

1. Badania laboratoryjne

Celem ćwiczenia jest poznanie metod wyznaczania błędów prądowego i kąowego transformacji harmonicznego prądu odkształconego przez indukcyjny przekładnik prądowy. Określenie głównych czynników warunkujących przebieg charakterystyk błędów prądowego i kąowego wykreślonych w funkcji częstotliwości transformowanej harmonicznego odkształconego napięcia pierwotnego.

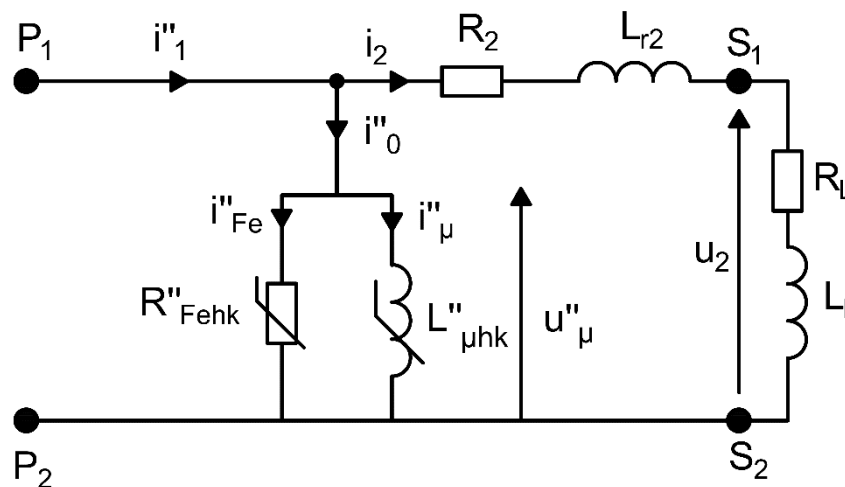
2. Podstawy teoretyczne

Przekładniki prądowe z rdzeniem magnetycznym (indukcyjne przekładniki prądowe) są powszechnie stosowane w sieciach elektroenergetycznych do transformacji prądów o znacznych wartościach na prądy o wartościach dopasowanych do układów wejściowych aparatury pomiarowej lub zabezpieczeniowej. Urządzenia te zyskały swoją popularność z uwagi na niezawodność i wysoką dokładność transformacji prądów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz (60 Hz), a obecnie nawet prądów o częstotliwości do 5 kHz. Jednakże, w wyniku obniżenia jakości energii elektrycznej indukcyjne przekładniki prądowe coraz częściej transformują prądy odkształcone. Z tego względu konieczne stało się określenie wymagań dotyczących dokładności transformacji harmonicznego do częstotliwości co najmniej 2 kHz według wymagań IRiESD (np. PGE). Aktualnie żadne normy nie określają także sposobu sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników w warunkach transformacji prądów odkształconych. Zawarte w normie PN-EN 61869-6:2017 wymagania w zakresie częstotliwości wyższych niż 50 Hz (60 Hz) dotyczą wyłącznie przekładników małej mocy.

Typowy zakres znamionowych prądów pierwotnych seryjnie produkowanych indukcyjnych przekładników prądowych wynosi od 50 A do 2,5 kA. W specjalnych konstrukcjach znamionowe prądy pierwotne wynoszą poniżej 50 A (nawet rzędu mA) lub są dużo większe od 10 kA. Opracowane dotychczas metody badań i układy pomiarowe umożliwiają wyznaczenie błędów prądowego i kąowego transformacji harmonicznego prądów odkształconych przez indukcyjne przekładniki prądowe. Jednakże wymagają one zastosowania specjalnego układu probierczego zdolnego do wytworzenia prądów o wartości skutecznej wynikającej ze znamionowego prądu pierwotnego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego. Stosowana jest również metoda badania w tzw. warunkach amperozwojów znamionowych, w której wymagane jest wykonanie dodatkowego uzwojenia pierwotnego. Tym samym konieczne stało się przeprowadzenie dodatkowych badań i analiz czynników warunkujących częstotliwościowy zakres pracy wieloprądowych układów probierczych w warunkach transformacji prądów odkształconych. Ponadto, w celu uzyskania wymaganych wartości prądów odkształconych konieczne jest zastosowanie dużej mocy źródła zasilania charakteryzującego się możliwością generacji przebiegów odkształconych o programowalnych poziomach poszczególnych harmonicznego i ich przesunięć fazowych. Powoduje to znaczne zwiększenie kosztów budowy szerokopasmowego układu probierczego. Dodatkowy problem stanowi coraz większa wymagana wartość skuteczna wyższych harmonicznego napięcia zasilającego, która wynika ze wzrostu zarówno reaktancji rozproszenia uzwojeń transformatora probierczego i toru prądowego wraz ze wzrostem częstotliwości generowanej wyższej harmonicznego prądu odkształconego.

2.1 Schemat zastępczy i wykres wskazowy indukcyjnego przekładnika prądowego

W ustalonych warunkach pracy indukcyjnego przekładnika prądowego na jego właściwości metrologiczne nie mają wpływu indukcyjność rozproszenia i rezystancja uzwojenia pierwotnego. Wynika to z faktu, że uzwojenie pierwotne można traktować jako źródło prądowe. Wpływ pola rozproszenia uzwojenia pierwotnego istotny jest jedynie w warunkach przetężeniowych lub w przekładnikach o bardzo dużej szczelinie powietrznej w rdzeniu. Jeżeli pominąć indukcyjność i rezystancję uzwojenia pierwotnego, to otrzymuje się schemat zastępczy zawierający tylko elementy obwodu wtórnego i gałęzi magnesowania. Po uwzględnieniu zmiany wartości parametrów rdzenia dla poszczególnych hk harmonicznym odkształconego prądu pierwotnego obwód ten przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1 Schemat zastępczy indukcyjnego przekładnika prądowego w warunkach transformacji prądu odkształconego

Na schemacie zastępczym z rysunku 1 zastosowano następujące oznaczenia (symbol " oznacza wielkości przeliczone na stronę wtórną):

hk – indeks oznaczający harmoniczną rzędu k ,

i''_{μ} – wartość chwilowa składowej biernej odkształconego prądu wzbudzenia,

i''_0 – wartość chwilowa odkształconego prądu wzbudzenia,

i''_1 – wartość chwilowa odkształconego prądu pierwotnego,

i_2 – wartość chwilowa odkształconego prądu wtórnego,

i''_{Fe} – wartość chwilowa składowej czynnej odkształconego prądu wzbudzenia,

$L''_{\mu hk}$ – indukcyjność wzajemna uzwojeń pierwotnego i wtórnego hk harmonicznym,

L_L – indukcyjność obciążenia obwodu uzwojenia wtórnego,

L_{r2} – indukcyjność rozproszenia uzwojenia wtórnego,

P_1/P_2 – zaciski uzwojenia pierwotnego,

R_2 – rezystancja uzwojenia wtórnego

R''_{Fehk} – rezystancja odzwierciedlająca straty mocy czynnej w rdzeniu hk harmonicznym,

R_L – rezystancja obciążenia obwodu uzwojenia wtórnego,

S_1/S_2 – zaciski uzwojenia wtórnego,

u''_{μ} – wartość chwilowa napięcia magnesującego,

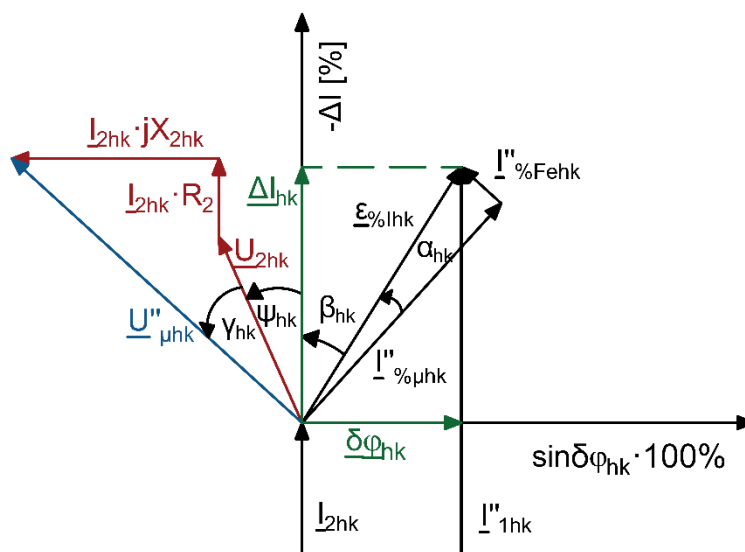
u_2 – wartość chwilowa odkształconego napięcia wtórnego.

Wartości elementów schematu zastępczego odwzorowujące rdzeń magnetyczny $R_{F_{hk}}$ i $L_{\mu hk}$ zostały uzależnione od rzędu harmonicznej transformowanego prądu pierwotnego. Ze zmianą częstotliwości zmieniają się wartości przenikalności magnetycznej i straty mocy czynnej rdzenia magnetycznego.

Do wykonania uzwojenia wtórnego seryjnie produkowanych przekładników prądowych o wartości znamionowego prądu 1 A wykorzystywany jest drut nawojowy o minimalnej średnicy 0,6 mm, a prądu wtórnego 5 A o średnicy co najmniej 1,2 mm (założona gęstość prądu $4,5 \text{ A/mm}^2$). W przypadku, gdy analizowany zakres częstotliwości ograniczony jest do 5 kHz dla stosowanych przekrojów poprzecznych drutu nawojowego, zmiana jego rezystancji w wyniku efektu naskórkowości jest pomijalna. Zmianę rezystancji, w wyniku zjawiska naskórkowości, należy koniecznie uwzględnić dla uzwojenia pierwotnego przekładników o dużych prądach znamionowych. Dlatego też do schematu zastępczego przyjęto wartość rezystancji R_2 wyznaczoną metodą techniczną dla prądu stałego. Również nie zmienia się wraz z częstotliwością prądu pierwotnego wartość indukcyjności rozproszenia uzwojenia wtórnego L_{r2} . Jest to parametr konstrukcyjny uzwojenia i odwzorowuje wartość strumienia rozproszenia związanego tylko z tym uzwojeniem.

W analizowanym schemacie zastępczym nie uwzględniono pojemności pasożytniczych uzwojenia wtórnego z uwagi na niskonapięciową konstrukcję układu izolacyjnego przekładników prądowych niskiego napięcia i stosunkowo niską wartość liczby zwojów w badanych przypadkach (do 2000 zwojów). Pojemności pasożytnicze należy uwzględnić w przypadkach konstrukcji wysokonapięciowych.

Dla schematu zastępczego indukcyjnego przekładnika prądowego z rysunku 1 został sporządzony wykres wskazowy (rysunek 2) obrazujący relację między prądami i napięciami dla danej harmonicznej prądu odkształconego.



Rys. 2 Wykres wskazowy indukcyjnego przekładnika prądowego w stanie ustalonym odpowiadający schematowi zastępczemu z rysunku 1

gdzie:

ψ_{hk} – wartość kąta fazowego między hk harmonicznymi prądu wtórnego I_{2hk} i napięcia wtórnego U_{2hk} ,

$I_{\% \mu hk}''$ – wektor hk harmonicznej składowej biernej odkształconego prądu wzbudzenia wyrażony w procentach prądu pierwotnego przeliczonego na stronę wtórną,

$\underline{I}_{\%Fehk}$ – wektor hk harmonicznej składowej czynnej odkształconego prądu wzbudzenia wyrażony w procentach prądu pierwotnego przeliczonego na stronę wtórną,
 \underline{I}''_{1hk} – wektor hk harmonicznej odkształconego prądu pierwotnego,
 \underline{I}_{2hk} – wektor hk harmonicznej odkształconego prądu wtórnego,
 $\underline{U}_{\mu hk}$ – wektor hk harmonicznej odkształconego napięcia magnesującego,
 \underline{U}_{2hk} – wektor hk harmonicznej odkształconego napięcia wtórnego,
 X_{2hk} – wartość reaktancji rozproszenia uzwojenia wtórnego dla hk harmonicznej odkształconego prądu wtórnego,
 α_{hk} – wartość kąta fazowego między hk harmonicznymi składowej biernej prądu wzbudzenia rdzenia oraz prądem wzbudzenia rdzenia,
 β_{hk} – wartość kąta fazowego między hk harmonicznymi prądu wzbudzenia rdzenia \underline{I}''_{0hk} i prądu wtórnego \underline{I}_{2hk} ,
 γ_{hk} – wartość kąta fazowego między hk harmonicznymi napięcia wtórnego \underline{U}_{2hk} i napięcia magnesującego $\underline{U}_{\mu hk}$,
 $\underline{\Delta I}_{hk}$ – wektor hk harmonicznej błędu prądowego indukcyjnego przekładnika prądowego,
 $\underline{\delta\varphi}_{hk}$ – wektor przesunięcia fazowego między hk harmoniczną prądu wtórnego i hk harmoniczną przeliczonego prądu pierwotnego przekładnika prądowego,
 $\underline{\varepsilon}_{\%1hk}$ – wektor hk harmonicznej błędu całkowitego indukcyjnego przekładnika prądowego.

W przypadku gdy indukcyjności obciążenia obwodu uzwojenia wtórnego i rozproszenia uzwojenia wtórnego są pomijalne, wówczas właściwości metrologiczne wraz ze wzrostem częstotliwości składowej harmonicznej prądu odkształconego zależą tylko od zastosowanego materiału magnetycznego scharakteryzowane parametrami $\underline{I}_{\mu hk}$ i \underline{I}_{Fehk} . Długość wskazów napięcia magnesującego $\underline{U}_{\mu hk}$ wówczas nie wzrasta, a jego wartość będzie sumą wskazów \underline{U}_{2hk} oraz $\underline{I}_{2hk} R_2$. Wektor ten będzie znajdował się na osi rzędnych wykresu wskazowego z rysunku 5. Wartość błędu prądowego będzie wprost proporcjonalna do długości wskazów prądu \underline{I}_{Fehk} , a wartość błędu kąтового do długości wskazów $\underline{I}_{\mu hk}$. Uwzględniając indukcyjność rozproszenia uzwojenia wtórnego dla obciążenia rezystancyjnego, dokładność transformacji harmonicznych przez indukcyjny przekładnik prądowy będzie wynikała także ze wzrostu długości wektora $\underline{U}_{\mu hk}$ spowodowanego wzrostem wraz z częstotliwością długości wektora napięcia na reaktancji uzwojenia wtórnego X_{2hk} . Wartości błędów prądowego i kąтового będą wynikały jednocześnie z długości obu wskazów prądów \underline{I}_{Fehk} i $\underline{I}_{\mu hk}$. Po uwzględnieniu indukcyjności obciążenia uzwojenia wtórnego następuje dalszy wzrost długości wskazów $\underline{U}_{\mu hk}$, co może wynikać z nasycenia rdzenia magnetycznego dla wyższych harmonicznych prądu odkształconego. Wskaz napięcia \underline{U}_{2hk} zostanie przesunięty o kąt ψ_{hk} , spowodowany zmianą współczynnika mocy obciążenia.

Z przedstawionego na rysunku 2 wykresu wskazowego wynika, że wektor błędu całkowitego jest tożsamy z wektorem prądu wzbudzenia wyrażonym w procentach prądu pierwotnego przeliczonego na stronę wtórną:

$$\underline{\varepsilon}_{\%1hk} = \underline{I}_{0hk} \quad (1)$$

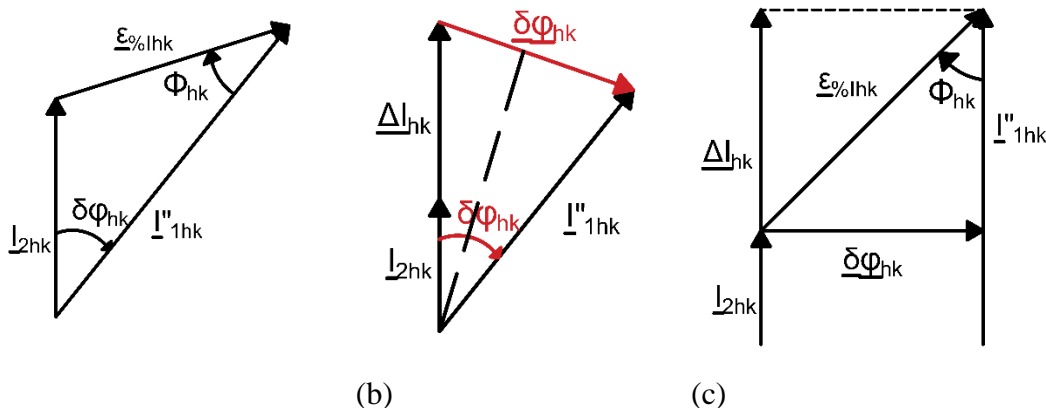
Wynika to z faktu, że wektory wykresu wskazowego przedstawione zostały w procentowych wartościach prądu \underline{I}''_{1hk} (oś rzędnych). Wówczas, procentową wartość błędu całkowitego można przedstawić za pomocą zależności:

$$\underline{\varepsilon}_{\%1hk} = \underline{I}_{2hk} - \underline{I}''_{1hk} \quad (2)$$

Graficzną reprezentację równania (2) stanowi rysunek 3a. Na tej podstawie, stosując twierdzenie cosinusów z wartości błędu całkowitego $\underline{\varepsilon}_{\%1hk}$, kąta ϕ_{hk} i prądu pierwotnego \underline{I}''_{1hk} , można wyznaczyć wartość prądu \underline{I}_{2hk} .

Na rysunku 3a wektor błędu całkowitego stanowi wskaz umożliwiający wyznaczenie prądu pierwotnego przeliczonego na stronę wtórną na podstawie wskazów prądu wtórnego.

W przypadku wykresów wskazowych dla przekładników, z uwagi na bardzo małe wartości kąta $\delta\varphi_{hk}$, zgodnie z rysunkiem 3b następuje jego równoważna zamiana na długość odcinka. Wówczas możliwe jest przedstawienie wykresu wskazowego błędów przekładnika zgodnie z rysunkiem 3c. Wektor błędu prądowego jest rzutem wektora błędu całkowitego na oś wartości błędu prądowego (oś rzędnych), natomiast wektor błędu kąтового jest rzutem wektora błędu całkowitego na oś wartości błędu kąтового (oś odciętych).



Rys. 3 a) Wykres wskazowy prądów przekładnika, b) przekształcenie przesunięcia fazowego o niewielkiej wartości na wektor błędu kąтового, c) wykres wskazowy błędów przekładnika

gdzie:

$\delta\varphi_{hk}$ – wartość przesunięcia fazowego między hk harmoniczną prądu wtórnego i hk harmoniczną przeliczonego prądu pierwotnego przekładnika prądowego,
 ϕ_{hk} – wartość przesunięcia fazowego między hk harmoniczną wskazu błędu całkowitego i hk harmoniczną przeliczonego prądu pierwotnego przekładnika prądowego.

Na wykresie wskazowym z rysunku 3b przesunięcie fazowe $\delta\varphi_{hk}$ między wektorami I_{2hk} i I_{1hk} z rysunku 6a można przedstawić jako długość wektora błędu kąтового zgodnie z zależnością:

$$|\underline{\delta\varphi_{hk}}| \cong \sin \delta\varphi_{hk} \cdot 100\% \quad (3)$$

Powyższe przybliżenie jest zasadne tylko dla niewielkich wartości kątów $\delta\varphi_{hk}$.

Zgodnie z wykresem wskazowym z rysunku 3c procentowa wartość błędu całkowitego może zostać przedstawiona następująco:

$$\varepsilon_{\%I_{hk}} = \sqrt{\Delta I_{hk}^2 + (\sin \delta\varphi_{hk} \cdot 100\%)^2} \quad (4)$$

gdzie:

ΔI_{hk} – wartość procentowa hk harmonicznego błędu prądowego indukcyjnego przekładnika prądowego,
 $\varepsilon_{\%I_{hk}}$ – wartość procentowa błędu całkowitego transformacji hk harmonicznego prądu odkształconego.

Oznacza to, że na podstawie wyznaczonych wartości błędu całkowitego i prądowego można wyznaczyć wartość błędu kąтового. Bezpośredni pomiar przesunięcia fazowego wyższych harmonicznymi dwóch prądów wymaga urządzenia pomiarowego zdolnego do wyznaczenia różnicy faz rzędu kilkunastu minut kątowych.

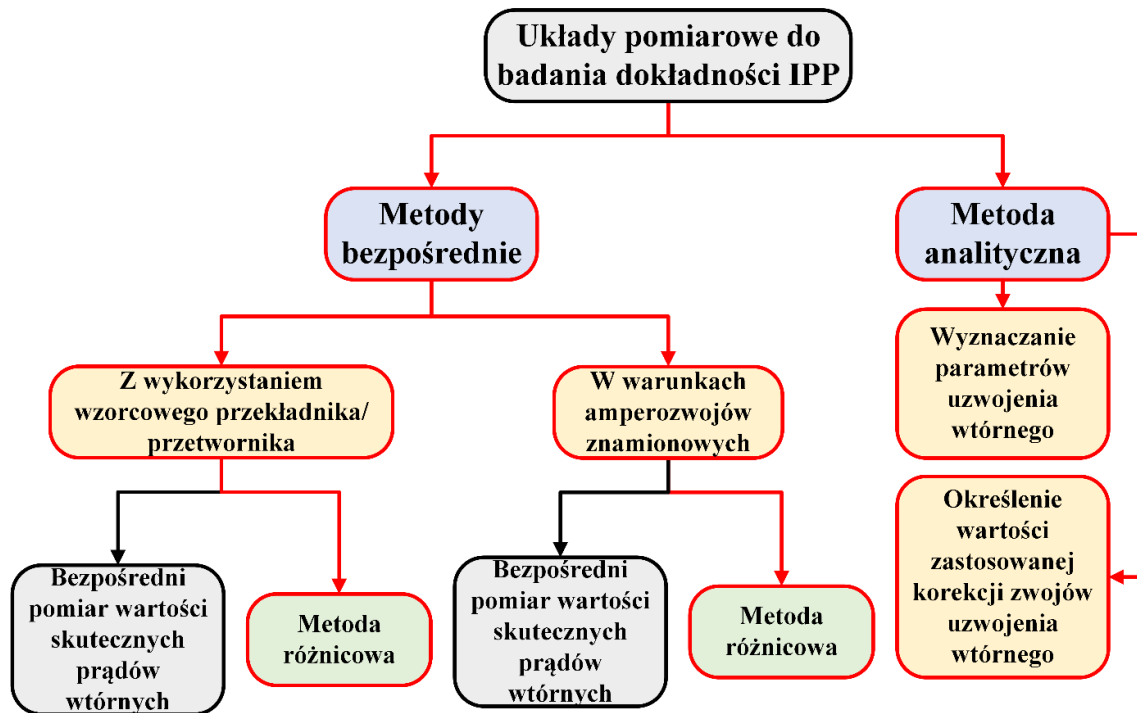
Dokładność transformacji indukcyjnych przekładników prądowych zależy głównie od właściwości rdzenia magnetycznego. Głównymi materiałami magnetycznymi stosowanymi współcześnie w konstrukcjach indukcyjnych przekładników prądowych są: stal krzemowa FeSi (typowa o zawartości około 3% krzemu), permaloj NiFe (Mumetall Vacuumschmelze 80% niklu i 20% żelaza). Indukcja magnetyczna nasycenia stali elektrotechnicznej wynosi od 1,3 T do 2,0 T, natomiast maksymalna przenikalność magnetyczna dla częstotliwości 50 Hz wynosi od około 1 000 do 10 000. Indukcja nasycenia permaloju wynosi 0,8 T, przy czym maksymalna przenikalność magnetyczna dla częstotliwości 50 Hz wynosi od około 60 000 do 140 000. Coraz częściej permaloj zastępowany jest przez materiały nanokrystaliczne charakteryzującymi się wyższymi wartościami indukcji nasycenia (około 1,2 T) i maksymalnej przenikalności magnetycznej względnej przekraczającej 400 000. Właściwości magnetyczne taśmy rdzeni magnetycznych zależą w szczególności od składu stopu materiału (różne procentowe udziały głównych pierwiastków), domieszek innych pierwiastków (np. dodatek magnezu), jej grubości, rozmiaru ziaren i technologii procesu wytwarzania. Blachy ze stali krzemowej nieorientowanej o różnych zawartościach krzemu charakteryzują się pośrednimi wielkościami ziaren i z tego względu wartość indukcji nasycenia może przyjmować pośrednie wartości z przedziału między indukcją nasycenia dla taśm mikrokrystalicznych (1,6 T) i blach zorientowanych (ok. 2 T). Stratność wynosi wówczas od 0,4 W/kg do 0,8 W/kg i zależy głównie od wartości indukcji magnetycznej materiału. Wykorzystuje się również łączenie rdzeni wykonanych z różnych materiałów magnetycznych np. stali krzemowej i materiału nanokrystalicznego. W tym wypadku rozróżnia się złożenie rdzeni osiowe i promieniowe.

2.2. Transformacja prądów odkształconych

Głównym źródłem błędów transformacji indukcyjnego przekładnika prądowego jest prąd wzbudzenia rdzenia magnetycznego. Należy podkreślić, że ze względu na nieliniowy kształt charakterystyki magnesowania rdzenia magnetycznego dokładność transformacji indukcyjnego przekładnika prądowego zależy od wartości indukcji magnetycznej, a zatem wartości skutecznych harmonicznego prądu pierwotnego i obciążenia uzwojenia wtórnego. Wartości błędów prądowego i kąтового transformacji wyższych harmonicznego niższego rzędu przez indukcyjne przekładniki prądowe zależą istotnie od ich wartości skutecznych i kąta fazowego między nimi. Kształt transformowanego prądu pierwotnego powoduje zmianę wartości maksymalnej indukcji magnetycznej w rdzeniu, zmieniając tym samym wartości samoistnie generowanych harmonicznego niskiego rzędu w prądzie wtórnym. Ponadto, podczas oceny dokładności transformacji prądów odkształconych przez indukcyjne przekładniki prądowe konieczne jest uwzględnienie kąta fazowego między generowaną i transformowaną harmoniczną. W oczywisty sposób wartość indukcji magnetycznej w rdzeniu zależy także od wartości i charakteru obciążenia uzwojenia wtórnego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego. Dlatego jego dokładność transformacji zostaje wyznaczona dla określonego zakresu i rodzaju obciążenia uzwojenia wtórnego, wartości skutecznej prądu pierwotnego i stopnia jego odkształcenia. Zmiana wartości indukcji magnetycznej w rdzeniu w wyniku odkształcenia transformowanego prądu pierwotnego powoduje zmianę wartości generowanych wyższych harmonicznego w prądzie wtórnym w wyniku nieliniowości charakterystyki magnesowania rdzenia magnetycznego. Główny wpływ na to zjawisko przy zachowaniu znamionowej wartości skutecznej odkształconego prądu pierwotnego ma zmiana wartości skutecznej podstawowej harmonicznego. Poprawę właściwości metrologicznych indukcyjnego przekładnika prądowego bez kompensacji można uzyskać w wyniku właściwego doboru punktu pracy na charakterystyce magnesowania jego rdzenia magnetycznego. W wielu przypadkach obniżenie wartości obciążenia uzwojenia wtórnego lub/i ograniczenie jego indukcyjności rozproszenia prowadzi do zwiększenia dokładności transformacji harmonicznego prądu odkształconego. Wynika to z faktu, że następuje obniżenie punktu pracy

na charakterystyce magnesowania rdzenia przekładnika do zakresu zwiększonej liniowości zmian wartości indukcji magnetycznej (w stosunku do natężenia pola magnetycznego), czyli osiągnięta jest większa dynamiczna przenikalność magnetyczna.

Dokładność indukcyjnych przekładników prądowych w warunkach transformacji prądów odkształconych może być badana w kilku typach układów pomiarowych zgodnie z podziałem przedstawionym na rysunku 4.



Rys. 4 Podział wykorzystywanych układów pomiarowych do badania dokładności indukcyjnych przekładników prądowych

2.2.1 Metoda zastępcza w amperozwojach znamionowych

Sprawdzenie dokładności transformacji prądu odkształconego przez indukcyjny przekładnik prądowy typu przelotowego może zostać przeprowadzone w warunkach amperozwojów znamionowych. Badany obiekt uważa się wówczas dodatkowym uzwojeniem pierwotnym, którego liczba zwojów z_D odpowiada jego znamionowej przekładni prądowej k według zależności:

$$z_D = k = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} \quad (5)$$

Uzwojenie to powinno zostać wykonane zgodnie zachowaniem warunku o równomierności rozłożenia zwojów. Każdy zwój uzwojenia posiada punkt stychny z sąsiednimi zwojami tego samego uzwojenia, zachowując przy tym współosiowy układ względem rdzenia magnetycznego i równomiernie wypełniając jego powierzchnię. W innym przypadku występują lokalne zmiany

wartości natężenia pola magnetycznego wewnątrz rdzenia i odpowiadające jej zmiany indukcji pola magnetycznego w rdzeniu. Wzrost jej wartości występuje na skutek magnesowania jednego obszaru rdzenia magnetycznego zwiększoną liczbą zwojów lub wpływem strumienia rozproszenia magnetycznego. W innym obszarze rdzenia występuje wtedy lokalne niedomagnesowanie z uwagi na zmniejszoną liczbę zwojów lub ich brak lub też brak strumienia rozproszenia. Zachowując równomierności rozłożenia zwojów uzyskuje się równoważne warunki pracy jak w stanie normalnej eksploatacji tego przekładnika zgodnie z warunkiem:

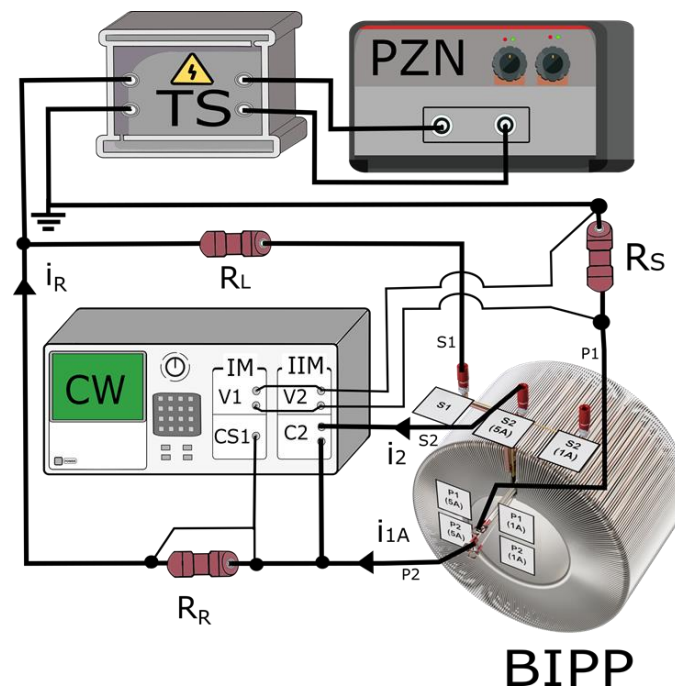
$$I_{1N} \cdot z_1 = I_{1A} \cdot z_D \quad (6)$$

gdzie:

I_{1A} – wartość skuteczna prądu dodatkowego uzwojenia pierwotnego indukcyjnego przekładnika prądowego w warunkach amperozwojów znamionowych,

z_1 – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego.

W przypadku sprawdzania dokładności przekładnika prądowego w warunkach jego amperozwojów znamionowych nie ma konieczności stosowania kosztownych wielkopiędowych układów probierczych zdolnych do wytworzenia prądów odkształconych i referencyjnego źródła prądu pierwotnego. Układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5 Schemat układu pomiarowego do wyznaczania wartości błędów prądowego i kąтового oraz całkowitego przelotowego indukcyjnego przekładnika prądowego w warunkach amperozwojów znamionowych

Na schemacie z rysunku 5 zastosowano następujące oznaczenia:

$C2$ – kanał prądowy II modułu pomiarowego cyfrowego watomierza,

$CS1$ – kanał przystosowany do przyłączenia sondy prądowej/napięciowej I modułu pomiarowego cyfrowego watomierza,

CW – cyfrowy watomierz,

i_{1A} – wartość chwilowa prądu dodatkowego uzwojenia,

i_2 – wartość chwilowa prądu wtórnego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego,

IM/IIM – I i II moduły cyfrowego watomierza,

i_R – wartość chwilowa prądu różnicowego,
 R_L – rezystor odwzorowujący obciążenie uzwojenia wtórnego w warunkach normalnej pracy,
 R_R – rezystor o wartości rezystancji 10Ω i indukcyjności poniżej $10 \mu\text{H}$ przeznaczony do pomiaru napięcia umożliwiającego wyznaczenie prądu przepływającego przez połączenie różnicowe między dodatkowym uzwojeniem a uzwojeniem wtórnym badanego indukcyjnego przekładnika prądowego,
 R_S – rezystor o wartości rezystancji $0,1 \Omega$ dla znamionowego prądu o wartości skutecznej 5 A i 1Ω dla prądu 1 A oraz indukcyjności poniżej $10 \mu\text{H}$ przeznaczony do pomiaru napięcia umożliwiającego wyznaczenie prądu przepływającego przez dodatkowe uzwojenie,
 TS – transformator separacyjny,
 $VI/V2$ – kanały napięciowe I i II modułu cyfrowego watomierza.

W tym układzie do pomiaru wartości skutecznych wyższych harmonicznych prądu dodatkowego uzwojenia i połączenia różnicowego zastosowano rezystancyjne boczniki. Połączenie różnicowe w warunkach równowagi amperozwojów zostało przedstawione w normie PN-EN 61869-2, przy czym wykorzystywane jest do określenia wartości błędu całkowitego w przypadku przekładników do zabezpieczeń. W przedstawionej metodzie pomiarowej to połączenie zastosowane jest do badania dokładności pomiarowych indukcyjnych przekładników prądowych w warunkach transformacji prądów odkształconych. Należy zwrócić uwagę, że wartość rezystancji bocznika do pomiaru prądu różnicowego wpływa na obciążenie uzwojenia wtórnego badanego przekładnika prądowego.

W układzie pomiarowym z rysunku 5 wartość skuteczna harmonicznej prądu dodatkowego uzwojenia przekładnika prądowego wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$I_{1Ahk} = \frac{U_{Shk}}{R_S} \quad (7)$$

gdzie:

I_{1Ahk} – wartość skuteczna hk harmonicznej prądu dodatkowego uzwojenia pierwotnego przekładnika prądowego w warunkach amperozwojów znamionowych,
 R_S – rezystancja zastosowanego bocznika prądowego do pomiaru napięcia umożliwiającego wyznaczenie prądu uzwojenia dodatkowego,
 U_{Shk} – wartość skuteczna hk harmonicznej napięcia na rezystorze pomiarowym R_S .

Wartość procentowa błędu całkowitego $\varepsilon_{\%1hk}$ transformacji hk harmonicznej wyrażona jest zależnością:

$$\varepsilon_{\%1hk} = \frac{U_{Rhk}}{I_{1Ahk} \cdot R_R} \cdot 100\% \quad (8)$$

gdzie:

U_{Rhk} – wartość skuteczna hk harmonicznej napięcia na rezystorze pomiarowym R_R ,
 R_R – rezystancja zastosowanego bocznika prądowego do pomiaru prądu różnicowego.

Korzystając z twierdzenia cosinusów, wykresu wskazowego rysunku 2a i równań (7) oraz (8), wartość skuteczna hk harmonicznej prądu wtórnego I_{2hk} badanego indukcyjnego przekładnika prądowego obliczana jest na podstawie zależności:

$$I_{2hk} = \sqrt{I_{1Ahk}^2 + \left(\frac{U_{Rhk}}{R_R}\right)^2 - 2 \cdot I_{1Ahk} \cdot \frac{U_{Rhk}}{R_R} \cdot \cos \phi_{Ahk}} \quad (9)$$

gdzie:

ϕ_{Ahk} – wartość przesunięcia fazowego między hk harmoniczną napięcia U_{Rhk} na boczniku pomiarowym R_R i hk harmoniczną prądu dodatkowego uzwojenia pierwotnego I_{1Ahk} przekładnika prądowego.

Procentowa wartość błędu prądowego transformacji harmonicznego jest określona zależnością:

$$\Delta I_{hk} = \frac{I_{2hk} - I_{1Ahk}}{I_{1Ahk}} \cdot 100\% \quad (10)$$

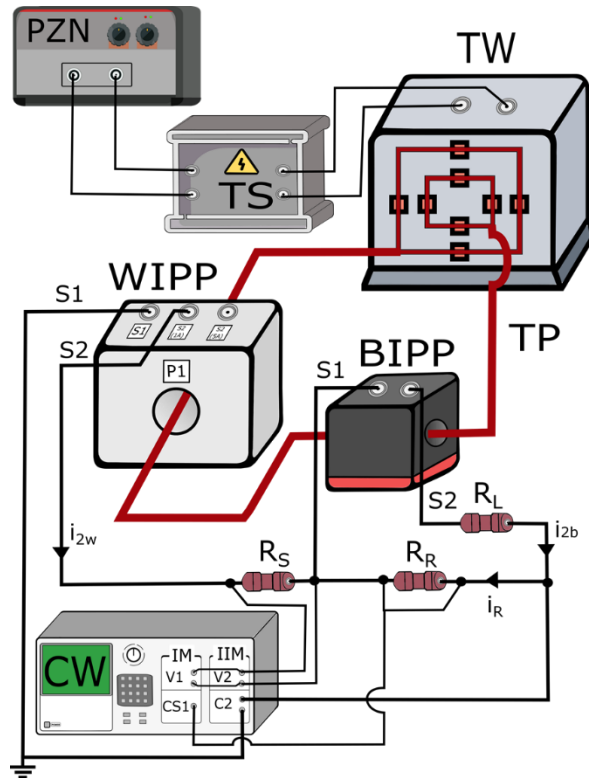
Korzystając z zależności (4) określającej błąd całkowity, możliwe jest obliczenie wartości błędu kąтового transformacji harmonicznego prądu odkształconego według zależności:

$$\delta\phi_{hk} = \arcsin \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_{\%Ihk}^2 - \Delta I_{hk}^2}}{100\%} \right) \quad (11)$$

Znak błędu kąтового jest dodatni, gdy wartość kąta ϕ_{hk} znajduje się w przedziale od 180° do 360° . Z tego względu istotny jest punkt uziemienia układu pomiarowego warunkujący kierunek przepływu prądu przez rezystor R_S .

2.2.2 Metoda bezpośrednia z zastosowaniem przekładnika lub przetwornika wzorcowego

Metoda bezpośrednia z zastosowaniem przekładnika lub przetwornika wzorcowego do sprawdzania dokładności indukcyjnego przekładnika prądowego w warunkach transformacji prądu odkształconego wymaga zastosowania układu probierczego zdolnego do wytworzenia prądów o wartościach skutecznych wynikających z jego znamionowej wartości prądu pierwotnego. Dlatego pojawiają się nowe wymagania dotyczące pracy i konstrukcji transformatora wielkopiętowego w szerokim zakresie częstotliwości wynikającej z zadanych harmonicznego w jego odkształconym prądzie wtórnym. Główny problem stanowi wymagane zwiększenie, wraz ze wzrostem częstotliwości harmonicznego prądu wtórnego, wartości skutecznej harmonicznego napięcia zasilającego, która wynika ze wzrostu reaktancji rozproszenia uzwojeń transformatora probierczego i toru prądowego. Spadek napięcia na uzwojeniu pierwotnym jest dodatkowo zwiększony przez prąd wzbudzenia rdzenia magnetycznego. W celu uzyskania wymaganych wartości skutecznej prądu odkształconego konieczne jest zastosowanie dużej mocy źródła zasilania charakteryzującego się możliwością generacji napięć odkształconych o programowalnych poziomach poszczególnych harmonicznego i ich przesunięć fazowych. Powoduje to znaczne zwiększenie kosztów budowy układu probierczego. Możliwe jest zastosowanie wzmacniaczy audio sterowanych przez generator arbitralny. Układ pomiarowy do wyznaczania wartości błędów prądowego i kąтового oraz całkowitego transformacji harmonicznego prądu odkształconego przez przekładnik prądowy przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6 Schemat układu pomiarowego do wyznaczania wartości błędów prądowego i kąтового oraz całkowitego przekładnika prądowego z zastosowaniem wzorcowego indukcyjnego przekładnika prądowego

Na rysunku 6 zastosowano tożsame oznaczenia jak na rysunku 5, przy czym:

i_{2b} – wartość chwilowa prądu wtórnego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego w metodzie z wzorcowym indukcyjnym przekładnikiem prądowym,

i_{2w} – wartość chwilowa prądu wtórnego wzorcowego indukcyjnego przekładnika prądowego,

TP – tor probierczy,

TW – transformator wielkoprądowy,

$WIPP$ – wzorcowy indukcyjny przekładnik prądowy.

Zależności określające wartości błędów całkowitego i prądowego oraz kąтового są analogiczne z przedstawionymi w poprzednim punkcie 2.2.1. W przypadku zastosowania układu pomiarowego z rysunku 6 wyznaczana jest wartość skuteczna hk harmonicznej prądu wtórnego wzorcowego indukcyjnego przekładnika prądowego I_{2whk} według wzoru:

$$I_{2whk} = \frac{U_{Rshk}}{R_S} \quad (12)$$

Natomiast zależność (9) określająca procentową wartość błędu całkowitego hk harmonicznej prądu odkształconego $\varepsilon_{\%1bhk}$ przyjmuje teraz postać:

$$\varepsilon_{\%1bhk} = \frac{U_{Rhk}}{R_R} \cdot \frac{100\%}{I_{2whk}} \quad (13)$$

Wówczas, wartość skuteczna hk harmonicznej prądu wtórnego I_{2bhk} badanego indukcyjnego przekładnika prądowego określona jest zależnością:

$$I_{2bhk} = \sqrt{I_{2whk}^2 + \left(\frac{U_{Rhk}}{R_R}\right)^2 - 2 \cdot I_{2whk} \cdot \frac{U_{Rhk}}{R_R} \cdot \cos \phi_{hk}} \quad (14)$$

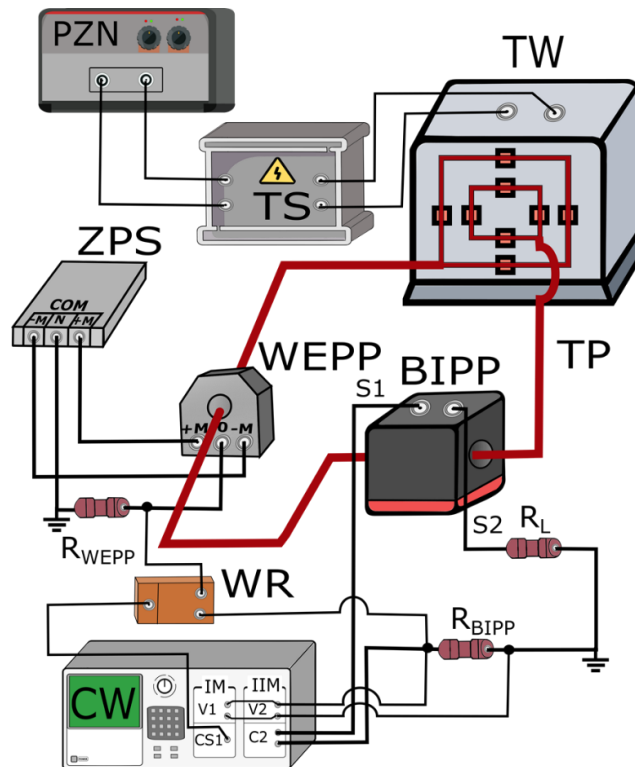
Ostatecznie, procentowa wartość błędu prądowego ΔI_{bhk} transformacji hk harmonicznej prądu odkształconego z równania (10) przyjmuje postać:

$$\Delta I_{bhk} = \frac{I_{2bhk} - I_{2whk}}{I_{2whk}} \cdot 100\% \quad (15)$$

Wartość błędu kąтового określana jest na podstawie zależności:

$$\delta\varphi_{bhk} = \arcsin \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_{\%Ibhk}^2 - \Delta I_{bhk}^2}}{100\%} \right) \quad (16)$$

Do sprawdzania dokładności transformacji prądu odkształconego przez przekładnik prądowy można również zastosować układ pomiarowy z wykorzystaniem przetwornika prądowego (rysunek 7).



Rys. 7 Schemat układu pomiarowego do wyznaczania wartości błędów prądowego i kąтового oraz całkowitego przekładnika prądowego z zastosowaniem wzorcowego przetwornika prądowego

Na rysunku 7 zastosowano następujące oznaczenia:

R_{BIPP} – rezystor do pomiaru napięcia umożliwiającego wyznaczenie prądu wtórnego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego,

R_{WEPP} – rezystor wzorcowego przetwornika prądowego o wartości rezystancji z zakresu dopuszczalnego obciążenia,
 $WEPP$ – wzorcowy przetwornik prądowy,
 WR – układ różnicowy (wymagany w przypadku, gdy zastosowany cyfrowy watomierz nie jest wyposażony w kanał różnicowy do pomiaru napięcia),
 ZPS – zasilacz prądu stałego.

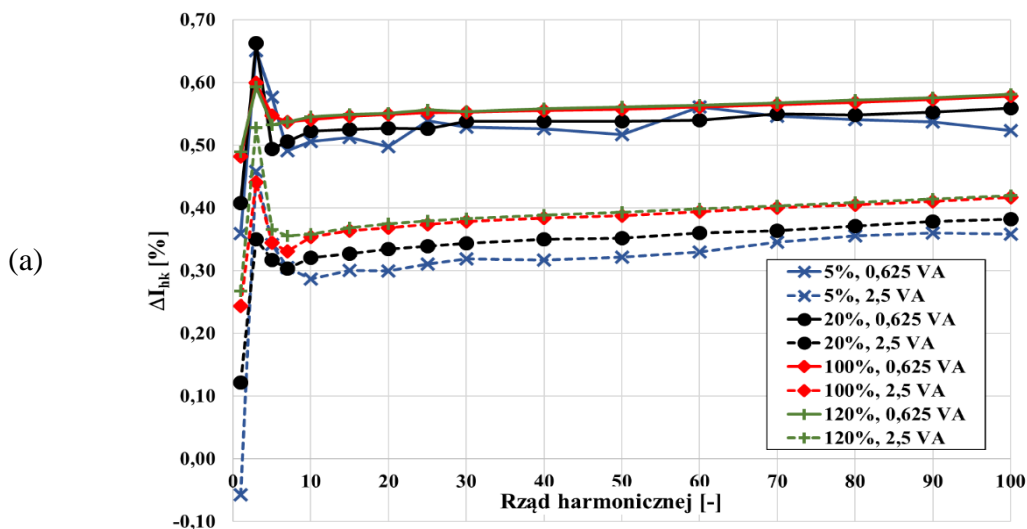
W celu wyznaczenia wartości prądu różnicowego mierzona jest wartość napięcia różnicowego między bocznikami prądowymi umieszczonymi w obwodach wtórnym badanego przekładnika prądowego i wyjściowym wzorcowego przetwornika prądowego. Istotne jest poprawne uziemienie tych rezystorów. Wzory od (12) do (16) po odpowiednich modyfikacjach wynikających z przekładni prądowej przetwornika oraz wartości zastosowanych rezystorów pomiarowych pozwalają wyznaczyć wartości błędów prądowego i kąтового.

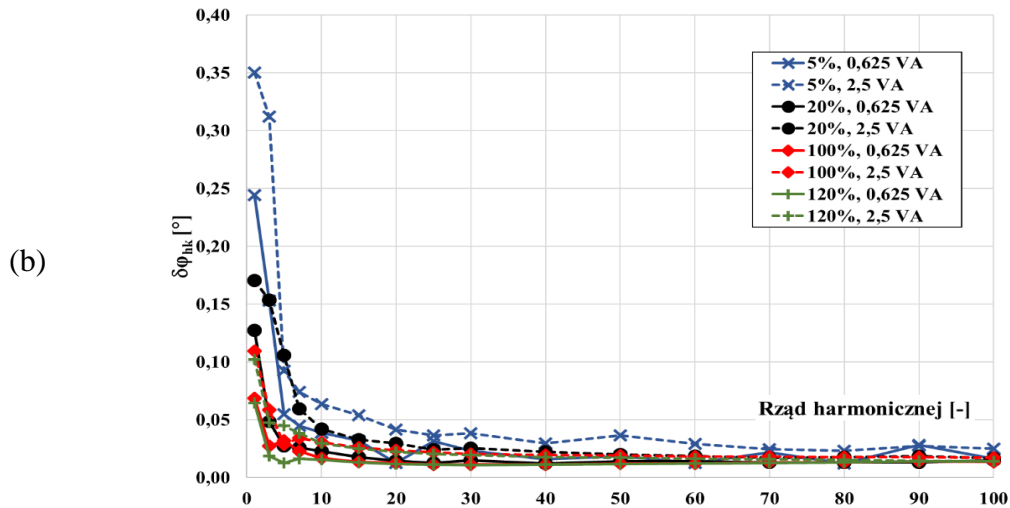
2.3. Charakterystyki częstotliwościowe błędów prądowego i kąтового IPP

Zgodnie z normą PN-EN 61869-2 badania dokładności indukcyjnych przekładników prądowych wykonuje się przy obciążeniu znamionowym S_N uzwojenia wtórnego oraz dla 25% S_N . Dla obciążeń o wartości mocy pozornej od 5 VA (włącznie) współczynnik mocy obciążenia powinien wynosić 0,8 ind. W pozostałych przypadkach pomiary wykonuje się przy współczynniku mocy 1, przy czym minimalna wartość obciążenia wynosi 1 VA i określana jest zgodnie z wymaganiami normalizacyjnymi w woltoamperach.

2.3.1 Wpływ wartości i charakteru obciążenia

Na wykresach z rysunku 8 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe błędów prądowego (a) i kąтового (b) dla seryjnie produkowanego przekładnika o znamionowej przekładni prądowej 100 A/5 A. Pomiary wykonano dla znamionowego rezystancyjnego obciążenia uzwojenia wtórnego (linie ciągłe) i dla 25% S_N (linie przerywane) oraz dla czterech wartości prądów pierwotnych odpowiadających 5%, 20%, 100% i 120% wartości prądu znamionowego I_{IN} . Wyniki badań i analiz dotyczą transformacji prądu odkształconego zawierającego pojedynczą wyższą harmoniczną z zakresu od 100 Hz do 5 kHz.



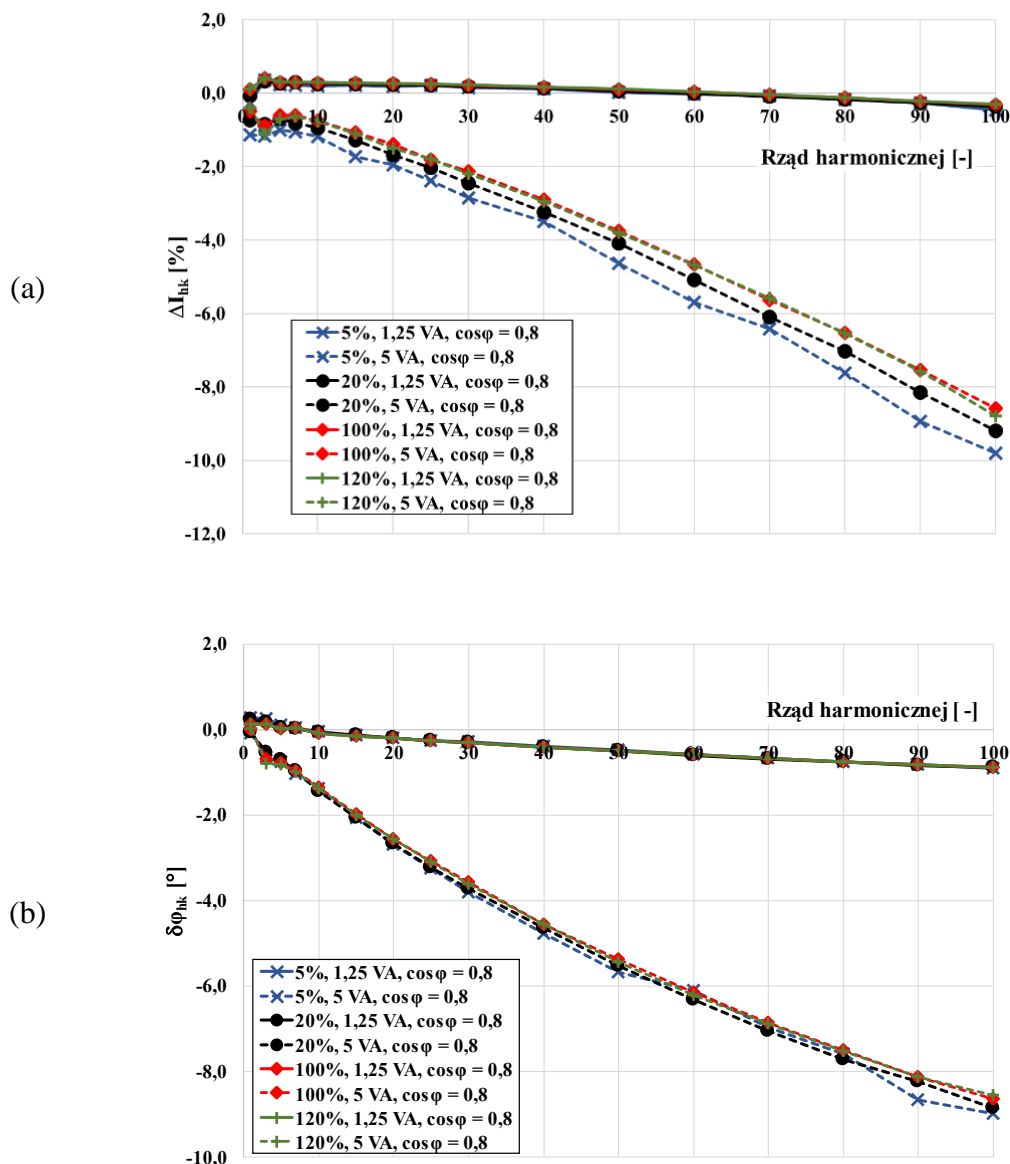


Rys. 8 Wpływ wartości rezystancyjnego obciążenia uzwojenia wtórnego na błędy przekładnika 100 A/5 A: (a) błąd prądowy, (b) błąd kątowy

Znaczne wartości błędów prądowego i kątowego w zakresie do 10. harmonicznej wynikają z generacji wyższych harmonicznych w prądzie wtórnym badanego przekładnika w wyniku nieliniowości charakterystyki magnesowania rdzenia magnetycznego.. W tym przypadku najwyższe wartości błędu prądowego występują w warunkach transformacji prądu o wartości 120% I_{IN} przy obciążeniu uzwojenia wtórnego mocą 25% S_N . Wynika to z zastosowanej poprawki zwojowej i przesunięcia wartości błędu prądowego w kierunku dodatnim. Dlatego obniżenie wartości skutecznej transformowanego prądu pierwotnego powoduje zmniejszenie wartości błędów. Wraz ze zwiększeniem obciążenia strony wtórnej wartości błędu prądowego przesuwają się w kierunku wartości ujemnych. Najwyższe wartości błędu kątowego występują dla 5% I_{IN} przy obciążeniu S_N . Jest to związane z niską początkową przenikalnością magnetyczną zastosowanego materiału magnetycznego. Wzrost wartości rezystancyjnego obciążenia prowadzi do wzrostu wartości błędu kątowego. Oczywiście zmiana wartości błędu kątowego zależy od zmiany punktu pracy na charakterystyce magnesowania i lokalnych zmian jej nachylenia. Wraz ze wzrostem częstotliwości transformowanej harmonicznej błąd prądowy wzrasta w kierunku wartości dodatnich, co wynika z zastosowanej poprawki zwojowej. Zmniejszenie prądu wzbudzenia rdzenia w analizowanym zakresie częstotliwości do 5 kHz wynika ze wzrostu reaktancji wzajemnej uzwojeń i rezystancji odzwierciedlającej straty mocy czynnej w rdzeniu. Rosnąca wartość prądu wzbudzenia rdzenia przy zwiększonej wartości obciążenia uzwojenia wtórnego zmniejsza wartość prądu wynikającą z różnicy znamionowej przekładni prądowej i rzeczywistej przekładni zwojowej badanych przekładników prądowych, dlatego też charakterystyka częstotliwościowa błędu prądowego przesuwa się w kierunku wartości ujemnych. W przypadku błędu kątowego powoduje to zmniejszenie jego wartości wraz z częstotliwością transformowanej wyższej harmonicznej prądu odkształconego. Wartości błędów kątowych dla wyższych harmonicznych od 10. nie ulegają zmianie wraz ze zmianą wartości obciążenia uzwojenia wtórnego. Błąd kątowy wynika z ilorazu składowej czynnej i składowej biernej prądu wzbudzenia rdzenia. Przy czym, w analizowanym przypadku stosunek tych dwóch wielkości utrzymany jest zarówno dla 100% S_N , jak i 25% S_N . Wraz ze wzrostem rezystancji obciążenia rosną wartości indukcji magnetycznej i straty mocy czynnej w rdzeniu. Jeśli występuje obniżenie nachylenia charakterystyki magnesowania, następuje obniżenie przenikalności magnetycznej rdzenia. Wówczas, obciążenie strony wtórnej nie będzie wpływać na wartości błędu kątowego.

W przypadku przekładników niekorygowanych wzrost obciążenia uzwojenia wtórnego prowadzi do wzrostu błędów prądowego i ich przesunięcia w kierunku wartości ujemnych. Związane jest to ze zwiększoną wartością napięcia wtórnego i tym samym zwiększoną indukcją magnetyczną w rdzeniu przekładnika prądowego. Jej wartość określa punkt pracy na charakterystyce magnesowania, dlatego też wraz ze wzrostem wartości indukcji magnetycznej następuje wzrost wartości natężenia pola magnetycznego i związanej z nim wartości prądu wzbudzenia rdzenia.

Na wykresach z rysunku 9 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe błędów prądowego (a) i kąтового (b) dla seryjnie produkowanego przekładnika o znamionowej przekładni prądowej 300 A/5 A. Pomiary wykonano dla znamionowego rezystancyjno-indukcyjnego obciążenia (wsp. mocy 0,8) uzwojenia wtórnego (linie ciągłe) i dla 25% S_N (linie przerywane) oraz dla czterech wartości prądów pierwotnych odpowiadających 5%, 20%, 100% i 120% I_{IN} . Wyniki badań i analiz także dotyczą transformacji prądu odkształconego zawierającego pojedynczą wyższą harmoniczną z zakresu od 100 Hz do 5 kHz.



Rys. 9 Wpływ wartości rezystancyjno-indukcyjnego obciążenia (wsp. mocy 0,8) na błędy przekładnika 300 A/5 A: (a) błąd prądowy, (b) błąd kątowy

Wartość obciążenia o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym nie powoduje równoległego przesunięcia charakterystyki częstotliwościowej w zakresie od 10. harmonicznej błędu prądowego (rysunek 9a), jak w przypadku obciążenia rezystancyjnego. Związane jest to ze wzrostem wartości napięcia wtórnego przekładnika wraz ze wzrostem częstotliwości wyższej harmonicznej transformowanego prądu w wyniku przesunięcia punktu pracy na charakterystyce magnesowania w kierunku nasycenia. Zmniejszenie jej nachylenia powoduje wzrost wartości prądu wzbudzenia rdzenia i tym samym ujemnej wartości błędu prądowego. Jednocześnie wzrost wartości indukcji magnetycznej powoduje wzrost strat mocy czynnej w rdzeniu. Ponadto, dla znamionowego rezystancyjno-indukcyjnego obciążenia (wsp. mocy 0,8) występuje znacznie większy wzrost błędów prądowego i kąтового transformacji wyższych harmonicznych ze wzrostem częstotliwości niż w przypadku obciążenia o wartości 25%. Wynika to z faktu, że indukcyjność obciążenia dla 100% S_N jest większa, co powoduje silniejszy wzrost jego reaktancji i wartości napięcia wtórnego przekładnika. Dla znamionowego rezystancyjno-indukcyjnego obciążenia (wsp. mocy 0,8) wartość jego indukcyjności wynosi:

$$Z_{S_N 100\%} = \frac{S_N}{I_{2N}^2} = \frac{5}{5^2} = 0,2 \Omega$$

$$R_{L 100\%} = Z_{S_N 100\%} \cdot \cos\varphi = 0,2 \cdot 0,8 = 0,16 \Omega$$

$$X_{L50Hz 100\%} = Z_{S_N 100\%} \cdot \sin\varphi = 0,16 \cdot 0,6 = 0,096 \Omega$$

$$L_{L 100\%} = \frac{X_{L50Hz}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,096}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cong 0,3 \text{ mH}$$

W przypadku 25% znamionowego rezystancyjno-indukcyjnego obciążenia (wsp. mocy 0,8) wartość jego indukcyjności wynosi:

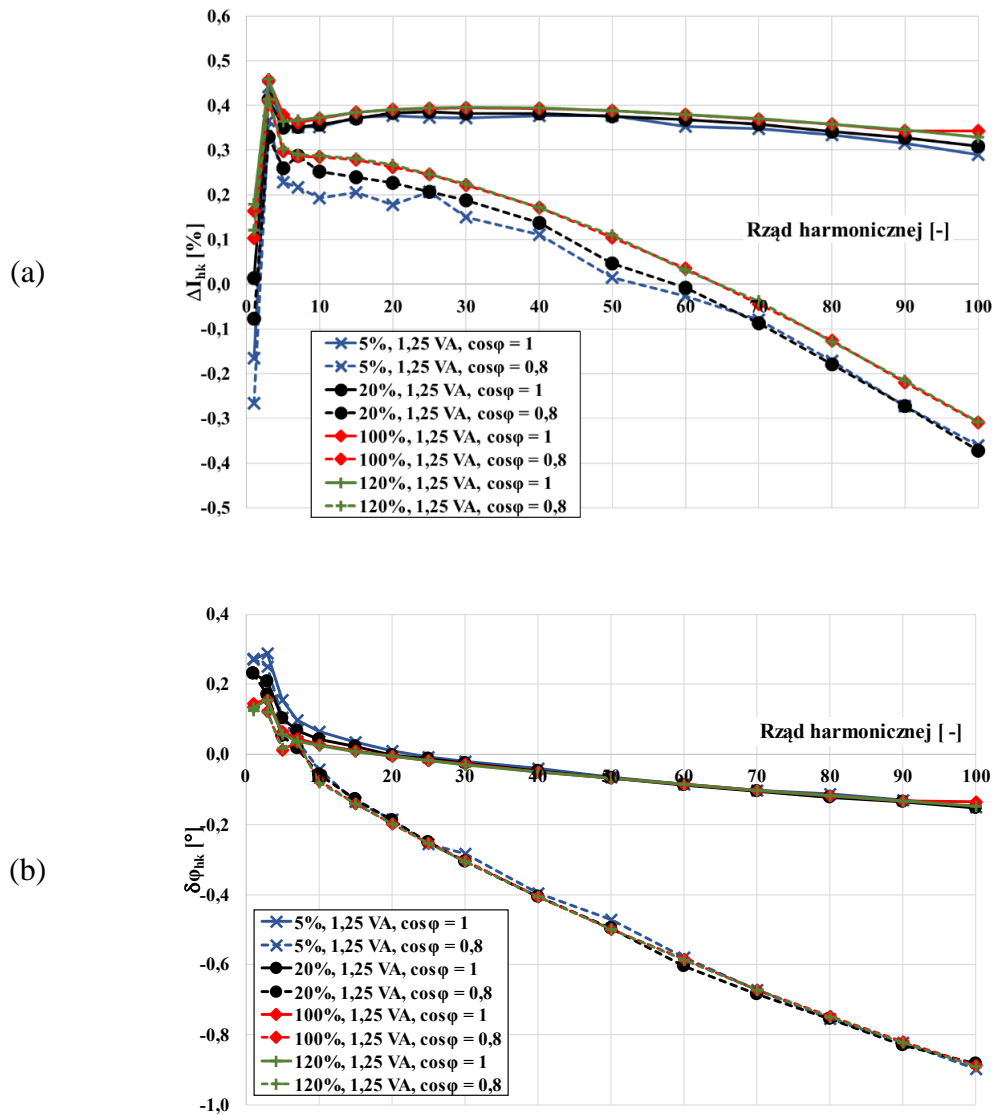
$$Z_{S_N 25\%} = \frac{0,25 \cdot S_N}{I_{2N}^2} = \frac{0,25 \cdot 5}{5^2} = 0,05 \Omega$$

$$R_{L 25\%} = Z_{S_N 25\%} \cdot \cos\varphi = 0,05 \cdot 0,8 = 0,04 \Omega$$

$$X_{L50Hz 25\%} = Z_{S_N 25\%} \cdot \sin\varphi = 0,05 \cdot 0,6 = 0,03 \Omega$$

$$L_{L 25\%} = \frac{X_{L50Hz}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,03}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cong 0,1 \text{ mH}$$

Na wykresach z rysunku 10 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe błędów prądowego (a) i kąтового (b) dla tego przekładnika wykonane dla 25% S_N przy współczynnikach mocy 1 (linie ciągłe) i 0,8 (linie przerywane) oraz dla czterech wartości prądów pierwotnych odpowiadających 5%, 20%, 100% i 120% I_{IN} .



Rys. 10 Wpływ charakteru obciążenia uzwojenia wtórnego na błędy przekładnika 300 A/5 A:
 (a) błąd prądowy, (b) błąd kątowy

Porównanie charakterystyk wskazuje, że w przypadku obciążenia o współczynniku mocy 0,8 występuje znacznie większy wzrost błędów prądowego i kąтового transformacji wyższych harmonicznych ze wzrostem częstotliwości niż w przypadku tej samej wartości obciążenia, ale o współczynniku mocy 1. Przesunięcie punktu pracy na charakterystyce magnesowania rdzenia magnetycznego w kierunku nasycenia, w przypadku obciążenia rezystancyjnego, wynika tylko ze wzrostu wraz z częstotliwością transformowanej wyższej harmonicznej reaktancji rozproszenia uzwojenia wtórnego badanego przekładnika.

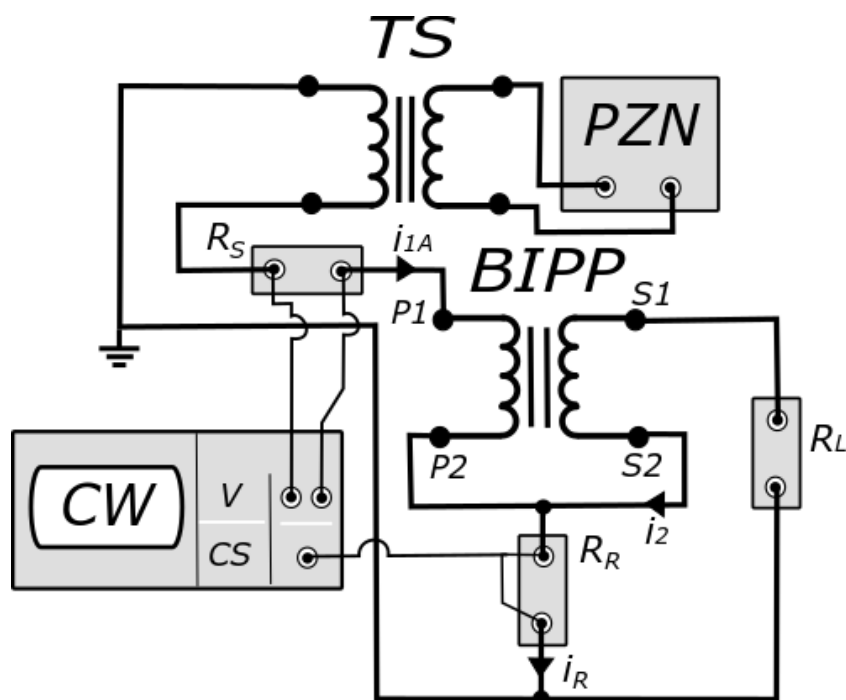
Przedstawione analizy wykazały, że stosowanie rezystancyjnego obciążenia uzwojenia wtórnego badanych indukcyjnych przekładników prądowych pozwoliło na uzyskanie znacznie mniejszych wartości błędów prądowego i kąтового transformacji wyższych harmonicznych w badanym zakresie częstotliwości. Rezystancyjne obciążenie uzwojenia wtórnego zapewnia szerszy częstotliwościowy zakres pracy z zadaną klasą dokładności wyznaczoną dla transformacji prądu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz (60 Hz) niż w przypadku zastosowania obciążenia rezystancyjno-indukcyjnego.

Przyczyny wzrostu błędów prądowego i kąтового dla transformacji wyższych harmoniczných prądu odkształconego przez indukcyjne przekładniki prądowe:

- generacja wyższych harmoniczných do prądu wtórnego,
- wzrost reaktancji obciążenia i uzwojenia wtórnego,
- wzrost strat mocy czynnej i spadek przenikalności magnetycznej rdzenia,
- nasycenie rdzeniu przy wysokim odkształceniu przebiegu pierwotnego,
- pojemność uzwojenia wtórnego

3. Badania laboratoryjne

Zanotować dane znamionowe badanego przekładnika prądowego. Pomiary należy wykonać dla prądów odkształconych o częstotliwości podstawowej 50 Hz zawierających pojedynczą wyższą harmoniczną. Należy zastosować wskazany układ pomiarowy:



Na schemacie pomiarowym zastosowano następujące oznaczenia:

CW – cyfrowy watomierz,

CS – kanał przystosowany do przyłączenia sondy prądowej/napięciowej modułu pomiarowego CW

i_{1A} – wartość chwilowa prądu dodatkowego uzwojenia,

i_2 – wartość chwilowa prądu wtórnego badanego indukcyjnego przekładnika prądowego,

i_R – wartość chwilowa prądu różnicowego,

R_L – rezystor odwzorowujący obciążenie uzwojenia wtórnego w warunkach normalnej pracy,

R_R – rezystor o wartości rezystancji 10Ω i indukcyjności poniżej $10 \mu H$ przeznaczony do pomiaru napięcia umożliwiającego wyznaczenie prądu przepływającego przez połączenie różnicowe między dodatkowym uzwojeniem a uzwojeniem wtórnym badanego indukcyjnego przekładnika prądowego,

R_S – rezystor o wartości rezystancji $0,1 \Omega$ dla znamionowego prądu o wartości skutecznej $5 A$ i 1Ω dla prądu $1 A$ oraz indukcyjności poniżej $10 \mu H$ przeznaczony do pomiaru napięcia umożliwiającego wyznaczenie prądu przepływającego przez dodatkowe uzwojenie,

TS – transformator separacyjny,

V – kanał napięciowy modułu cyfrowego watomierza.

Wykonanie ćwiczenia:

Wartość skuteczna harmonicznego odkształconego prądu dodatkowego uzwojenia pierwotnego przekładnika prądowego regulowana jest poprzez dwa kanały przedwzmacniacza. W pierwszym kanale zadawana jest wartość skuteczna harmonicznego podstawowego, w drugim kanale dodawana jest wartość skuteczna wyższej harmonicznej. Częstotliwości harmonicznego regulowane są za pomocą dwukanałowego generatora arbitralnego. W jednym module cyfrowego watomierza wykonywane są pomiary harmonicznego napięcia rezystorów pomiarowych: prądu dodatkowego uzwojenia przekładnika prądowego oraz prądu różnicowego. Pomiary wykonuje się używając funkcji cyfrowego watomierza: „Harmonic” → Mode „ON” („source” U2). W kanale V1 (odczyt wskazania U) realizowany jest pomiar napięcia rezystora prądu dodatkowego uzwojenia, a w kanale CS1 (odczyt wskazania I) prądu różnicowego przy czym dodatkowo wyznaczany jest kąt przesunięcia fazowego ϕ_{Ahk} (odczyt wskazania ϕ). Dla zadanej harmonicznej należy wybrać odpowiedni rząd mierzonej harmonicznej („order” cyfrowego watomierza) za pomocą pokrętki. Wartości powinny być zmierzone z odpowiednio dobranymi zakresami pomiarowym oraz z włączoną funkcją „AVG” (average – uśrednianie). Zakresy pomiarowe cyfrowego watomierza niezależnie dla każdego z kanałów ustawiane są poprzez wybór odpowiedniego zakresu z wykorzystaniem funkcji „RANGE”.

Przed rozpoczęciem pomiarów zanotować:

Dane znamionowe przekładnika:

- znamionowa przekładnia prądowa –
- klasa dokładności 50 Hz –
- wartość obciążenia znamionowego –
- producent, model i typ przekładnika –

Zadane wartości prądu pierwotnego i wyższej harmonicznej:

Zadana wartość obciążenia uzwojenia wtórnego R_L :

Rezystancja zastosowanego bocznika prądowego do pomiaru prądu różnicowego R_R : **10 Ω**

Rezystancja zastosowanego bocznika prądowego do pomiaru napięcia umożliwiającego wyznaczenie prądu uzwojenia dodatkowego R_S : **0,1 Ω (5 A) lub 1 Ω (1 A)**

Tabela 1. IPP I

kh	f [Hz]	U_{Shk}	U_{Rhk}	ϕ_{Ahk}
1	50			
3	150			
5	250			
7	350			
10	500			
15	750			
20	1000			
25	1250			
30	1500			
35	1750			
40	2000			
45	2250			
50	2500			
55	2750			
60	3000			
65	3250			
70	3500			
75	3750			
80	4000			
85	4250			
90	4500			
95	4750			
100	5000			

Tabela 2. IPP II

kh	f [Hz]	U_{Shk}	U_{Rhk}	ϕ_{Ahk}
1	50			
3	150			
5	250			
7	350			
10	500			
15	750			
20	1000			
25	1250			
30	1500			
35	1750			
40	2000			
45	2250			
50	2500			
55	2750			
60	3000			
65	3250			
70	3500			
75	3750			
80	4000			
85	4250			
90	4500			
95	4750			
100	5000			

Wartość skuteczna harmonicznej prądu dodatkowego uzwojenia przekładnika prądowego wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$I_{1Ahk} = \frac{U_{Shk}}{R_S} \quad (19)$$

Wartość procentowa błędu całkowitego $\varepsilon_{\%Ihk}$ transformacji hk harmonicznej wyrażona jest zależnością:

$$\varepsilon_{\%Ihk} = \frac{\frac{U_{Rhk}}{R_R}}{I_{1Ahk}} \cdot 100\% \quad (20)$$

Wartość skuteczna hk harmonicznej prądu wtórnego I_{2hk} badanego indukcyjnego przekładnika prądowego obliczana jest na podstawie zależności:

$$I_{2hk} = \sqrt{I_{1Ahk}^2 + \left(\frac{U_{Rhk}}{R_R}\right)^2 - 2 \cdot I_{1Ahk} \cdot \frac{U_{Rhk}}{R_R} \cdot \cos \phi_{Ahk}} \quad (21)$$

Procentowa wartość błędu prądowego transformacji harmonicznej jest określona zależnością:

$$\Delta I_{hk} = \frac{I_{2hk} - I_{1Ahk}}{I_{1Ahk}} \cdot 100\% \quad (22)$$

Wartości błędu kąтового transformacji harmonicznej prądu odkształconego wyznacza się z zależności:

$$\delta\phi_{hk} = \arcsin \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_{\%Ihk}^2 - \Delta I_{hk}^2}}{100\%} \right) \quad (23)$$

Znak błędu kąтового określany jest według poniższej tabeli:

ϕ_{Ahk}	<0°:90°)	<90°:180°)	<180°:270°)	<270°:360°)
ΔI_{hk}	[+]			
$\delta\phi_{hk}$	[+]	[-]	[+]	[-]
ΔI_{hk}	[-]			
$\delta\phi_{hk}$	[-]	[+]	[-]	[+]

Korzystając z zależności od (7) do (11) wyznaczyć wartości błędów całkowitego, prądowego i kąтового badanych indukcyjnych przekładników prądowych. Wyniki przestawić w tabeli:

Tabela 4. Wyniki IPP I

kh	f [Hz]	I_{1Ahk}	I_{2hk}	$\varepsilon_{%Ihk}$	ΔI_{hk}	$\delta\phi_{hk}$
1	50					
3	150					
5	250					
7	350					
10	500					
15	750					
20	1000					
25	1250					
30	1500					
35	1750					
40	2000					
45	2250					
50	2500					
55	2750					
60	3000					
65	3250					
70	3500					
75	3750					
80	4000					
85	4250					
90	4500					
95	4750					
100	5000					

Tabela 5. Wyniki IPP II

kh	f [Hz]	I_{1Ahk}	I_{2hk}	$\varepsilon_{%Ihk}$	ΔI_{hk}	$\delta\phi_{hk}$
1	50					
3	150					
5	250					
7	350					
10	500					
15	750					
20	1000					
25	1250					
30	1500					
35	1750					
40	2000					
45	2250					
50	2500					
55	2750					
60	3000					
65	3250					
70	3500					
75	3750					
80	4000					
85	4250					
90	4500					
95	4750					
100	5000					

Podać przykładowe obliczenia dla dwóch wartości w każdej z kolumn

4. Opracowanie wyników pomiarowych

W sprawozdaniu przedstawić charakterystyki błędów całkowitego, prądowego i kąтового wykreślone w funkcji częstotliwości transformowanej harmoniczej odkształconego prądu pierwotnego oraz uzasadnić ich przebieg. Omówić możliwe czynniki warunkujące ich wartości. W zależności od zakresu badań wykonywanych podczas ćwiczenia porównać charakterystyki wyznaczone dla dwóch indukcyjnych przekładników prądowych lub dla tego samego przekładnika w poszczególnych próbach pomiarowych i określić możliwe przyczyny występowania różnic w ich przebiegach.