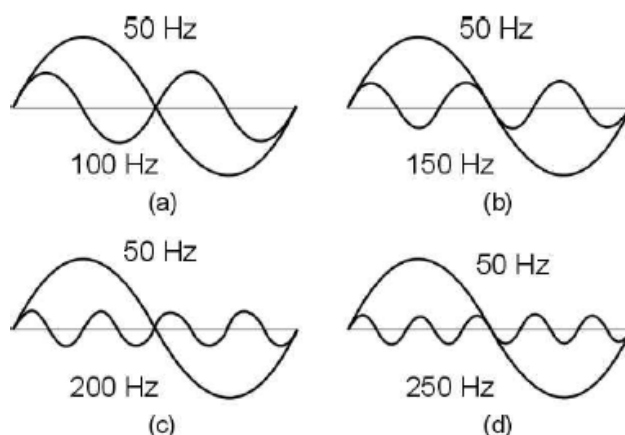
Celem Ćwiczenia jest zapoznanie studentów z pracą urządzeń pomiarowych do badania zjawisk pojawiających się wyższych harmonicznymi napięciami przy zasilaniu odbiorników nieliniowych oraz przenoszenia tych zniekształceń przez transformatorów przy różnych grupach połączeń. Badane również będzie przemagnesowanie rdzeni transformatorów.

## 2. Podstawy teoretyczne

Jakości energii elektrycznej jest szeroko rozumianym pojęciem w skład którego wchodzi szereg zjawisk wpływających na wartość dostarczanego produktu. W dzisiejszych czasach zapewnienie pożądanej jakości energii elektrycznej staje się coraz trudniejszym zadaniem z jakim napotykają się spółki dystrybucyjne. Napotykają się na wiele zakłóceń, w których coraz większe znaczenie nabierają wyższe harmoniczne napięcia oraz prądu. Pojawianie się wyższych harmonicznymi jest związane z odbiornikami nieliniowymi. Są to taki odbiorniki, których charakterystyka prądowo-napięciowa ma kształt nieliniowy. Przez wiele lat problem harmonicznymi nie był postrzegany jako zagrożenie. Było to spowodowane skupieniem uciążliwych odbiorników przede wszystkim w dużych zakładach przemysłowych. Wraz z rozwojem technologii duże, skoncentrowane odbiorniki stają się mniejszym zagrożeniem za sprawą szeregu możliwych rozwiązań powodujące tłumienie niechcianych harmonicznymi. Niestety ich miejsce zastępują, mimo minimalnej mocy, uciążliwe odbiorniki komunalne, których liczba jest ogromna i stale rośnie w związku z urbanizacją.

### ○ Wprowadzenie w zagadnienie harmonicznymi [5]

Pojęcie harmonicznymi wywodzi się z akustyki, gdzie odnoszone było do wibracji struny lub kolumny powietrza. W przypadku przebiegów występujących w elektrotechnice, harmoniczna definiowana jest jako składowa przebiegu o częstotliwości będącej całkowitą krotnością częstotliwości podstawowej.

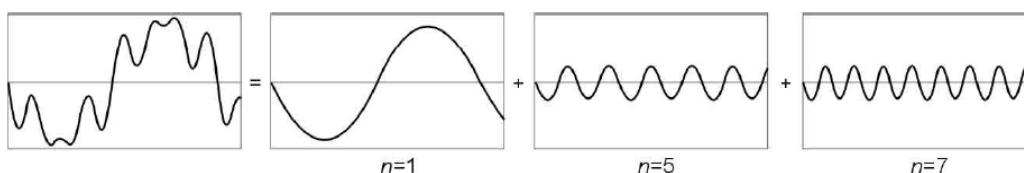


Rys. 2.1 Przebieg sinusoidy o częstotliwości 50Hz i jego harmoniczne: a) druga 100Hz, b) trzecia 150Hz, c) czwarta 200Hz, d) piąta 250Hz. [5]

Tabela 2.1 Wyższe harmoniczne odpowiadające podstawowej harmonicznej równej 50 Hz

Rząd harmonicznej	Częstotliwość
1	50
3	150
5	250
7	350
9	450
...	...
n	5n

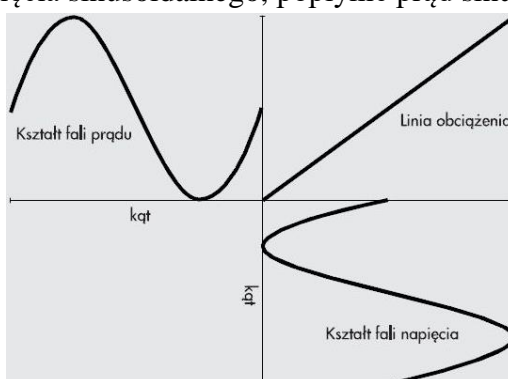
Każdy odkształcony przebieg czasowy napięcia lub prądu może być utworzony z harmoniczných, tak jak każdy okresowy przebieg może być poddany rozkładowi na harmoniczne:



Rys.2.2 Dekompozycja przebiegu odkształconego na harmoniczne (1,5,7) [3]

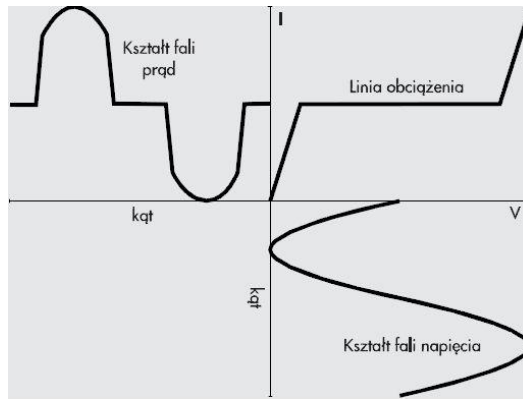
#### o Teoretyczne uzasadnienie powstawania harmoniczných [10]

W idealnym systemie zasilania prąd i napięcie są pozbawione zakłóceń. W praktyce niesinusoidalne prądy powstają, gdy płynący prąd nie odpowiada liniowo przyłożonemu napięciu. W prostym obwodzie zawierającym tylko elementy liniowe - opór, indukcyjność i pojemność - płynący prąd jest proporcjonalny do napięcia (o danej częstotliwości) tak, że w przypadku zastosowania napięcia sinusoidalnego, popłynie prąd sinusoidalny (Rys. 2.3).



Rys.2.3 Kształt fali prądu przy obciążeniu liniowym [10]

Przebieg obciążenia przedstawia zależność między zastosowanym napięciem i prądem przepływającym w odbiorniku. Rys. 2.3 przedstawia obciążenie liniowe. Warto zauważyć, że tam gdzie występuje element bierny, nastąpi przesunięcie fazowe między napięciem, a prądem. Zmniejszony jest współczynnik mocy, ale obwód pozostaje dalej obwodem liniowym.



Rys. 2.4 Kształt fali prądu przy obciążeniu nieliniowym [10]

Rys. 2.4 przedstawia sytuację, gdzie obciążeniem jest prosty pełnookresowy prostownik oraz kondensator taki, jak przy włączeniu zasilacza impulsowego. W takim przypadku prąd płynie tylko wtedy, gdy napięcie wejściowe przekracza odpowiadający ładunek zgromadzony w kondensatorze zbiorczym, to znaczy blisko najwyższego punktu sinusoidy napięcia, jak pokazuje kształt linii obciążenia.

#### ○ Współczynniki charakteryzujące harmoniczne napięcia i prądu [11]

- Współczynnik THD -(Total Harmonic Distortion) całkowity współczynnik odkształcenia harmonicznymi:

$$THDu = \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U_1} \quad THDi = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} \quad 2.4$$

gdzie:  $U, I$  - wartość skuteczna odpowiednio napięcia i prądu

$U_1, I_1$  - wartość skuteczna pierwszej harmonicznej odpowiednio napięcia i prądu.

- Współczynnik IHD (Individual Harmonic Distortion) - określa udział poszczególnych harmonicznymi k-tego rzędu w przebiegu badanym.

$$IHD_{\%} = \frac{I_k}{I_1} \quad IHD_{\%} = \frac{I_k}{I_1} \quad 2.6$$

- Współczynnik TDD (Total Demand Distortion) - określa w niektórych przypadkach odkształcenia prądu spowodowane harmonicznymi.

$$TDD = \sqrt{\sum_{k=2}^N \left( \frac{I_k}{I_{1n}} \right)^2} \quad 2.7$$

gdzie:  $I_k$  - wartość skuteczna k-tej harmonicznej prądu,  $I_{1n}$  - wartość skuteczna podstawowej harmonicznej prądu odpowiadająca mocy umownej  $S_u$ ,  $N$  - liczba harmonicznymi, najczęściej przyjmuje się  $N = 50$ .

### ○ Skutki występowania wyższych harmonicznych

Pogorszenie jakości zasilania powoduje występowanie wielu problemów w obwodach zasilających. Ze względu na ciągły wzrost liczby odbiorników nieliniowych, które są szczególnie odpowiedzialne za odkształcanie przebiegów prądów oraz napięcia, problem się coraz bardziej nasila. Efektem zakłóceń wprowadzanych do sieci przez odbiorniki nieliniowe mogą być między innymi:

#### ➤ Wzrost strat w elementach rezystancyjnych [9]

Prądy o impulsowych przebiegach są pobierane m.in. przez prostowniki z filtrem pojemnościowych, występujące powszechnie w zasilaczach bardzo wielu urządzeń. Impulsowy przebieg prądu, pomimo niewielkiej wartości średniej charakteryzuje się znaczną wartością skuteczną, co jest przyczyną istotnego wzrostu strat energii oraz przegrzewania się elementów rezystancyjnych. Straty np. w elementach rezystancyjnych linii przesyłowej, na bezpiecznikach przez które płynie taki prąd, mogą być nawet kilkanaście razy większe od strat powstających przy przebiegu sinusoidalnym.

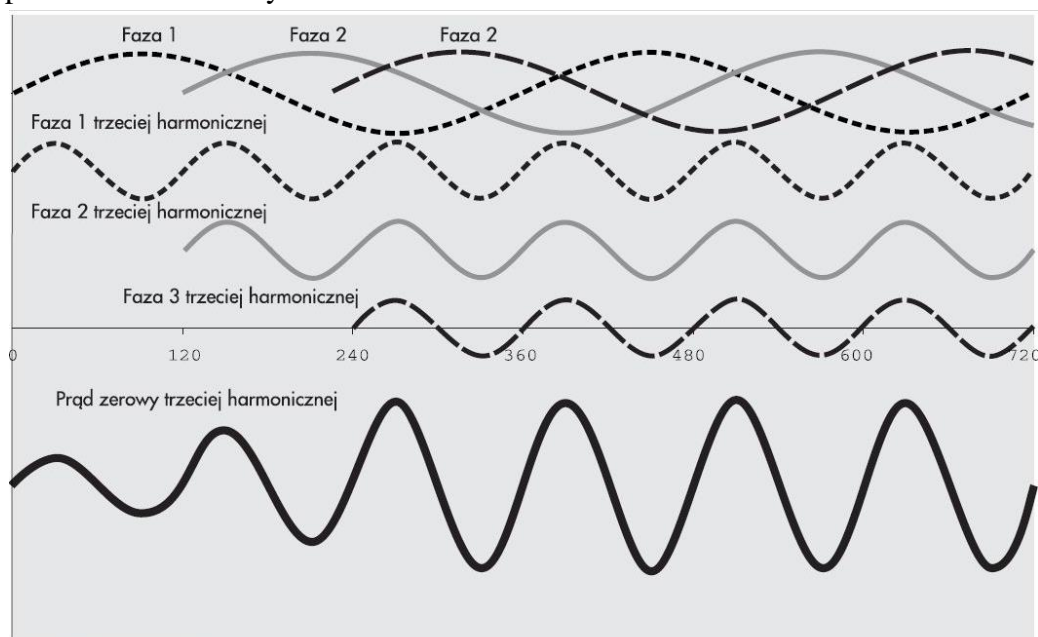
#### ➤ Zaburzenia w pracy silników i generatorów [10,12]

Jednym ze skutków obecności harmonicznych w napięciu i prądzie w maszynach wirujących (indukcyjnych i synchronicznych) jest wzrost temperatury pracy spowodowany stratami w uzwojeniach i na magnesowanie maszyny. Jest to dodatkowe narażenie izolacji i elementów mechanicznych, które powoduje skrócenie czasu eksploatacji maszyny. Indukowanie prądu o wysokiej częstotliwości w wirniku jest dodatkową stratą. Kolejnym problemem jest powstawanie pól harmonicznych w stojanie, z których każdy próbuje wprowadzić silnik w ruch obrotowy, o różnej prędkości obrotowej, w różnych kierunkach. Harmoniczne powodują podwyższenie poziomu zakłóceń akustycznych.

#### ➤ Straty w transformatorach [10]

Straty histerezy i w prądach wirowych zwiększają się zwykle o około 10% strat przy pełnym obciążeniu. Rośną one z kwadratem rzędu harmonicznej. W praktyce, przy pełnym obciążeniu transformatora sprzętem komputerowym, łączne straty byłyby dwa razy większe niż przy porównywalnym obciążeniu liniowym. Powoduje to o wiele wyższą temperaturę pracy transformatora i szybsze zużycie. Na przykład w takich warunkach żywotność transformatora zmniejszyłaby się z około 40 lat do 40 dni. Inny wpływ harmonicznych na transformatory wiąże się z harmonicznymi rzędu podzielnego przez 3. Przy uzwojeniu połączonym w trójkąt wszystkie harmoniczne rzędu podzielnego przez 3 sumują się w fazie tak i krążą w uzwojeniu. Harmoniczne te są efektywnie "pochłaniane" przez uzwojenie i nie rozprzestrzeniają się w systemie zasilania, a transformatory z takim układem połączeń służą jako transformatory izolujące te harmoniczne. Przy przemianowaniu transformatora trzeba wziąć pod uwagę ten krążący w uzwojeniu transformatora prąd [10]. Warto też zauważyć, że harmoniczne rzędu będącego wielokrotnością liczby 3 w uzwojeniach połączonych w gwiazdę sumują się w przewodzie neutralnym. Powoduje to wzrost temperatury transformatora, a przy dużych prądach prowadzi do uszkodzenia izolacji. Przepływ harmonicznych powoduje wzrost zaburzeń akustycznych.

- Konieczność zwiększania wydajności prądowej źródeł zasilających [9].  
Pobór prądu o przebiegu impulsowym wymaga zwiększenia wydajności źródła zasilającego. Dotyczy to szczególnie takich urządzeń jak agregaty prądotwórcze i UPS-y. W przypadku zasilaczy UPS jednym z parametrów jest współczynnik crest-factor, który określa dopuszczalny stosunek wartości szczytowej do wartości skutecznej prądu pobieranego z zasilacza. Większe wartości współczynnika pozwalają na poprawną pracę UPS przy impulsowym poborze prądu przez zasilane odbiorniki.
- Wzrost prądu w przewodzie neutralnym [10].  
Dołączenie do sieci trójfazowej nieliniowych odbiorników jednofazowych powoduje znaczny wzrost wartości prądu w przewodzie zerowym. Przy symetrycznym obciążeniu liniowymi odbiornikami suma arytmetyczna prądów jest równa zero. Przy niesymetrycznym obciążeniu przewodów fazowych lub przy odbiornikach nieliniowych w przewodzie neutralnym płynie prąd. Z właściwości harmoniczných wiadomo, że sinusoidy harmoniczných nie będących wielokrotnością liczby 3 są przesunięte względem siebie o  $120^\circ$ , co powoduje sumaryczny prąd w przewodzie neutralnym równy zero. Natomiast przebiegi harmoniczných będących wielokrotnością liczby 3 nie są przesunięte względem siebie i sumują się w przewodzie neutralnym.



Rys. 2.5 obciążanie przewodu neutralnego przez harmoniczne 3-rzędu [10]

W Polsce przeciążenie przewodu neutralnego w starym budownictwie może być poważnym zagrożeniem z uwagi na stosowanie w minionych czasach jako przewodu neutralnego żył aluminiowych o zmniejszonych przekrojach. W środowisku o dużej ilości odbiorników nieliniowych zaleca się zwiększenie przekroju przewodu neutralnego nawet dwukrotnie w stosunku do przekroju przewodów fazowych. Niezależnie od przegrzewania się przewodu neutralnego, w zależności od jego przekroju, mogą się również pojawiać spadki i zakłócenia napięcia, wpływające negatywnie na pracę odbiorników.

W USA, gdzie ze względu na napięcie znamionowe tylko 120V i odpowiednio większe prądy, problem jest jeszcze bardziej jaskrawy, używa się już częściowo kabli 6-żyłowych, przy czym dla przewodu neutralnego prowadzi się dwie żyły równolegle. [14]

➤ Zjawisko naskórkowości (Kelvina) [10]

Prąd przemienny w znacznej części płynie po zewnętrznej powierzchni przewodu. Jest to zjawisko zwane naskórkowością i jest wyraźniej widoczne przy wysokich częstotliwościach. Zjawisko naskórkowości jest zwykle ignorowane, ponieważ ma bardzo niewielki wpływ przy składową podstawową, natomiast przy częstotliwości powyżej 350Hz, tzn. powyżej siódmej harmonicznej, następują dodatkowe straty i wydzielanie ciepła. Stosowanie wielordzeniowych kabli lub wielowarstwowych szyn może przyczynić się do złagodzenia tego problemu.

➤ Awarie kondensatorów [5]

Kondensatory kompensacyjne należą do tej kategorii urządzeń, które w bardzo dużym stopniu doświadczają skutków pracy w środowisku elektromagnetycznym z przebiegami odkształconymi. Przeciążenia, którym podlegają, dotyczą: napięcia, prądu i mocy. Dlatego też do tych wielkości odnoszą się, określone przez producentów, dopuszczalne współczynniki przeciążeniowe podające krotność ich wartości znamionowych. Wyznaczają one, dla baterii kondensatorów, obszar nieniszczących warunków, lecz praca z długotrwałym przeciążeniem skraca znacząco czas ich eksploatacji. Wzrost wartości szczytowej napięcia, będący rezultatem obecności wyższych harmonicznych, to dodatkowy stres dla izolacji. Może on spowodować w konsekwencji częściowe wyładowanie w dielektryku, zwarcie końców folii i trwałe uszkodzenie kondensatora. Dopuszczalny współczynnik przeciążenia napięciowego kondensatora nie przekracza 110% wartości znamionowej. Większość problemów jest wywołanych harmonicznymi prądu. Przepływ harmonicznymi prądu powoduje wzrost prądu, który może się zwiększać wraz ze wzrostem rzędu harmonicznej (w wyniku zmniejszenia impedancji zastępczej kondensatora  $Z_c$ ). Przepływ przez baterię kondensatorów zbyt dużego prądu powoduje dodatkowe straty mocy w wyniku czego następuje wzrost temperatury, przyspieszenie procesów fizykochemicznych dielektryka. Wyszczególnione procesy powodują skrócenie czasu eksploatacji urządzenia, trwałe uszkodzenie lub przepalenie wkładek bezpiecznikowych co powoduje nieprawidłową kompensację układu elektrycznego.

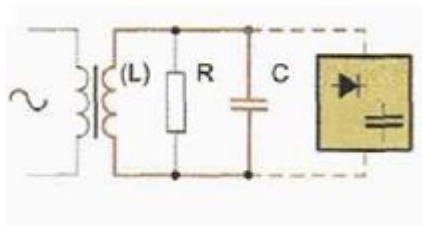
➤ Przyspieszenie degradacji izolacji [9]

wyższe harmoniczne napięcia, ze względu na pojemności występujące w strukturach izolacji, powodują wzrost strat spowodowanych prądami pojemnościowymi. Prądy te mogą powodować lokalne przegrzewania, mikropęknięcia i w konsekwencji przyspieszoną degradację izolacji. Powinno to skłaniać do częstszych pomiarów stanu izolacji w środowiskach o dużym poziomie harmonicznym.

➤ Zjawiska rezonansowe [9]

Jedną z przyczyn groźnych awarii, będących następstwem generowania harmonicznymi przez odbiorniki nieliniowe, mogą być zjawiska rezonansowe. W obwodzie przedstawionym na rys.2.10 w wyniku pobudzenia przez harmoniczne do

drgań obwodu LC mogą powstać przepięcia, stanowiące zagrożenie dla zasilanych urządzeń.



Rys. 2.6 Układ zasilania z odbiornikiem nieliniowym [9]

Przedstawione zagrożenia, będące następstwem dołączenia do sieci zasilającej odbiorników pogarszających jakość energii elektrycznej stanowią realne źródła awarii, zwłaszcza, że ilość odbiorników nieliniowych ma tendencję silnie rosnącą. Kumulacja zagrożeń może prowadzić do awarii, których skutki mogą mieć charakter nie tylko lokalny. Dla prawidłowej oceny potencjalnego zagrożenia należy zwracać uwagę na pomiar rzeczywistej skutecznej wartości prądu oraz na doraźną kontrolę zniekształceń napięcia i prądu. Pomiary powinny być rejestrowane dla dłuższych okresów czasowych, gdyż czasem większe zagrożenie stwarzają chwilowe zakłócenia o bardzo wysokich wartościach.

#### ○ Parametry niskiego i średniego napięcia zasilającego [22]

- Znamionowa częstotliwość napięcia zasilającego powinna wynosić 50 Hz.

W normalnych warunkach pracy wartość średnia częstotliwości mierzonej przez 10s dla sieci pracujących synchronicznie z systemem elektroenergetycznym powinna być zawarta w przedziale:

- 50 Hz  $\pm$  1% (tj. 49,5 ... 50,5 Hz) przez 95 % tygodnia,
- 50 Hz + 4% / -6 % (tj. 47 .. 52 Hz) przez 100 % tygodnia.

- dla sieci bez synchronicznego połączenia z systemem elektroenergetycznym

(np. sieci zasilających na niektórych wyspach) powinna być zawarta w przedziale:

- 50 Hz  $\pm$  2% (tj. 49 ... 51 Hz) przez 95 % tygodnia,
- 50 Hz  $\pm$  15% (tj. 42,5 .. 57,5 Hz) przez 100 % tygodnia.

- Znornalizowane napięcie znamionowe  $U_n$  publicznych sieci niskiego napięcia wynosi:

$U_n = 230$  V pomiędzy fazą a przewodem neutralnym dla sieci trójfazowych, czteroprzewodowych,

$U_n = 400$  V pomiędzy fazami, dla sieci trójfazowych, trójprzewodowych.

W warunkach normalnych pracy, w każdym tygodniu, 95 % ze zbioru 10- minutowych, średnich wartości skutecznych napięcia zasilającego powinno mieścić się w przedziale  $U_n \pm 10$  %.

- W normalnych warunkach pracy, w ciągu każdego tygodnia, 95% ze zbioru 10-minutowych, średnich wartości skutecznych dla każdej harmonicznej napięcia powinno być mniejsze lub równe wartościom podanym w tabeli 2.2. Rezonanse mogą spowodować wystąpienie wyższych wartości dla indywidualnej harmonicznej.



Ponadto, współczynnik THD napięcia zasilającego (uwzględniający wszystkie harmoniczne aż do rzędu 40) powinien być mniejszy lub równy 8%.

Tabela 2.2 Wartości poszczególnych harmoniczných napięcia w sieci nN i Sn

nieparzyste harmoniczne				parzyste harmoniczne	
nie będące wielokrotnością 3		będące wielokrotnością 3			
harmoniczna rzędu h	wartość względna napięcia	harmoniczna rzędu h	wartość względna napięcia	harmoniczna rzędu h	wartość względna 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%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

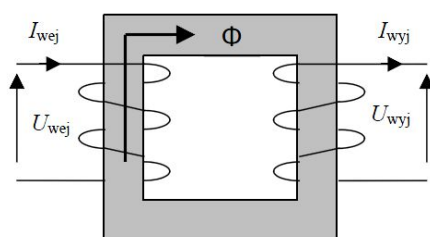
\*) – w zależności od układu i konstrukcji w sieci wartość dla 3- harmonicznej może być znacznie mniejsza

### 3. Źródła wyższych harmoniczných napięć i prądów

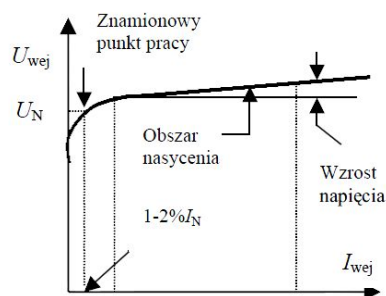
Podstawowym źródłem wyższych harmoniczných są odbiorniki energii elektrycznej o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej. Do takich odbiorników można zaliczyć:

#### o Transformatory [5, 23]

Transformatory były historycznie jednym z pierwszych źródeł harmoniczných w systemie elektroenergetycznym. Zależność pomiędzy napięciem i prądem strony pierwotnej transformatora - jako charakterystyka magnesowania - jest silnie nieliniowa i stąd lokalizacja punktu pracy w obszarze jej nasycenia powoduje znaczące odkształcenia prądu magnesującego (rys. 3.2). Zwykle transformator projektuje się na wartość prądu magnesującego równego 1-2%  $I_N$  [5].



Rys 3.1 Schemat ideowy transformatora [5]



Rys 3.2 Charakterystyka magnesowania transformatora [5]

Z teorii transformatorów wiemy, że przy sinusoidalnie zmieniającym się strumieniu magnetycznym w rdzeniu, prąd magnesujący powinien zawierać szereg harmoniczných nieparzystych. Przy transformatorze 1-fazowym harmoniczne te mogą być dostarczane z sieci bez ograniczeń. Przy transformatorze trójfazowym sinusoida podstawowa prądu

magnesującego oraz harmoniczne nieparzyste, których rząd jest niepodzielny przez 3, tworzą normalne układy trójfazowe. Natomiast harmoniczne rzędu podzielnego przez 3 są skierowane zgodnie i występują we wszystkich uzwojeniach. Budowa rdzenia transformatora oraz kojarzenia uzwojeń ma zasadniczy wpływ na zawartość harmonicznych w prądzie magnesującym [23].

- *Uzwojenie pierwotne połączone w gwiazdę z wyprowadzonym punktem neutralnym.*

Każda z faz może swobodnie pobierać z sieci harmoniczne, a w szczególności rzędu podzielnych przez 3. Przez przewód neutralny płynie suma arytmetyczna harmonicznych rzędu podzielnych przez 3.

- *Uzwojenie pierwotne połączone w trójkąt.*

Przy takiej konfiguracji uzwojeń sieć nie może dostarczać harmonicznych rzędu podzielnych przez 3. Konsekwencją tego byłoby odkształcenie krzywych strumieni fazowych- przez wystąpienie w nich harmonicznych trzeciego rzędu. Harmoniczne te wznecają we wszystkich uzwojeniach fazowych siły elektromotoryczne. Siły te sumują się arytmetycznie, powodując prąd potrójnej częstotliwości. Prąd ten wytwarza swój strumień o kierunku przeciwnym niż kierunek strumienia który go wytworzył. W konsekwencji tego następuje tłumienie strumienia potrójnej częstotliwości. Strumień podczas magnesowania pozostaje praktycznie sinusoidalny, a amperozwoje są częściowo dostarczane z sieci, a częściowo wytwarzane w uzwojeniach trójkąta (rzędu podzielnych przez 3). W rdzeniu niesymetrycznym dodatkowo część harmonicznych podzielnych przez 3 będzie dostarczana z sieci.

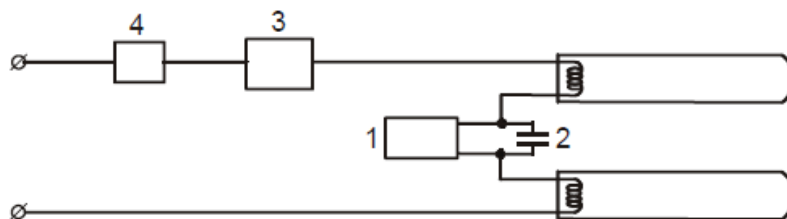
- *Uzwojenie pierwotne połączone w gwiazdę bez wyprowadzonego punktu neutralnego.*

Z sieci uzwojenie pierwotne nie może czerpać harmonicznych podzielnych przez 3. W procesie magnesowania bierze udział również uzwojenie wtórne połączone w trójkąt uzupełniając amperozwoje magnesujące harmonicznych podzielnymi przez 3. Dla rdzenia niesymetrycznego trójkąt wytwarza za małe amperozwoje dla kolumn skrajnych, a za duże dla kolumny środkowej. Z sieci harmoniczne rzędu 3-ciego dopływają fazami skrajnymi, natomiast odpływają fazą środkową.

#### ○ **Świetlówki kompaktowe [2]**

##### ***Świetlówkami typu SL***

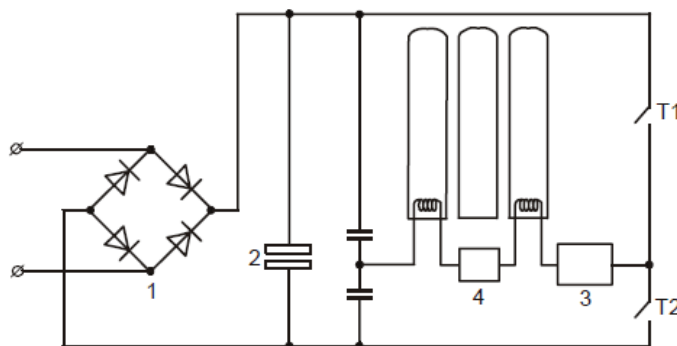
Świetlówki kompaktowe pracujące w połączeniu ze statecznikiem indukcyjnym zwane są świetlówkami typu SL. Ich układ elektryczny jest identyczny jak układ świetlówek liniowych, identyczny jest także proces zapłonu. Lampa zasilana jest bezpośrednio z sieci o częstotliwości 50 Hz, w związku z czym statecznik ma stosunkowo dużą masę. Schemat świetlówki typu SL pokazany został na rys. 3.3. Lampa jest elementem silnie nieliniowym, a jej charakterystyka prądowo-napięciowa ma dla wartości chwilowych kształt pętli, co wynika z fizycznych właściwości wyładowań elektrycznych w gazie.



Rys. 3.3 Schemat świetłówki kompaktowej SL: 1 – zapłonnik, 2 – kondensator zapłonowy, 3 – statecznik indukcyjny, 4 – zabezpieczenie termiczne [2]

### Świetłówki typu PL

Są to świetłówki kompaktowe ze statecznikiem elektronicznym. Na rys. 3.9 pokazany został przykładowy schemat takiej świetłówki z układem podgrzewania elektrod, prostownikiem i generatorem pracującym przy częstotliwości ok. 45 kHz. Statecznik indukcyjny lampy przy tej częstotliwości jest niewielki, dzięki czemu lampa zintegrowana z całym układem ma małe rozmiary i masę. Podstawową wadą świetłówek kompaktowych ze statecznikiem elektronicznym jest bardzo silne odkształcenie prądu dopływającego z sieci, znacznie silniejsze niż w przypadku świetłówek kompaktowych ze stabilizacją indukcyjną.



Rys. 3.4 Schemat świetłówki kompaktowej PL Electronic: 1 – układ prostujący, 2 – kondensator elektrolityczny, 3 – statecznik indukcyjny, 4 – układ podgrzewania elektrod [2]

### o Piece łukowe [5]

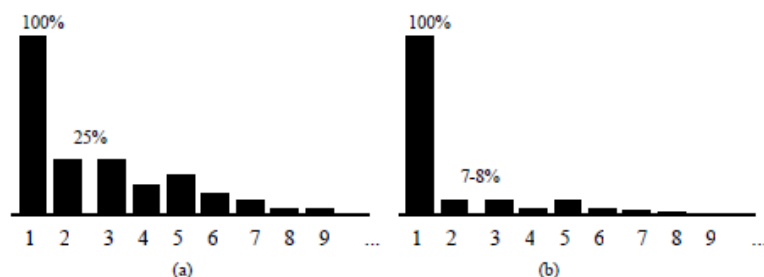
Przebiegi czasowe napięcia i prądów pieca mają charakter zmiennych losowych, są nieokreślonymi funkcjami czasu. Przedstawienie ich odkształcenia poprzez dyskretne spektrum jest pewnym, powszechnie stosowanym przybliżeniem rzeczywistości technicznej.



Rys. 3.5 Przykładowy przebieg czasowy prądu pieca w pierwszych minutach roztopienia [5]

Warunki wyładowania łukowego ulegają zmianom w poszczególnych fazach wytopu. W efekcie największy stopień odkształcenia prądu występuje w okresie roztopiania. Rozróżniamy dwa dominujące rodzaje pieców ze względu na ich budowę: piece łukowe i pieco-kadzie. W przypadku pieco-kadzi wahania prądu stają się mniejsze, a krzywa prądu

coraz mniej różni się od przebiegu sinusoidalnego. Jest to spowodowane krótszym łukiem z powodu pojawienia się lustra.



Rys. 3.6 Przykładowe spektrum harmoniczne prądu: a) pieca łukowego, b) pieco-kadzi [5]

Wartości chwilowe szybko maleją wraz ze wzrostem częstotliwości harmonicznej oraz wzrostem mocy pieca. Wyższe harmoniczne o rzędach powyżej 11 mają praktycznie pomijalne wartości. Obecność harmonicznej o rzędach będących całkowitą krotnością trzeciej harmonicznej jest rezultatem asymetrycznej pracy pieca.

#### ○ Wyladowcze źródła światła [5]

W urządzeniach tych światło jest wytwarzane w oparciu o przepływ prądu przez parę lub gaz. Występujący w ich strukturze szeregowy dławik z rdzeniem (balast) jest źródłem trzeciej harmonicznej o znacznej wartości. Jego zastąpienie w nowoczesnych konstrukcjach układem elektronicznym, mimo niewątpliwych zalet użytkowych, może zwiększać wartość odkształceń.

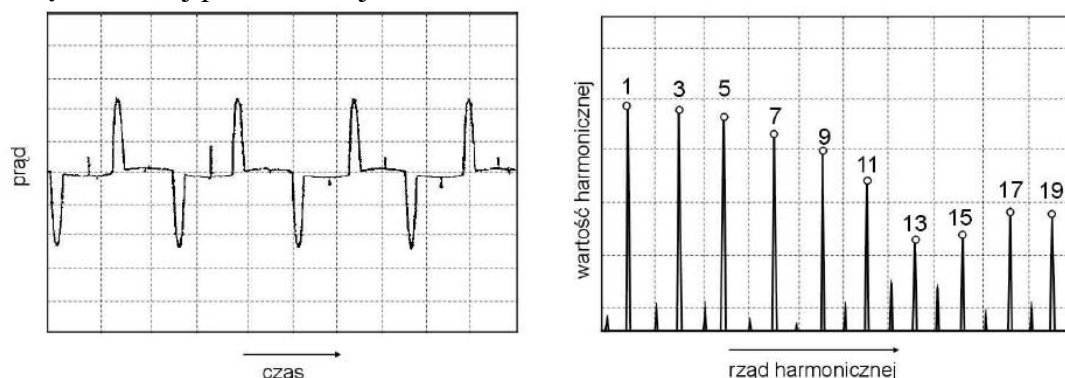
#### ○ Przekształtniki [19]

Zasada ich działania polega na załączaniu i wyłączaniu elementów półprzewodnikowych mocy (łączników). Przebieg czasowy napięcia wyjściowego przekształtników sieciowych jest wynikiem sekwencyjnego doprowadzania do zacisków wyjściowych, poprzez łączniki półprzewodnikowe, ściśle określonych wycinków (impulsów) przebiegów czasowych napięć linii zasilającej. Przebiegi czasowe prądów wejściowych przekształtników sieciowych jako odbiorników nieliniowych są odkształcone. Zakładając pomijalnie krótki czas komutacji ( $m=0$ ) oraz przyjmując, że prąd wyjściowy przekształtnika jest stały i nie zawiera tętnień, prądy uzwojeń transformatorów przekształtnikowych oraz prądy linii zasilającej przekształtniki mają przebiegi prostokątne lub schodkowe, przy czym liczba schodków w półfali tych prądów zwiększa się wraz ze zwiększeniem liczby tętnieniowej. Np.: prostownik sześciopulsowy powoduje sześć pulsów na okres na wyjściu prądu stałego. Będzie on w prądzie zasilającym generował harmoniczne o rzędzie  $-1/n \times \text{liczba pulsów} + 1$ , gdzie  $n=1,2,3...$  [10]

#### ○ Urządzenia informatyczne [5]

Urządzenia komputerowo-biurowe są bardzo kłopotliwe ze względu na wartości harmonicznych porównywalnych do wartości składowej podstawowej. Współczynnik odkształcenia prądu zawarty jest w ogromnej większości przypadków przedziale 100-130%, a wartość maksymalna trzeciej harmonicznej osiąga poziom 90-95% składowej podstawowej. Rysunek 3.7 przedstawia typowy przebieg prądu komputera PC wraz z jego widmem

harmonicznym. Widać wyraźnie, że 3, 5 i 7 harmoniczna mają wartości porównywalne z wartością składowej podstawowej.

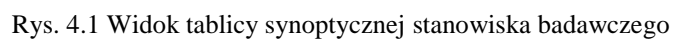


Rys 3.7 Przykładowy przebieg prądu komputera i jego rozkład na harmoniczne [5]

## 4. Opis stanowiska badawczego

### ○ Zasilanie stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze jest wyposażone w tablicę synoptyczną, na której są umieszczone schematy urządzeń z wyprowadzonymi zaciskami. Stanowisko będzie zasilane z puszek instalacyjnej podłączonej do tablicy rozdzielczej. Regulacja napięcia będzie odbywała się za pomocą autotransformatora At umieszonego na zewnątrz stanowiska. Zasilanie jego nastąpi po włączeniu stycznika Q1, oznaczony jako WG. Kontrola napięcia wyjściowego z At będzie się odbywać za pomocą trzech zewnętrznych woltomierzy, przyłączanych do odpowiednich zacisków. Po załączeniu stycznika Q2, opisanego na tablicy jako WP, zostaje podane napięcie na stanowisko. Sterowanie stycznikami zostało tak połączone, że w pierwszej kolejności należy załączyć stycznik WG, a następnie WP. Wyłączenie WG powoduje wyłączenie załączonego stycznika WP. Cewki styczników są zabezpieczone wyłącznikiem nadmiarowo-prądowym 6A (Q3).



Rys. 4.1 Widok tablicy synoptycznej stanowiska badawczego

- **Zasilanie i podłączenie analizatora AS3-mini**

Zasilanie analizatora zostało zabezpieczone wyłącznikiem nadmiarowo- prądowym 6A (Q4). Analizator jest załączany pokrętkiem S5 (opisany na tablicy- Załączanie analizatora AS3-mini). Napięcie jest podawane na zasilacz ~230V/~24V.

AS3-mini jest wyposażony w tory prądowe i napięciowe. Ze względu na pomiar bezpośredni tory prądowe zostały zabezpieczone wyłącznikami nadmiarowo-prądowymi 6A w celu ochrony przed przeciążeniem cewek pomiarowych urządzenia. Tory napięciowe zabezpieczone zostały w podobny sposób w celu ochrony przed zwarcieniem w urządzeniu.

- **Opis zainstalowanych badanych urządzeń**

- **Transformator TR1**

Jednostka trójfazowa- rdzeń trójkolumnowy zbudowany z kształtki 3UI

*Parametry elektryczne:*

-moc znamionowa	$S_N=250\text{VA}$
-znamionowe napięcie strony pierwotnej (fazowe)	$U_{GN}=230\text{V}$
-znamionowe napięcie strony wtórnej (fazowe)	$U_{DN}=60\text{V}$
-znamionowy prąd strony pierwotnej	$I_{GN}=0,38\text{A}$
-znamionowy prąd strony wtórnej	$I_{DN}=1,38\text{A}$

- **Transformator TR2**

Trzy jednostki jednofazowe- Odzwzorowują transformator pięciokolumnowy. Każdy z transformatorów ma rdzeń jednokolumnowy zbudowany z kształtki LL

*Parametry elektryczne:*

-moc znamionowa	$S_N=100\text{VA}$
-znamionowe napięcie strony pierwotnej (fazowe)	$U_{GN}=230\text{V}$
-znamionowe napięcie strony wtórnej (fazowe)	$U_{DN}=60\text{V}$
-znamionowy prąd strony pierwotnej	$I_{GN}=0,43\text{A}$
-znamionowy prąd strony wtórnej	$I_{DN}=1,67\text{A}$

- **Lampy wyładowcze**

Model zbudowany z trzech układów (po jednym na fazę) składających się ze statecznika, zapłonika oraz lampy sodowej o mocy 70W.

- **Świetlówki kompaktowe**

Model zbudowany z sześciu świetlówek kompaktowych (energooszczędnych) -po dwie na fazę o mocy 18W każda.

Należy zachować odpowiedni zakres napięcia w czasie badań zawartego między (0,7-1,1)Un.

- **Prostownik sześciopulsowy**

Prostownik jest zbudowany na bazie dwupołwkowego mostka trójfazowego. Składa się on z sześciu diod prostowniczych (o parametrach: Un=1000V, In=10A).

Mostek będzie obciążany równolegle połączonymi trzema rezystorami ceramicznymi (o mocy 50W każdy) i o rezystancji wypadkowej 2500Ω. Rezystory są przystosowane

do wymuszenia łącznej mocy na rezystorach ok. 110 W. Pomiary należy wykonywać szybko z uwagi na intensywne wydzielanie się ciepła na rezystorach.

#### ➤ **Dowolny odbiornik**

Na obudowie stanowiska zastały umieszczone trzy gniazda jednofazowe do których można podłączyć dowolny odbiornik jednofazowy. Należy pamiętać o maksymalnym prądzie jednej fazy równym 6A –o mocy ok. 1300W.

#### ○ **Ochrona przeciwporażeniowa stanowiska**

Stanowisko jest przystosowane do podłączenia przewodu PE. Zastosowano samoczynne wyłączenie zasilania w układzie TN. Metalowa konstrukcja stanowiska, transformator T1 oraz bolce gniazd 1-fazowych zostały podłączone do listwy uziemiającej. Zacisk uziemiający został wyprowadzony obok zacisków zasilających po lewej stronie obudowy.

W przypadku braku przewodu PE w instalacji należy bezwzględnie zmostkować zacisk PE z zaciskiem N ze względów bezpieczeństwa oraz ze względu na brak możliwości wyprowadzenia osobnego uziemienia roboczego dla transformatorów TR1 i TR2.

#### ○ **Zastosowanie analizatora AS3-mini [16]**

Analizator parametrów sieci AS-3 mini przeznaczony jest do ciągłego pomiaru, analizy i rejestracji parametrów energii elektrycznej w obwodach jedno i trójfazowych sieci i urządzeń elektroenergetycznych. Może być instalowany na szynach DIN w szafach rozdzielczych jak również w polach zasilających i odbiorczych rozdzielnic elektroenergetycznych. Zaciski napięciowe analizatora można przyłączyć bezpośrednio do sieci o międzyfazowym napięciu znamionowym do 400V lub pośrednio do uzwojeń wtórnych przekładników napięciowych o napięciu 100 V. Zaciski prądowe podłączyć pośrednio przez przekładniki prądowe o prądzie wtórnym 5 A lub w przypadku stanowiska badawczego bezpośrednio z maksymalnym obciążeniem 5A

Analizator jest urządzeniem pomocnym do oceny jakości energii elektrycznej i stanowi uzupełnienie dla analizatorów AS-3 plus. Jako urządzenie łączące wybrane cechy dobrych mierników cyfrowych, rejestratorów zdarzeń, analizatorów wyższych harmonicznych i liczników energii elektrycznej ze strażnikiem mocy wypełnia luki na rynku pomiarów elektrycznych. Odpowiednia ilość analizatorów wyposażonych w łącze szeregowe wraz z dostarczonym oprogramowaniem umożliwi prowadzenie monitorowania parametrów elektrycznych całego systemu zasilania użytkownika. Wykorzystując wszystkie możliwości analizatora AS-3 mini służby energetyczne zyskują narzędzie wspomagania diagnostycznego, pomocne w prowadzeniu prawidłowej gospodarki elektroenergetycznej zgodnej z wymogami wprowadzonego prawa energetycznego oraz z zasadami ekonomii.

#### ○ **Opis i działanie programu AS-koncentrator [17]**

Program AS-Koncentrator przeznaczony jest do obsługi Analizatorów sieci AS firmy TWELVE Electric®. Jest programem usługowo-serwisowym, zapewniającym komunikację z poszczególnymi analizatorami oraz kontrolę transmisji, podgląd bieżących wskazań i nastaw analizatorów, ułatwienie zdalnej konfiguracji poszczególnych funkcji analizatorów. W sposób automatyczny przenosi zawartości poszczególnych rejestratorów z przyrządów do bazy



danych, rozsyła bieżące informacje do poszczególnych uprawnionych użytkowników jako serwer DDE oraz serwer TCP. Dzięki temu jest głównym elementem wizualizacyjnym systemów informatycznych wspomagających zarządzanie jakością energii elektrycznej. Program AS-Koncentrator utworzony przy pomocy narzędzia Borland Delphi, wykorzystuje najnowsze technologie informatyczne zapewniając szybką i niezawodną pracę w środowisku Windows 95/98/NT/ME/2000/XP. Praca wielowątkowa pozwala optymalnie wykorzystać moc obliczeniową komputera, zapewniając jednocześnie maksymalną szybkość obsługi systemu monitorowania i zachowując dużą swobodę oraz łatwość konfiguracji. W celu otrzymania oscylogramu, w zakładce miernik1, należy wybrać okno oscyloskopu i kliknąć „Zatrzaśnij przebieg do analizy”. Pobieranie wykresu trwa kilka minut, stan pobierania możemy sprawdzić w oknie głównym programu AS-Koncentrator

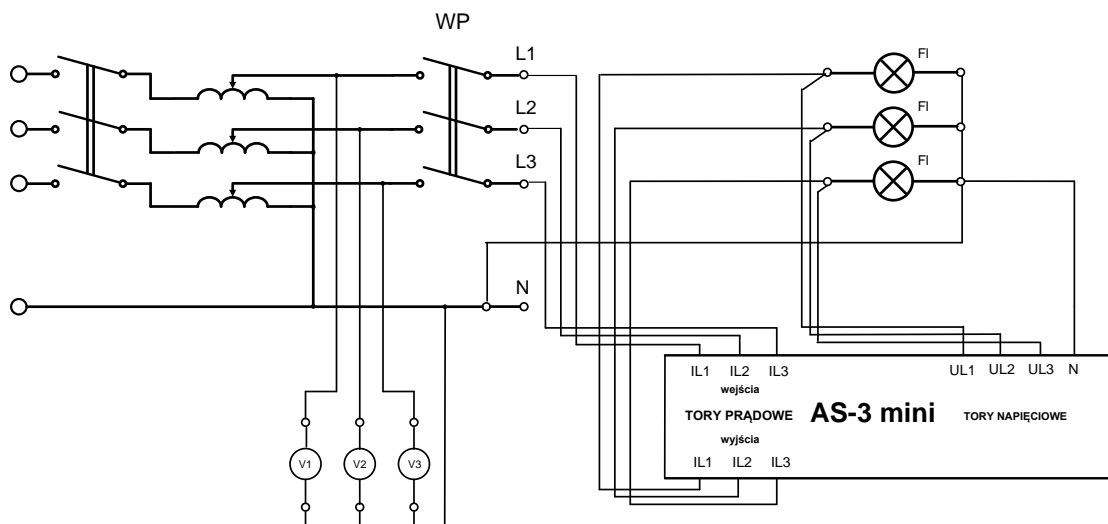
#### o Opis i działanie programu AS-Wizualizacja [18]

Program AS-Wizualizacja przeznaczony jest do graficznej prezentacji wyników Analizy Sieci Energetycznych analizatorami produkcji firmy TWELVE Electric®. Jest programem usługowym, zapewniającym dostarczanie i prezentację w postaci graficznej stanów i wartości poszczególnych parametrów z poszczególnych punktów pomiarowych systemu monitorowania oraz wyświetlanie dodatkowych informacji oraz alarmów. Wszystkie dane są dostarczane przez serwery parametrów bieżących za pośrednictwem protokołu TCP. Dzięki temu użytkownik posiada szybki i intuicyjny podgląd stanu systemu zasilania, a dostarczane informacje ułatwiają racjonalne zarządzanie jakością energii elektrycznej. Program AS-Wizualizacja utworzony przy pomocy Borland Delphi, wykorzystuje najnowsze technologie informatyczne zapewniając szybką i niezawodną pracę w środowisku Windows 95/98/NT/ME/2000/XP. Składa się z programu głównego AS-Wizualizacja, zestawu bibliotek z gotowymi elementami i projektami oraz projektów ekranów wizualizacyjnych przygotowanych przez użytkownika do wizualizacji poszczególnych informacji. Pliki z definicjami elementów posiadają rozszerzenie \*.ewp, natomiast pliki z projektami poszczególnych ekranów \*.kwp.

## 5. Wykonywanie ćwiczenia

### Pomiary zawartości harmonicznych świetlówek kompaktowych

Pomiary należy wykonać dla układu połączonego wg rys. 5.1. Świetlówki zasilić napięciem 230V. Wartość napięcia należy ustawić przy otwartym wyłączniku WP, a następnie po ustawieniu wymaganego napięcia zamknąć WP. Pomiary zarejestrować po odczekaniu minuty. Wyniki pomiarów wpisać do tabel nr 5.1 i 5.2. Należy zatrzasnąć przebiegi prądów i napięć na początku pomiarów. Pomiary powtórzyć dla napięć 210 i 240 V.



Rys. 5.1 Ideowy schemat do wyznaczania zawartości harmonicznego napięcia i prądu świetlówek kompaktowych

Tabela 5.1. Harmoniczne w napięciach

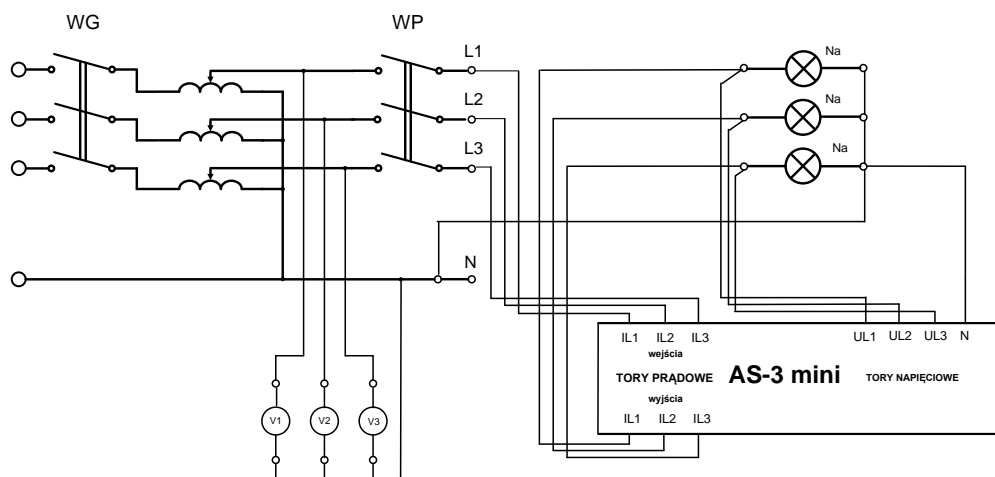
$U_i[V]$	Nr harmoniczej	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	THD
	$U_{L1} [\%]$															
	$U_{L2} [\%]$															
	$U_{L3} [\%]$															

Tabela 5.2. Harmoniczne w prądach

$I_N[A]$	$I_i[A]$	Nr harmoniczej	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	THD
		$I_{L1} [\%]$															
		$I_{L2} [\%]$															
		$I_{L3} [\%]$															

### Pomiary zawartości harmonicznego prądu wyładowczych

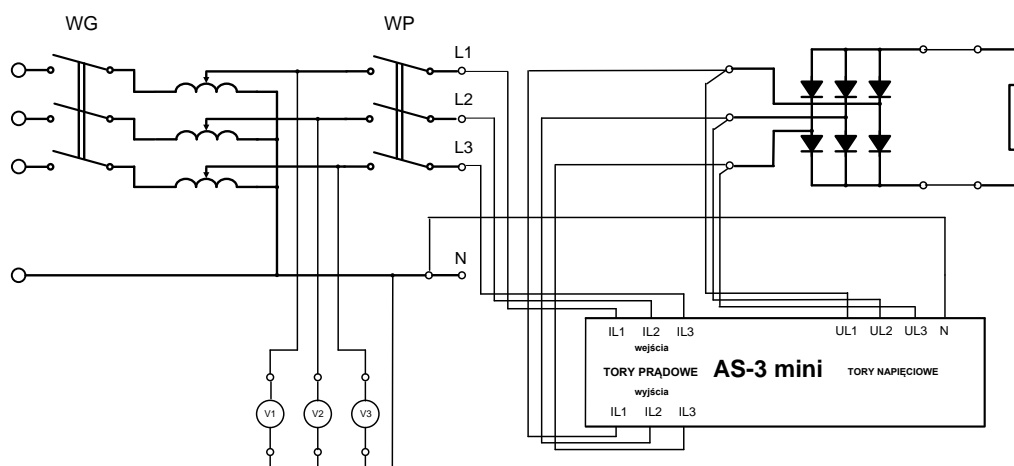
Pomiary należy wykonać dla układu połączonego wg rys. 5.2. Lampy zasilić napięciem 230V. Wartość napięcia należy ustawić przy otwartym wyłączniku WP, a następnie po ustawieniu wymaganego napięcia zamknąć WP. Pomiary zarejestrować po odczekaniu minuty. Wyniki pomiarów wpisać do tabel nr 5.1 i 5.2. Należy zatrzasać przebiegi prądów i napięć na początku pomiarów. Pomiary powtórzyć dla napięć 210 i 240 V.



Rys. 5.2 Ideowy schemat do wyznaczania zawartości harmonicznych napięcia i prądu lamp wyładowczych

### Pomiary zawartości harmonicznych prostownika sześciopulsowego

Pomiary należy wykonać dla układu połączonego wg rys. 5.3. Prostownik zasilć napięciem fazowym 230V. Pomiary zarejestrować zaraz po włączeniu zasilania. Wyniki pomiarów wpisać do tabel nr 5.1 i 5.2. Należy zatrzasnąć przebiegi prądów i napięć na początku pomiarów. Prostownik jest obciążany rezystorami o mocy wypadkowej ok. 90W. Pomiary należy wykonywać szybko ze względu na wydzielanie dużej ilości ciepła na rezystorach.



Rys. 5.3 Ideowy schemat do wyznaczania zawartości harmonicznych prostownik sześciopulsowego

## Literatura

- [1] Malska W., Łatka M.: Wpływ odbiorników nieliniowych na parametry jakości energii elektrycznej, Wiadomości elektrotechniczne 10/2007.
- [2] Gabryjelski Z.: Świetlówki kompaktowe jako źródła zaburzeń elektromagnetycznych, Przegląd elektrotechniczny 9/2007.
- [3] Malska W., Łatka M.: Wybrane wskaźniki jakości energii elektrycznej, Wiadomości elektrotechniczne 12/2007.
- [4] Hanzelka Z.: Jakość Energii Elektrycznej. „Część 1: Wczoraj, Dziś, Jutro...” dostępna na stronie <http://www.twelvee.com.pl> na dzień 10.09.2009
- [5] Hanzelka Z.: Jakość Energii Elektrycznej. „Część 4- Wyższe harmoniczne napięcie i prądów.” dostępna na stronie <http://www.twelvee.com.pl> na dzień 10.09.2009
- [6] Konorski B.: „Podstawy Elektrotechniki t.III”, PWN Warszawa 1967

- [7] Zaburzenia w napięciu zasilającym Europejski Program Leonardo da Vinci – dostępna na stronie <http://www.miedz.org.pl/> na dzień 10.10.2009
- [8] Pasko M., Maciążek M. Buła D.: Wprowadzenie do zagadnień analizy jakości energii elektrycznej, Wiadomości elektrotechniczne 4/2007.
- [9] Baranek A., Niewiadomski M., Płatek T.: Odbiorniki nieliniowe – problemy i zagrożenia, Wiadomości elektrotechniczne 4/2007.
- [10] Jakość zasilania- poradnik. Harmoniczne. Przyczyny powstawania i skutki działania. Europejski Program Leonardo da Vinci – dostępna na stronie <http://www.miedz.org.pl/> na dzień 10.10.2009
- [11] Kuśmirek Zygmunt: „Harmoniczne w systemach elektroenergetycznych” Przegląd Elektrotechniczny, NR 6/2006
- [12] Hanzelka Z.: „Rozważania o jakości energii elektrycznej”. Elektroinstalator 12/2001
- [13] Wiatr Julian: „Wyższe harmoniczne przyczyną zagrożenia pożarowego w instalacjach elektrycznych” Wojskowe Biuro Studiów projektów budowlanych i lotniskowych w Warszawie
- [14] Stefan Fassbinder „I GDZIE TU JEST „HARMONIA”?” Jachranka 2001 – dostępna na stronie [http://www.miedz.org.pl](http://www.miedz.org.pl/) na dzień 10.10.2009
- [15] <http://harmoniczne.pl/> na dzień 01.11.2009
- [16] Twelve „Instrukcja użytkowania AS3-mini” wersja 3.58 dostarczana wraz z oprogramowaniem analizatora
- [17] Twelve „Instrukcja użytkowania AS3-Koncentrator” wersja 2.22” dostarczana wraz z oprogramowaniem analizatora
- [18] Twelve „Instrukcja użytkowania AS3-wizualizacja” wersja 2.4” dostarczana wraz z oprogramowaniem analizatora
- [19] „Pomiary i ocena jakości energii elektrycznej (jakość napięcia zasilającego) w punkcie wspólnego przyłączenia” Politechnika Lubelska, Laboratorium pomiarów i eksploatacji w elektroenergetyce. Lublin 2006
- [20] Hanzelka Z.: Jakość Energii Elektrycznej. „Część 4- Wyższe harmoniczne napięć i prądów c.d.” dostępna na stronie <http://www.twelvee.com.pl> na dzień 10.09.2009
- [21] A. Firlit „Aktywna filtracja wyższych harmonicznych” z cyklu „Ciągłość i jakość zasilania” praca zbiorowa dostępna na stronie <http://www.miedz.org.pl> na dzień 10.11.2009
- [22] PN-EN 50160:2002 „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych”
- [23] E. Jezierski „Transformatory. Budowa i projektowanie” Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1967, wydanie II