

## Przetwornik prądowy LEM jako alternatywa dla przekładnika Ferrantiego w zabezpieczeniach RCD

**Streszczenie.** W artykule przeanalizowano możliwość zastąpienia przekładnika Ferrantiego, pracującego w niektórych układach zabezpieczeń różnicowoprądowych, przetwornikami prądowymi pracującymi w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Układy takie w odróżnieniu od układu Ferrantiego mogą zapewnić poprawną pracę układów zabezpieczeń RCD przy zniekształceniach i zmianach częstotliwości prądu zasilającego urządzenia elektryczne.

**Abstract.** In this article a possibility of replacement of Ferranti current transformer, which is worked in residual-current devices (RCD), by closed-loop current transformers was analyzed. These transformers as contrasted with Ferranti current transformer can provide proper work of RCD systems when frequency of supply current of electric devices is distorted or changed. (**LEM current transducer as an alternative for Ferranti current transformer in RCD protection**).

**Słowa kluczowe:** przetwornik prądowy, przekładnik Ferrantiego, zabezpieczenie RCD

**Keywords:** current transformer, Ferranti current transformer, RCD protection

### Wstęp

Obecnie zabezpieczenia różnicowoprądowe RCD (residual-current devices) znajdują szerokie zastosowanie w większości instalacji elektrycznych. Zadaniem tych urządzeń jest ochrona przeciwporażeniowa, zarówno pośrednia, jak i bezpośrednia. Odpowiadają również za zminimalizowanie częstości i skutków potencjalnych uszkodzeń urządzeń oraz pożarów. Zabezpieczenia takie są stosowane zarówno w sieciach jednofazowych trójprzewodowych, jak i trójfazowych pięcioprzewodowych.

Dla znamionowych warunków pracy, przy zastosowaniu w sieci zasilającej oddzielnych przewodów ochronnego i neutralnego, wyłączniki różnicowoprądowe dobrane do parametrów sieci oraz podłączonych odbiorników są niezawodnym zabezpieczeniem. Dzieje się tak, ponieważ znacząca większość tego typu wyłączników jest przystosowana do detekcji prądu różnicowego o częstotliwości 50 Hz oraz 60 Hz.

W przypadku rzeczywistych warunków pracy urządzeń sytuacja ulega zmianie. Obecność odbiorników takich jak przemienniki oraz przekształtniki częstotliwości, wprowadzających zniekształcenia w postaci wyższych harmonicznych i subharmonicznych prądu lub wahań częstotliwości, może silnie wpłynąć na działanie wyłączników różnicowoprądowych. Może się to objawić pogorszeniem selektywności zadziałania - wiele wyższym progiem zadziałania, a w skrajnych przypadkach kompletnym brakiem zadziałania [1, 2, 3]. Zjawisko takie może również wystąpić przy zasilaniu urządzeń z falowników prądami o różnych częstotliwościach [2].

Problem ten wynika z ograniczonej częstotliwości pracy niektórych przekładników stosowanych w zabezpieczeniach różnicowoprądowych [2,3] lub jest związany z szybkością narastania prądu dla przebiegów odkształconych [4].

Do zabezpieczania urządzeń małych mocy, zwłaszcza w gospodarstwach domowych, stosuje się kompaktowe wyłączniki różnicowoprądowe, w których przekładnik reagujący na prąd różnicowy, jak i sterowany nim wyłącznik, znajdują się w jednej obudowie. Przy zabezpieczeniach odbiorników dużej mocy wiele dostępnych na rynku zabezpieczeń różnicowoprądowych jest zbudowana z oddzielnych elementów, a w szczególności oddzielnego przekładnika Ferrantiego, który zyskała przekładnik różnicowoprądowy sterujący następnie rozłącznikiem dużej mocy. Przekładnik Ferrantiego ze względu na swoją budowę najlepiej funkcjonuje w

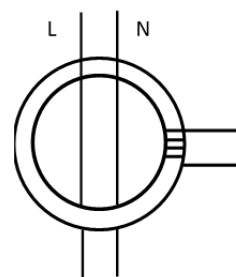
obwodach prądu o częstotliwości 50 Hz. W niniejszej pracy przeanalizowano możliwość zastąpienia układu Ferrantiego, przetwornikami prądowymi pracującymi w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Układy te, ze względu na szerokie pasmo pracy i możliwość doboru obciążenia w obwodzie wtórnym w szerokim zakresie, pozwalają na zastosowanie ich jako alternatywne rozwiązanie dla przekładnika Ferrantiego, bez konieczności wymiany zastosowanych urządzeń RCD.

W artykule sprawdzono doświadczalnie poprawność działania przetwornika prądowego LEM i przekładnika Ferrantiego w układzie wyłącznika różnicowoprądowego dla różnych częstotliwości prądu różnicowego.

### Testowane elementy

Do testów wykorzystano przekładnik Ferrantiego typu TR 250 firmy Elester [5] oraz przetwornik prądowy LEM pracujący w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego typu LA 55-P [6].

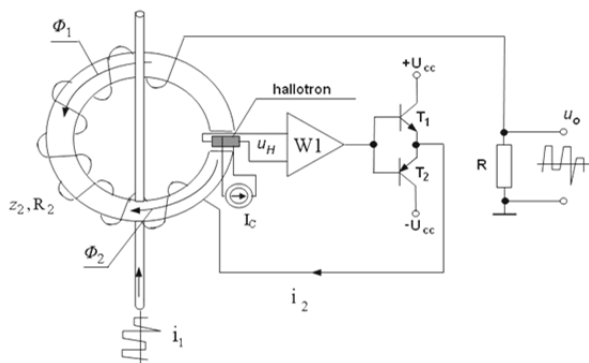
Przekładnik Ferrantiego składa się z uzwojenia wtórnego (kilkadziesiąt zwojów) nawiniętego na toroidalnym rdzeniu magnetycznym i uzwojenia pierwotnego, które stanowią przewody sieciowe L i N, przechodzące poprzez przekładnik do odbiornika (rys. 1).



Rys. 1. Budowa przekładnika Ferrantiego.

W rozwiązaniu tym prąd różnicowy, wynikający z niezerowej wartości sumy wektorowej prądów przepływających przewodami umieszczonymi w oknie przekładnika, powoduje pojawienie się prądu w uzwojeniu wtórnym. Ze względu na wykonanie rdzeni takich przekładników z materiałów magnetycznych miękkich, największe wartości prądu wyjściowego można uzyskać dla prądu różnicowego o częstotliwościach około 50 Hz [7].

Takiego ograniczenia pasma częstotliwości prądu nie mają przetworniki prądowe LEM z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego (ang. Closed Loop C/L). W przetwornikach tych pole magnetyczne, wytwarzane w rdzeniu magnetycznym przez przewód lub przewody z mierzonym prądem pierwotnym, jest kompensowane polem wytwarzanym przez cewkę kompensacyjną w taki sposób, aby w rdzeniu, jak również w jego szczelinie, gdzie jest umieszczony czujnik Halla, wartość strumienia wynosiła zero (rys. 2). Prąd zasilający cewkę kompensacyjną jest jednocześnie prądem wtórnym wychodzącym z przetwornika, który poprzez zastosowanie odpowiedniego rezystora jest przetwarzany na napięcie.



Rys. 2. Budowa przetwornika prądowego LEM z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego.

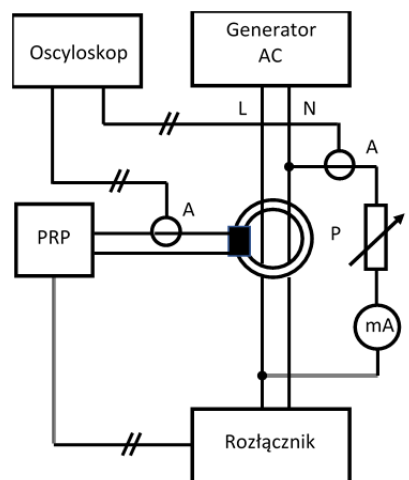
Zastosowanie pętli sprzężenia zwrotnego pozwoliło uzyskać pasmo pracy przetworników prądowych LEM od 0 Hz do 200 kHz oraz zredukować ich odpowiedź czasową [8]. Efekt przekładnika sumującego uzyskano dzięki umieszczeniu przewodów fazowych i neutralnego w oknie pomiarowym.

### Układ pomiarowy

W celu przeprowadzenia testów działania dostosowano układ wykorzystywany w badaniu wpływu sygnałów odkształconych na skuteczność działania wyłączników RCD. Zmodernizowany układ pomiarowy do badania skuteczności działania układów RCD wykorzystujących przekładniki Ferrantiego i przetworniki prądowe pracujące w pętli zamkniętej pokazano na rysunku 3. Na schemacie można wyróżnić następujące elementy: generator mocy Chrome Programmable AC Source 61504, oscyloskop cyfrowy Tektronix DPO4032, rezystor regulowany R, badany przekładnik lub przetwornik prądowy P, miliamperomierze mA typu APPA 305. Sondy do pomiaru prądu Chauvin Arnoux E6N, przekaźnik różnicowoprądowy Elester PRP, rozłącznik.

Na rysunku 3 jest pokazany układ zabezpieczenia różnicowoprądowego RCD zbudowany z przekaźnika różnicowoprądowego PRP oraz zewnętrznego przekładnika Ferrantiego. Przekładnik Ferrantiego transformuje prąd różnicowy  $\Delta I$ , będący sumą wektorową prądów płynących w przewodach fazowym L i neutralnym N, na napięcie sterujące wyzwoleniem przekaźnika PRP. W normalnym trybie pracy prąd różnicowy wynosi zero. Jeżeli pojawi się prąd płynący przez obudowę odbiornika do przewodu ochronnego, prąd różnicowy  $\Delta I$  staje się większy od zera. Jeżeli osiągnie poziom zbliżony do prądu wyłączenia  $\Delta I_N$  nastawionego na przekaźniku różnicowym, następuje wyłączenie rozłącznika przez przekaźnik PRP. W układzie testowym nie ma odbiornika za rozłącznikiem, gdyż jest on zbędny. Prąd płynący przez przewód ochronny odpowiadający prądowi różnicowemu  $\Delta I$  jest bezpośrednio pobierany z przewodu fazowego za przekładnikiem

Ferrantiego. Do regulacji tego prądu zastosowano rezystor nastawny R, a jego pomiar jest wykonywany za pomocą miliamperomierza. Dodatkowo w układzie zastosowano dwie sondy pomiarowe do monitorowania kształtów i częstotliwości prądów różnicowego oraz wyjściowego z testowanego przekładnika.

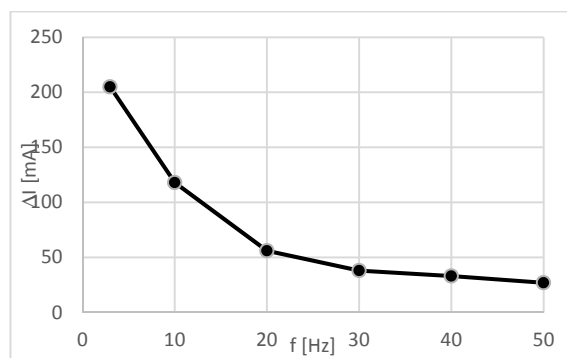


Rys. 3. Schemat układu do testowania przekładników Ferrantiego i przetworników prądowych LEM.

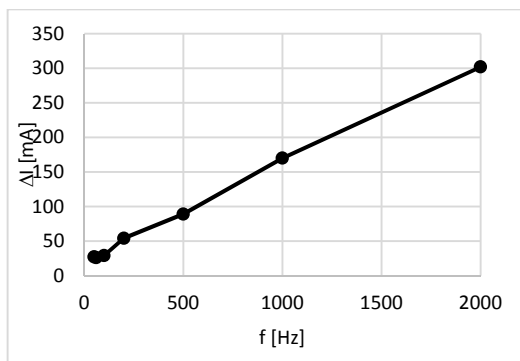
Pomiary przeprowadzono przy napięciu sinusoidalnym o wartości skutecznej 230 V zmieniając jego częstotliwość. Przy nastawionej częstotliwości prąd różnicowy zwiększano od zera do wartości, przy której nastąpiło zadziałanie przekaźnika różnicowoprądowego PRP nastawionego na  $\Delta I_N = 30$  mA. Należy jednak zaznaczyć, że według normy [9] zabezpieczenie różnicowoprądowe działa poprawnie, jeżeli prąd zadziałania wyłącznika  $\Delta I$  jest większy niż  $0,5 I_{\Delta N}$ , ale nie większy niż  $I_{\Delta N}$ . Jako pierwszy przetestowano przekładnik Ferrantiego, a następnie został on zastąpiony przetwornikiem prądowym LEM. Zakres badań podzielono na dwa etapy. W pierwszej fazie zakres częstotliwości prądu w układzie zawierał się w granicach od 3 Hz do 50 Hz, w drugiej części częstotliwości zawierały się w granicach od 50 Hz do 2 kHz.

### Wyniki pomiarów

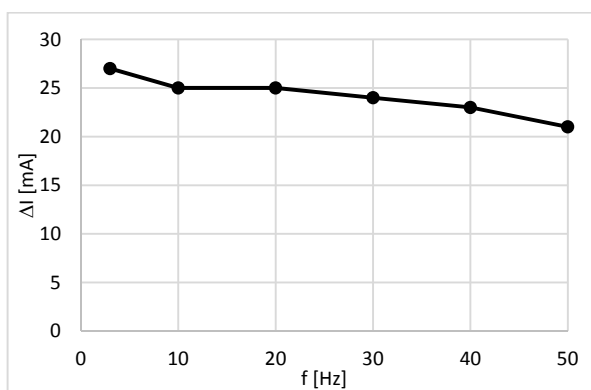
Wyniki prądów różnicowych  $\Delta I$ , przy których zadziałał przekaźnik różnicowoprądowy PRP nastawiony na prąd wyzwolenia  $\Delta I_N = 30$  mA, dla zmiany częstotliwości od 3 Hz do 2 kHz, dla przekładnika Ferrantiego są pokazane na rysunkach 4 i 5, a dla przetwornika prądowego LEM na rysunkach 6 i 7.



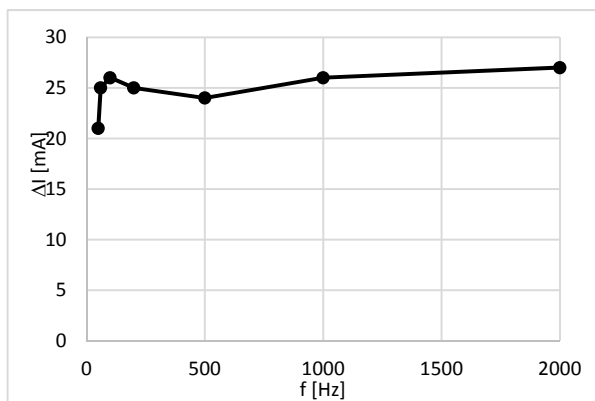
Rys. 4. Prąd różnicowy  $\Delta I$  płynący przez przekładnik Ferrantiego, przy którym zadziałał przekaźnik PRP nastawiony na prąd  $\Delta I_N = 30$  mA, w zależności od częstotliwości prądu różnicowego zmieniającej się od 3 Hz do 50 Hz.



Rys. 5. Prąd różnicowy  $\Delta I$  płynący przez przekładnik Ferrantiego, przy którym zadziałał przekaźnik PRP nastawiony na prąd  $\Delta I_N = 30$  mA, w zależności od częstotliwości prądu różnicowego zmieniającej się od 50 Hz do 2000 Hz.



Rys. 6. Prąd różnicowy  $\Delta I$  płynący przez przetwornik prądowy LEM, przy którym zadziałał przekaźnik PRP nastawiony na prąd  $\Delta I_N = 30$  mA, w zależności od częstotliwości prądu różnicowego zmieniającej się od 3 Hz do 50 Hz.



Rys. 7. Prąd różnicowy  $\Delta I$  płynący przez przetwornik prądowy LEM, przy którym zadziałał przekaźnik PRP nastawiony na prąd  $\Delta I_N = 30$  mA, w zależności od częstotliwości prądu różnicowego zmieniającej się od 50 Hz do 2000 Hz.

### Analiza wyników

Zdaniem autorów, głównym wpływ na zachowanie przekaźnika różnicowoprądowego będzie miała budowa i właściwości przekładnika sumującego (przekładnik Ferrantiego), ponieważ w tego rodzaju rozwiązaniach nie występuje wyzwalacz różnicowy, mający według [10], znaczący wpływ na wartość prądu zadziałania. Według autorów znaczące będą właściwości rdzenia magnetycznego użytego do konstrukcji przekładnika sumującego. Dzięki swoim właściwościom, musi on zapewnić odpowiednią wartość napięcia indukowanego  $E$

po stronie wtórnej przy przepływie prądu różnicowego. Napięcie to jest określone zależnością [10]:

$$(1) \quad E = 4,44 \cdot f \cdot N_S \cdot B \cdot S_{Fe}$$

gdzie:  $f$  – częstotliwość prądu różnicowego;  $N_S$  – liczba zwojów uzwojenia wtórnego;  $B$  – indukcja magnetyczna w rdzeniu przekładnika;  $S_{Fe}$  – przekrój poprzeczny rdzenia

Napięcie to jest zatem ściśle powiązane z wartością indukcji magnetycznej w rdzeniu przekładnika, a co za tym idzie kształtem pętli histerezy. Aby możliwe było płynne nadążanie napięcia po stronie wtórnej przekładnika za prądem różnicowym, konieczne jest stosowanie rdzeni magnetycznych miękkich o maksymalnej wartości przenikalności magnetycznej rdzenia większej niż 350 000 i współczynnika proporcjonalności remanencji  $B_R/B_S$  ponad 0,7 [11] lub rdzeni o niskim stosunku indukcji remanencji do indukcji nasycenia  $B_R/B_S$  [7], czyli przy zastosowaniu rdzeni o płaskiej i wąskiej pętli histerezy [12].

Na ograniczanie skuteczności działania przekaźników PRP ma również wpływ zmiana wartości impedancji obwodu wtórnego przekładnika sumującego. Zmiana reaktancji obwodu wtórnego przekładnika Ferrantiego jest bowiem powiązana z częstotliwością prądu, a w tym przypadku prądu różnicowego:

$$(2) \quad X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

gdzie:  $L$  – indukcyjność własna zależna od materiału rdzenia, a co za tym idzie kształtu pętli histerezy.

Jest to widoczne przy prądach odbiegających częstotliwością od znamionowych warunków pracy (50 Hz), co przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Obserwuje się tam znaczący wzrost prądu zadziałania układu.

W przypadku wykorzystania jako przekładnika sumującego przetwornika prądowego LEM pracującego w pętli zamkniętej (C/L) zyskujemy szersze pasmo pracy, w małym stopniu zależne również od kształtu prądu różnicowego. Rdzeń przetwornika prądowego wspomaganego elektronicznie ma bowiem w swojej konstrukcji szczelinę powietrzną, wpływającą na reluktancje obwodu magnetycznego. Napięcie indukowane na wyjściu elektronicznego stopnia mocy układu z rys. 2, wykorzystywane jako wejściowy sygnał przekaźnika PRP wyznacza się z zależności [13]:

$$(3) \quad U_1 = I_{1n} \cdot \left( \sqrt{\omega L_2^2 + (R_2 + R_m)^2} \right) \cdot \frac{z_1}{z_2}$$

gdzie:  $U_1$  - wartość napięcia wyjściowego, elektronicznego bloku przetwornika,  $z_1, z_2$  – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego przetwornika,  $I_1$  - wartość prądu wypadkowego w obwodzie pierwotnym przetwornika (prądu różnicowego),  $R_2$  - rezystancja uzwojenia kompensującego (wtórnego) o liczbie zwojów  $z_2$ ,  $L_2$  - indukcyjność uzwojenia kompensującego,  $R_m$  – rezystancja pomiarowa.

Występująca w tym schemacie indukcyjność  $L_2$ , dla rdzeni ze szczeliną wyznaczyć można na podstawie zależności [13]:

$$(4) \quad L_2 = \frac{z_2^2}{\frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}\mu_0 S_0} + \frac{\delta}{\mu_0 S_0}} \approx \frac{z_2^2 \mu_0 S_0}{\delta}$$

gdzie:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$  - przenikalność magnetyczna próżni,  $S_0$  - pole powierzchni przekroju poprzecznego

szczeliny powietrznej,  $\delta$  - długość szczeliny powietrznej,  $l_{Fe}$  - średnia droga strumienia w rdzeniu,  $\mu_{Fe}$  - względna przenikalność magnetyczna materiału rdzenia.

Zgodnie z zależnością (4) indukcyjność cewki kompensacyjnej  $L_2$  jest zależna jedynie od wymiarów geometrycznych rdzenia przetwornika prądowego. Jej wartość nie zależy od wartości płynącego prądu ani od jego częstotliwości. Obecność szczeliny powietrznej wpływa także na kształt pętli histerezy rdzenia magnetycznego. Obserwuje się bowiem w przybliżeniu liniowy przebieg zależności  $B=f(H)$  w pewnym obszarze  $H$ , w odróżnieniu od rdzenia o takich samych wymiarach geometrycznych bez szczeliny powietrznej. Taki przebieg pętli histerezy jest wskazany do zastosowań przy prądach odkształconych i szerokim zakresie zmienności częstotliwości prądu różnicowego. Potwierdzają to wyniki zależności prądu zadziałania przekładnika PRP, w którym jako przekładnik sumujący wykorzystano przetwornik prądowy LEM. Przedstawione na rysunkach wyniki badań potwierdzają rozszerzenie pasma poprawnego działania PRP, zarówno w kierunku częstotliwości mniejszych niż 50 Hz oraz wysokich częstotliwości.

### Wnioski

Analiza przedstawionych na rysunkach 4 i 5 wyników wskazuje, że prąd różnicowy z przekładnika Ferrantiego jest mniejszy niż 30 mA jedynie w paśmie częstotliwości od 50 Hz do 100 Hz. Jednocześnie w paśmie tym zapewniona jest właściwa ochrona przeciwporażeniowa realizowana przez przekładnik różnicowoprądowy PRP. Wraz ze zmniejszaniem się lub zwiększaniem się częstotliwości, wartość prądu różnicowego, przy którym następuje zadziałanie przekładnika PRP znacząco rośnie ponad 30 mA, narażając użytkownika na porażenie prądem. Sytuacja taka nie występuje przy zastosowaniu przetwornika prądowego LEM jako układu sumującego. W tym przypadku w całym badanym paśmie częstotliwości od 3 Hz do 2 kHz prąd różnicowy, powodujący zadziałanie przekładnika PRP jest mniejszy od 30 mA, spełniając warunek, że rzeczywisty prąd różnicowy powinien być większy od  $0,5 I_{\Delta N}$ , ale nie większy niż  $I_{\Delta N}$ . Przeprowadzone badania i analiza ich wyników potwierdzają zatem możliwość zastąpienia zewnętrznego przekładnika Ferrantiego przetwornikiem prądowym LEM, pracującym z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego i wykorzystaniem go jako układu sumującego. Należy przy tym zapewnić ciągłość zasilania dla układu przetwornika prądowego lub zastosować proponowane rozwiązanie lokalnie, na wyjściu przemiennika częstotliwości lub falownika, zapewniając wysoki stopień ochrony dla urządzeń napędowych. Budowa i możliwość kształtowania napięcia wyjściowego przetworników prądowych pracujących w pętli zamkniętej, poprzez właściwy dobór rezystora pomiarowego  $R_M$ , dają możliwość dostosowania i poprawy skuteczności działania zabezpieczeń wykorzystujących przekładniki PRP do

szerokiego zakresu częstotliwości. Takie rozwiązanie przekładnika sumującego może także poprawić niezawodność działania zabezpieczeń w układach zasilanych z przemienników częstotliwości oraz instalacjach, gdzie występują znaczące harmoniczne lub zmiany częstotliwości prądu, w tym w instalacjach fotowoltaicznych i systemach generacji rozproszonej.

### Autorzy:

dr inż. Artur Szczęsny, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, ul. B. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: [artur.szczesny@p.lodz.pl](mailto:artur.szczesny@p.lodz.pl)

dr inż. Adam Graczyk, Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, ul. B. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: [adam.graczyk@p.lodz.pl](mailto:adam.graczyk@p.lodz.pl)

### LITERATURA

- [1] Czapp S.: Wyłączniki różnicowoprądowe w ochronie przeciwporażeniowej przy odkształconym prądzie różnicowym. *Seria Monografie*, nr 99, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2009, 184 s. ISBN 978-83-7348-287-6.
- [2] Czapp S.: Wyłączniki różnicowoprądowe do obwodów z przekształtnikami energoelektronicznymi, *Elektro.info*, 11/2015
- [3] Lee T. M., Chan T. W.: The effects of harmonics on the operational characteristics of residual current circuit breakers, *Int. Conf. on Energy Management and PowerDelivery, Proc. of EMPD'95*, vol. 2, Nov. 1995, s. 715-719. DOI: 10.1109/EMPD.1995.500786.
- [4] Szczęsny A., Korzeniewska E.: Validation of the method for measuring the effectiveness of residual current protection, *Proceedings of the International Conference „Applications of Electromagnetics in Modern Engineering and Medicine”* June 9-12, 2019, Janów Podlaski, Poland, DOI:10.23919/PTZE.2019.8781686
- [5] Przekładnik różnicowoprądowy PRP, katalog, Zakłady Aparatury Elektrycznej „Elester” S.A.
- [6] Current transducer LA 55-P, katalog, LEM
- [7] Musiał E., Czapp S.: Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe. Przegląd i charakterystyka współczesnych konstrukcji, *miesięcznik Stowarzyszenia Elektryków Polskich*, Vol. R. 14., nr. nr 109 (2008), s.3-44
- [8] Isolated current and voltage transducers. Characteristics - Applications - Calculations, publikacja, LEM
- [9] PN-HD 60364-6 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Część 6: Sprawdzenie.
- [10] Czapp S., Kałka Ł.: Badanie działania wyłączników różnicowoprądowych przy częstotliwościach prądu różnicowego mniejszych niż 50 Hz. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2016, Nr 50.
- [11] Zastrzeżenie patentowe PL/EP 1710812 „Wyłącznik różnicowo prądowy i rdzeń magnetyczny do tego wyłącznika”
- [12] Smółka K, Gmyrek Z. : Dynamics of the line-start reluctance motor with rotor made of SMC material. *Open Physics Volume 15, Issue 1, 29 December 2017, Pages 833-838*
- [13] Szczęsny A., Analiza właściwości częstotliwościowych skompensowanych elektronicznych przekładników prądowych, *Rozprawa doktorska*, Łódź, 2008