

Przemysław OTOMAŃSKI¹, Przemysław ZAZULA²

¹ POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

² OKRĘGOWY URZĄD MIAR W POZNANIU, PRACOWNIA POMIARÓW WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH, ul. Krakowska 19, 61-893 Poznań

Stanowisko pomiarowe do oceny właściwości metrologicznych liczników energii elektrycznych prądu stałego

Dr inż. Przemysław OTOMAŃSKI

Pracownik Zakładu Metrologii i Optoelektroniki Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej. Główne obszary zainteresowań dotyczą zagadnień związanych z teorią pomiarów, w szczególności z oceną niepewności wyniku pomiaru, badaniem właściwości metrologicznych czujników i przetworników pomiarowych oraz badań w zakresie oceny jakości energii elektrycznej. Jest autorem lub współautorem ponad 100 publikacji.



e-mail: otoman@et.put.poznan.pl

Mgr inż. Przemysław ZAZULA

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej. Studia na kierunku Elektrotechnika ukończył w 1980 roku. Pracownik Okręgowego Urzędu Miary w Poznaniu, kierownik Pracowni Pomiarów Wielkości Elektrycznych – laboratorium akredytowane AP084. Główne obszary zainteresowań naukowych dotyczą tematyki szacowania niepewności w pomiarach związanych z oceną jakości energii elektrycznej, badaniem właściwości metrologicznych przetworników pomiarowych jak również pomiarami czasu.



e-mail: pzazula@wp.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono stanowisko pomiarowe, przeznaczone do oceny właściwości metrologicznych liczników energii elektrycznej prądu stałego. Stanowisko to składa się z dwóch wielofunkcyjnych kalibratorów, oraz skonstruowanej na potrzeby tego stanowiska specjalizowanej przystawki wysokonapięciowej umożliwiającej generację napięć stałych do 4 kV o odpowiednio wysokiej dokładności. Opisano szczegółowo poszczególne elementy tego stanowiska wraz z wynikami wzorcowania.

Słowa kluczowe: system pomiarowy, licznik energii elektrycznej prądu stałego, niepewność pomiaru.

The measuring system for evaluation of metrological properties of direct current Watt-hour meters

Abstract

The paper presents a method for evaluating the accuracy of indications of the direct current Watt-hour meters in a designed and constructed measuring system. Such a system is composed of two multi-function calibrators, and a specialized high-voltage attachment designed for the needs of this system, which makes it possible to generate direct voltages in a required range up to 4 kV with suitable high precision. The values of voltages supplying the Watt-meter extorted a suitable configuration of the equipment on the constructed measuring system, which guarantees proper galvanic separation of particular components of the measuring system as well as its safe operation. Both calibrators with specialised high-voltage attachment, dedicated for the measuring system, were calibrated in order to evaluate the whole system accuracy. The calibration results, together with the determined value of the expanded uncertainty, were included in the calibration certificate. The authors described in detail particular elements of the measuring system together with the results of its calibration. The measuring system was constructed at the Electrical Quantities Measurement Laboratory, Regional Verification Office in Poznań. The function of direct current Watt-hour meters is the measurement of power and electrical energy in circuits of direct current supply in a railway traction network 3.3 kV. The measurement results were completed with a presentation of uncertainty budgets.

Keywords: measuring system, direct current Watt-hour meter, measurement uncertainty.

1. Wstęp

Ocena parametrów metrologicznych urządzeń służących do rozliczeń pomiędzy podmiotami gospodarczymi jest złożonym problemem pomiarowym. W praktyce często przyjmuje się, że odpowiednią formą takiej oceny jest wzorcowanie. Uzyskane w wyniku wzorcowania wartości, powiązane z niepewnością ich wyznaczenia, powinny być określone w konkretnych punktach pomiarowych.

Punkty te powinny być zgodne z odpowiednimi normami i innymi dokumentami uzupełniającymi. W pracy przedstawiono opracowane i skonstruowane stanowisko pomiarowe, przeznaczone do oceny właściwości metrologicznych liczników energii elektrycznej prądu stałego. Liczniki tego typu znajdują zastosowanie w pomiarach mocy i energii prądu stałego w sieci trakcyjnej kolejowej. Krajowa sieć trakcyjna w Polsce zasilana jest napięciem stałym 3,3 kV, dlatego też opracowane stanowisko pomiarowe umożliwia generację napięć stałych w zakresie do 4 kV. W tym miejscu warto nadmienić, że w sieciach trakcyjnych innych krajów europejskich stosuje się napięcia stałe o wartościach 1,5 kV oraz napięcia przemiennie o różnych wartościach i częstotliwościach: 15 kV – 16,7 Hz oraz 25 kV – 50 Hz.

Za pierwszy, dokładny miernik zużycia energii elektrycznej uważa się licznik opatentowany w 1883 i skonstruowany przez berlińskiego naukowca Hermana Arona. Miernik ten, zwany "Pendelzähler" wykorzystywał w swoim działaniu zasadę wahadła. Na rys. 1 przedstawiono widok tego urządzenia.



Rys. 1. Widok licznika prądu stałego tzw. „Pendelzähler”
Fig. 1. View of the direct current meter called “Pendelzähler”

Przyrząd ten posiadał dwa wahadła z cewkami zasilanymi napięciem sieciowym. Pod wahadłami znajdowały się dwie cewki prądowe nawinięte przeciwobnie. Na skutek oddziaływania cewek, w warunkach przepływu prądu, jedno wahadło poruszało się wolniej, a drugie szybciej niż w przypadku braku przepływu prądu. Ta różnica prędkości była przekazywana do mechanizmu zliczającego licznika. Wahadła zamieniały się rolami, co minutę, aby skompensować różnicę wyjściowych częstości drgań. Pierwsze mierniki wykorzystujące mechanizm zegarowy wymagały comiesięcznego naciągu ręcznego. Modele późniejsze posiadały półautomatyczny naciąg elektryczny [1].

Współczesne liczniki energii elektrycznej prądu stałego w niczym nie przypominają urządzeń opisanych powyżej. Mierniki stosowane obecnie są nowoczesnymi przyrządami pomiarowymi, najczęściej mikroprocesorowymi, wyposażonymi w interfejs pomiarowy, który pozwala na zdalną transmisję zarejestrowanych

wyników pomiarów. Budowę, parametry techniczne oraz szczegółowy opis wszystkich funkcji przykładowego licznika energii elektrycznej prądu stałego LE 3000plus stosowanego do pomiarów mocy i energii zawarto w [2].

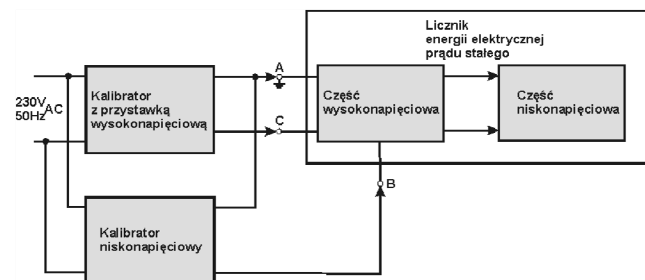
2. Stanowisko pomiarowe

Konstrukcja liczników, stosowanych do pomiarów parametrów energii w sieci trakcji kolejowej, wymusiła przygotowanie stanowiska pomiarowego, które umożliwia wzorcowanie licznika przy zasilaniu napięciem stałym w zakresie od 0 V do 4 kV, oraz sygnałem z bocznika prądowego odpowiadającego przepływowi prądu o wartościach od kilkuset do ponad tysiąca amperów. Stanowisko pomiarowe zbudowano w Pracowni Pomiarów Wielkości Elektrycznych Okręgowego Urzędu Miar w Poznaniu.

Wartości napięć zasilających badany licznik wymusiły odpowiednią konfigurację aparatury na skonstruowanym stanowisku pomiarowym, która gwarantuje właściwą separację galwaniczną poszczególnych podzespołów stanowiska jak również jego bezpieczną obsługę.

Opracowane i skonstruowane stanowisko pomiarowe składa się z dwóch wielofunkcyjnych kalibratorów, oraz skonstruowanej na potrzeby tego stanowiska specjalizowanej przystawki wysokonapięciowej umożliwiającej generację, z odpowiednio wysoką dokładnością, napięć stałych w żądanym zakresie do 4 kV.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat opracowanego stanowiska pomiarowego do badań liczników energii elektrycznej prądu stałego, natomiast na rysunku 3 zaprezentowano widok skonstruowanego stanowiska wraz z badanym licznikiem energii elektrycznej LE3000 plus.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego do badań liczników energii elektrycznej prądu stałego

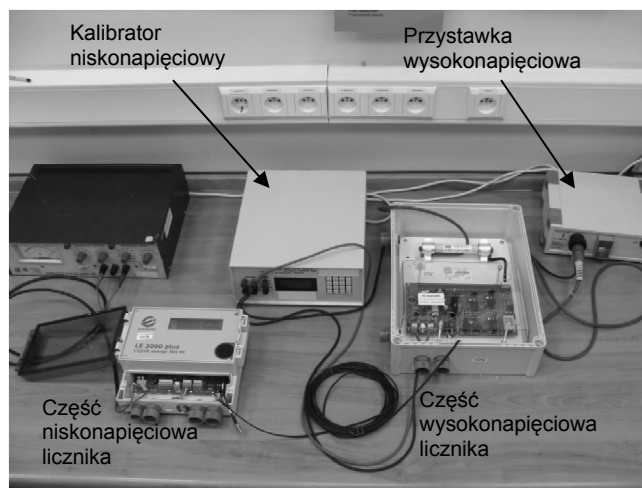
Fig. 2. Diagram of the measuring system for testing the direct current Watt-hour meters

Sygnal pomiędzy zaciskami A i B odpowiada, w układzie rzeczywistym, spadkowi napięcia na zewnętrznym boczniku pomiarowym, natomiast sygnał pomiędzy zaciskami A i C jest napięciem odpowiadającym w rzeczywistości wysokiemu napięciu w trakcji elektrycznej. W opracowanym układzie pomiarowym napięcie U_{AB} osiąga niewielkie wartości, dzięki czemu zminimalizowano koszty izolacji pomiędzy wewnętrznymi blokami układu pomiarowego. Zacisk C opracowanego stanowiska pomiarowego znajduje się na wysokim potencjale ujemnym, rzędu - 4 kV. Odpowiednia konfiguracja i izolacja tego zacisku umożliwia bezpieczną obsługę całego stanowiska pomiarowego.

Opracowany układ pomiarowy gwarantuje odpowiednie parametry metrologiczne, minimalny pobór energii z sieci zasilającej, co jest istotne z punktu widzenia kosztów przeprowadzanych badań, jak również właściwą separację podzespołów.

Kalibrator wraz z opracowaną specjalizowaną przystawką wysokonapięciową, umożliwiającą generację napięć stałych w zakresie do 4 kV, pracuje przy niskich wartościach prądu obciążenia licznikiem rzędu 10 mA. Drugi z kalibratorów, skonstruowany również na potrzeby tego stanowiska, odpowiada za generację sygnału symulującego spadek napięcia na boczniku pomiarowym. Pracuje on przy wartościach napięć wyjściowych rzędu 200 mV. Odpowiada to w rzeczywistości przepływowi przez bocznik pomiarowy prądu o wartościach rzędu tysiąca i więcej amperów.

Wyznaczona względna wartość niepewności rozszerzonej tej części stanowiska pomiarowego wynosi 0,06 % i jest określona w aktualnym świadectwie wzorcowania.



Rys. 3. Widok stanowiska pomiarowego wraz z badanym licznikiem energii LE3000plus

Fig. 3. View of the measuring system together with evaluated energy meter LE3000plus

W pierwotnej wersji tego stanowiska, podczas wyznaczania wartości energii elektrycznej, pomiaru czasu dokonywano stoperem mechanicznym. Charakterystykę metrologiczną stopera w postaci wzoru na bezwzględny błąd pomiaru czasu $\Delta\tau$, wyrażonego w sekundach, przedstawia zależność (1)

$$\Delta\tau = \left[\left(\frac{\Delta_d \pm U_d}{86400} \right) \cdot \tau + (\Delta_k \pm U_k) \right] \quad (1)$$

gdzie Δ_d oznacza błąd długoterminowy, U_d niepewność rozszerzoną błędów długoterminowych, Δ_k błąd krótkoterminowy, U_k niepewność rozszerzoną błędów krótkoterminowych, natomiast τ mierzony przedział czasu w sekundach [3]. Dla konkretnego stopera mechanicznego zależność (1) przyjmuje postać:

$$\Delta\tau = \left[\left(\frac{-2,5 \pm 1,7}{86400} \right) \cdot \tau \pm 0,11 \right]. \quad (2)$$

Błąd długoterminowy dla stopera tego typu związany jest głównie z naciąganiem sprężyny, natomiast błąd krótkoterminowy ma związek przede wszystkim z czasem reakcji operatora i przycisku. Przy pomiarze czasu rzędu 30 min tym stoperem, uzyskano wartość niepewności rozszerzonej na poziomie 0,12 s. Szczegółowy opis tych zagadnień można znaleźć w pracy [3].

W obecnej wersji stanowiska pomiarowego wprowadzono istotne modyfikacje, które pozwoliły na znaczące ograniczenie niedokładności pomiaru energii. Wprowadzone zmiany pozwoliły na wyeliminowanie błędów związanego z czasem reakcji osoby przeprowadzającej pomiary. Wysokie napięcie, uzyskiwane z kalibratora napięciowego wraz z przystawką, jest podłączone przez cały czas trwania pomiarów do części wysokonapięciowej badanego licznika. W trakcie normalnej pracy licznika w sieci trakcji kolejowej prąd obciążenia mierzony jest przez licznik pośrednio, poprzez spadek napięcia na zewnętrznym boczniku. Na skonstruowanym stanowisku pomiarowym symulacja prądu obciążenia mierzonego przez licznik realizowana jest przez kalibrator niskonapięciowy, którego sygnał wyjściowy symuluje spadek napięcia z bocznika. Kalibrator ten wyposażony jest w precyzyjny generator interwału czasu - GIC o zakresie nastaw: (1 ÷ 85) min. Generuje on sygnał przez ściśle określony przedział czasu, standardowo jest to 15 minut. Konstrukcja tego kalibratora umożliwia generację impulsu o możliwie największej stromości narastania, co jest równoznaczne z jak najkrótszym czasem załączenia i wyłączenia.

czenia tego impulsu. Kalibrator ten wraz z GIC, który jest jego integralną częścią, wyzorcowano w celu wyznaczenia niedokładności pomiaru czasu i napięcia.

Badania kalibratora w części pracującej jako GIC przeprowadzono w laboratorium przy temperaturze otoczenia ($23,0 \div 24,3$) °C. Wyniki wzorcowania GIC zostały odniesione do państwowego wzorca jednostek miar czasu i częstotliwości przez zastosowanie, jako przyrządu kontrolnego, częstotlicznika-czasomierza cyfrowego typu Agilent 53132A, synchronizowanego częstotliwością wzorcową z państwowego wzorca jednostek miar czasu i częstotliwości.

Końcowy wynik pomiaru jest kompletny tylko wówczas, kiedy zawiera zarówno wartość wielkości mierzonej, jak również niepewność wyniku pomiaru, związaną z tą wartością. Zgodnie z dokumentem [4] niepewność pomiaru jest to nieujemny parametr charakteryzujący rozproszenie wartości wielkości przyporządkowany do menzurandu, obliczony na podstawie uzyskanej informacji. Zwykle niepewność pomiaru obejmuje wiele składników. Wartości niektórych z nich mogą być wyznaczone metodą typu A wyznaczania niepewności pomiaru, która polega na wyznaczeniu wartości składowej niepewności pomiaru za pomocą statystycznej analizy wartości wielkości zmierzonych otrzymanych w zdefiniowanych warunkach pomiaru. Inne składniki, których wartości mogą być wyznaczone metodą typu B wyznaczania niepewności pomiaru, mogą być scharakteryzowane za pomocą odchylenia standardowego, wyznaczonego na podstawie funkcji gęstości prawdopodobieństwa opartej na doświadczeniu lub innej informacji [5]. Niepewność pomiaru została wyznaczona zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumencie [6].

Błąd odtwarzania przedziałów czasu przez GIC - $\Delta\tau$ w zakresie ($1 \div 15$) minut jest określony zależnością (3):

$$\Delta\tau = 5,18 \text{ ms} - \gamma \cdot \tau_n \pm 0,02 \text{ ms} \quad (3)$$

gdzie τ_n jest wartością nominalną przedziału czasu nastawioną na GIC, a wartość parametru γ wyznaczona podczas wzorcowania wyniosła $(-5,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$ s/s. Błąd odtwarzania jest różnicą między wartością umownie prawdziwą odtwarzanej wielkości a jej wartością nominalną.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki wzorcowania GIC kalibratora niskonapięciowego wraz z wyznaczonymi wartościami błędów odtwarzania i niepewności wyniku pomiaru dla interwału czasowego równego 0,25 godziny.

Tab. 1. Wyniki wzorcowania generatora interwału czasu kalibratora niskonapięciowego

Tab. 1. Results of calibrating the time distributor of a low-voltage calibrator

Zakres 5100 s			
Wartość nastawiona	Wartość poprawna	Błąd odtwarzania $\Delta\tau$	Niepewność pomiaru U
s	s	s	s
900	900,0574	0,0574	0,0021

W tabeli 2 przedstawiono wyniki wzorcowania kalibratora niskonapięciowego dla szerokiego zakresu napięć. Badania tego kalibratora przeprowadzono w laboratorium przy temperaturze otoczenia ($21,9 \div 23,0$) °C, oraz wilgotności względnej ($38,3 \div 41,3$) %. Wyniki wzorcowania zostały odniesione do państwowego wzorca jednostki miary napięcia elektrycznego stałego przez zastosowanie multimetru cyfrowego. Niepewność pomiaru została wyznaczona zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumencie [6].

Błąd wskazania Δ ma postać: $\Delta = W_w - W_p$, gdzie wartość wskazana W_w jest nastawą na kalibratorze, natomiast wartość poprawną W_p odczytuje się z multimetru wzorcowego.

Kalibrator z przystawką wysokonapięciową, jak również kalibrator niskonapięciowy, pracują z wewnętrzną pętlą sprzężenia zwrotnego. Dzięki temu sygnały wyjściowe z obu urządzeń są stabilne w czasie.

Tab. 2. Wyniki wzorcowania kalibratora niskonapięciowego
Tab. 2. Results of calibrating a low-voltage calibrator

Zakres 2500000 μV			
Wartość wskazana W_w	Wartość poprawna W_p	Błąd wskazania Δ	Niepewność pomiaru U
μV	μV	μV	μV
-3000	-3003,1	3,1	0,6
-5000	-5001,6	1,6	0,6
-6000	-6002,3	2,3	0,6
-10000	-10002,2	2,2	0,6
-15000	-15002,2	2,2	0,7
-25000	-25000,7	0,7	0,7
-30000	-30001,6	1,6	0,7
-48000	-48002,2	2,2	0,8
-50000	-50001,2	1,2	0,8
-60000	-60001,8	1,8	0,8
-80000	-80000,9	0,9	1,0
-90000	-90000,0	0,0	1,1
-10000	99998,0	-2,0	1,1
-150000	-149996,8	-3,2	1,5

3. Wnioski

W pracy podjęto próbę zaprezentowania złożonej tematyki dotyczącej badań liczników energii elektrycznej prądu stałego na napięcie rzędu 4 kV. Przedstawiono zaprojektowane i skonstruowane stanowisko pomiarowe składające się z dwóch wielofunkcyjnych kalibratorów, oraz skonstruowanej na potrzeby tego stanowiska specjalizowanej przystawki wysokonapięciowej, umożliwiającej generację napięć stałych w żądanym zakresie do 4 kV o odpowiednio wysokiej dokładności.

Opisano szczegółowo poszczególne elementy tego stanowiska pomiarowego wraz z wynikami wzorcowania.

Przy doborze punktów pomiarowych badanego licznika na stanowisku pomiarowym, zestawionych w tabeli 2, kierowano się wnioskami wynikającymi z badań liczników umieszczonych w warunkach rzeczywistych na elektrowozach, podczas ich normalnej eksploatacji.

Modyfikacja stanowiska pomiarowego, w porównaniu z wersją pierwotną przedstawioną w pracy [3], pozwoliła za znaczące zmniejszenie wartości niepewności wyników pomiarów.

Autorzy składają serdeczne podziękowanie pracownikom Pracowni Pomiarów Wielkości Elektrycznych Okręgowego Urzędu Miar w Poznaniu za pomoc w realizacji części eksperymentalnej niniejszej publikacji.

4. Literatura

- [1] Kennedy Rankin Electrical Installations of Electric Light Power, Traction and Industrial Electrical Machinery I 201-209 (Edinburgh: T.C. & E.C. Jack), 1902.
- [2] Dokumentacja techniczno-ruchowa: Licznik energii elektrycznej prądu stałego 3 kV LE300plus, Łódź, 2011.
- [3] Otomański P., Zazula P. Charakterystyka metrologiczna stanowiska pomiarowego do badań liczników energii elektrycznej prądu stałego w zakresie do 4 kV, Przegląd Elektrotechniczny nr 12/2008, 2008, 315-317.
- [4] International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) 2008 JCGM 200:2008.
- [5] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement 2008 JCGM 100:2008.
- [6] EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration European co-operation for Accreditation, 1999.