

dr inż. Michał Kaczmarek
Instytut Elektroenergetyki
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki,
Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka

Załącznik 2A

Autoreferat przedstawiający opis dorobku
i osiągnięć naukowych

Koch

1) Imię i Nazwisko

Michał Kaczmarek

2) Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

Magister inżynier ze specjalizacją układy elektroniki przemysłowej, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki i Elektroniki, 2004 r.

Doktor nauk technicznych ze specjalizacją elektromagnetyzm i przekładniki, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, 2009 r., rozprawa doktorska: Transfer zaburzeń przez przekładniki napięciowe, promotor: prof. dr hab. inż. Ryszard Nowicz.

Podyplomowe trzyletnie studia pedagogiczne, Politechnika Łódzka, Wydział Organizacji i Zarządzania, 2006 r. - 2008 r.

Studia doktoranckie, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, doktorant w Katedrze Mikroelektroniki i Technik Informatycznych, 2005 r., doktorant w Katedrze Elektrotechniki Ogólnej i Przekładników, 2006 r. - 2009 r.

3) Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

2010 – obecnie: adiunkt w Instytucie Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej

2009 – 30 IX 2010: adiunkt w Katedrze Elektrotechniki Ogólnej i Przekładników, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej.

4) Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.)

a) Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego:

Analiza pracy i metodyka badań indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych podczas transformacji przebiegów odkształconych i sygnałów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości.

b) Cykl publikacji powiązanych tematycznie:

- B1. Kaczmarek M., Inductive current transformer accuracy of transformation for the PQ measurements, *Electric Power Systems Research*, vol. 150, 9(2017), 169-176.
- B2. Kaczmarek M.: Development and application of the differential voltage to single-ended voltage converter to determine the composite error of voltage transformers and dividers for transformation of sinusoidal and distorted voltages, *Measurement*, vol. 101, 4(2017), 53–61.
- B3. Kaczmarek M., Measurement error of non-sinusoidal electrical power and energy caused by instrument transformers, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, 10(2016), 3492–3498.
- B4. Kaczmarek M., Secondary current distortion of inductive current transformer in conditions of dips and interruptions of voltage in the power line, *Electric Power Systems Research*, vol. 137, 8(2016), 1-5.
- B5. Kaczmarek M., A practical approach to evaluation of accuracy of inductive current transformer for transformation of distorted current higher harmonics, *Electric Power Systems Research*, vol. 119, 2(2015), 258-265.
- B6. Kaczmarek M., Szatilo T.: Reference voltage divider designed to operate with oscilloscope to enable determination of ratio error and phase displacement frequency characteristics of MV voltage transformers, *Measurement*, vol. 68, 5(2015), 22-31.
- B7. Kaczmarek M.: The source of the inductive current transformers metrological properties deterioration for transformation of distorted currents, *Electric Power Systems Research*, vol. 107, 2(2014), 45-50.

- B8. Kaczmarek M.: Estimation of the Inductive Current Transformer Derating Conditions for Distorted Currents, Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical Sciences, vol. 62, 2(2014), 363-366.
- B9. Kaczmarek M.: Wide frequency operation of the inductive current transformer with Ni80Fe20 toroidal core, Electric Power Components and Systems, vol. 42, 10(2014), 1087-1094.
- B10. Kaczmarek M.: Sposób wyznaczania błędów napięciowego i kąтового indukcyjnych przekładników i dzielników napięciowych dla napięć sinusoidalnych o częstotliwościach 50 Hz (60 Hz) i wyższych, bez przekładnika wzorcowego, numer zgłoszenia patentowego: P.405830, data zgłoszenia: 29.10.2013 r., numer przyznanego prawa wyłącznego: PL 225861 B1.
- B11. Kaczmarek M., Nowicz R.: Sposób oceny dokładności transformacji indukcyjnych przekładników prądowych dla prądów odkształconych, numer zgłoszenia patentowego: P.399602, data zgłoszenia: 21.06.2012 r., numer przyznanego prawa wyłącznego: PL 223692 B1.
- B12. Kaczmarek M., Nowicz R.: Układ pomiarowy do wyznaczania błędów prądowego i kąтового indukcyjnych przekładników prądowych dla prądów sinusoidalnych o częstotliwościach 50 Hz (60 Hz) i wyższych, numer zgłoszenia patentowego: P.393923, data zgłoszenia: 14.02.2011 r., numer przyznanego prawa wyłącznego: PL 220992 B1.

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Cel naukowy analiz przeprowadzonych w ramach ww. prac stanowiło określenie wpływu warunków eksploatacyjnych na wartości błędów prądowego/napięciowego, kąтового i całkowitego transformacji harmonicznym prądów/napięć odkształconych i sygnałów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości. Badania te dotyczyły przede wszystkim oddziaływania czynników w postaci wartości skutecznych wyższych harmonicznym sygnału pierwotnego i składowej podstawowej oraz jej dynamicznym zmian, a także wartości i charakteru obciążenia uzwojenia wtórnego indukcyjnych

przekładów na ich dokładność transformacji w tych warunkach pracy. Wyniki tych prac znajdują zastosowanie podczas wyznaczania wpływu przekładników na błędy pomiarów wartości i jakości energii elektrycznej przesyłanej przez sieć elektroenergetyczną. Drugim analizowanym aspektem w przypadku indukcyjnych przekładników prądowych była ocena wpływu właściwości magnetycznych rdzenia na dokładność transformacji prądów odkształconych i sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości. Badania te dotyczyły zastosowania tych przekładników do oceny jakości energii elektrycznej także w warunkach występowania zaników i zapadów napięcia sieci elektroenergetycznej oraz transformacji silnie odkształconych prądów. Wykonane analizy pozwoliły na określenie warunków, w których zastosowanie indukcyjnego przekładnika prądowego/napięciowego powoduje większe niż wynikające z jego klasy dokładności błędy pomiarów wartości przesyłanej energii elektrycznej i jej jakości. Umożliwiło to ustalenie przyczyn wzrostu błędów i opracowanie rozwiązań pozwalających na ich ograniczenie. W zakresie opracowanej **metodyki badań cel naukowy** ww. prac obejmował określenie etapów i sposobu prowadzenia badań oraz opracowanie koncepcji układów pomiarowych i algorytmu selekcjonowania indukcyjnych przekładników zapewniających wymaganą dokładność w warunkach transformacji przebiegów odkształconych i sygnałów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości. Opracowana została metoda oceny dokładności transformacji przekładników w tych warunkach ich pracy poprzez pomiar tylko błędu całkowitego. Wykonane i zastosowane układy pomiarowe stanowią wdrożenie opracowanych koncepcji naukowych i potwierdzają uniwersalność opracowanych metod poprzez wykorzystanie dwóch różnych urządzeń: cyfrowego watomierza lub analizatora jakości energii. Pozwalają wyznaczyć wartości błędów prądowego/napięciowego i kąтового oraz całkowitego podczas transformacji sygnałów sinusoidalnych, a także wybranej harmonicznej odkształconego prądu/napięcia. Na podkreślenie zasługuje fakt, że realizacje układów pomiarowych, według opracowanych sposobów sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników prądowych/napięciowych, dla sygnałów sinusoidalnych i harmonicznym przebiegów odkształconych mogą być identyczne. Wyznaczenie błędów dla harmonicznym wymaga dodatkowo zsynchronizowanego

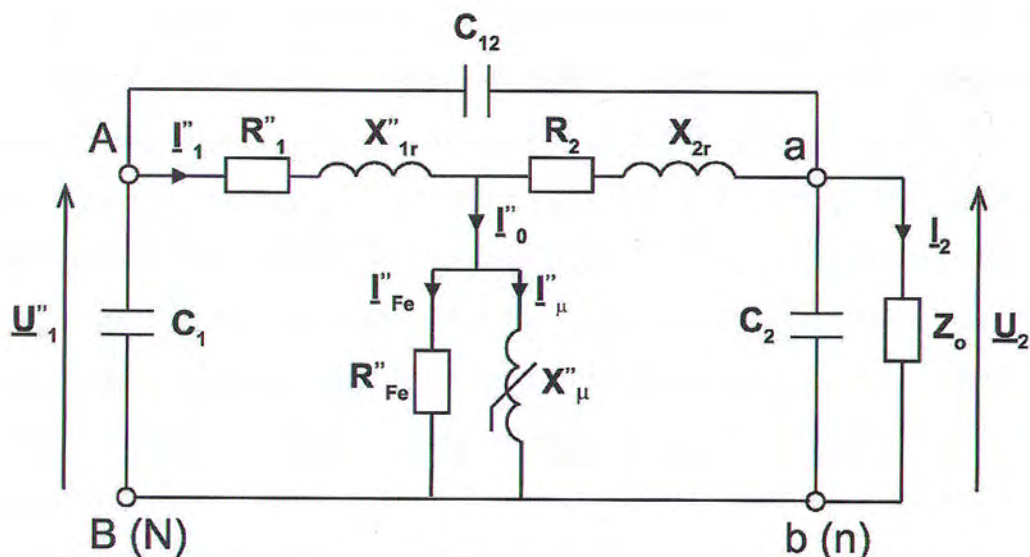
wykonania np. szybkiej transformaty Fouriera (FFT) sygnałów zmierzonych w obu torach pomiarowych w celu wyznaczenia ich wartości skutecznych i przesunięć fazowych w odkształconym sygnale. Opracowana metodyka badań w przypadku indukcyjnych przekładników prądowych wymagała przygotowania sposobu wzorcowania referencyjnych przekładników prądowych. Natomiast w przypadku przekładników napięciowych konieczne było opracowanie metod konstrukcji i sprawdzenia dokładności referencyjnego dzielnika wzorcowego. Nowatorskim rozwiązaniem jest realizowana bezpośrednio w systemie pomiarowym możliwość weryfikacji dokładności pomiaru błędów prądowego/napięciowego i kąтового. Porównywana jest wartość błędu całkowitego obliczona na podstawie zmierzonych wartości błędów prądowego/napięciowego i kąтового z wartością wynikającą z bezpośredniego pomiaru. W przypadku przekładników prądowych do tego celu wymagane jest zastosowanie wysokiej czułości, przelotowej sondy prądowej. Natomiast w przypadku przekładników napięciowych konieczne było opracowanie i wykonanie oraz zastosowanie dużej impedancji, szerokopasmowego układu różnicowego.

Przekładniki napięciowe i prądowe należą do systemu elektroenergetycznego i stanowią podstawowy element łączący obwód pierwotny linii elektroenergetycznej z obwodem wtórnym wykorzystywanym do pomiarów lub zabezpieczeń. W niektórych punktach sieci, jakość energii elektrycznej ulega obecnie znacznemu pogorszeniu. Z tego względu konieczna jest dokładna transformacja napięć/prądów odkształconych. Istotne są wówczas nie tylko błędy przekładni i kątowy badanego przekładnika wyznaczone dla transformacji sygnałów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz (zgodnie z normą PN-EN 61869-2/3), ale także jego dokładność transformacji wyższych harmonicznych odkształconych napięć/prądów. W przypadku pomiarów jakości energii zgodnie z normą PN-EN 50160:2010, co najmniej w zakresie częstotliwości do 2000 Hz. Jeżeli w układzie pośrednim badany jest poziom zaburzeń przewodzonych występujących w sieci elektroenergetycznej, konieczne jest dla zachowania niezbędnej dokładności pomiaru, aby przekładnik charakteryzował się odpowiednio wysokimi właściwościami metrologicznymi dla wyższych harmonicznych o częstotliwościach do 9 kHz (normy PN-EN 61000-2-2/4:2003). Dopuszczalne wartości harmonicznych

prądu/napięcia w sieci elektroenergetycznej określa instrukcja ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnej. Obecnie normy polskie/europejskie i amerykańskie (C57.13:2016) nie określają wymagań i sposobów badań dokładności indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych podczas transformacji wyższych harmoniczných sygnałów odkształconych, ani prądów/napięć sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości. Norma PN-EN 61869-6:2017 dotyczy jedynie przekładników małej mocy, czyli układów elektronicznych pasywnych lub aktywnych przeznaczonych do transformacji prądu lub napięcia. Badania dokładności transformacji powinny być wykonane przy znamionowej wartości skutecznej sygnału wejściowego dla sygnałów sinusoidalnych lub harmoniczných prądów/napięć odkształconych o częstotliwości z określonego, według normy, zakresu. Dla danych klas dokładności wyznaczonych podczas transformacji sinusoidalnego sygnału o częstotliwości znamionowej 50 Hz (60 Hz), określono wartości graniczne błędów przekładni i kątowych transformacji sygnałów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości oraz wyższych harmoniczných sygnałów odkształconych. Wymagania te mogą być wykorzystywane jako wytyczne do oceny szerokopasmowej dokładności indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych. Jednak wtedy, ze względu na nieliniowy przebieg charakterystyki magnesowania rdzenia, pomiary powinny zostać wykonane nie tylko przy znamionowej wartości prądu/napięcia badanego przekładnika, lecz także dla wartości wymaganych zgodnie z normą PN-EN 61869-2/3. Przy czym, w przypadku badań dotyczących dokładności transformacji prądów odkształconych przez indukcyjne przekładniki należy przeprowadzić także sprawdzenie dokładności transformacji podstawowej harmonicznęj w warunkach występowania wielu kolejnych harmoniczných niższego rzędu w sygnale pierwotnym. Szczególnie przy 120% wartości skutecznej sygnału znamionowego może to spowodować nasycenie rdzenia indukcyjnego przekładnika prądowego i gwałtowny wzrost błędów. Ponadto, w normie PN-EN 61869-6:2017 przedstawiono po trzy koncepcje układów pomiarowych do badania dokładności transformacji wyższych harmoniczných oraz sygnałów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości przez przekładniki/przetworniki prądowe i napięciowe. Pierwsza metoda oparta jest o zastosowanie woltomierza homodynamicznego (ang. Lock-in amplifier).

W drugim przedstawionym sposobie wykorzystany został komparator prądów. Dlatego zastosowanie dodatkowych przetworników wymagane jest w pierwszym przypadku do badania przekładników prądowych natomiast w drugim przypadku do sprawdzania dokładności przekładników napięciowych. W obu układach pomiarowych występuje także konieczność zastosowania dodatkowych układów dopasowujących wartość prądu/napięcia do dopuszczalnych wartości wejściowych aparatury pomiarowej. Z tych powodów, dla zachowania wysokiej dokładności pomiaru kluczowa jest stabilność parametrów dodatkowych elementów układu pomiarowego niezależnie od częstotliwości sinusoidalnego prądu/napięcia lub składowych harmonicznym sygnałów odkształconych i ich wartości. Trzecia metoda-cyfrowa wymaga zastosowania zsynchronizowanych przetworników analogowo-cyfrowych, natomiast do wyznaczania błędów transformacji przekładników wykorzystywany jest program komputerowy. Idea tego typu układu pomiarowego polega na wykorzystaniu w układzie pomiarowym cyfrowego watomierza lub analizatora jakości energii lub wielokanałowej karty pomiarowej. Wadą tego konkretnego rozwiązania jest brak pomiaru różnicowego, powszechnie stosowanego ze względu na zapewniane niezawodność i wysoką dokładność w układach pomiarowych do sprawdzania dokładności przekładników podczas transformacji sygnałów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz (60 Hz).

Głównymi przyczynami wzrostu błędów napięciowego i kąтового dla transformacji wyższych harmonicznym napięcia odkształconego przez indukcyjny przekładnik napięciowy są: wzrost reaktancji rozproszenia uzwojenia pierwotnego i spadek reaktancji pojemnościowej uzwojeń a także między uzwojeniami. Prowadzi to do występowania zjawisk rezonansowych między indukcyjnością główną i rozproszenia uzwojenia pierwotnego przekładnika, a pojemnościami uzwojeń i między uzwojeniami. Schemat zastępczy indukcyjnego przekładnika napięciowego dla częstotliwości sinusoidalnego napięcia pierwotnego i harmonicznym odkształconego napięcia pierwotnego do 10 kHz przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy indukcyjnego przekładnika napięciowego dla częstotliwości do 10 kHz

Na schemacie tym zastosowano następujące oznaczenia (symbole z dwiema kreskami (bis) oznaczają wielkości sprowadzone do obwodu wtórnego):

U_1'' – napięcie pierwotne przeliczone na stronę wtórną, I_1'' – prąd pierwotny przeliczony na stronę wtórną, R_1'' – rezystancja uzwojenia pierwotnego przeliczona na stronę wtórną, X_{1r}'' – reaktancja rozproszenia uzwojenia pierwotnego przeliczona na stronę wtórną, R_{Fe}'' – rezystancja odwzorowująca straty w rdzeniu przeliczona na stronę wtórną, I_{Fe}'' – prąd odwzorowujący straty w rdzeniu przeliczony na stronę wtórną, X_{μ}'' – reaktancja główna przeliczona na stronę wtórną, I_{μ}'' – prąd magnesujący przeliczony na stronę wtórną, X_{2r} – reaktancja rozproszenia uzwojenia wtórnego, R_2 – rezystancja uzwojenia wtórnego, U_2 – napięcie wtórne, I_2 – prąd wtórny, Z_0 – impedancja obciążenia. W stosunku do klasycznego schematu zastępczego indukcyjnego przekładnika napięciowego schemat zastępczy przedstawiony na rysunku 1 został rozszerzony o pojemności uzwojenia pierwotnego C_1 , uzwojenia wtórnego C_2 i pojemność między uzwojeniami C_{12} .

Ze względu na nieliniowy przebieg charakterystyki magnesowania rdzeni indukcyjnych przekładników błąd transformacji harmoniczej jest inny niż napięcia/prądu sinusoidalnego o tej samej częstotliwości. W przypadku indukcyjnych przekładników

prądowych, zgodnie z raportem technicznym IEC 61869-103:2012, pasmo pracy może wynosić nawet 20 kHz. O dokładności transformacji przekładnika prądowego decyduje przede wszystkim wysoka jakość materiału rdzenia magnetycznego. Pasma pracy ograniczone jest przez filtr dolnoprzepustowy wytworzony przez reaktancję rozproszenia uzwojenia wtórnego i jego pojemności. Zatem, jest znacząco mniejsze w przypadku zastosowania bardzo dużych wartości przekładni zwojowej. O dokładności transformacji przekładnika napięciowego decydują przede wszystkim parametry konstrukcyjne uzwojeń pierwotnego i wtórnego oraz układ izolacyjny. Między rdzeniem a uzwojeniem wtórnym, jak również między uzwojeniami, występuje warstwa izolacyjna. Grubość tej warstwy zależy od różnicy potencjałów między izolowanymi elementami i warunkuje wartości pasożytniczej pojemności sprzęgającej między uzwojeniami C_{12} . Wzrost średnicy uzwojenia, powoduje wzrost jego rezystancji, jak również reaktancji rozproszenia i w efekcie powoduje wzrost błędów przekładnika. Ponadto, zwiększenie grubości izolacji między uzwojeniem pierwotnym i wtórnym prowadzi do wzrostu rezystancji i reaktancji uzwojeń ale i do obniżenia pojemności pasożytniczych sprzęgających uzwojenie pierwotne i wtórne. Zwiększenie liczby zwojów uzwojeń powoduje wzrost ich pojemności $C_{1/2}$.

Analogicznie jak dla transformacji napięcia sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz błąd napięciowy transformacji harmonicznej napięcia odkształconego przez przekładnik napięciowy obliczany jest jako, różnica wartości skutecznych danej harmonicznej w napięciu wtórnym i w napięciu pierwotnym po pomnożeniu przez znamionową przekładnię przekładnika napięciowego, odniesiona do wartości skutecznej danej harmonicznej w napięciu pierwotnym.

$$\Delta U_{kh} = \frac{K_{Un} U_{2kh} - U_{1kh}}{U_{1kh}} \cdot 100\% \quad (1)$$

ΔU_{kh} - błąd napięciowy transformacji k-tej harmonicznej przez przekładnik napięciowy,
 U_{2kh} - wartość skuteczna k-tej harmonicznej w odkształconym napięciu wtórnym,
 U_{1kh} - wartość skuteczna k-tej harmonicznej w odkształconym napięciu pierwotnym,
 K_{Un} - przekładnia znamionowa przekładnika napięciowego.

Błąd kątowy jest to kąt między wektorem danej harmonicznej w odkształconym napięciu pierwotnym i odwróconym o 180° wektorem danej harmonicznej w odkształconym napięciu wtórnym, wyrażony w minutach lub centyradianach. Błąd kątowy jest dodatni, jeśli odwrócony o 180° wektor danej harmonicznej w odkształconym napięciu wtórnym wyprzedza wektor danej harmonicznej w odkształconym napięciu pierwotnym.

$$\delta_{U_{kh}} = \varphi_{2kh} - \varphi_{1kh} \quad (2)$$

$\delta_{U_{kh}}$ - błąd kątowy transformacji k-tej harmonicznej przez przekładnik napięciowy, φ_{1kh} - przesunięcie fazowe k-tej harmonicznej w odkształconym napięciu pierwotnym względem podstawowej harmonicznej napięcia pierwotnego, φ_{2kh} - przesunięcie fazowe k-tej harmonicznej w odkształconym napięciu wtórnym względem podstawowej harmonicznej napięcia pierwotnego.

Wartości błędów prądowego i kąтового przekładnika prądowego dla transformacji harmonicznych prądu odkształconego oblicza się w sposób analogiczny.

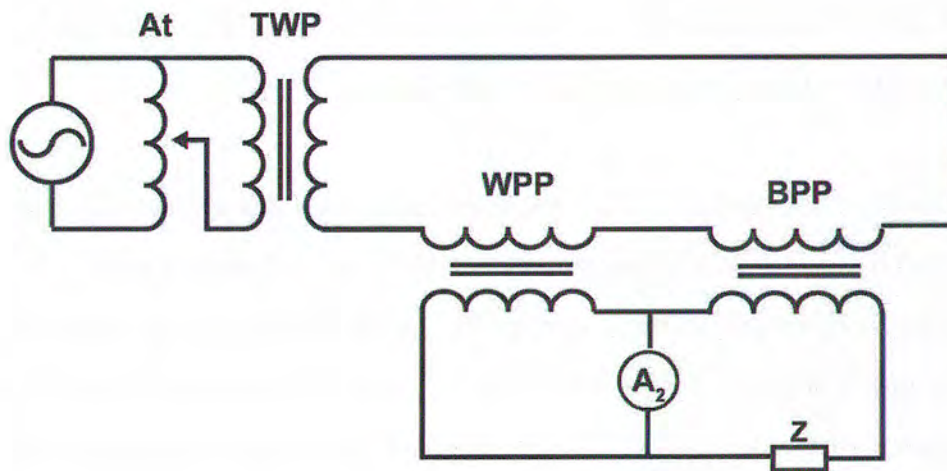
Pojęcie błędu całkowitego definiuje norma PN-EN 61869-2:2013, zgodnie z którą, jest to wartość skuteczna prądu w stanie ustalonym, wyrażona w procentach wartości skutecznej prądu pierwotnego, będąca różnicą między chwilowymi wartościami prądów pierwotnego i wtórnego pomnożonego przez znamionową przekładnię przekładnika prądowego.

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (Ki_2 - i_1)^2 dt} \quad (3)$$

K - znamionowa przekładnia prądowa, i_1 , i_2 - wartości chwilowe prądów pierwotnego i wtórnego, I_1 - wartość skuteczna prądu pierwotnego, T - okres przebiegu prądu.

Zgodnie z tą normą błąd całkowity określa się w badaniach typu dla przekładników prądowych do zabezpieczeń typu P i PX w warunkach, w których uzwojenie pierwotne badanego przekładnika prądowego zasilane jest praktycznie sinusoidalnym prądem

o wartości równej granicznemu znamionowemu prądowi pierwotnemu, a uzwojenie wtórne obciążone jest mocą znamionową przy współczynniku mocy zawartym między 0,8 ind. a 1,0. W układach pomiarowych do wyznaczania błędu całkowitego przekładników prądowych do zabezpieczeń, przedstawionych w normie PN-EN 61869-2:2013, stosuje się konwencjonalny przekładnik wzorcowy o pomijalnie małym błędzie całkowitym w porównaniu z błędem badanego przekładnika prądowego oraz skrzynkę obciążeń przeznaczoną do pracy przy częstotliwości 50 Hz (60 Hz). Różnica prądów wyznaczana jest przez amperomierz o klasie dokładności 0,1 lub co najmniej o klasie wyższej niż badany przekładnik. Schemat ideowy układu pomiarowego do wyznaczania błędu całkowitego przekładnika prądowego został przedstawiony na rysunku 2.

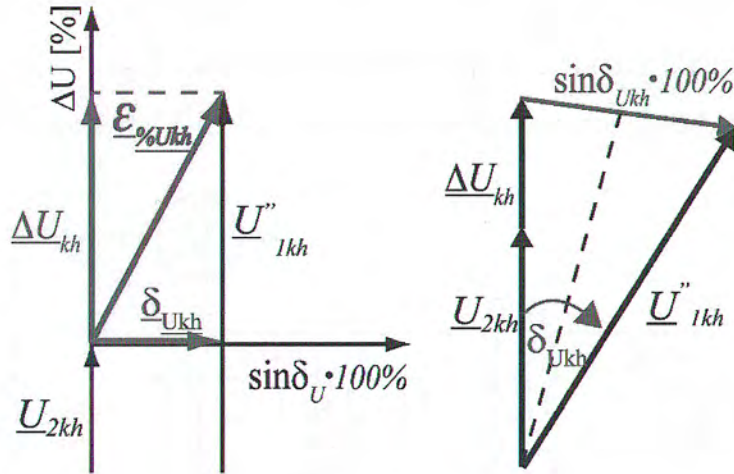


Rys. 2. Schemat ideowy układu pomiarowego do wyznaczania błędu całkowitego przekładnika prądowego

Na schemacie z rysunku 2 zastosowano następujące oznaczenia:

At - autotransformator, TWP - transformator prądowy, WPP - wzorcowy przekładnik prądowy, BPP - badany przekładnik prądowy, Z - skrzynka obciążenia uzwojenia wtórnego badanego przekładnika prądowego, A - amperomierz.

Błąd całkowity dla danej harmonicznej napięcia odkształconego może zostać zdefiniowany w oparciu o wykres wskazowy przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Wykres wskazowy dla transformacji k-tej harmonicznej napięcia odkształconego przez przekładnik napięciowy

Na wykresie wskazowym z rysunku 3 zastosowano następujące oznaczenia:

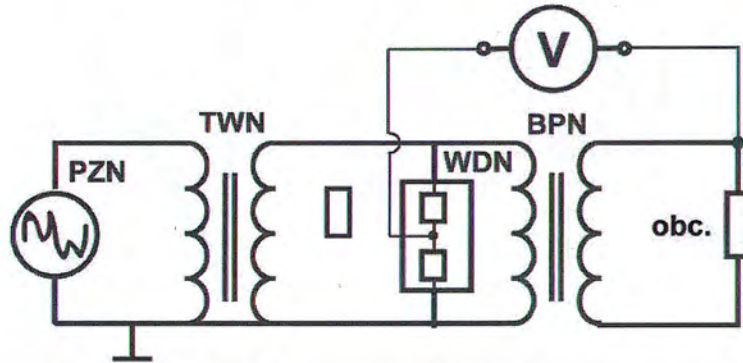
\underline{U}''_{1kh} - wektor k-tej harmonicznej napięcia pierwotnego przekładnika napięciowego przeliczonego na stronę wtórną, \underline{U}_{2kh} - wektor k-tej harmonicznej napięcia wtórnego, $\varepsilon_{\%U_{kh}}$ - wektor k-tej harmonicznej błędu całkowitego, $\underline{\Delta U}_{kh}$ - wektor k-tej harmonicznej błędu napięciowego, $\underline{\delta}_{U_{kh}}$ - wektor k-tej harmonicznej błędu całkowitego wynikający z błędu kąтового dla k-tej harmonicznej.

Na podstawie powyższego wykresu wskazowego można wykazać, że wartość błędu całkowitego transformacji k-tej harmonicznej napięcia odkształconego przez przekładnik napięciowy jest równa sumie geometrycznej wyznaczonych dla transformacji tej harmonicznej błędów napięciowego i składowej błędu całkowitego wynikającej z błędu kąowego k-tej harmonicznej.

$$\varepsilon_{\%U_{kh}} = \sqrt{\Delta U_{kh}^2 + (\sin \delta_{U_{kh}} \cdot 100)^2} \quad (4)$$

Wartość błędu całkowitego przekładnika prądowego dla transformacji harmonicznych prądu odkształconego oblicza się w sposób analogiczny.

Błąd całkowity przekładnika napięciowego wyznaczany jest między punktami o wysokim potencjale napięcia wyjściowego dzielnika i napięcia wtórnego badanego przekładnika zgodnie ze schematem ideowym przedstawionym na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat ideowy układu pomiarowego do wyznaczania błędu całkowitego przekładnika napięciowego względem dzielnika wzorcowego

Na schemacie z rysunku 4 zastosowano następujące oznaczenia:

PZN - programowalne źródło napięcia zmiennego, TWN - transformator podnoszący napięcie, WDN - wzorcowy dzielnik napięciowy, BPN - badany przekładnik napięciowy, obc. - impedancja obciążenia uzwojenia wtórnego badanego przekładnika napięciowego, V - woltomierz.

Z uwagi na zbyt niską rezystancję woltomierzy, która typowo ma wartość poniżej 10 M Ω dla prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz, pomiar błędu całkowitego według schematu ideowego z rysunku 4 prowadziłby do nieprawidłowej pracy wzorcowego dzielnika napięciowego. Wynika to z jego wysokiej rezystancji wynoszącej co najmniej 1 M Ω /kV i warunkującej rezystancję wyjściową o wartości 100 k Ω . Powoduje to przepływ prądu przez woltomierz o wartości wpływającej znacząco na dokładność dzielnika.

Omówienie wyników prac wskazanych w osiągnięciu naukowym

[B6]: W artykule tym przedstawiony został sposób konstrukcji szerokopasmowego dzielnika rezystancyjno-pojemnościowego 2 kV / 100 V. **Kandydat zaproponował nowe/oryginalne sposoby wyznaczania i weryfikacji**

częstotliwościowych charakterystyk jego błędów napięciowego i kąowego. Rezystory dzielnika dobierane są w układzie mostkowym prądu stałego przy zasilaniu napięciem znamionowym. Charakterystyki częstotliwościowe kształtowane są za pomocą kondensatorów, których wartości dla poszczególnych rezystorów dobierane są na podstawie wyników pomiarów wartości skutecznych i przesunięć fazowych napięć wejściowego i wyjściowego badanego dzielnika. Kluczową sprawą dla zapewnienia poprawności działania układu pomiarowego jest brak zmiany przekładni napięciowej i przesunięcia fazowego zastosowanych sond napięciowych dla pomiarów tych wartości napięć. W zaproponowanym do weryfikacji wyznaczonych charakterystyk błędów badanych dzielników napięciowych układzie mostkowym dwóch dzielników napięciowych nie został jeszcze zastosowany pomiar różnicowy błędu całkowitego. Zmierzone zostały natomiast wartości błędów między dzielnikami i porównane z wartościami wynikającymi z obliczeń dla wyznaczonych charakterystyk błędów napięciowego i kąowego obu dzielników.

[B2]: W artykule tym przedstawione zostały opracowane metoda konstrukcji i sposób sprawdzenia dokładności przetwarzania oraz metoda zastosowania układu różnicowego do bezpośredniego pomiaru błędu całkowitego przekładników napięciowych. **Zdaniem Kandydata nowe elementy zaproponowanej metody dotyczą zastosowania optoizolacji, która przy zachowaniu odpowiedniego odstępu między diodą nadawczą i odbiornikiem zapewnia możliwość pomiaru różnicowego między napięciami nawet o bardzo wysokich wartościach skutecznych. Dodatkowo duża impedancja wejściowa tego układu zapewnia wyeliminowania wpływu na dokładność dzielnika napięciowego włączenia do układu pomiarowego z rysunku 4 woltomierza lub innego urządzenia pomiarowego. Nowatorskim elementem jest także stworzenie możliwości weryfikacji dokładności pomiaru błędów napięciowego i kąowego, wyznaczanych dla przekładnika napięciowego podczas transformacji dowolnego typu przebiegów przez dowolny system pomiarowy, dzięki jednocześnie mierzonemu błędowi całkowitemu. Procentowa wartość k-tej harmonicznej błędu całkowitego jest równa wartości skutecznej k-tej harmonicznej**

napięcia wyjściowego układu różnicowego odniesionej do jej wartości skutecznej w napięciu pierwotnym po przeliczeniu na stronę wtórną:

$$\varepsilon_{Ckh} = \frac{U_{rkh}}{U''_{1kh}} \cdot 100\% \quad (5)$$

ε_{Ckh} - wartość k-tej harmoniczej błędu całkowitego [%], U_{rkh} - wartości skutecznej k-tej harmoniczej napięcia wyjściowego układu różnicowego, U''_{1kh} - wartości skuteczna k-tej harmoniczej w napięciu pierwotnym przeliczona na stronę wtórną.

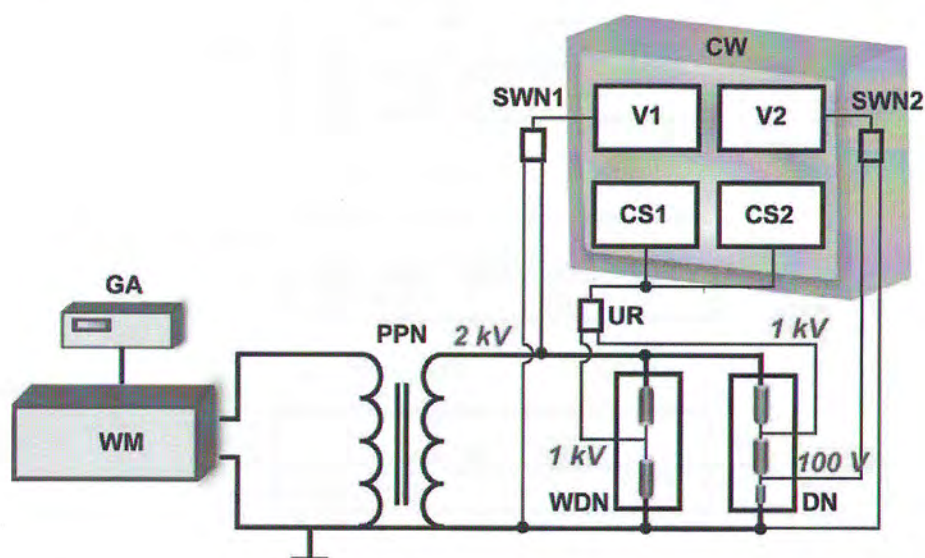
Wartość błędu całkowitego zmierzona poprzez układ różnicowy ze względu na wysoką dokładności pomiaru pozwala określić błąd jego wyznaczania na podstawie zależności (4) ze zmierzonych wartości błędów napięciowego i kąтового. Obliczony błąd wyznaczania błędu całkowitego równy jest błędowi granicznemu pomiaru błędu napięciowego (przy założeniu, że błąd pomiaru błędu kąтового jest pomijalnie mały) lub błędu kąтового (przy założeniu, że błąd pomiaru błędu napięciowego jest pomijalnie mały) przez dany system pomiarowy.

$$\Delta\varepsilon_{Okh} = \frac{\varepsilon_{\%Ukh} - \varepsilon_{Ckh}}{\varepsilon_{Ckh}} \cdot 100\% \quad (6)$$

$\Delta\varepsilon_{Okh}$ - błąd wyznaczania k-tej harmoniczej błędu całkowitego na podstawie zmierzonych wartości błędów napięciowego i kąтового [%], ε_{Ckh} - wartość k-tej harmoniczej błędu całkowitego zmierzona poprzez układ różnicowy [%], $\varepsilon_{\%Ukh}$ - obliczona wartość k-tej harmoniczej błędu całkowitego na podstawie równania (4) dla zmierzonych wartości błędów napięciowego i kąтового [%].

[B10]: Zdaniem Kandydata nowe elementy zaproponowanego sposobu przedstawionego w tym patencie krajowym dotyczą zastosowania dzielnika napięciowego [B6] i układu różnicowego [B2] do sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników i dzielników napięciowych podczas transformacji napięć sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości. Równie nowatorski jest uniwersalny charakter metody, która pozwala na zastosowanie różnej aparatury

pomiarowej (cyfrowego watomierza [B2] lub analizatora jakości energii [B3]) i umożliwia także sprawdzanie dokładności indukcyjnych przekładników i dzielników napięciowych podczas transformacji napięć odkształconych. Schemat ideowy układu pomiarowego realizującego opracowany sposób sprawdzania dokładności dzielników napięciowych przedstawiono na rysunku 5.



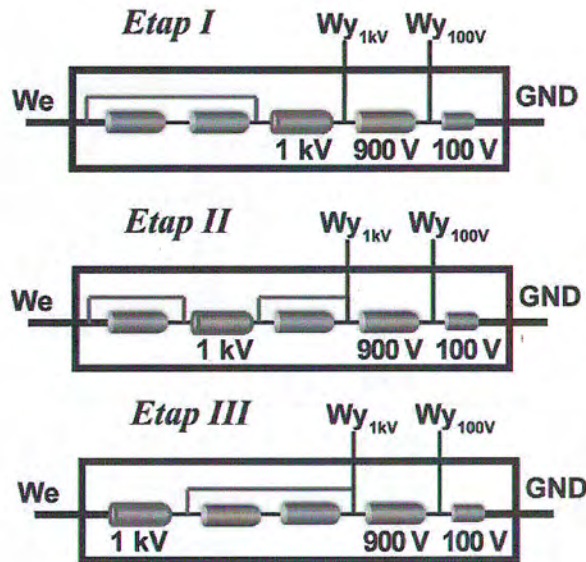
Rys. 5. Schemat ideowy układu pomiarowego realizującego opracowany sposób sprawdzania dokładności dzielników napięciowych

Na schemacie z rysunku 5 zastosowano następujące oznaczenia:

CW - cyfrowy watomierz, GA - generator arbitralny, WM - wzmacniacz mocy, WDN - wzorcowy dzielnik napięciowy, DN - badany dzielnik napięciowy, UR - układ różnicowy, PPN - przekładnik podnoszący napięcie, SWN1/2 – sonda WN 1/2.

Dzielnik wzorcowy stanowią dwa rezystory wysokonapięciowe, dla których dla zadanego pasma pracy, bez względu na kierunek włączenia dzielnika do napięcia zasilającego, nie występują zmiany błędu całkowitego wyznaczone względem dowolnego dzielnika 2 kV / 1 kV. Następnie w przedstawionym układzie pomiarowym wykonywane jest sprawdzenie dokładności badanego dzielnika. Błąd wskazywany przez układ różnicowy powinien być pomijalnie mały. Jeżeli napięcie znamionowe badanego dzielnika jest wyższe niż 2 kV należy pomiary powtórzyć zastępując

sprawdzony fragment części górnej dzielnika o napięciu znamionowym 1 kV, kolejnym niesprawdzonym fragmentem części górnej dzielnika o napięciu znamionowym 1 kV i zwierając fragment sprawdzony. Etapy sprawdzania dokładności dzielnika o przekładni napięciowej 4 kV / 100 V ilustruje przykład z rysunku 6.



Rys. 6. Etapy sprawdzania dokładności dzielnika napięciowego 4 kV / 100 V

Na rysunku 6 zastosowano następujące oznaczenia:

We - zacisk badanego dzielnika napięciowego przeznaczony do podłączenia napięcia wejściowego, którego znamionowa wartość skuteczna w prezentowanym przykładzie wynosi 4 kV; *Wy_{1kV}* - zacisk badanego dzielnika napięciowego o znamionowej wartości skutecznej napięcia wyjściowego 1 kV; *Wy_{100V}* - zacisk badanego dzielnika napięciowego o znamionowej wartości skutecznej napięcia wyjściowego 100 V.

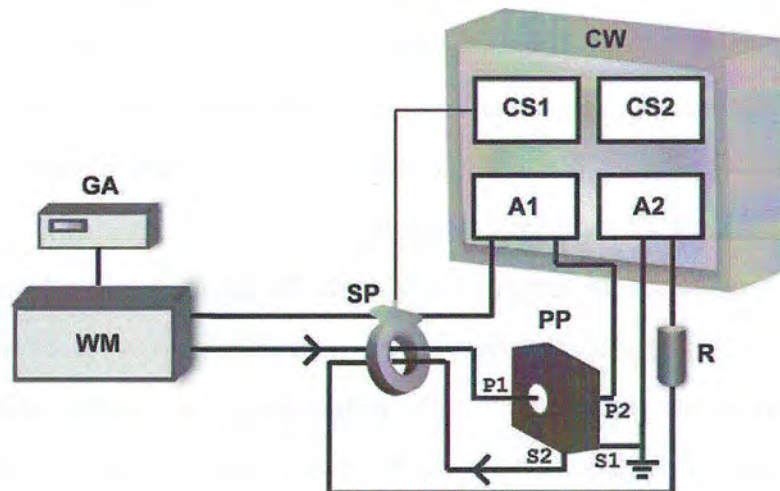
Sprawdzenie dokładności dzielnika napięciowego 4 kV / 1 kV wykonywane jest przy napięciu zasilającym systemu pomiarowego z rysunku 5 o wartości skutecznej 2 kV z dzielnikiem wzorcowym 2 kV / 1 kV. Układ różnicowy podłączony jest wtedy do zacisku *Wy_{1kV}* badanego dzielnika napięciowego natomiast zasilanie systemu pomiarowego o wartości skutecznej 2 kV do zacisku *We*. Sprawdzenie dokładności wewnętrznego dzielnika napięciowego 1 kV / 100 V wykonywane jest przy napięciu zasilającym systemu pomiarowego z rysunku 5 o wartości skutecznej 200 V

z dzielnikiem wzorcowym 200 V / 100 V. Układ różnicowy podłączony jest wtedy do zacisku Wy_{100V} badanego dzielnika napięciowego natomiast zasilanie do zacisku Wy_{1kV}. Zacisk We dzielnika pozostaje nie podłączony. W analogiczny sposób możliwe jest szerokopasmowe sprawdzenie dokładności dzielników o dowolnych napięciach znamionowych. **Kandydat zaproponował nową/oryginalną metodę, której zaletą w porównaniu ze sprawdzaniem dokładności dzielnika przy znacznie niższym od znamionowego napięciu wejściowym jest brak wpływu zmian pojemności dzielnika z napięciem i temperaturą na wartości wyznaczonych błędów przy zapewnionej weryfikacji dokładności pomiaru przez zastosowany układ różnicowy.** Pełna kontrola poprawności działania badanego dzielnika napięciowego zawsze wymagana pomiaru prądu upływu układu izolacyjnego i wyładowań niezupełnych przy znamionowej wartości skutecznej napięcia odkształconego lub/i sinusoidalnego o podwyższonej częstotliwości. Dysponując wykonanym zgodnie z opracowaną procedurą lub zakupionym szerokopasmowym dzielnikiem wzorcowym, sprawdzenie dokładności dzielnika napięciowego może być wykonywane bezpośrednio, w jednej próbie pomiarowej przy napięciu znamionowym.

[B11]: W tym patencie krajowym Kandydat zaproponował nowy/oryginalny sposób oceny dokładności indukcyjnych przekładników prądowych podczas transformacji prądów odkształconych polegający na zastosowaniu pomiarów błędu całkowitego. Przedstawiona metoda może zostać również zastosowana do sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników prądowych podczas transformacji prądów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości. **Zdaniem Kandydata nowe elementy zaproponowanej metody dotyczą zastosowania znanej metody pomiaru w warunkach amperozwojów znamionowych do szerokopasmowego sprawdzania dokładności przelotowego indukcyjnego przekładnika prądowego.** Przewód z prądem pierwotnym o wartości skutecznej znamionowego prądu wtórnego został kilkakrotnie przeprowadzony przez okno rdzenia przekładnika zgodnie z przekładnią znamionową. Wtedy do zasilania obwodu pierwotnego badanego przekładnika wymagany jest prąd o niewielkiej wartości skutecznej wynikającej z wartości prądu wtórnego. **Ponadto, do pomiarów wartości**

skutecznej różnicy prądów pierwotnego i wtórnego, czyli błędu całkowitego może zostać zastosowana przelotowa sonda prądowa. Największą zaletą metody jest brak konieczności zastosowania przekładnika wzorcowego.

[B12]: Przedmiotem tego patentu jest zaproponowana przez Kandydata nowa/oryginalna idea układu pomiarowego do wyznaczania błędów prądowego i kątownego indukcyjnych przekładników prądowych podczas transformacji prądów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości. Metoda może zostać również zastosowana do wyznaczania błędów tych przekładników podczas transformacji prądów odkształconych. Na rysunku 7 przedstawiono schemat ideowy układu pomiarowego do sprawdzania dokładności przelotowych indukcyjnych przekładników prądowych w tych warunkach pracy.



Rys. 7. Schemat ideowy układu pomiarowego do sprawdzania dokładności przelotowych indukcyjnych przekładników prądowych

Na rysunku 7 zastosowano następujące oznaczenia:

CW - cyfrowy watomierz, SP - sonda prądowa, A1/2 - wejście prądowe I/II modułu pomiarowego cyfrowego watomierza, CS1/2 - wejście napięciowe I/II modułu przeznaczone do podłączenia sondy prądowej, GA - generator arbitralny, WM - wzmacniacz mocy, PP - badany przelotowy przekładnik prądowy, R - rezystor obciążenia uzwojenia wtórne badanego przekładnika.

Wartości błędu prądowego transformacji danej harmonicznej prądu odkształconego lub sinusoidalnego o podwyższonej częstotliwości przez badany indukcyjny przekładnik prądowy obliczane są na podstawie zależności analogicznej do (1). Błędy kątowe obliczane są zgodnie z zależnością analogiczną do (2) na podstawie wyznaczonej różnicy przesunięć fazowych sinusoidalnych prądów pierwotnego i wtórnego lub danej harmonicznej w odkształconych prądach pierwotnym i wtórnym zmierzonych odpowiednio w pierwszym i drugim module cyfrowego watomierza. Podczas badań przekładniki prądowe były obciążone przez rezystory ($\cos\varphi = 1$). Wymaganie to wynika z konieczności wyeliminowania wzrostu wartości napięcia wtórnego w wyniku wzrostu reaktancji obciążenia dla transformacji prądu odkształconego lub sinusoidalnego o podwyższonej częstotliwości i w konsekwencji wzrostu indukcji w rdzeniu badanego przekładnika prądowego. Opracowana idea układu pomiarowego jest uniwersalna, gdyż pozwala na zastosowanie różnej aparatury pomiarowej: cyfrowego watomierza [B5] lub analizatora jakości energii [B3]. **Zdaniem Kandydata nowy element zaproponowanej metody stanowi możliwość zastosowania wyznaczonej poprzez pomiar bezpośredni wartości błędu całkowitego (zgodnie z zależnością analogiczną do równania (6)) do weryfikacji dokładności pomiaru zmierzonych wartości błędów prądowego i kąтового.** Przelotowy przekładnik prądu o wyznaczonej dokładności transformacji prądów odkształconych lub sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości w układzie z rysunku 7 może zostać zastosowany jako przekładnik referencyjny do sprawdzania dokładności dowolnego typu przekładników prądowych w tych warunkach pracy w układzie pomiarowym wykonanym według tej samej opatentowanej idei. Wymagany jest wtedy dodatkowo do zapewnienia odpowiedniej wartością prądu pierwotnego transformator wielkoprądowy natomiast błąd całkowity wyznaczany jest między prądami wtórnymi przekładnika badanego i przelotowego przekładnika referencyjnego.

[B8]: Uproszczona procedura przedstawiona w tym artykule zakłada wyznaczenie błędu całkowitego podczas transformacji prądu sinusoidalnego i następnie podczas transformacji prądu odkształconego. W przypadku poprawnej pracy przekładnika nie powinien nastąpić znaczący wzrost wartości wyznaczonego błędu całkowitego.

Świadczy to o pracy przekładnika w liniowej części charakterystyki magnesowania rdzenia, mimo zmiany wartości indukcji ze względu na zmianę kształtu transformowanego prądu pierwotnego. W innym wypadku należy zmniejszyć znamionowe obciążenie uzwojenia wtórnego i powtórzyć pomiar. **Oryginalnym wkładem Kandydata w odniesieniu do zapewnienia optymalnej dokładności indukcyjnego przekładnika prądowego podczas transformacji prądu odkształconego jest możliwość właściwego doboru wartości obciążenia znamionowego włączanego do uzwojenia wtórnego.** W układzie pomiarowym może zostać zastosowany jedynie klasyczny amperomierz, jak to zostało przedstawione na schemacie ideowym z rysunku 2.

[B7]: W artykule tym wykazano, że sprawdzenie dokładności indukcyjnego przekładnika prądowego przeznaczonego do transformacji prądów odkształconych z zastosowaniem sygnału zawierającego jedynie jedną wyższą harmoniczną nie pozwala na określenie maksymalnych wartości błędów dla poszczególnych warunków pracy przekładnika. **Oryginalnym osiągnięciem Kandydata w odniesieniu do przedstawionej analizy jest uzasadnienie wymagania wykonania pomiaru dokładności transformacji harmonicznego podstawowego prądu pierwotnego w warunkach występowania w transformowanym sygnale wielu harmonicznym oraz określenie kształtu prądu pierwotnego do badań. Przy znacznych wartościach kolejnych harmonicznym kształt odkształconego sygnału transformowanego przez przekładnik prądowy jest zbliżony do prostokątnego, dla którego następuje wzrost indukcji w rdzeniu względem wartości występującej przy transformacji sygnału sinusoidalnego o tej samej wartości skutecznej. Dla określenia maksymalnej wartości błędów prądowego i kątownego transformacji harmonicznego podstawowego prądu odkształconego sprawdzenie dokładności indukcyjnego przekładnika prądowego musi zostać wykonane przy maksymalnej zakładanej podczas jego pracy wartości indukcji w rdzeniu ze względu na możliwość wystąpienia nasycenia.** Podczas badań należy zastosować kształt prądu określony w instrukcji ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnej dla maksymalnej emisji harmonicznym prądu przez urządzenia o prądzie fazowym powyżej 16 A. W przypadku

zastosowania przekładnika poza siecią elektroenergetyczną, gdzie występuje możliwość jeszcze większego odkształcenia prądu pierwotnego dla określenia maksymalnej wartości błędów prądowego i kąтового harmonicznej podstawowej podczas transformacji prądu odkształconego należy zastosować kształt sygnału według normy PN-EN 61000-3-12:2012 dla wyższej zakładanej wartości współczynnika zawartości harmonicznych prądu niż 23%. W celu zapewnienia maksymalnej zakładanej podczas jego pracy wartości indukcji w rdzeniu pomiary należy przeprowadzić dla granicznej wartości skutecznej ze względu na dopuszczalną wartość prądu pierwotnego danego przekładnika prądowego podczas jego pracy ze znamionowym obciążeniem uzwojenia wtórnego. W praktyce ze względu na tłumienie przetężeń, obwody wtórne przekładników prądowych są specjalnie dociążane, dlatego jest to zagadnienie szczególnie istotne. W celu zapewnienia poprawnej pracy indukcyjnego przekładnika prądowego podczas transformacji silnie odkształconych prądów należy w fazie jego projektowania zapewnić odpowiedni zapas indukcji dla granicznej wartości prądu pierwotnego przy znamionowym obciążeniu uzwojenia wtórnego. W przypadku wyprodukowanych przekładników prądowych zaprojektowanych do transformacji prądów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz (60 Hz) można określić optymalny zakres mocy obciążenia uzwojenia wtórnego dla uzyskania najwyższej dokładności transformacji harmonicznych prądu odkształconego.

[B5]: Artykuł ten stanowi podsumowanie rozważań dotyczących warunków sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników prądowych przeznaczonych do transformacji prądów odkształconych. **Kandydat zaproponował nową/oryginalną czterostopniową procedurę, która zakłada wykorzystanie błędu całkowitego do oceny dokładności przekładników. Wynika to z faktu, że zgodnie z zależnością (4) zapisaną w sposób analogiczny dla przekładnika prądowego, błąd całkowity stanowi zawsze wartość graniczną błędu prądowego i kąтового (po odpowiednim przeliczeniu). Jeżeli zatem, wyznaczona wartość błędu całkowitego dla danej harmonicznej prądu odkształconego nie przekracza mniejszej z przyjętych wartości granicznych błędów prądowego/kąтового przekładnik spełnia wymagania dokładności przyjęte dla zadanej klasy dokładności w zakresie obu**

tych błędów. Oczywiście procedura zawsze może zostać rozszerzona o dodatkowy krok polegający na sprawdzeniu błędów prądowego i kąтового dla transformacji poszczególnych harmonicznym prądu odkształconego przez badany przekładnik prądowy. Zaletą opracowanej metody wykorzystującej błąd całkowity jest możliwość zastosowania sygnału złożonego z wielu harmonicznym bez ryzyka obniżenia dokładności pomiaru. Rozwiązanie to zapewnia zmniejszenie kosztów układu pomiarowego i skrócenie czasu pomiarów. Pierwszy etap procedury sprawdzenia dokładności przekładników prądowych przeznaczonych do transformacji prądów odkształconych stanowi wyznaczenie błędów prądowego i kąтового przekładnika prądowego zgodnie z normą PN-EN 61869-2:2013 dla sinusoidalnego prądu pierwotnego o częstotliwości 50 Hz (60 Hz). W drugim etapie należy sprawdzić, czy podczas transformacji prądu sinusoidalnego i warunków zgodnych z pkt 1 procedury nie następuje znaczące, według przyjętych kryteriów, dodatkowe odkształcenie prądu wtórnego przez badany przekładnik prądowy. Zbyt wysoka wartość wyższych harmonicznym w prądzie wtórnym podczas transformacji prądu sinusoidalnego świadczy o nieliniowym przebiegu charakterystyki magnesowania rdzenia i będzie prowadzić do znaczących błędów podczas transformacji prądów odkształconych. W trzecim etapie sprawdzania dokładności przekładnika podczas transformacji prądu odkształconego może zostać zastosowany prąd pierwotny o wartościach skutecznych harmonicznym według normy PN-EN 61000-3-12:2012 dla zakładanej podczas pracy badanego przekładnika maksymalnej wartości współczynnika zawartości harmonicznym prądu. W przypadku poprawnej pracy przekładnika nie powinna nastąpić znacząca zmiana wartości wyznaczonej wartości błędu całkowitego dla podstawowej harmonicznym w porównaniu do warunków transformacji prądu sinusoidalnego według pkt 1 procedury. Świadczy to o pracy przekładnika w liniowej części charakterystyki magnesowania rdzenia, mimo wzrostu indukcji ze względu na zmianę kształtu transformowanego prądu pierwotnego. W innym wypadku należy zmniejszyć znamionowe obciążenie uzwojenia wtórnego lub/i obniżyć zakładaną klasę dokładności przekładnika lub/i obniżyć dopuszczalną wartość współczynnika zawartości wyższych harmonicznym w transformowanym prądzie pierwotnym podczas

pracy badanego przekładnika a następnie powtórzyć pomiar. W tym samym kroku procedury należy sprawdzić, czy łączna wartość błędu całkowitego dla wszystkich harmonicznych podczas transformacji prądu odkształconego znacząco nie wzrosła w stosunku do jego wartości wyznaczonej w warunkach transformacji prądu sinusoidalnego. Świadczy to o liniowej charakterystyce transformacji badanego przekładnika prądowego w zakresie częstotliwości harmonicznych występujących w zadanym prądzie pierwotnym. Ostatnim etapem opracowanej procedury jest wyznaczenie wartości poszczególnych harmonicznych błędu całkowitego dla transformacji prądu odkształconego. Jeśli wyznaczona wartość błędu całkowitego dla danej harmonicznej prądu odkształconego nie przekracza mniejszej z przyjętych wartości granicznych błędów prądowego/kątowego przekładnik spełnia wymagania dokładności przyjęte dla zadanej klasy dokładności w zakresie obu tych błędów. Procedura może zostać rozszerzona o dodatkowy krok polegający na sprawdzeniu błędów prądowego i kątowego dla transformacji poszczególnych harmonicznych prądu odkształconego przez badany przekładnik prądowy. W przypadku indukcyjnych przekładników napięciowych ze względu na niewielkie dopuszczalne wartości poszczególnych harmonicznych w odkształconym napięciu pierwotnym podczas pracy w sieci elektroenergetycznej nie występuje omawiane zjawisko wzrostu indukcji w rdzeniu. **Oryginalnym wkładem Kandydata w odniesieniu do ich badań jest stworzenie możliwości zastosowania pomiaru błędu całkowitego do wykrywania zjawisk rezonansowych.** Podczas sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników napięciowych podczas transformacji napięć odkształconych dla skrócenia kosztów i czasu pomiarów uzasadnione jest zastosowanie co najmniej dwustopniowej procedury. W pierwszym kroku może zostać wykonane badanie napięciem odkształconym złożonym z wielu harmonicznych. Wysoka wartość błędu całkowitego transformacji danej harmonicznej przez badany indukcyjny przekładnik wskazuje na występowanie rezonansu. Wartości błędu całkowitego mogą wynosić od kilkudziesięciu nawet do kilkuset procent, co gwarantuje wysoką wykrywalność i zapewnia skuteczność metody. Taka wartość błędu zmierzona dla harmonicznej znajdującej się w wymaganym paśmie pracy przekładnika napięciowego pozwala

stwierdzić, że nie spełnia on wymagań w zakresie szerokopasmowej dokładności transformacji napięcia pierwotnego. W drugim kroku procedury należy podczas badań zastosować napięcie odkształcone o podstawowej harmonicznej 50 Hz (60 Hz) z pojedynczą harmoniczną o wartości np. 5% znamionowego napięcia pierwotnego. Błąd całkowity lub/i błędy napięciowe i kątowe są wyznaczane po kolei dla wyższych harmonicznym z badanego pasma pracy przekładnika napięciowego.

[B3]: Oryginalnym wkładem Kandydata w odniesieniu do znanej metody wyznaczania błędu pośredniego pomiaru mocy czynnej i energii elektrycznej wynikającego z zastosowania w układzie pomiarowym indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych jest przedstawiona w tym artykule możliwość zastosowania do jego obliczenia błędu całkowitego zamiast błędu kąтового. Zagadnienie to jest szczególnie istotne, ponieważ błąd pomiaru mocy wynikający z zastosowania przekładników może zostać wyznaczony jedynie dla transformacji konkretnego sygnału. W wielu przypadkach nie ma jednak możliwości wykonania pomiarów błędu kąтового jednocześnie dla wielu harmonicznym ze względu na zakłócenia pomiaru fazy. Ponadto, w wielu opisanych w normach i literaturze układach pomiarowych nie ma możliwości pomiaru błędów jednocześnie dla wielu harmonicznym np. w przypadku zastosowania woltomierza homodynamicznego lub komparatora. Wtedy jedynym rozwiązaniem jest wykonanie oddzielnego pomiaru dla każdej harmonicznej, co ogranicza zastosowanie tych metod do warunków laboratoryjnych. Wyznaczanie błędu całkowitego zamiast błędu kąтового dla każdej harmonicznej transformowanego przez przekładnik prądowy/napięciowy odkształconego wieloma harmonicznymi prądu/napięcia pozwala na uproszczenie układu pomiarowego i skrócenie czasu oraz kosztów pomiarów. Metoda znajduje zastosowanie szczególnie w przypadku badań prowadzonych w miejscu zainstalowania przekładników, gdzie nie jest stosowane własne zasilanie układu pomiarowego.

[B4]: Oryginalnym wkładem Kandydata w odniesieniu do analiz pracy indukcyjnych przekładników prądowych w warunkach występowania dynamicznym zmian wartości skutecznej prądu pierwotnego jest określenie warunków występowania dodatkowego odkształcenie prądu wtórnego. Omawiane

zjawisko może być następstwem przełączania dużych obciążeń przyłączonych do linii elektroenergetycznej lub występowania zaników/zapadów jej napięcia. Jeżeli strumień magnetyczny w rdzeniu przekładnika jest różny od zera to w uzwojeniu wtórnym jest indukowana siła elektromotoryczna o kierunku przeciwnym do napięcia wtórnego. Powoduje to odkształcenie prądu wtórnego i znaczące pogorszenie dokładności transformacji przekładnika prądowego. Dla cyklicznie powtarzającego się zjawiska prowadzi do zwiększenia wartości skutecznej wyższych harmonicznym odczytywanych w układzie pomiarowym do monitorowania jakości energii elektrycznej przyłączonym do strony wtórnej indukcyjnego przekładnika prądowego.

[B1]: Oryginalnym wkładem Kandydata w odniesieniu do zagadnienia projektowania indukcyjnych przekładników prądowych dedykowanych do układów pomiarowych jakości energii elektrycznej jest określenie specjalnych wymagań w celu zapewnienia wymaganej dokładności transformacji w tych warunkach pracy. Wykazano, że stosowanie materiałów o bardzo wysokiej przenikalności magnetycznej dla przekładników tego typu jest niewskazane. Zastosowanie rdzenia składanego o niższej wypadkowej przenikalności magnetycznej powoduje znaczące ograniczenie błędu transformacji w warunkach występowania dynamicznych zmian wartości skutecznej prądu pierwotnego i prowadzi jedynie do nieznacznego obniżenia szerokopasmowej dokładności transformacji indukcyjnego przekładnika prądowego. Ponadto wykazano, że zastosowanie indukcyjnego przekładnika prądowego z rdzeniem składanym może zapewnić stałe wartości błędów prądowego i kąтового podstawowej harmonicznym nawet w przypadku transformacji silnie odkształconych prądów pierwotnych. Zjawisko to jest wynikiem zlinearyzowania charakterystyki magnesowania rdzenia przez materiał o niskiej przenikalności magnetycznej. Ponadto, omówiona została szczegółowo procedura projektowania indukcyjnego przekładnika prądowego przeznaczonego do pomiarów jakości energii elektrycznej przesyłanej przez sieć elektroenergetyczną. **Zdaniem Kandydata nowe elementy zaproponowanej metody dotyczą sposobów właściwego doboru wypadkowej przenikalności magnetycznej zastosowanego rdzenia składanego i przyjętej indukcji znamionowej.**

[B9]: Oryginalnym wkładem Kandydata w odniesieniu do analiz pracy indukcyjny przekładnik prądowy podczas transformacji prądów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości jest wykazanie wpływu na ich dokładność pojemności wewnętrznych i reaktancji rozproszenia uzwojenia wtórnego oraz właściwości magnetycznych rdzenia. Wraz ze wzrostem częstotliwości sinusoidalnego prądu pierwotnego wzrasta wpływ pojemności uzwojeń i między uzwojeniami oraz reaktancji rozproszenia uzwojenia wtórnego na dokładność transformacji natomiast słabnie rola charakterystyki magnesowania rdzenia. Błędy przekładnika ze względu na niską wartość indukcji w rdzeniu nie wynikają z jej przebiegu tylko z początkowej przenikalności rdzenia magnetycznego. Zjawisko to występuje niezależnie od zastosowanego materiału rdzeniowego, a jego nasilenie zależy od układów izolacyjnego i geometrycznego uzwojeń oraz liczby zwojów. Pojemności uzwojeń zależą wprost proporcjonalnie od liczby zwojów, a więc zastosowanie materiału magnetycznego o wyższej przenikalności początkowej warunkuje mniejszą liczbę zwojów dla wymaganej przekładni, co powoduje znaczące obniżenie tych pojemności i poprawę szerokopasmowych właściwości przekładnika. Pojemność między uzwojeniami także zależy od ich układu geometrycznego, lecz główny wpływ na jej wartość ma układ izolacyjny i przenikalność elektryczna zastosowanego materiału izolacyjnego.

Praktyczne wykorzystanie wyników badań

Opracowana metodyka badań i wdrożone koncepcje układów pomiarowych oraz wyniki analiz umożliwiają:

- sprawdzenie dokładności indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych podczas transformacji sygnałów o podwyższonej częstotliwości i przebiegów odkształconych,
- wyselekcjonowanie przekładników zapewniających wysoką dokładność transformacji przebiegów odkształconych i/lub sygnałów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości,
- opracowanie i wykonanie urządzenia pomiarowego do sprawdzania dokładności przekładników w tych warunkach pracy,

- weryfikację założeń projektowych nowych konstrukcji szerokopasmowych przekładników prądowych i napięciowych,
- właściwy dobór warunków pracy obecnie stosowanych indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych w celu ograniczenia ich błędów transformacji przebiegów odkształconych i/lub sygnałów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości.

Zastosowanie pomiarów błędu całkowitego w badaniach dokładności transformacji przekładników umożliwia:

- ocenę dokładności przekładników podczas transformacji sygnałów o podwyższonej częstotliwości i harmonicznym przebiegów odkształconych, zapewniając niski koszt układu pomiarowego i skrócenie czasu pomiarów przy zachowaniu wysokiej dokładności i niezawodność układu pomiarowego,
- weryfikację poprawności działania i dokładności pomiarów wszelkich systemów pomiarowych przeznaczonych do wyznaczania błędów prądowego/napięciowego i kąтового indukcyjnych przekładników prądowych/napięciowych,
- wyznaczanie błędu pośredniego pomiaru mocy czynnej i energii elektrycznej wynikającego z zastosowania w układzie pomiarowym indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych bez pomiarów błędu kąтового,
- określenie maksymalnej wartości błędów prądowego/napięciowego i kąтового,
- wykrycie zjawisk rezonansowych.

Opracowana metodyka badań i wyniki analiz pozwalają na zwiększenie dokładności pomiarów wartości i jakości energii elektrycznej przesyłanej przez sieć elektroenergetyczną.

5) Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

W warunkach niskiej jakości energii elektrycznej, gdy występują zaniki i zapady napięcia zasilania - mogą wystąpić krótkotrwałe stany nieustalone, będące źródłem impulsowych zaburzeń przewodzonych w obwodzie pierwotnym przekładnika napięciowego [A1] [E5]. Zaburzenia te są przenoszone do obwodu wtórnego

przekładnika. Wartości maksymalne tych impulsów mogą nawet kilkakrotnie przekraczać wartości napięć znamionowych pierwotnego i wtórnego. Może to doprowadzić do nieprawidłowej pracy urządzeń pomiarowych lub zabezpieczeniowych przyłączonych do strony wtórnej przekładnika napięciowego a nawet doprowadzić do ich uszkodzenia. Zgodnie z wynikami badań przedstawionymi w artykule [A1] napięciowe przetworniki elektroniczne są wolne od tych wad. Niestety ważnym problemem, sprawiającym kłopoty zarówno techniczne, jak i organizacyjno-prawne pojawiającym się w rozwiązaniach niekonwencjonalnych jest zasilanie pomocnicze. Nawet krótkotrwały brak tego zasilania może spowodować niesprawność zarówno układów zabezpieczeń jak i rozliczeń energii.

Opracowana propozycja zaleceń normalizacyjnych do badań dokładności indukcyjnych przekładników prądowych dla harmonicznym przebiegów odkształconych przedstawiona w artykule [E12] zakłada wykorzystanie błędu całkowitego. Wartości graniczne zostały obliczone na podstawie zależności (4) dla wartości błędów prądowego i kątownego zgodnych z normą PN-EN 61869-2:2013 i odpowiednich, ze względu na klasę dokładności, procentowych wartości znamionowego prądu pierwotnego. Dla przekładników prądowych należy wprowadzić znacznie niższe wartości dopuszczalnych błędów transformacji harmonicznym niż dla przekładników napięciowych. Wniosek ten wynika ze znacznie większej wartości skutecznej dopuszczalnych harmonicznym prądu niż napięcia według instrukcji ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnej oraz norm PN-EN 61000-3-12:2012 i PN-EN 50160:2010. Dla wartości granicznych błędów przedstawionych w normie PN-EN 61869-6:2017 dotyczącej przekładników małej mocy i transformacji sygnałów odkształconych sumaryczny błąd prądowy przekładnika klasy 0,2 (zgodnie z normą PN-EN 61869-2:2013) dla transformacji prądu odkształconego może wynosić ponad 2,8% [L1]. Propozycje normalizacyjne w zakresie badań dokładności przekładników przeznaczonych do transformacji przebiegów sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości przedstawione w artykule [E23] zakładają konieczność wykreślenia charakterystyk błędów badanych przekładników, wyznaczonych dla określonego zakresu częstotliwości przebiegu pierwotnego przy ustalonych procentowych wartościach skutecznych odpowiednio prądu lub napięcia znamionowego

i obciążeniach obwodu wtórnego. Krzywe te w jednoznaczny sposób będą określały pasmo pracy przekładnika prądowego lub napięciowego dla danej klasy dokładności. Gdy dla sygnału sinusoidalnego o wybranych wartości i częstotliwości, błędy transformacji przyjmują wartości graniczne dla zadanej klasy dokładności, pasmo częstotliwości transformacji badanego przekładnika, z zadaną klasą dokładności, jest ograniczone do tej wyznaczonej częstotliwości granicznej. Wykonanie pomiarów wartości obu błędów w danym zakresie częstotliwości prądów pierwotnych daje odpowiedź na pytanie w jakim paśmie częstotliwości badany przekładnik pracuje w zadanej klasie dokładności. Należy jednak pamiętać, że w praktycznych zastosowaniach przekładników przewidzianych do pracy przy podwyższonej częstotliwości istnieje wiele przypadków w których nie ma potrzeby wyznaczania błędów kątowych (np. elektrotermia indukcyjna) i wówczas są określane tylko błędy prądowe / napięciowe.

Przedstawione w artykule [E29] badania laboratoryjne miały na celu wyznaczenie poziomu odporności mikrokontrolera DSP (ang. Digital Signal Processing) typu MP56F8025 na zaburzenia w postaci serii szybkich elektrycznych stanów przejściowych, definiowanych zgodnie z normą PN-EN 61000-4-4:2013, w kategoriach utraty funkcji lub obniżenia jakości działania urządzenia badanego. Otrzymane rezultaty posłużyły do określenia możliwości zastosowania tego typu mikrokontrolerów w urządzeniach pracujących w środowiskach, w których występują zaburzenia elektryczne pochodzące od łączeniowych stanów przejściowych. Z przeprowadzonych badań wynika, że wprowadzenie zaburzeń na porty wejścia/wyjścia zestawu demonstracyjnego MP56F8025DEMO spowodowało chwilową utratę jego funkcjonalności (restart mikrokontrolera) oraz zakłócenia w transmisji danych, które ustąpiły po zakończeniu generacji zaburzeń. Badane urządzenie powróciło do normalnego działania bez interwencji operatora. Ponadto, możliwe jest poprzez odpowiednią konfigurację układów peryferyjnych, ograniczenie skutków występowania zaburzeń i dzięki temu utrzymanie normalnego działania urządzenia w granicach określonych przez producenta wyrobu. Natomiast w artykule [E8] przedstawiono wyniki pomiarów parametrów elektrycznych zaprojektowanego i wykonanego aktywnego filtra pasmowo-przepustowego z wielokrotną pętlą sprzężenia zwrotnego.

Szczegółowo opisany został problem sprzężenia zaburzeń przewodzonych poprzez ścieżkę masy z wejściem zastosowanych wzmacniaczy operacyjnych powodujący błędne działanie filtru. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, że ograniczenie zakłóceń w pracy układu jest możliwe przez zmniejszenie pojemności sprzęgających lub/i zapewnienie odpowiedniego uziemienia.

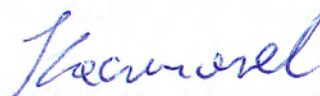
W artykule [E3] przedstawiono wyniki badań EMC przeciwzakłóceniewego transformatora separacyjnego, który został zastosowany w układzie laboratoryjnym do badania rozwoju wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych przy napięciu udarowym piorunowym [A2]. Obwody rejestracji fotograficznej wyładowań oraz rejestracji światła emitowanego przez rozwijające się wyładowanie pozwalają na skuteczną ocenę mechanizmów determinujących rozwój wyładowań elektrycznych w cieczech. Ponieważ źródłem wysokiego napięcia jest generator udarów napięciowych piorunowych to podczas jego pracy następuje generacja zaburzeń przewodzonych do zasilającej sieci elektroenergetycznej. Podstawowym rozwiązaniem zapobiegającym zakłóceniom w obwodzie pomiarowym jest klatka Faradaya z filtrem sieciowym. Jedynym elementem układu pomiarowego, który pozostaje poza ekranowaną komorą i wymaga zasilania zewnętrznego jest sterownik komórki Pockelsa systemu wyzwalania lampy błyskowej. W tym obwodzie musiał zostać dodatkowo zastosowany przeciwzakłóceniewy transformatora separacyjnego, którego skuteczność została potwierdzona opisanymi badaniami laboratoryjnymi.

Podsumowując, pozostałe osiągnięcia naukowo - badawcze Kandydata dotyczyły przede wszystkim nowe/oryginalne opracowanie wymagań normalizacyjnych dla badań dokładności indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych podczas transformacji sygnałów odkształconych i sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości. Ponadto, zostały określone przyczyny wpływu zaburzeń przewodzonych na pracę wybranych urządzeń elektronicznych i opracowane skuteczne działania w celu ich minimalizacji. Zdaniem Kandydata nowe elementy zaproponowanej metody badań dokładności transformacji napięciowych przetworników elektronicznych dotyczą ich zastosowania w warunkach zaników i zapadów napięcia pierwotnego.

**Wkład w rozwój dyscypliny naukowej Elektrotechnika prac
należących do wskazanego we wniosku osiągnięcia naukowego:**

- Określenie krytycznych warunków magnetycznych do zapewnienia wymaganej dokładności indukcyjnych przekładników prądowych podczas transformacji prądów odkształconych i o podwyższonej częstotliwości [B1] [B9]. Nowatorskie analizy naukowe dotyczyły również tych wymagań dla nietypowych warunków pracy - silnie odkształconych prądów pierwotnych, jak i występowania gwałtownej zmiany ich amplitudy. Obejmowały także wyjaśnienie przyczyn występowania tych zjawisk [B4] [B7].
- Określenie warunków eksploatacyjnych zapewniających optymalną dokładność transformacji indukcyjnych przekładników prądowych dla prądów odkształconych i o podwyższonej częstotliwości [B7-B9].
- Wyjaśnienie przyczyn występowania zjawiska gwałtownego obniżenia dokładności transformacji prądów odkształconych przez indukcyjne przekładniki prądowe [B7] i opracowanie metody zapobiegania wzrostowi błędów [B1].
- Opracowanie algorytmu selekcji indukcyjnych przekładników zapewniających wymaganą dokładność transformacji do pomiarów wartości i jakości energii elektrycznej w warunkach odkształconych prądów i napięć [B5].
- Opracowanie metody oceny dokładności transformacji napięć/prądów odkształconych i sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości przez indukcyjne przekładniki napięciowe/prądowe z zastosowaniem wyłącznie błędu całkowitego [B2] [B5] [B7] [B11].
- Zastosowanie błędu całkowitego do wyznaczania błędu pośredniego pomiaru mocy czynnej i energii elektrycznej wynikającego z zastosowania w układzie pomiarowym indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych zamiast błędu kąтового [B3].
- Opracowanie metody konstrukcji i sposobu sprawdzenia dokładności przetwarzania oraz metody zastosowania układu różnicowego do bezpośredniego pomiaru błędu całkowitego przekładników napięciowych [B2].

- Opracowanie sposobów wzorcowania szerokopasmowych referencyjnych przekładników prądowych i dzielników napięciowych do zastosowania w układach pomiarowych przeznaczonych do sprawdzania dokładności przekładników podczas transformacji prądów/napięć odkształconych i sinusoidalnych o podwyższonej częstotliwości [B2-B3] [B6-B7] [B10-B12].
- Opracowanie sposobu sprawdzania dokładności indukcyjnych przekładników prądowych i napięciowych podczas transformacji prądów/napięć odkształconych i o podwyższonej częstotliwości i wdrożenie koncepcji układów pomiarowych. Nowatorskimi elementami metody są możliwość zastosowania różnej aparatury pomiarowej i weryfikacja jej dokładności przez jednocześnie wyznaczanym wartością błędów przekładni, kąтового i całkowitego [B2-B3] [B10-B12].



Michał Kaczmarek

Łódź, 07.08.2017 r.