

MIKROPROCESOROWY, DWUKANAŁOWY KILOWOLTOMIERZ NAPIĘCIA STAŁEGO

Paweł ZYDRON, Damian PALA, Michał BONK

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel: 12 6172835 e-mail: pzydron@agh.edu.pl, mail@damianpala.com, bonkm@agh.edu.pl

Streszczenie: W laboratorium wysokich napięć zachodzi potrzeba wykonywania pomiarów różnych rodzajów napięć ze źródeł o różnorodnych konfiguracjach układowych (jedno i wielofazowe, symetryczne, niesymetryczne). Artykuł przedstawia opis pracy projektowo-konstrukcyjnej obejmującej wykonanie 2-kanałowego miernika wysokiego napięcia stałego, zbudowanego z zastosowaniem dedykowanego kontrolera mikroprocesorowego, zwiększającego funkcjonalność przyrządu. Część wysokonapięciowa miernika została zbudowana w oparciu o dwa dzielniki rezystancyjne o dużej dokładności i stabilności temperaturowej. W artykule przedstawiono zarówno założenia i rozwiązania konstrukcyjne wykonanego kilowoltomierza różnicowego jak również wyniki jego badań przeprowadzonych w Laboratorium Wysokich Napięć AGH, a dotyczących podstawowych parametrów technicznych tego przyrządu pomiarowego.

Słowa kluczowe: wysokie napięcie stałe, kilowoltomierz różnicowy, sterownik mikroprocesorowy.

1. WPROWADZENIE

W badawczych laboratoriach wysokich napięć występuje stała potrzeba wykonywania wiarygodnych pomiarów różnego rodzaju napięć: stałych, przemiennych, impulsowych, kombinowanych, wytwarzanych przez źródła o różnych konfiguracjach układowych: jedno-/wielofazowych, doziemnych/międzyfazowych, symetrycznych/niesymetrycznych. Taka różnorodność napięć i układów jest powodowana potrzebą jak najbardziej wiernego odtworzenia w warunkach laboratoryjnych narażeń napięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych, pracujących w różnych, niekiedy bardzo specyficznych, warunkach eksploatacyjnych. Pewna grupa pomiarów dotyczy badań wykonywanych rutynowo, na przykład podczas prób napięciowych układów izolacyjnych wykonywanych w oparciu o zalecenia odpowiednich norm przedmiotowych. W przypadku prowadzenia prac badawczych i rozwojowych, dotyczących badań właściwości nowych materiałów lub konstrukcji układów izolacyjnych wymagania dotyczące pomiarów mogą mieć charakter niestandardowy, znacznie odbiegający od pomiarów typowych.

Do pomiarów wysokich napięć, ze względu na ich wartość, stosuje się metody charakterystyczne dla techniki wysokich napięć, np. metody iskiernikowe, przekładnikowe, z dzielnikami różnych typów (rezystancyjnymi, pojemno-

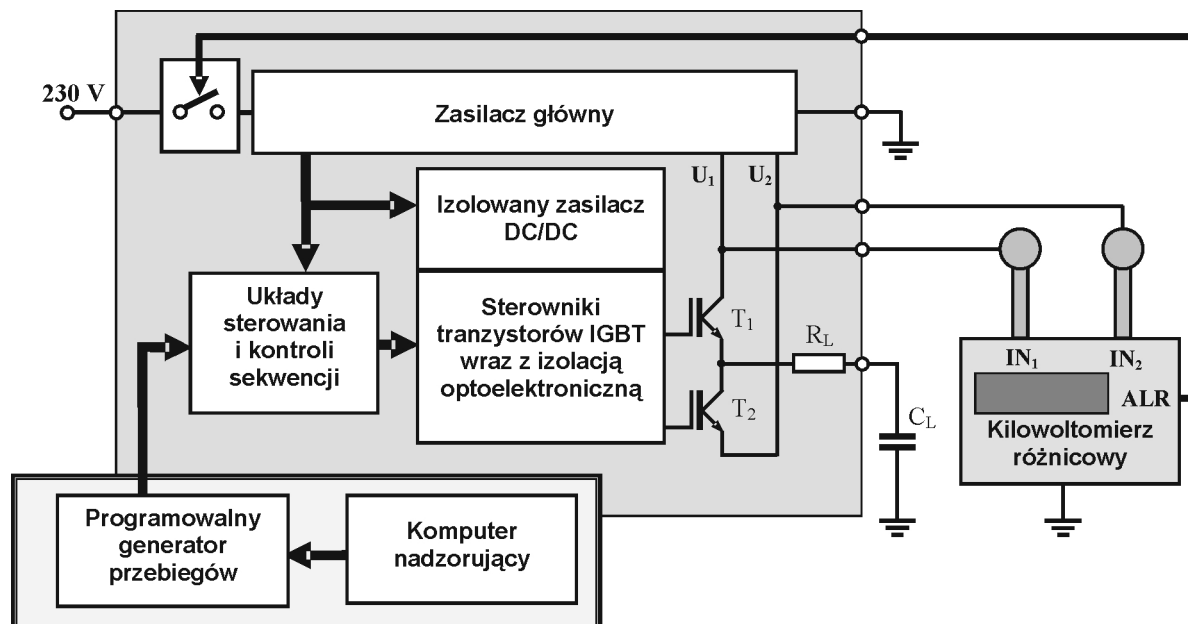
ściowymi), uwzględniające przede wszystkim rodzaj mierzonego napięcia. Metody te oraz wymagania ich dotyczące są szczegółowo opisywane w licznych podręcznikach i monografiach z zakresu techniki i diagnostyki wysokonapięciowej [1-3] oraz normach krajowych i międzynarodowych [4-5].

Artykuł opisuje projekt i wykonanie 2-kanałowego kilowoltomierza napięcia stałego przeznaczonego do kontroli napięć stałych *DC* zasilających układ laboratoryjnego energoelektronicznego modulatora napięć typu *PWM* (*Pulse Width Modulation*) (rys. 1), służącego badaniom układów izolacyjnych. Kilowoltomierz ma za zadanie mierzyć wartości dwóch napięć stałych zasilających modulator, wyznaczać ich różnicę oraz w przypadku przekroczenia zadanej przez operatora wartości granicznej zainicjować operację wyłączenia zasilania układu.



Rys. 1. Przykładowy, energoelektroniczny modulator napięć typu *PWM*, dla którego zaprojektowano opisany w artykule 2-kanałowy kilowoltomierz napięcia stałego

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy przykładowego układu generacji napięć *PWM* wraz z zaprojektowanym kilowoltomierzem. Przystępując do realizacji zadania określono podstawowy zestaw wymagań, które powinien spełniać kilowoltomierz, dotyczących zakresu wartości napięć mierzonych, dokładności pomiaru, sposobu wizualizacji wyników oraz programowania nastaw napięć granicznych.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy przykładowego układu generacji napięć PWM wraz z projektowanym kilowoltmierzem

Zaprojektowany kilowoltmierz 2-kanalowy powinien mierzyć napięcia: U_1 podawane na wejście IN_1 oraz U_2 podawane na wejście IN_2 i wyznaczać ich różnicę. Napięcie U_1 jest dodatnie i jeśli napięcie $U_2 = -U_1$ wówczas modulator jest zasilany napięciem symetrycznym względem masy o wartości różnicowej równej $2U_1$. Przekroczenie dopuszczalnej wartości różnicowej powoduje aktywowanie sygnału alarmowego ALR, co skutkuje rozłączeniem stycznika, przez który podawane jest napięcie sieciowe 230 V, zasilające cały układ. Pojemność C_L reprezentuje pojemność badanego układu izolacyjnego, a rezystor R_L ograniczenie wartości prądu jej ładowania. Wysokonapięciowe tranzystory IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) dużej mocy T_1 i T_2 pełnią funkcję łączników sterowanych odpowiedzialnych za wytworzenie odpowiedniej, modulowanej sekwencji napięć PWM, zadawanej z zewnętrznego programowanego generatora przebiegów.

2. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE I KONSTRUKCJA KILOWOLTMIERZA

Przed rozpoczęciem prac projektowych określono zestaw wymagań dotyczących właściwości i parametrów technicznych kilowoltmierz:

- zakres pomiarowy: nie mniejszy niż $\pm 12\sqrt{2}$ kV,
- krok nastawy wartości napięcia granicznego oraz rozdzielczość wyświetlacza LCD: 100 V,
- rozdzielczość pomiaru przetwornika A/C: nie mniej niż 10 bitów dla pełnego zakresu pomiarowego, co odpowiada wartości ok. 33 V/bit,
- liczba kanałów pomiarowych: 2 (IN_1 i IN_2),
- próbkowanie: 8000 próbek/s (4000 próbek/s w kanale),
- wyjście dwustanowe: NC/NO,
- mikroprocesorowy kontroler,
- duży, czytelny wyświetlacz,
- możliwość pomiaru napięć stałych w kanałach IN_1/IN_2 oraz obliczenia dla nich wartości różnicowej,
- dodatkowo, jako możliwa do realizacji opcja, pomiar napięć przemiennych w obu kanałach,
- uwzględnienie przy projektowaniu części wysokonapięciowej występujących zjawisk polowych.

Dla spełnienia wyżej wymienionych wymagań urządzenie zostało zaprojektowane i wykonane w oparciu o mikrokontroler ATmega32. Uzasadnieniem dla takiego wyboru jednostki sterującej są parametry techniczne mikrokontrolera, pozwalające spełnić wymagania określone w założeniach projektowych. Mikrokontroler ATmega32 posiada: wbudowany przetwornik analogowo-cyfrowy, interfejs SPI (*Serial Peripheral Interface*) oraz wydajność obliczeniową wystarczającą dla realizacji zadań wykonywanych przez zaprojektowany kilowoltmierz [6]. Dodatkowo, uwzględniono również czynnik ekonomiczny tzn. niską cenę i dostępność tego układu na rynku.

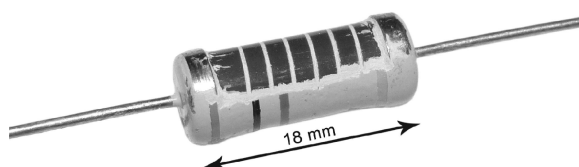
Każdy kilowoltmierz powinien wizualizować mierzoną wartość napięcia, w sposób umożliwiający jej łatwy odczyt. W opisanym urządzeniu zastosowano czytelny wyświetlacz typu LED (*Light-Emitting Diode*), pozwalający na równoczesne wyświetlanie dwóch napięć, z planowaną rozdzielczością 0,1 kV. Niezależny sterownik wyświetlacza, odciążający główny procesor od wykonywania dodatkowych operacji, pracuje w oparciu o mikrokontroler ATmega8 [7]. Komunikacja podstawowego modułu miernika z wyświetlaczem odbywa się poprzez interfejs standardu SPI.

Dwa niezależnie mierzone sygnały wysokonapięciowe, są podawane na wysokonapięciowe dzielniki rezystancyjne, których dokładność i stabilność ma zasadnicze znaczenie dla niepewności pomiaru napięcia. Ich zadaniem jest obniżenie wartości mierzonych napięć do wartości odpowiadających zakresowi napięcia akceptowanego przez układy wstępnego przetwarzania sygnału, z których każdy zawiera wtórnik napięciowy i wzmacniacz operacyjny realizujący m.in. funkcję przesuwania poziomu sygnału. Następnie sygnały napięciowe są multipleksowane na wejście przetwornika A/C mikrokontrolera, gdzie odbywa się operacja próbkowania i konwersji wartości analogowej napięcia na wartość cyfrową dla 8000 próbek. Mikrokontroler przetwarza uzyskane dane cyfrowe, uwzględniając parametry toru pomiarowego, a końcowy wynik jest wysyłany poprzez interfejs SPI do modułu wyświetlacza LED.

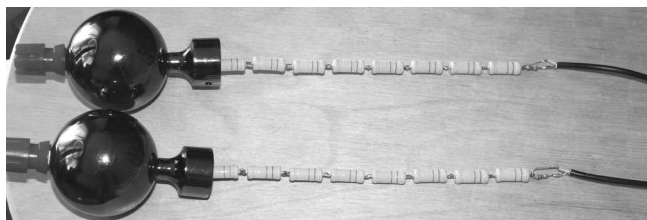
Dla realizacji planowanej funkcji dodatkowej urządzenie wyposażono w ręcznie nastawiany cyfrowy zadajnik maksymalnej dopuszczalnej różnicy napięć wejściowych oraz dwustanowe wyjście przekaźnikowe.

Elementy te pozwalają na realizację funkcji zabezpieczenia przed zbyt dużą wartością różnicy napięć podawanych na układ wysokonapięciowego modulatora napięcia.

Jednymi z najważniejszych elementów miernika są dwa wykonane dla niego wysokonapięciowe dzielniki napięcia. Ich zadaniem jest obniżanie wysokich napięć, podawanych na wejścia IN_1 i IN_2 , do wartości nie większych niż 1,25 V, co odpowiada zakresowi wejściowemu przetwornika A/C mikrokontrolera ATmega32. Każdy z dzielników składa się z górnej gałęzi rezystancyjnej (wysokonapięciowej) oraz rezystancji dolnej. Gałąź wysokonapięciową stanowi 8 połączonych szeregowo rezystorów typu VR68 (rys. 3), selekcjonowanych spośród rezystorów o tolerancji $\pm 1\%$ z temperaturowym współczynnikiem rezystancji $TCR \leq 200$ ppm/K [8]. Rezystancję dolną stanowi precyzyjny, wysokostabilny rezystor typu RCMA (tolerancja $\pm 0,2\%$, $TCR \leq \pm 15$ ppm/K) [9]. Rezystancja wejściowa obu dzielników napięcia jest równa 37,6 M Ω , a całkowita długość jednego wynosi ok. 40 cm (rys. 4). Doprowadzenia wysokonapięciowe do łańcuchów rezystorowych wykonano z metalowych kul wyposażonych w zaciski laboratoryjne. Takie rozwiązanie ma za zadanie odpowiednio ukształtować rozkład i obniżyć wartość maksymalną natężenia pola elektrycznego w otoczeniu zacisków, co pozwala wyeliminować pojawianie się wyładowań ulotowych.



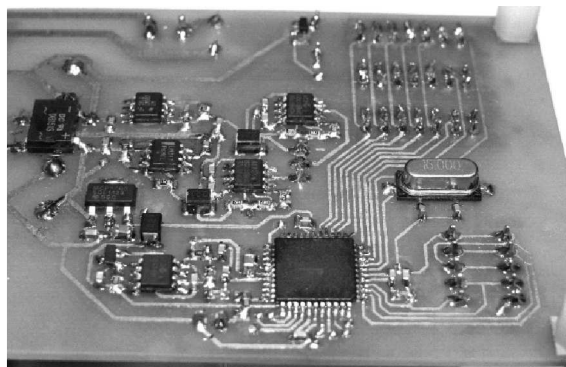
Rys. 3. Rezystor wysokonapięciowy typu VR68



Rys.4. Łańcuchy rezystorowe wysokonapięciowych dzielników napięcia zastosowanych w kilowoltmierzu

Jak podano, podstawowym układem elektronicznym zastosowanym w kilowoltmierzu jest mikrokontroler ATmega32, któremu towarzyszą niezbędne dla poprawnego funkcjonowania przyrządu układy analogowe odpowiedzialne za kondycjonowanie sygnałów mierzonych (rys. 5). Wraz z nimi na jednej płytce drukowanej umieszczono również transformator zasilający oraz układy filtracji i stabilizacji napięcia. Na osobnej płytce drukowanej zainstalowano moduł wyświetlacza LED wraz ze sterownikiem opartym na mikrokontrolerze ATmega8. Wyświetlacz został zaprojektowany w układzie 2 x 3, czyli 2 rzędy po 3 cyfry o wysokości 1,5 cala i regulowanej jasności świecenia w każdym. Wyświetlane są mierzone wartości napięć z obu kanałów lub obliczone napięcie różnicowe.

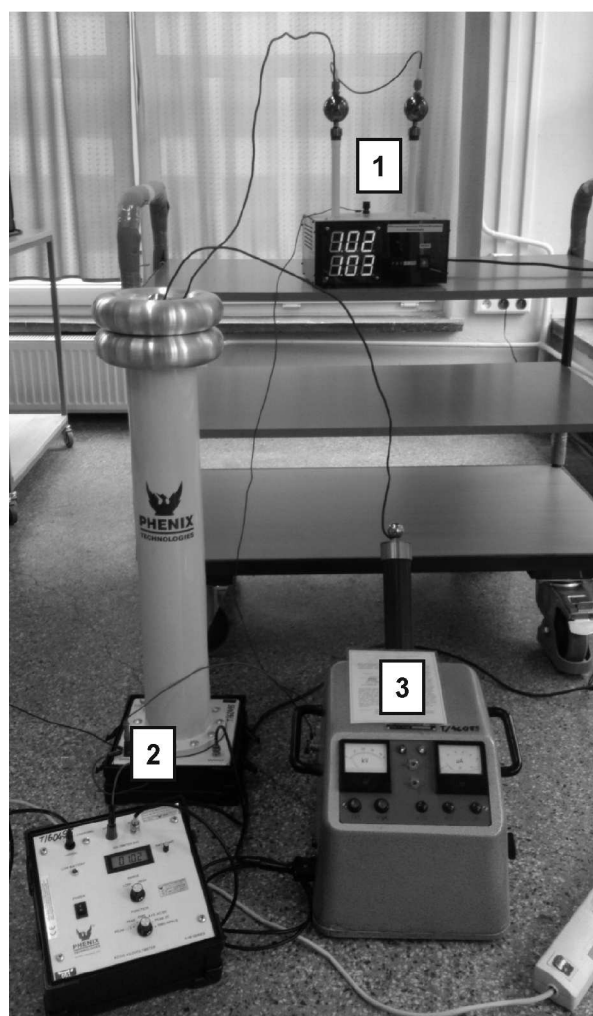
Opisane elementy i układy elektroniczne składające się na końcową wersję kilowoltmierza umieszczono w specjalnie przygotowanej obudowie, wykonanej z płyt wyciętych laserowo z czarnego szkła akrylowego.



Rys.5. Fragment płyty głównej miernika z mikrokontrolerem i układami kondycjonowania sygnałów analogowych

3. WYNIKI TESTÓW KILOWOLTMIERZA

Dla sprawdzenia poprawności konstrukcji kilowoltmierza wykonano testy laboratoryjne, podczas których jego wskazania odniesiono do wskazań przyjętego za miernik referencyjny kilowoltmierza KVM-200 firmy Phenix Technologies o dokładności $1\% \pm 3$ cyfry dla 10% do 100% pełnego zakresu i $2\% \pm 5$ cyfr dla 1% do 10% pełnego zakresu pomiarowego [10]. Napięcie stałe zastosowane w czasie testów było wytwarzane przez aparat do badania kabli typu ABK-45 (rys. 6).



Rys. 6. Testy kilowoltmierza: 1) badany kilowoltmierz dwukanałowy, 2) kilowoltmierz referencyjny KVM-200, 3) źródło napięcia stałego – aparat do badania kabli ABK-45

Wartość względnej różnicy wskazania δ_x w kanale IN_x względem wskazania kilowoltomierza referencyjnego obliczono zgodnie ze wzorem:

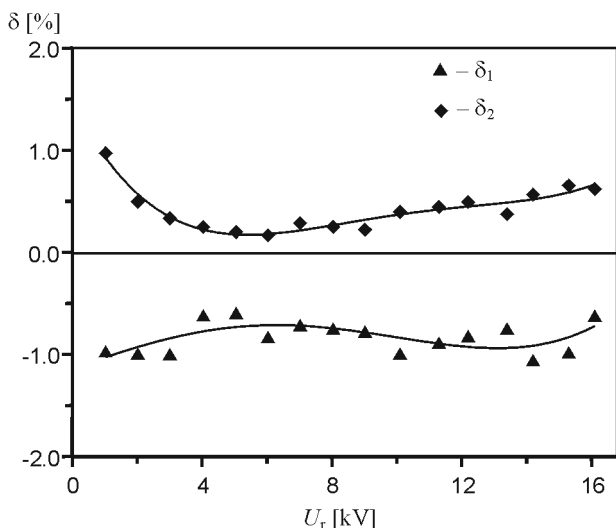
$$\delta_x = \frac{U_x - U_r}{U_r} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

gdzie:

U_x – wartość napięcia wskazana przez kilowoltomierz badany w kanale IN_x (średnia z 5 odczytów);

U_r – wartość napięcia wskazana przez kilowoltomierz referencyjny KVM-200 (średnia z 5 odczytów).

Wyniki pomiarów sprawdzających dla napięcia stałego, dla obu kanałów kilowoltomierza, przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Zależność względnej różnicy wskazania δ_x dla kanałów IN_1 (trójkąty) i IN_2 (kwadraty) dla napięć stałych do 16 kV

4. PODSUMOWANIE

Wykonany kilowoltomierz dzięki pomiarowi dwukanałowemu i wbudowanemu mikrokontrolerowi pozwala na pracę w kilku trybach. Zmiana trybu odbywa się poprzez wciśnięcie przycisku MODE, znajdującego się na płycie czołowej urządzenia. Podstawowymi trybami, wynikającymi z przeznaczenia urządzenia są:

- tryb I – dwukanałowy pomiar napięcia stałego,
- tryb II – wyznaczanie różnicy napięć stałych.

Podczas realizacji projektu zaimplementowano również prosty algorytm obliczania wartości skutecznych dla ciągów rejestrowanych próbek, który może być stosowany dla określania wartości napięć przemiennych w kanałach IN_1 i IN_2 (tryb III) oraz wyznaczania wartości ich różnicy (tryb

IV). Ze względu na to, że dla w pełni poprawnej pracy w tych trybach koniecznym jest dokonanie pewnych modyfikacji w układzie próbkowania sygnałów nie badano szczegółowo charakterystyk przyrządu dla tego typu napięć.

Testy kilowoltomierza, polegające na odniesieniu jego wskazań do wskazań kilowoltomierza KVM-200 (przyjętego za referencyjny) wykazały, że posiada on właściwości wystarczające dla planowanego zastosowania. Również układ detekcji zbyt dużej różnicy napięć poprawnie reaguje na celowo wymuszane przekroczenia.

Konstrukcja kilowoltomierza oparta na mikrokontrolerze ATmega32 pozwala na dalszą rozbudowę jego funkcji oraz np. wprowadzenie programowej korekty charakterystyk przetwarzania sygnałów, uwzględniających parametry torów analogowych. Wyjście przekaźnikowe wraz z cyfrowym zadajnikiem wartości granicznej napięcia umożliwiają sterowanie zewnętrznym urządzeniem i realizację funkcji zabezpieczenia modulatora napięcia.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Kuffel E., Zaaengl W. S., Kuffel J.: High voltage engineering – Fundamentals, ISBN 0-7506-3634-3, Newness Butterworth-Heinemann, 2000.
2. Ryan H.M. (ed.): High voltage engineering and testing 3rd ed., IET Press, London, 2013, ISBN 978-1-84919-263-7
3. Florkowska B.: Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych, Wyd. AGH, Kraków 2009, ISBN 978-83-7464-193-7.
4. International Standard IEC 60060-1, ed. 3, 2010-09: High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements
5. IEEE Std 4-2013: IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques
6. Nota aplikacyjna mikrokontrolera ATmega32 <http://www.atmel.com/images/doc2503.pdf>
7. Nota aplikacyjna mikrokontrolera ATmega8 http://www.atmel.com/images/atmel-2486-8-bit-avr-microcontroller-atmega8_1_datasheet.pdf
8. Nota katalogowa rezystorów firmy Vishay: High Ohmic/High Voltage Metal Glaze Leaded Resistors <http://www.vishay.com/docs/28734/28734.pdf>
9. Nota katalogowa rezystorów firmy Vishay: Molded Metal Film Very High Stability and Precision Resistors <http://www.vishay.com/docs/52009/rcma.pdf>
10. Kilovoltmeter KVM-200 – User’s manual, Phenix Technologies, 2006
11. Aparat do badania kabli ABK-45, Instrukcja obsługi.

MIKROPROCESSOR-CONTROLLED 2-CHANNEL DC-KILOVOLT METER

Key-words: DC high voltage, kilovoltmeter, microprocessor based controller

In the high voltage laboratory it is necessary to perform measurements of different kinds of voltages from sources with various configurations (single or multi-phase, symmetrical or asymmetrical, etc.). This paper presents a description of the work, whose main objective was to design and build the 2-channel DC-kilovoltmeter, built on the basis of a dedicated microprocessor controller ATmega32 that enhances the functionality of the instrument. High voltage part of the instrument was constructed based on two resistive dividers with high accuracy and temperature stability. The article presents both, the assumptions and design solutions of the 2-channel DC-kilovoltmeter as well as the results of the tests carried out in the AGH University of Science and Technology HV Laboratory, checking basic technical parameters of constructed instrument.