

Automatyczny system wzorcujący z kalibratorem wieloproduktowym

Streszczenie. Zaprezentowano koncepcję automatyzacji wzorcowania przyrządów pomiarowych wielkości elektrycznych z zastosowaniem kalibratora wieloproduktowego z automatycznym odczytem i zapisem wskazań wzorcowanego przyrządu oraz obliczaniem wartości średniej błędów i rozszerzonej niepewności pomiaru. Zastosowanie idei wbudowanego multimetru i kamery umożliwiło automatyczny odczyt wskazań przyrządów z wyjściem elektrycznym lub z wyświetlaczem cyfrowym. Zaproponowano budżet dla automatycznie obliczanej rozszerzonej niepewności pomiaru.

Abstract. The concept of automating the calibration of measuring instruments for electrical quantities using a multi-product calibrator with automatic reading and recording of the calibrated device's readings and calculating the average value of the error and expanded measurement uncertainty was presented. The use of the idea of a built-in multimeter and a camera enabled automatic reading of the indications of devices with an electrical output or with a digital display. A budget for automatically calculated expanded measurement uncertainty was proposed. (**Automatic calibration system with multi-product calibrator**).

Słowa kluczowe: automatyczny system wzorcujący, niepewność pomiaru, kalibrator wielofunkcyjny, cyfrowe multimetry.
Keywords: automatic calibration system, uncertainty of measurement, multifunction calibrator, digital multimeters.

Wzorcowanie przyrządów pomiarowych wielkości elektrycznych

W procesie wzorcowania przyrządów pomiarowych wielkości elektrycznych ustalana jest relacja między wskazaniami wzorcowanego przyrządu pomiarowego (ang. Device Under Test (DUT)) a wskazaniami wzorca. Wynik wzorcowania podawany jest jako wartość średnia błędów M z różnicy wskazań DUT i wzorca, z $n=10$ powtarzanych pomiarów w danej serii dla każdego punktu pomiarowego. Ustalona wartość błędów podawana jest wraz z rozszerzoną niepewnością pomiaru U , która uwzględnia niepewność typu A związaną z niepewnością cząstkowych wyników pomiaru oraz niepewność typu B związaną z wpływami systematycznymi.

Zatem w procesie wzorcowania należy realizować następujące zadania:

- zadawać wskazania wzorca odpowiednie dla danego punktu pomiarowego, z zapewnieniem warunków wymaganej dokładności wskazań wzorca,
- odczytywać i zapisywać wskazania DUT,
- obliczać wartość średnią błędów M i wartość rozszerzonej niepewności pomiaru U celem zapisu ich w wystawianych świadectwach wzorcowania.

W tabeli 1 przedstawiono udział poszczególnych czynności w pracochłonności wzorcowania typowego multimetru klasy 3,5 cyfry bez cyfrowego interfejsu komunikacyjnego. Z przedstawionych danych, uzyskanych metodą obserwacji procesu wzorcowania realizowanego zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO/IEC 17025:2018 wynika, że o pracochłonności procesu wzorcowania decyduje pracochłonność ręcznego odczytu i zapisu wskazań DUT.

Tabela 1. Pracochłonność wzorcowania multimetru klasy 3,5 cyfry

| Czynność operatora / systemu | Pracochłonność [%] |
|---|--------------------|
| Podłączenie i odłączenie DUT do wzorca | 5 |
| Zadawanie wskazań wzorca | 10 |
| Ręczny odczyt i zapis wskazań DUT | 75 |
| Obliczenie wartości M i U jako wyniku pomiaru | 10 |

Naturalnym trendem w działalności laboratoriów wzorcujących jest dążenie do zwiększenia produktywności

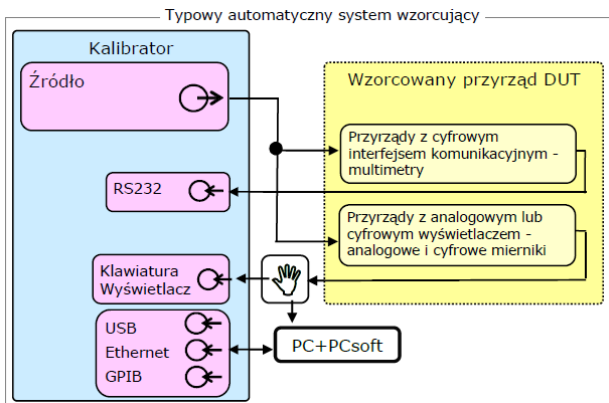
wzorcowania przez wykorzystanie nowoczesnych technologii:

- stosowanie uniwersalnych wzorców, które umożliwiają wzorcowanie szerokiego asortymentu przyrządów pomiarowych [1-3],
- automatyzację odczytu i zapisu wskazań wzorcowanych przyrządów i obliczania wyniku wzorcowania [4-6].

Kalibratory wieloproduktowe - geneza

Asortyment wzorcowanych przyrządów, w pierwszej kolejności, zależy od asortymentu odtwarzanych wielkości elektrycznych przez źródło kalibratora (rysunek 1). Pięćdziesiąt lat temu (lata 1970.) pojawiły się pierwsze uniwersalne wzorce (5100 Fluke, 300 Rotek, GA1 Lumel) i przyjęły nazwę Kalibrator Wielofunkcyjny (Multifunction Calibrator) z racji możliwości odtwarzania napięć i prądów stałych i przemiennych przez jeden wzorzec. Następnie (lata 1980.) pojawiły się wzorce umożliwiające odtwarzanie napięć i prądów przemiennych jednocześnie na więcej niż jednym wyjściu, z nastawianym kątem przesunięcia fazowego (800/811 Rotek, SQ31/33 Lumel), i przyjęły nazwę Kalibrator Mocy (Power Calibrator). Implementacja możliwości odtwarzania parametrów jakości energii w kalibratorach mocy dała początek rozwojowi kalibratorów mocy i jakości energii (lata 2000. to 6100A Fluke, C300 Calmet) w celu wzorcowania analizatorów jakości energii w związku z pojawieniem się normy EN 50160:1999.

Kilkanaście lat temu pojawiły się jeszcze bardziej uniwersalne wzorce (lata 2010. to 5502A, 5522A i 5080A Fluke, 5025C Time Electronics, M142 Meatest), które w jednej obudowie są połączeniem kalibratora wielofunkcyjnego z jednofazowym kalibratorem mocy i jakości energii. Kalibratory te odtwarzają, równocześnie na dwóch wyjściach, napięcia i prądy z nastawianym kątem przesunięcia fazowego, pełniąc tym samym dodatkową funkcję kalibratora mocy prądu stałego i przemiennego. Kalibratory te przyjęły nazwę Kalibrator Wieloproduktowy (Multi-Product Calibrator) z racji szerokiej możliwości wzorcowania przyrządów pomiarowych napięcia i prądu stałego i przemiennego czy rezystancji, ale i mierników mocy, liczników energii, analizatorów harmonicznych i oscyloskopów.



Rys.1. Typowy automatyczny system wzorujący

Aktualnie obserwowany jest intensywny rozwój w grupie kalibratorów wieloproduktowych [1-3,7], które są stosowane w typowych automatycznych systemach wzorujących przedstawionych na rysunku 1. W systemie tym możliwe jest automatyczne wzorowanie przyrządów z cyfrowym interfejsem komunikacyjnym jak multimetry, ale tylko tych typów, które są dostępne w specjalistycznym programie komputerowym, np. MET/CAL Fluke. Warunkiem automatycznego wzorowania przyrządów jest posiadanie przez nie cyfrowego interfejsu komunikacyjnego umożliwiającego odczytywanie wskazań DUT.

Istotny wzrost uniwersalności wzorców nie wyeliminował ręcznego odczytu i zapisu wskazań przyrządów bez cyfrowego interfejsu komunikacyjnego – wzorowanie tych przyrządów wymaga ręcznego odczytu i ręcznego zapisywania wskazań DUT z wykorzystaniem klawiatury i wyświetlacza komputera lub kalibratora, co jest najbardziej pracochłonnym etapem całego procesu wzorowania (tabela 1), nawet przy wykorzystaniu programu MET/CAL.

Automatyzacja odczytu wskazań wzorcowanego przyrządu

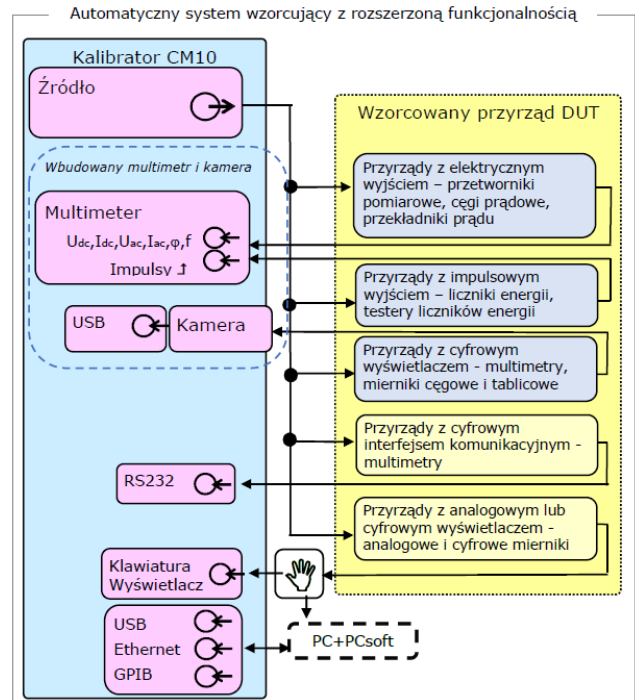
Model kalibratora stosowanego w automatyzowanym systemie wzorującym może być przedstawiony w postaci dwóch bloków:

- źródła, którego parametry decydują o zakresie wzorowania,
- modułów do odczytu wskazań DUT, których wszechstronność decyduje o zakresie automatyzacji.

Na rysunku 2 przedstawiono automatyczny system wzorujący z rozszerzoną funkcjonalnością, w którym do typowego systemu wzorującego zilustrowanego na rysunku 1 wbudowano multimetr i kamerę, co pozwala na realizację automatycznego odczytu i zapisu wskazań szerokiego asortymentu wzorcowanych przyrządów nie wyposażonych w cyfrowe interfejsy komunikacyjne.

Wbudowany multimetr umożliwia automatyczny odczyt wskazań przyrządów z wyjściem elektrycznym lub impulsowym, co automatyzuje wzorowanie takich przyrządów, jak:

- ✓ przetworniki pomiarowe ze standardowym wyjściem elektrycznym napięcia lub prądu stałego czy częstotliwości,
- ✓ cęgi prądowe i przekładniki prądu z wyjściem napięcia lub prądu stałego lub przemiennego z możliwością automatycznego pomiaru ich charakterystyki amplitudowej i fazowej,
- ✓ liczniki energii elektrycznej i ich testery z wyjściem impulsowym.



Rys.2. Automatyczny system wzorujący z rozszerzoną funkcjonalnością

Wbudowana kamera umożliwia automatyczny odczyt wskazań przyrządów wyposażonych w wyświetlacz cyfrowy. Brak funkcji wbudowanej kamery powoduje, że użytkownicy kalibratorów próbują we własnym zakresie automatyzować wzorowanie przyrządów z wyświetlaczami cyfrowymi bez cyfrowego interfejsu komunikacyjnego [5,6,8,9] a nawet wzorowanie przyrządów analogowych [10,11].

Możliwy jest też ręczny odczyt i zapisywanie wskazań DUT z wykorzystaniem klawiatury i wyświetlacza komputera lub kalibratora.

Automatyzacja obliczania wyniku wzorowania

Automatycznie obliczany wynik wzorowania, uzyskiwany w automatycznym systemie wzorującym przedstawionym na rysunku 2, zawiera następujące składowe:

- wartość średnia błędów z różnicy wskazań DUT i wzorca, z n powtarzanych pomiarów w danej serii dla każdego punktu pomiarowego, gdzie liczba n jest zadawana w trakcie tworzenia procedury pomiarowej i może mieć różną wartość dla każdego punktu pomiarowego,
- wartość rozszerzonej niepewności pomiaru obliczana ze wzoru (1),
- wartość odchylenia standardowego s dla potrzeb obliczania wartości rozszerzonej niepewności pomiaru według wzoru stosowanego w laboratorium wzorującym, z wykorzystaniem innego budżetu niepewności niż budżet stanowiący podstawę wzoru (1),
- wartości błędów częściowych z n powtórzonych pomiarów w danej serii.

Wynik wzorowania może być prezentowany albo w postaci bezwzględnej albo w postaci względnej z wyborem formy zapisu w procentach lub [ppm], co operator deklaruje na etapie definiowania parametrów wzorcowanego urządzenia. Wybrana forma zapisu jest jednolita dla wszystkich powyższych składowych wyniku wzorowania.

Wartość względna rozszerzonej niepewności pomiaru jest obliczana z następującego wzoru:

$$(1) U_E = k \cdot \sqrt{\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + u^2(\delta x_{RS}) + u^2(\delta x_{RM}) + u^2(\delta x_{RR})} =$$

$$= k \cdot \sqrt{\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{U_S}{k}\right)^2 + \left(\frac{U_M}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{RR}/W_W}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2}$$

gdzie: k – współczynnik rozszerzenia, standardowo $k=2$, s – odchylenie standardowe, n – liczba powtarzanych wyników pomiaru w danej serii, $u(\delta x_{RS})$ – niepewność standardowa związana z błędem granicznym źródła, $u(\delta x_{RM})$ – niepewność standardowa związana z błędem granicznym wbudowanego multimetru (dotyczy tylko trybu pracy z odczytem wskazań DUT z wbudowanego multimetru), $u(\delta x_{RR})$ – niepewność standardowa związana z rozdzielczością odczytu wskazań DUT, U_S – rozszerzona niepewność źródła podawana w specyfikacji kalibratora, U_M – rozszerzona niepewność wbudowanego multimetru podawana w specyfikacji kalibratora, Δ_{RR} – rozdzielczość odczytu wskazań DUT, W_W – wartość odczytanego wskazania DUT.

Rozdzielczość Δ_{RR} odczytu wskazań DUT stanowi obowiązkowy składnik rozszerzonej niepewności pomiaru opisanej wzorem (1), dla wszystkich sprzężeń wykorzystywanych do odczytu wskazań DUT przedstawionych na rysunku 2. Wymagana wartość rozdzielczości jest zadawana przez operatora w trakcie tworzenia procedury pomiarowej i może mieć różną wartość dla każdego punktu pomiarowego. Wykorzystanie wbudowanej kamery lub multimetru w systemie sprzężenia umożliwia automatyczne ustalanie rozdzielczości odczytu wskazań DUT i operator może być w tym przypadku zwolniony z konieczności zadawania wartości rozdzielczości podczas tworzenia procedury pomiarowej – dla pozostałych rodzajów sprzężeń takiej możliwości już nie ma.

Stanowisko pomiarowe i rezultaty

Na rysunku 3 przedstawiono widok stanowiska pomiarowego do wzorcowania multimetru klasy 3,5 cyfry bez cyfrowego interfejsu komunikacyjnego, w którym do odczytu wskazań wzorcowanego multimetru zastosowano kamerę. Stanowisko może realizować funkcję automatycznego wzorcowania, w którym wykorzystane są, zdefiniowane wcześniej, parametry wzorcowanego urządzenia i procedury pomiarowej.

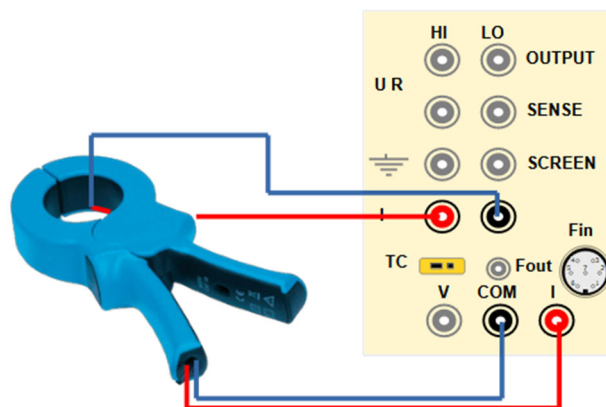


Rys.3. Stanowisko z kamerą

Czynności operatora sprowadzają się do podłączenia wzorcowanego multimetru do zacisków kalibratora, wyboru funkcji multimetru, ustawienia kamery na zgodność wartości wskazań multimetru i odczytów kalibratora. Następnie operator uruchamia automatyczne wzorcowanie w wybranych punktach pomiarowych procedury wzorcowania. Operator zwolniony z ręcznego odczytu i z ręcznego zapisu wskazań wzorcowanego multimetru może się skupić na rzecz nadzoru procesu wzorcowania przez wrywkową obserwację zgodności wartości wskazań multimetru i odczytów kalibratora, wartości błędów cząstkowych, wartości

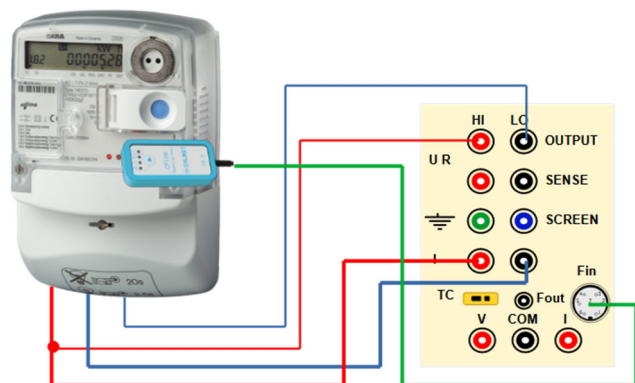
średniej błędu, wartości odchylenia standardowego czy wartości rozszerzonej niepewności pomiaru.

Idea wykorzystania wbudowanego multimetru do automatycznego wzorcowania przyrządów z wyjściem impulsowym, na przykładzie cęgów prądowych, jest prezentowana na rysunku 4. Prąd w obwodzie pierwotnym cęgów wymuszony jest przez źródło kalibratora pomiędzy zaciskami oznaczonymi jako „HI-I” i „LO-I”. Prąd w obwodzie wtórnym cęgów jest mierzony za pomocą wbudowanego multimetru pomiędzy zaciskami oznaczonymi jako „I” i „COM”. Źródło umożliwia nastawianie prądów pierwotnych do 20,5 A (do 120 A AC i do 200 A DC ze wzmacniaczem transkonduktancji CC10 Calmet). Multimetr umożliwia pomiar prądów wtórnych do 6 A AC i pomiar kąta przesunięcia fazowego pomiędzy prądem wtórnym i pierwotnym w zakresie 0-360°. W przypadku potrzeby wzorcowania cęgów prądowych w zakresie prądowym do 6000 A możliwe jest wykorzystanie dodatkowej zwojnicy o liczbie zwoi równej 50.



Rys.4. Sposób podłączenia cęgów pomiarowych do wejścia prądowego wbudowanego multimetru kalibratora wieloproductowego

Idea wykorzystania wbudowanego multimetru do automatycznego wzorcowania przyrządów z wyjściem impulsowym, na przykładzie jednofazowego licznika energii elektrycznej, jest prezentowana na rysunku 5. Zaciski napięciowe licznika są połączone z zaciskami napięciowymi źródła kalibratora oznaczonymi jako „HI-U” i „LO-U”, natomiast zaciski prądowe licznika są połączone z zaciskami prądowymi źródła kalibratora oznaczonymi jako „HI-I” i „LO-I”. Impulsy świetlne z diody LED licznika są przetwarzane w impulsy elektryczne z zastosowaniem fotogłowicy podłączonej do wejścia impulsowego wbudowanego multimetru oznaczonego jako „Fin”.



Rys.5. Sposób podłączenia licznika energii do wejścia impulsowego wbudowanego multimetru kalibratora wieloproductowego

Wzorcowanie przyrządów z wykorzystaniem wbudowanego multimetru jest bardziej wygodne dla operatora niż wzorcowanie z wykorzystaniem wbudowanej kamery, ale może być stosowane tylko do wzorcowania tych przyrządów, które są wyposażone w elektryczne lub impulsowe wyjście.

W tabeli 2 przedstawiono uzyskane czasy realizacji przykładowych procedur pomiarowych w warunkach $n=10$ powtarzanych pomiarów dla każdego punktu pomiarowego. Podczas wzorcowania multimetru zachodzi potrzeba udziału operatora przy zmianie funkcji multimetru. Podczas wzorcowania cęgów mierzony jest błąd amplitudy i fazy.

Tabela 2. Czas wzorcowania

| DUT | Rys. | Liczba punktów pomiarowych | Czas wzorcowania [min] |
|---------------------|------|----------------------------|------------------------|
| Multimetr 3,5 cyfry | 3 | 10 | 5 |
| Cęgi prądowe | 4 | 5 | 6 |
| Licznik energii | 5 | 10 | 6 |

Zakres wzorcowania

Zakres wzorcowania opracowanego systemu przedstawionego na rysunku 2 zależy od parametrów źródła kalibratora. Źródło odtwarza napięcia stałe i przemiennie w zakresie do 1050 V, prądy stałe w zakresie do 20,5 A (do 200 A ze wzmacniaczem CC10 Calmet) i przemiennie w zakresie do 20,5 A (do 120 A ze wzmacniaczem CC10 Calmet) oraz rezystancje w zakresie do 1 GΩ z wysoką dokładnością umożliwiającą wzorcowanie nowoczesnych przyrządów pomiarowych, włącznie z multimetrami klasy 6,5 cyfry.

Równoczesne odtwarzanie napięcia na wyjściu napięciowym i prądu na wyjściu prądowym z nastawianym kątem przesunięcia fazowego między prądem i napięciem umożliwia wzorcowanie mierników mocy, przetworników mocy, liczników energii i ich testerów do klasy dokładności liczników 0,2S.

Odtwarzanie napięć i prądów o programowanych kształtach poliharmonicznych z nastawianymi amplitudami i fazami poszczególnych harmonicznych z niepewnością 0,1% umożliwia wzorcowanie mierników harmonicznych i analizatorów jakości energii. Symulacja charakterystyk termoelementów umożliwia wzorcowanie termoelektrycznych mierników temperatury. Odtwarzanie napięć prostokątnych o programowanym współczynniku wypełnienia (funkcja PWM Pulse Width Modulation) i napięć prostokątnych wysokiej częstotliwości (funkcja HSO High frequency Square Oscillator) umożliwia wzorcowanie oscyloskopów.

Wnioski

Kalibrator wieloproduktowy to wzorzec, który zakresem wzorcowania obejmuje szeroki asortyment wzorcowanych przyrządów wielkości elektrycznych – wzorcowanych „produktów”. Przejście drogi od pierwszych kalibratorów wielofunkcyjnych do pierwszych kalibratorów wieloproduktowych zajęło konstruktorom kilkadziesiąt lat.

Główną przeszkodą na drodze zwiększania produktywności wzorcowania jest konieczność ręcznego odczytu i ręcznego zapisu wskazań wzorcowanego przyrządu pozabawionego cyfrowego interfejsu komunikacyjnego. O zakresie automatyzacji wzorcowania decydują zastosowane w kalibratorze moduły do odczytu wskazań DUT. Wbudowany multimetr i wbudowana kamera

umożliwiają automatyczny odczyt (i automatyczny zapis) wskazań szerokiego asortymentu przyrządów z wyjściem elektrycznym, wyjściem impulsowym i z wyświetlaczem cyfrowym. W związku z tym opracowany kalibrator wieloproduktowy uzyskał funkcję automatycznego testera.

Celem dalszego zwiększenia produktywności wzorcowania z zastosowaniem opracowanego kalibratora, zaimplementowano w nim dodatkową funkcję obliczania wartości rozszerzonej niepewności pomiaru.

Opracowany w ramach projektu NCBiR Wieloproduktowy Kalibrator i Tester typu CM10 daje przesłanki na skokowe zwiększenie produktywności wzorcowania przyrządów pomiarowych przez automatyzację odczytu i zapisu wskazań wzorcowanych przyrządów i wyliczania wyniku wzorcowania.

Autorzy: mgr inż. Daniel Belica, Calmet Spółka z o.o., ul. Kukuczka 18, 65-472 Zielona Góra, E-mail: D.Belica@calmet.eu; mgr inż. Jarosław Markiewicz, Calmet spółka z o.o., ul. Kukuczka 18, 65-472 Zielona Góra, E-mail: J.Markiewicz@calmet.eu; mgr inż. Piotr Nowakowski, Calmet Spółka z o.o., ul. Kukuczka 18, 65-472 Zielona Góra, E-mail: P.Nowakowski@calmet.eu; mgr inż. Adam Szmytkiewicz, Calmet spółka z o.o., ul. Kukuczka 18, 65-472 Zielona Góra, E-mail: A.Szmytkiewicz@calmet.eu; mgr inż. Marcin Tylkowski, Calmet Spółka z o.o., ul. Kukuczka 18, 65-472 Zielona Góra, E-mail: M.Tylkowski@calmet.eu; dr hab. inż. Andrzej Olencki, Calmet spółka z o.o., ul. Kukuczka 18, 65-472 Zielona Góra, E-mail: A.Olencki@calmet.eu

LITERATURA

- [1] The Fluke Calibration 5560A, 5550A, and 5540A High Performance Multi-Product Calibrators, Technical data, Fluke Calibration, USA, 05/2022
- [2] 4000 Series Precision Multi Product Calibrator, Operation Manual, Transmille, V 1.00, Sep. 2015
- [3] 9010+ Multifunction Calibrator, User Manual, Meatest, Brno, EN, rev.14 FW ver.2.043, Jan. 2024
- [4] Krajewski M., Sienkowski S., Automatyzacja wzorcowania multimetrów i kalibratorów, PAK, 56 (2010), nr 11
- [5] Grzeczka G., Klebba M., Automated Calibration System for Digital Multimeters Not Equipped with a Communication Interface, Sensors 20(13):3650, June 2020
- [6] Donciu C., Temneanu M., Samoila A., Automated Video System for Measurement Instruments Test and Calibration, Available online: <https://www.researchgate.net/publication/238769825> (lipiec 2024), January 2007
- [7] TD1880 High-Precision Multi-Product Calibrator, Tunkia, Chiny. Available online: <https://www.salukitec.com/wp-content/uploads/2022/05/TD1880-High-Precision-Multiproduct-Calibrator.pdf> (lipiec 2024)
- [8] Andria G., Cavone G., Fabbiano L., Giaquinto N., Savino M., Automatic calibration system for digital instruments without built-in communication interface, XIX IMEKO World Congr. Fundam. Appl. Metrol, 2009
- [9] Martín-Rodríguez F., Vázquez-Fernández E., Dacal-Nieto A., Formella A., Álvarez-Valado V., González-Jorge H., Digital Instrumentation Calibration Using Computer Vision, In Conference: Image Analysis and Recognition, 7th International Conference, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, Vol. 6112 (2010)
- [10] Chmielińska J., Jakubowski J., Application of Matlab for automatic reading of analogue measuring instruments, Przegląd Elektrotechniczny, 92 (2016), nr 11, 95-98
- [11] Pocięcha D., Żyłka P., The histogram-enhanced Hough transform applied to automated readout of analogue gauge meters using digital image processing, Measurement Automation Monitoring, 61 (2015), no. 11, 507-511