

ADAM BABŚ

## NOWE ROZWIĄZANIA POMIARÓW NAPIĘĆ I PRĄDÓW W SIECIACH INTELIGENTNYCH

**STRESZCZENIE** W artykule przedstawiono nowe rozwiązania pomiarów napięć i prądów w sieci średniego napięcia, których stosowanie jest związane z masowym wdrożeniem w krajowej energetyce układów wykrywania przepływu prądu zwarciovego. Opisano zasady działania przekładników pomiarowych małej mocy, ich konstrukcję oraz perspektywy zastosowań tych przekładników w sieciach średnich i wysokich napięć.

**Słowa kluczowe:** przekładniki pomiarowe małej mocy, cewka Rogowskiego, sensor napięciowy

**DOI:** 10.5604/01.3001.0013.0187

### 1. WPROWADZENIE

---

Nie będzie przesady w stwierdzeniu, że cała nasza wiedza o systemach i sieciach elektroenergetycznych jest wynikiem pomiarów dwóch wielkości: napięcia i prądu. Pomiar tych wielkości po ich przetworzeniu umożliwia pomiar mocy, energii a także pomiary takich własności materiałów jak oporność, przewodność i wiele innych.

Możliwość bezpośredniego pomiaru napięć i prądów jest ograniczona bezpiecznymi wartościami tych wielkości jak również wymogami urządzeń, które korzystają z tych pomiarów. Stąd też od ponad 120 lat stosowane są przekładniki napięciowe i prądowe zapewniające redukcję mierzonych napięć do znormalizowanej wartości 57,7 V/100 V oraz prądów do wartości 1 A lub 5 A oraz pobór mocy 20 VA – 2000 VA, wymaganej dla działania przekaźników elektromechanicznych. Przekładniki te, będące transformatorami z rdzeniem ferromagnetycznym, wykorzystują zjawisko indukcji elektromagnetycznej [1].

Wraz z coraz bardziej powszechnym stosowaniem urządzeń cyfrowych, dla których sygnał wejściowy o wartościach zapewnianych przez te przekładniki staje się utrudnieniem dla jego przetworzenia, pojawiły się przekładniki, które nadal generują sygnał analogowy, ale o znacznie mniejszym poziomie.

---

**mgr inż. Adam BABŚ**  
a.babs@ien.gda.pl

Instytut Energetyki Oddział Gdańsk  
ul. Mikołaja Reja 27, 80-870 Gdańsk

Przekładniki te, w odróżnieniu od przekładników konwencjonalnych, określa się mianem przekładników niekonwencjonalnych (NCIT<sup>1</sup>) lub zgodnie z normą [3] przekładnikami małej mocy (LPIT<sup>2</sup>). Termin „mała moc” oznacza, że przy normatywnym obciążeniu rezystancją, pobierana moc jest znacząco mniejsza niż 1 W. Przykładowo dla przekładników napięciowych małej mocy dla zalecanego obciążenia 2 MΩ pobierana moc jest mniejsza niż 2 μW.

Przekładniki elektroniczne małej mocy, nazywane również sensorami, mogą być przekładnikami aktywnymi, jeśli zawierają elementy aktywne (np. wzmacniacze) lub przekładnikami pasywnymi, jeśli zawierają tylko elementy pasywne (rezystancje, pojemności) i nie wymagają zasilania zewnętrznego.

Ich stosowanie wynika z masowego wdrażania układów zdalnego sterowania i pomiaru, w których konieczny jest pomiar napięć i prądów w głębi sieci SN, umożliwiający poprawną lokalizację miejsca zwarcia niezbędną dla realizacji automatyki sieciowej FDIR<sup>3</sup>, której zadaniem jest redukcja czasów niedostarczenia energii [2].

## 2. PODSTAWOWE WYMAGANIA NORMATYWNE

Podstawowe wymagania normatywne dla przekładników pomiarowych zdefiniowano w poszczególnych częściach normy IEC 61869 – Przekładniki pomiarowe (tab. 1), Części 10 [4] i 11 [5] dotyczące przekładników małej mocy (LPIT), zostały zatwierdzone przez PKN w lipcu 2018 r.

Dostępne są również publikacje IEC będące zaleceniami i komentarzami do norm, które są publikowane w formie raportów technicznych [6].

Dla przekładników małej mocy (LPIT) w normie IEC 61869-6 [3] sformułowano wymagania specyficzne dla tego typu przekładników dotyczące m.in.:

- klasy dokładności i dopuszczalnego uchybu zarówno dla wyjścia analogowego, jak i cyfrowego,
- pasma przenoszenia i harmonicznych,
- warunków obsługi i testowania,
- obciążenie obwodu wtórnego.

Zdefiniowano pojęcie dokładności pomiaru poprzez współczynnik błędu (error ratio):

$$\varepsilon = \frac{K_r Y_s - X_p}{X_p} \cdot 100$$

gdzie:

$K_r$  – przekładnia przekładnika

$X_p$  – wartość skuteczna sygnału wejściowego

$Y_s$  – wartość skuteczna sygnału wyjściowego

<sup>1</sup> NCIT – Non Conventional Instrument Transformers.

<sup>2</sup> LPIT – Low-power instrument transformer.

<sup>3</sup> FDIR Fault Detection, Isolation and Restoration. Funkcja automatyki polegająca na wykryciu miejsca zwarcia, izolacji uszkodzonego odcinka oraz przywróceniu zasilania dla pozostałej części sieci SN.

Definicja jest poprawna tylko przy znamionowym obciążeniu strony pierwotnej i wtórnej. Obciążenie definiuje się jako impedancję obwodu wtórnego wynikającą z równoległego połączenia rezystancji i pojemności wyrażonej odpowiednio w omach i faradach.

Norma ta zaleca standardowe obciążenia o wartości 2 M $\Omega$  i 50 pF, przy czym dopuszczalne są również obciążenia wynikające z poprzedniej normy IEC 60044-8, tj. 2 k $\Omega$  i 5 000 pF i 20  $\Omega$  i 500 pF.

Znamionowa częstotliwość jest różna dla przekładników dla zastosowań pomiarów i wynosi 99% do 101%  $f_n$  a dla celów zabezpieczeń 96% do 102%.

**Tabela 1**

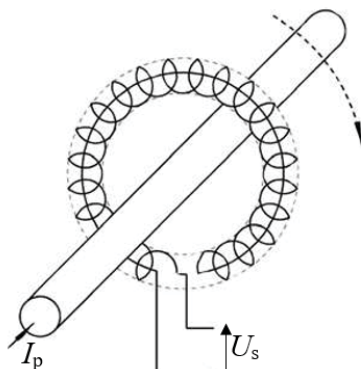
Specyfikacja części normy IEC 61869 – Przekładniki pomiarowe

| Numer rodziny  | Numer części   | Tytuł części normy  |
|--|----------------|---|
| IEC 61869 – 1<br>Wymagania ogólne dla przekładników                      | IEC 61869 – 2  | Dodatkowe wymagania dla przekładników prądowych   |
|  | IEC 61869 – 3  | Dodatkowe wymagania dla indukcyjnych przekładników napięciowych   |
|  | IEC 61869 – 4  | Dodatkowe wymagania dla przekładników kombinowanych   |
|  | IEC 61869 – 5  | Dodatkowe wymagania dla pojemnościowych przekładników napięciowych  |
| IEC 61869 – 6<br>Dodatkowe wymagania ogólne dla przekładników małej mocy | IEC 61869 – 7  | Dodatkowe wymagania dla elektronicznych przekładników napięciowych  |
|  | IEC 61869 – 8  | Dodatkowe wymagania dla elektronicznych przekładników prądowych   |
|  | IEC 61869 – 9  | Cyfrowy interfejs dla przekładników pomiarowych   |
|  | IEC 61869 – 10 | Dodatkowe wymagania dotyczące pasywnych przekładników prądowych małej mocy                                  |
|  | IEC 61869 – 11 | Dodatkowe wymagania dotyczące pasywnych przekładników napięciowych małej mocy                               |
|  | IEC 61869 – 12 | Dodatkowe wymagania dla elektronicznych przekładników pomiarowych lub kombinowanych pasywnych przekładników |
|  | IEC 61869 – 13 | Niezależny moduł integrujący (Merging unit)   |
|  | IEC 61869 – 14 | Dodatkowe wymagania dla przekładników prądowych dla zastosowań prądu stałego                                |
|  | IEC 61869 – 15 | Dodatkowe wymagania dla przekładników napięciowych dla zastosowań prądu stałego                             |

### 3. ROZWIĄZANIA SENSORÓW NAPIĘCIA I PRĄDU

Dotychczasowe przekładniki konwencjonalne, zwłaszcza w sieciach średnich napięć, w coraz większym stopniu zastępowane są przekładnikami pasywnymi małej mocy.

Dla pomiaru prądu powszechnie zastosowanie znalazły sensory prądowe – przekładniki prądowe pasywne małej mocy wykorzystujące zasadę cewki Rogowskiego (rys. 1).



$$U_s(t) = M \frac{dI_p(t)}{dt}$$

**Rys. 1. Schemat cewki Rogowskiego**

Cewka Rogowskiego jest uzwojeniem wtórnym transformatora bezrdzeniowego którego uzwojeniem pierwotnym jest przewód przechodzący przez wnętrze cewki (rys. 1). Napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym jest proporcjonalne do pochodnej natężenia prądu elektrycznego. Dokładność pomiaru zależy od rezystancji cewki, czasu trwania i stromości przebiegu mierzonego prądu. Zasadniczą rolę dla dokładności pomiaru odgrywa również sposób całkowanie sygnału pomiarowego i przetworzenia na wartość pomiarową oraz zastosowanie w układzie przetwarzającym odpowiedniej jakości rezystorów i kondensatorów odpornych na procesy starzenia.

Napięcie wyjściowe cewki Rogowskiego podawane jest w odniesieniu do 1 A prądu pierwotnego (czułość pomiaru) i wynosi od 0,2 mV/A do 200 mV/A. Zakres napięć wtórnych pozwala na taki dobór typu cewki, aby przy znamionowym prądzie pierwotnym napięcie w uzwojeniu wtórnym w żadnej sytuacji nie stanowiło zagrożenia porażeniem, nawet przy kilkunastokrotnym wzroście prądu w przypadku zwarcia. Zazwyczaj dobiera się takie cewki, dla których napięcie to dla prądu znamionowego nie przekracza napięcia kilkuset miliwoltów, co odpowiada czułości pomiaru w granicach od 1 mV/A do 2 mV/A dla częstotliwości 50 Hz [8].

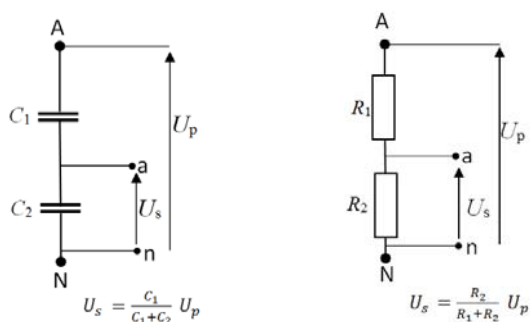
Przykłady wykonania cewek Rogowskiego przedstawiono na rysunku 2.

Dla pomiaru napięcia stosowane są pasywne przekładniki napięciowe małej mocy LPVT (sensory napięciowe). Napięcie pierwotne  $U_p$  redukowane jest do napięcia wtórnego (mierzonego) przy pomocy rezystorów lub pojemności połączonych jako dzielnik napięcia. Zasada działania została przedstawiona na rysunku 3. Sensor nie wymaga kalibracji i zachowuje charakterystyką liniową w całym zakresie pracy. Taki układ jest niewrażliwy na częstotliwość mierzonego napięcia, a w przypadku pomiaru z wykorzystaniem dzielnika rezystancyjnego może być stosowany również w sieciach

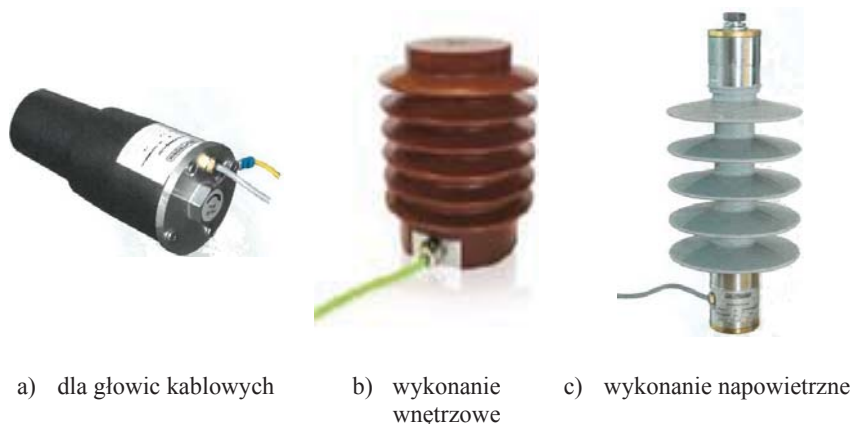
prądu stałego. Aktualna wersja normy dotycząca tego typu LPVT definiuje sygnał wyjściowy o wielkości  $3,25\sqrt{3}$  oraz pożądaną klasę dokładności  $0,5/1/3$  (3P) przy znamionowym obciążeniu  $2\text{ M}\Omega$ .



Rys. 2. Przykłady wykonania cewek Rowskiego



Rys. 3. Zasada pomiaru pojemnościowych i rezystancyjnych sensorów napięciowych LPVT



a) dla głowic kablowych

b) wykonanie  
wnętrzone

c) wykonanie napowietrzne

**Rys. 4. Przykłady wykonania sensorów napięciowych**

#### 4. UWARUNKOWANIA STOSOWANIA SENSORÓW NAPIĘCIOWYCH I PRĄDOWYCH

Stosowanie sensorów prądowych nie stwarza problemów instalacyjnych. Dostępne są rozwiązania sensorów z cewką Rogowskiego, zarówno przystosowaną do zakładania na kabel bez rozwierania obwodu (sensor dzielony), jak i wymagający rozłączenia obwodu prądowego (sensor niedzielony). Wybór typu sensora prądowego powinien uwzględniać średnicę przewodu oraz spodziewany prąd znamionowy.

Koniecznym jest zapewnienie, aby żyła powrotna (oplot kabla) przed miejscem uziemienia przechodziła przez okno sensora razem z żyłą roboczą.

Instalacja przekładników napięciowych małej mocy LPVT jest różna w nowoczesnych rozdzielnicach z aparaturą rozdzielczą w izolacji gazowej oraz w rozdzielnicach w izolacji powietrznej. Dla rozdzielnic z izolacją powietrzną istnieje duża dowolność wyboru miejsca instalacji LPVT natomiast w rozdzielnicach z izolacją gazową (GIS), gdzie kable doprowadzane są przy wykorzystaniu konektorowych głowic kablowych powszechnym rozwiązaniem jest stosowanie LPVT wkładanych do tych głowic zamiast korka (zatycki). Z tego powodu pojawiają się oczekiwania, aby konektorowe głowice kablowe były poddane testowaniu zapewniającemu kompatybilność tych dwu elementów, zwłaszcza w zakresie własności dielektrycznych i klasy dokładności zespołu głowica – sensor napięciowy. Pozytywny wynik takich testów musi zapewniać również zgodność mechaniczną (dopasowanie) obu elementów.

#### 5. ZALETY PRZEKŁADNIKÓW PASYWNYCH MAŁEJ MOCY

Sensory mają liniową charakterystykę przetwarzania niezależnie od mierzonego zakresu pomiarowego, a zatem mogą być wykorzystywane zarówno do celów pomiarowych, jak i zabezpieczeniowych. Również przesunięcie kątowne pomiaru jest pomijalne (ok. 0,5 stopnia).

Niewątpliwą zaletą sensorów napięciowych i prądowych jest niski poziom napięcia wyjściowego, co eliminuje niebezpieczeństwo porażenia. Ze względu na brak materiałów ferromagnetycznych nie występuje zjawisko ferrezonansu. Kolejną zaletą sensorów, w porównaniu do tradycyjnych przekładników indukcyjnych, są wielokrotnie niższe straty energii [9].

Sygnały pomiarowe z sensorów są wprowadzane bezpośrednio do układów automatyki (sterowników obiektów) i wykorzystywane są do wykrywania przepływu prądu zwarcia, a wykorzystanie pomiaru napięcia oraz pomiaru prądu znacząco poprawia skuteczność tego wykrywania, dzięki zastosowaniu algorytmów admitancyjnych.

Prowadzone analizy zwrotu kosztów inwestycyjnych na instalacje układów wykrywania prądu zwarcia [7] i [9] wskazują, że zwrot ten jest szybszy w liniach o wyższym napięciu. Zastosowanie kilku urządzeń w danej linii lub ciągu liniowym znacznie skraca czas lokalizacji miejsca zwarcia. Można oszacować odpowiednią dla danego odcinka liczbę urządzeń, kalkulując ich koszt, a z drugiej strony, korzyści wynikające ze zmniejszenia czasu niedostarczenia energii.

## 6. PERSPEKTYWY ZASTOSOWAŃ LPIT

Powszechność rozwiązań wykrywania prądu zwarcia na podstawie pomiarów napięć i prądów prowadzi do poszukiwania innej niż dotychczasowa, tańszej techniki pomiarowej.

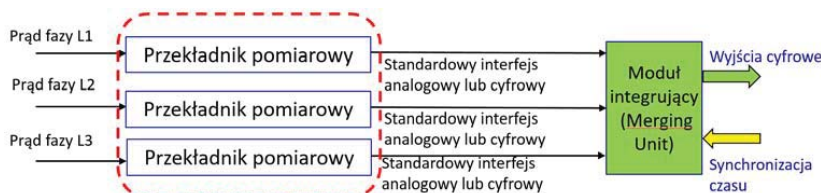
Przewidywana skala instalacji wynika z analizy ekonomicznej optymalnej liczby układów wykrywania prądu zwarcia w sieci SN [7]. W zależności od tego, czy sieć energetyczna jest napowietrzna czy kablowa, liczba tych układów powinna być nie mniejsza niż odpowiednio około 20% i 40% ogólnej liczby stacji (łączników) w ciągu liniowym (kablowym). Przy ogólnej liczbie ponad 250 tys. stacji SN/nn w krajowej sieci średniego napięcia i około 30% udziale sieci kablowych, liczba stacji w których wskazana jest instalacja układów wykrywania zwarć wynosi około 66 tys., czyli około 26% ogólnej liczby stacji SN/nn. Doświadczenia innych krajów potwierdzają, że instalacja układów wykrywania zwarć wchodzących w skład automatyki restytucyjnej, na 15–20% obszaru sieci SN prowadzi do 80% redukcji czasu SAIDI [10].

Stosowanie LPIT stanowi znaczący krok w dziedzinie cyfryzacji obwodów wtórnych – cyfrowych stacji zarówno dla sieci średnich, jak i wysokich napięć. Umożliwia przetworzenie analogowych pomiarów dokonywanych przez LPIT na postać cyfrową i udostępnienie ich dla centralnego sterownika w standardowej postaci zgodnej z normą IEC 61850. Zadanie to realizuje moduł integrujący (merging unit), będący źródłem danych dla sterownika stacyjnego odpowiedzialnego m.in. za wykrywanie zwarć, sygnalizację i sterowanie łącznikami. Właściwości modułu integrującego opisuje norma IEC 61869-9, specyfikując wyjście cyfrowe do cyfrowych systemów automatyki stacji, takie jak: format wiadomości, liczba zmiennych, częstotliwość próbkowania, sposób synchronizacji. Definicje zawarte w tej normie są zgodne ze specyfikacją przesyłu wartości próbkowanych zawartą IEC 61850-9-2 w zakresie:

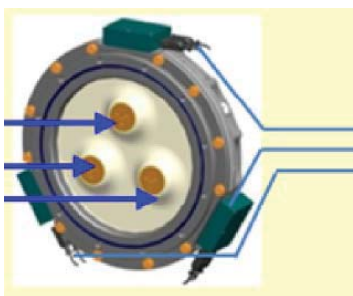
- potrzeb dla przekładników pomiarowych,
- zapewnienia współpracy,
- zmniejszenia liczby opcji,
- wyboru preferowanych częstotliwości próbkowania,
- sposobu synchronizacji czasu.



Przykład zastosowania niezależnego modułu integrującego, który agreguje pomiary analogowe napięcia lub prądu i przetwarza na postać zgodną z normą IEC 61869-9 i IEC 61850-9-2 przedstawia rysunek 5.



Rys. 5 Niezależny moduł integrujący (SAMU = Stand Alone Merging Unit)



Rys. 6 Czujniki prądowe i napięciowe (zalne żywicą) do pomiarów  $U$  i  $I$  w rozdzielniczy 110 kV [11]

Zastosowanie techniki LPIT znalazło zastosowanie również w rozdzielnicach 110 kV z izolacją gazową GIS [11], gdzie wyeliminowano przekładniki konwencjonalne zastępując je czujnikami LPIT umieszczonymi w metalowym kołnierzu (flanszy). Prąd mierzony jest za pomocą cewek Rogowskiego, a napięcie za pomocą pojemnościowego czujnika pola elektrycznego (rys. 6). Zastosowanie LPIT umożliwia realizację cyfrowych obwodów wtórnych stacji z zastosowaniem magistrali procesowej. Wymiary i waga rozdzielnic GIS, okablowanie oraz prace uruchomieniowe mogą zostać w tym przypadku znacznie ograniczone.

## LITERATURA

1. Babś A.: „Czy już czwarta generacja zabezpieczeń?”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 2, 2007, s. 6–11.
2. Babś A., Kajda L.: „Automatyka restytucyjna w sieciach średnich napięć sposobem na poprawę jakości dostaw energii”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 3, 2017, s. 28–33.
3. IEC 61869-6:2016 INSTRUMENT TRANSFORMERS – Part 6: Additional general requirements for low-power instrument transformers.
4. IEC 61869-10 ED1 Instrument transformers – Part 10: Specific requirements for low power passive current transformers
5. IEC 61869-11 ED1 Instrument transformers – Part 11: Specific requirements for low power passive voltage.
6. IEC/TR 61869-103 IT The use of instrument transformers for power quality measurement.



7. „Koncepcja rozwoju automatyzacji sieci SN z uwzględnieniem rozwoju tych sieci w kierunku Sieci Inteligentnych”, Opracowanie IEn nr OG/82a/2011, sierpień 2011.
8. Milovac P., Javora R., Skendzic V.: “Sensor technology in a medium voltage switchgear for the US market applications CIRED Glasgow”, 12 – 15 June 2017, Paper 709.
9. Scarabeli M. Orteni G, Aith J.: “Fault Sensors CIRED Glasgow”, 12 – 15 June 2017 Paper 226.
10. Schroedel O.: “Distribution Automation Solutions – Impact on System Availability in Distribution Networks”, *CIRED Frankfurt*, czerwiec 2011, Paper 1117.
11. Tiusanen J. i inni: “New smart approach for a U/I-measuring system integrated in a GIS cast resin partition (LPIT)” – *Design, Manufacturing, Qualification and Operational Experience CIGRE 2018 Paryż*, B3-117.

*Przyjęto do druku dn. 21.12.2018 r.*

## NEW SOLUTIONS FOR VOLTAGE AND CURRENT MEASUREMENT IN INTELLIGENT NETWORKS

Adam BABŚ

**ABSTRACT** *The article presents new solutions of voltage and current instrument transformers in a medium voltage network, the use of which is related to the mass implementation of short-circuit current detection systems in the power industry. The principles of operation of low power instrument transformers and their construction are described as well as perspectives of applications of these transformers in medium and high voltage networks.*

**Keywords:** *Low power instrument transformers, Rogowski coil, voltage sensor*

