

Janusz TOKARSKI, Brunon SZADKOWSKI, Ryszard BOGACZ
Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej
Politechniki Śląskiej

MIERNIK NAPIĘCIA POWROTNEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono oryginalną konstrukcję miernika napięcia powrotnego, charakteryzującą się przede wszystkim skuteczną kompensacją upływności izolacyjnych oraz zastosowaniem mikroprocesorowego sterowania pomiarami i cyfrowej rejestracji wyników pomiarowych.

RECOVERY VOLTAGE METER

Summary. The paper presents a new construction of a recovery voltage meter which ensures the exceptionally effective compensation of insulation leakage conductances. A microprocessor used in the meter controls measurements. The measurement results are digitally recorded.

1. WPROWADZENIE

Pomiary napięć powrotnych stosowane są w diagnostyce układów izolacyjnych transformatorów i maszyn elektrycznych [2, 3, 7, 8], przy czym właściwości diagnostyczne takich pomiarów nie są jeszcze całkowicie poznane [7, 9, 10], a oferta rynkowa odpowiednich przyrządów pomiarowych jest bardzo skromna i nieatrakcyjna cenowo. Nieznane jeszcze możliwości metody pomiarowej oraz niewystarczająca baza sprzętowa są powodem dużego zainteresowania pomiarami napięć powrotnych różnych ośrodków badawczych, służb zajmujących się diagnostyką izolacji oraz konstruktorów przyrządów pomiarowych.

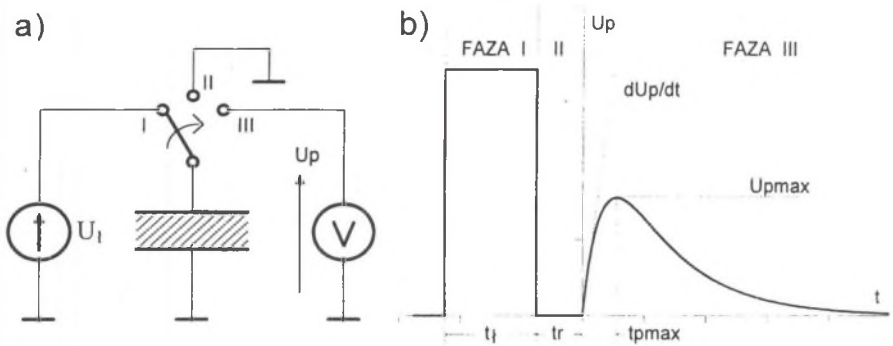
Proces pomiaru napięcia powrotnego składa się z trzech faz. Dwie pierwsze fazy stanowią przygotowanie do pomiaru, warunkujące wystąpienie napięcia powrotnego, natomiast trzecia faza - to właściwy pomiar [1, 3, 5, 8, 9, 10]. Przebieg poszczególnych faz jest następujący (rys.1a):

I - ładowanie badanej próbki izolacji napięciem stałym U_1 (o wartości setek woltów lub wyższym), przez ściśle określony czas ładowania t_1 ,

II - rozładowywanie próbki w czasie t_r (w najprostszym przypadku jest to zwarcie elektrod badanej próbki), również przez ściśle określony czas rozładowania t_r ,

III - pomiar (rejestracja) napięcia powrotnego U_p (na rozwartych zaciskach badanej próbki), trwający na tyle długo, aby możliwe było zaobserwowanie maksimum tego napięcia.

Typową charakterystykę napięcia powrotnego U_p przedstawiono na rys.1b [1, 6, 8, 10].



Rys.1. Schemat procesu pomiaru napięcia powrotnego: (a) – schemat ideowy układu do pomiaru napięcia powrotnego U_p , (b) – typowa charakterystyka napięcia powrotnego w funkcji czasu t

Fig.1. Diagram of the recovery voltage measuring process: (a) – schematic diagram of the circuit for recovery voltage U_p measurement, (b) – typical waveform of the recovery voltage

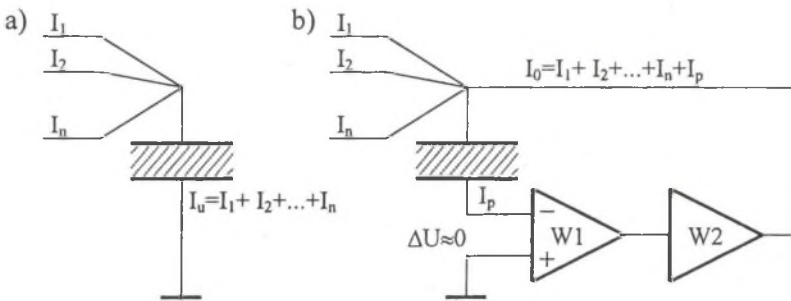
Napięcie powrotne początkowo narasta, następnie osiąga maksimum i w końcu maleje do zera. Najbardziej interesujące z punktu widzenia diagnostyki izolacji parametry to: maksymalna wartość napięcia powrotnego U_{pmax} , czas osiągnięcia maksimum t_{pmax} oraz początkowa szybkość narastania napięcia powrotnego dU_p/dt (dla $t = 0$). Na ogół wymaga się przeprowadzenia całej serii pomiarów napięcia powrotnego dla czasów ładowania t_l zmieniających się w granicach od kilkudziesięciu milisekund do kilku tysięcy sekund [1, 2, 3, 6, 7, 8]. W celu przeprowadzenia takiej serii pomiarów w rozsądnych granicach czasowych, przyjmuje się wykładniczy wzrost czasu t_l w każdym kolejnym pomiarze. Zbiór wyników z całej serii pomiarów pozwala wyznaczyć między innymi tzw. widmo polaryzacji układu izolacji, zawierające informacje o stanie i jakości izolacji [8, 9].

Poprawny pomiar napięcia powrotnego musi odbywać się w układzie całkowicie izolowanym, bez ucieczki prądu na zewnątrz badanego układu izolacji. Klasyczny układ pomiarowy (rys.1a) [1, 3, 5, 6], zawierający źródło napięcia U_1 , przełącznik oraz element pomiarowy, stwarza bardzo duże trudności konstrukcyjne, polegające przede wszystkim na konieczności

zapewnienia, aby prąd upływu był na poziomie wielokrotnie niższym niż własny prąd badanej izolacji. Wymagało to stosowania trudno dostępnych i bardzo drogich, wysoko-napięciowych elementów elektronicznych.

W pracy [10] zaproponowano nową koncepcję układu do pomiaru napięcia powrotnego, w którym uzyskano skuteczną kompensację prądów upływu. Działanie odpowiedniego obwodu kompensacyjnego polega na doprowadzeniu do wysokonapięciowej elektrody badanej próbki izolacji dodatkowego prądu, kompensującego wszystkie prądy upływu (zarówno od strony źródła zasilania, jak i przełączników oraz elementu pomiarowego). Zastosowanie wzmacniacza operacyjnego z zamkniętą pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego zapewnia całkowicie automatyczne działanie kompensacji.

Ideę nowego rozwiązania układu pomiarowego (kompensacji prądów upływu) przedstawiono na rys.2.

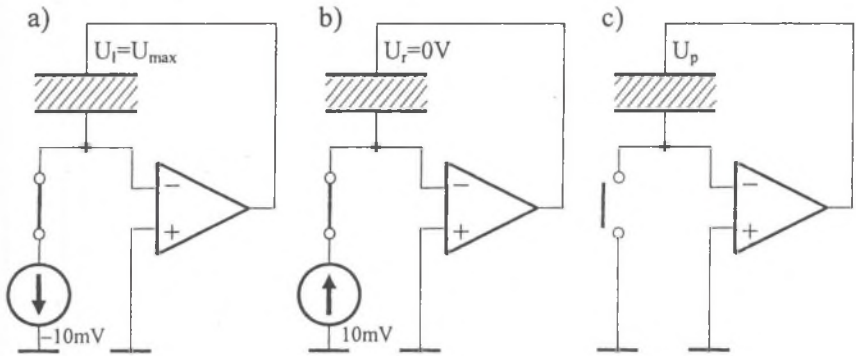


Rys.2. Koncepcja kompensowania prądów upływu wysokopotencjałowej elektrody badanej próbki izolacji: a) – układ bez kompensacji, b) – układ z kompensacją. (I_u – suma prądów upływu, I_p – prąd polaryzujący wejście wzmacniacza, I_o – prąd wyjściowy wzmacniacza, W1 – niskonapięciowy wzmacniacz o ekstremalnie małym prądzie polaryzacji, W2 – wysokonapięciowy stopień wyjściowy wzmacniacza)

Fig.2. Idea of compensating leakage currents of the high-voltage electrode of the tested sample: a) – the circuit without compensation, b) – the circuit with compensation. (I_u – the sum of leakage currents, I_p – the current polarizing the amplifier input, I_o – the amplifier output current, W1 – the low-voltage amplifier with extremely small polarization current, W2 – the high-voltage output stage of the amplifier)

Przykładową realizację poszczególnych faz pomiaru napięcia powrotnego z uwzględnieniem koncepcji podanej na rys.2 przedstawiono na rys.3. Ładowanie i rozładowanie odbywa się w układzie z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego, przy czym ładowanie odbywa się przez wymuszenie na wysokonapięciowym wyjściu wzmacniacza maksymalnej wartości napięcia, uzyskanej w wyniku przesterowania niewielkim napięciem ujemnym (- 10 mV). Natomiast rozładowanie odbywa się przez wymuszenie na wyjściu wzmacniacza

minimalnej wartości napięcia (równej potencjałowi masy), uzyskanej w wyniku przesterowania niewielkim napięciem dodatnim (10 mV). W fazie trzeciej następuje włączenie badanej próbki izolacji w obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego poprzez rozwarcie wyłącznika łączącego próbkę z masą. Wówczas następuje skompensowanie wszystkich prądów upływu poszczególnych elementów przyłączonych do wysokopotencjałowej elektrody badanej próbki izolacji.



Rys.3. Fazy pomiaru napięcia powrotnego: (a) ładowanie, (b) rozładowanie, (c) pomiar
Fig.3. Stages of recovery voltage measurement: (a) charging, (b) discharging, (c) measurement

2. OPIS KONSTRUKCJI MIERNIKA

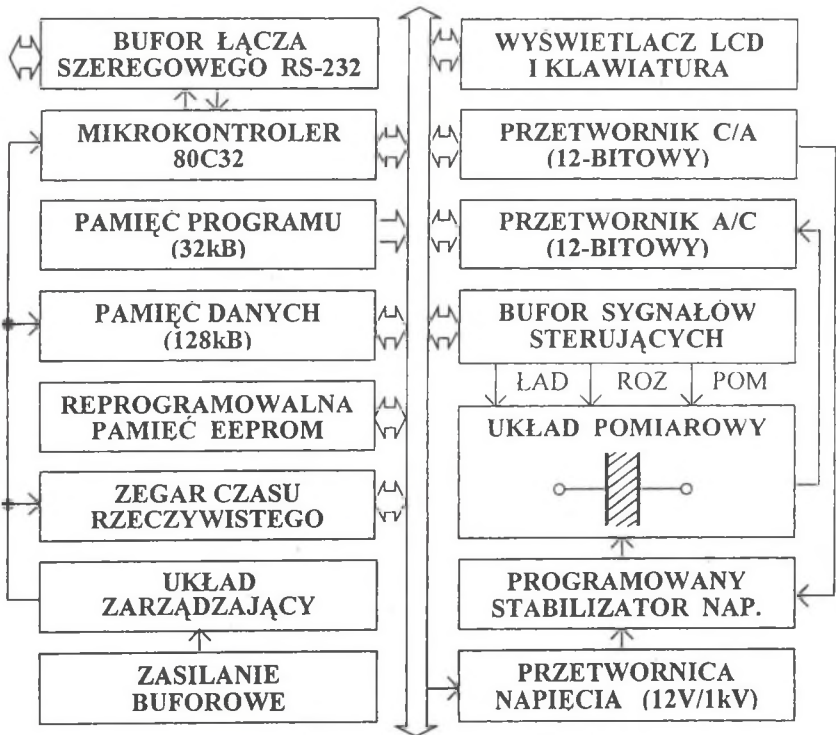
Opisaną w p.1 (oraz w pracy [10]) koncepcję rozwiązania układu pomiarowego wykorzystano w nowo opracowanej, cyfrowej konstrukcji miernika napięcia powrotnego. Odpowiedni schemat blokowy wykonanego miernika przedstawiono na rys.4.

W celu umożliwienia realizacji szerszego zakresu badań, zdecydowano się nadać miernikowi cechy rejestratora, umożliwiającego oprócz pamiętania najważniejszych wyników pomiarowych, również pełną, cyfrową rejestrację wybranych charakterystyk czasowych napięcia powrotnego. Opcja ta zdeterminowała strukturę mikroprocesorowej części sterującej miernika, zawierającej odpowiednio dużą pojemność pamięci danych, zegar czasu rzeczywistego (umożliwiający lokalizację przeprowadzonej rejestracji w czasie) oraz układ buforowego zasilania - podtrzymujący zawartość pamięci i pracę zegara po wyłączeniu zasilania.

Podstawowym elementem części sterującej miernika jest mikrokontroler typu 80C32, należący do intelowskiej rodziny MCS51. Program mikrokontrolera umieszczono w pamięci trwałej EPROM o pojemności 32 kB. Do przechowywania współczynników korekcyjnych, stałych parametrów i ewentualnych poprawek wykorzystano reprogramowalną pamięć trwałą

EEPROM o niewielkiej pojemności równej 256 B. Pamięć danych o pojemności przekraczającej objętość przestrzeni adresowej mikrokontrolera podzielono z konieczności na cztery przełączalne banki po 32 kB każdy. Pamięć ta może pomieścić ponad 50 tysięcy pojedynczych wyników pomiarowych, pogrupowanych w serie zaopatrzone w dodatkowe informacje, zawierające nastawione dla danej serii wartości parametrów, datę i czas jej przeprowadzenia oraz ewentualny komentarz. Datę i czas odmierza kwarcowy zegar czasu rzeczywistego typu RTC72421A, połączony bezpośrednio z magistralą mikrokontrolera. Pracę zegara po wyłączeniu zasilania podtrzymuje akumulatorem układ zasilania buforowego, umożliwiając również długoczasowe podtrzymanie zawartości pamięci danych. Układ zarządzający blokuje dostęp do zegara i pamięci danych w czasie włączania i wyłączenia zasilania głównego, chroniąc je przed przypadkową zmianą zawartości, w warunkach silnego zakłócenia towarzyszącego włączaniu i wyłączeniu.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów (rejestracji) mogą być odczytane za pomocą komputera, po uprzednim przesłaniu ich łączem szeregowym RS232C. Do utworzenia interfejsu szeregowego w mierniku wykorzystano port szeregowy mikrokontrolera, oddzielony od zewnętrznych linii sygnałowych buforem z optoizolacją, zapewniającą bezpieczne połączenie z komputerem w każdych warunkach.



Rys.4. Schemat blokowy miernika napięcia powrotnego
Fig.4. Block diagram of the recovery voltage meter

Układ komunikacji przyrządu z operatorem zawiera cztery klawisze funkcyjne oraz alfanumeryczny wyświetlacz LCD z podświetlaniem ekranu. Wyświetlacz umożliwia wyświetlenie dwóch wierszy po 16 znaków alfanumerycznych. Górny wiersz wyświetla zawsze informację o stanie miernika lub aktualnie wybranej opcji. Natomiast dolny wiersz umożliwia zmianę opcji, nastawę wartości parametrów pomiaru, odczyt wyników itd. Cztery klawisze o funkcjach: akceptacja, rezygnacja, zwiększanie lub przeglądanie w przód oraz zmniejszanie lub przeglądanie wstecz, umożliwiają ustawienie wszystkich parametrów i trybów pracy przyrządu. Towarzyszące ustawianiu informacje na wyświetlaczu sprawiają, że czynność ta jest bardzo prosta i nie wymaga specjalnego przygotowania.

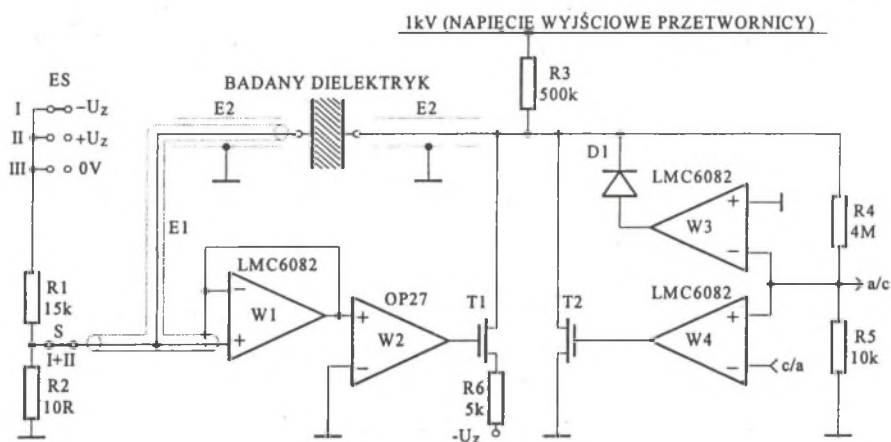
Ogniwiem pośredniczącym pomiędzy mikroprocesorową częścią sterującą a układem pomiarowym są dwa 12-bitowe przetworniki: analogowo-cyfrowy typu MAX187 [12] oraz cyfrowo-analogowy typu MAX538 [13]. Szybki, kompensacyjny przetwornik a/c wraz z układem śledząco-pamiętającym i rezystancyjnym, pomiarowym dzielnikiem napięcia, zapewnia prawidłowe przetworzenie wartości mierzonego napięcia powrotnego na postać cyfrową. Przetwornik c/a, poprzez generację napięcia referencyjnego dla stabilizatora wysokiego napięcia, zapewnia nastawienie odpowiedniej wartości napięcia ładowania U_1 .

Bufory sygnałów cyfrowych dopasowują sygnały sterujące, wypracowane przez mikrokontroler, do poziomów wymaganych przez układ pomiarowy. Przetwornica wysokiego napięcia dostarcza niestabilizowanego napięcia o wartości około 1 kV i mocy wyjściowej około 3 W. Uruchamiana jest tylko na czas trwania pomiaru, ze względu na oszczędność mocy (przewidziano przenośną wersję przyrządu z zasilaniem akumulatorowym) i bezpieczeństwo. Również ze względów bezpieczeństwa, stan aktywny przetwornicy i wysokie napięcie na jej wyjściu sygnalizowane jest świeceniem ostrzegawczej diody elektroluminescencyjnej.

Blizszego omówienia wymaga przedstawiony na schemacie z rys.4 – blok „układ pomiarowy”, zintegrowany z programowanym stabilizatorem napięcia ładowania U_1 . Blok ten stanowi zasadniczy element części pomiarowej przyrządu. Odpowiedni schemat wspomnianego bloku układu pomiarowego przedstawiono na rys.5.

Wzmacniacze W1 i W2 oraz tranzystor T1 stanowią łącznie wzmacniacz regulujący potencjał wysokonapięciowej elektrody badanego systemu izolacji. Wzmacniacz W1 (LMC6082), połączony w układzie wtórnika napięciowego, zapewnia ekstremalnie małą wartość prądu polaryzacji (10 fA w temperaturze pokojowej [11]). Ponadto sygnał wyjściowy tego wzmacniacza różniący się od potencjału wejścia tylko o wartość napięcia niezrównoważenia (maksymalnie 150 μ V w temperaturze pokojowej [11]), służy do polaryzacji ekranu E1, otaczającego niskonapięciowy węzeł badanej próbki. Wzmacniacz operacyjny W2 (OP27) stanowi właściwe ogniwo wzmacniacza regulacyjnego. Wzmacniacz ten, podobnie jak W1, należy do grupy wzmacniaczy precyzyjnych, posiadających duże wzmocnienie przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, małą wartość napięcia niezrównoważenia oraz minimalny dryft temperaturowy. Suma napięć niezrównoważenia wzmacniaczy W1 i W2 oraz napięcia steru-

jącego stanowi różnicę napięć pomiędzy elektrodą niskonapięciową a potencjałem masy i w przypadku zastosowanych wzmacniaczy nie przekracza dziesiątych części miliwolta. Wykonapięciowe wyjście wzmacniacza zrealizowano w postaci pojedynczego, wysokonapięciowego tranzystora polowego mocy T1. Ten sam tranzystor całkowicie otwarty umożliwia podanie napięcia ładowania U_1 w pierwszej fazie pomiaru i całkowicie zwarty umożliwia rozładowanie badanej próbki dielektryka w fazie rozładowania. Rezystor R6 w obwodzie źródła tranzystora T1 ogranicza jego wzmocnienie napięciowe w stanie aktywnym i jednocześnie ogranicza prąd rozładowania do wartości 2 mA w przypadku pełnego wysterowania.



Rys.5. Uproszczony schemat układu pomiarowego (por. rys.4 - blok „układ pomiarowy”)
Fig.5. Simplified schematic diagram of the measuring circuit (compare Fig.4 – the block „układ pomiarowy”)

Jako przełącznik S wykorzystano przekaźnik kontaktronowy. Obydwa styki otwartego w fazie trzeciej kontaktronu są na zerowym potencjale i nawet niezbyt duża wartość rezystancji pomiędzy stykami powoduje znikomo mały prąd upływu. Przełącznik ES jest elektronicznym kluczem podającym na wejście wzmacniacza regulacyjnego niewielkie (około 10 mV) napięcie ujemne lub dodatnie, odpowiednio w fazie ładowania i rozładowania, powodując odcięcie lub maksymalne wysterowanie tranzystora T1.

Przyjmując maksymalny skok napięcia na wyjściu wzmacniacza T2 (równy około 10 V) i maksymalny skok na wyjściu tranzystora wysokonapięciowego (równy około 1 kV), możemy oszacować minimalne wzmocnienie napięciowe stopnia końcowego na około 100 V/V. Zatem następuje stukrotne zwiększenie wzmocnienia w układzie regulacji (przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego).

Ponieważ kompensacja częstotliwościowa wzmacniacza W2 uwzględnia tylko jego własne wzmocnienie, to stukrotne zwiększenie tego wzmocnienia może być przyczyną nie-

stabilności i zmusza do dodatkowej kompensacji częstotliwościowej zarówno wzmacniacza W2, jak i tranzystora polowego T1. Maksymalne i minimalne napięcia na wysokonapięciowym wyjściu wzmacniacza są nieprecyzyjnie określone. Wartość napięcia maksymalnego zależy wprost od wartości niestabilizowanego napięcia wyjściowego z przetwornicy oraz od podziału napięcia dzielnikiem R3 oraz $R4 + R5$. Wartość napięcia minimalnego w głównej mierze zależy od napięcia ujemnego U_S i stosunku rezystancji R3 do R6. Z tego względu równolegle do wyjścia wysokonapięciowego wzmacniacza przyłączono dwa układy, precyzyjnie określające maksymalną i minimalną wartość napięcia.

Minimalna wartość napięcia powinna wynosić 0 V, co odpowiada zwarciu elektrod systemu izolacji w fazie rozładowania. Za ograniczenie napięcia na poziomie 0 V odpowiada układ złożony z wzmacniacza W3 oraz diody D1. Napięcie wysokonapięciowej elektrody, podzielone pomiarowym dzielnikiem rezystancyjnym R4 i R5, porównywane jest przez wzmacniacz W3 z potencjałem masy. Dopóki jest ono większe od zera, wysokonapięciowa dioda D1 spolaryzowana jest zaporowo i układ ogranicznika nie wykazuje żadnego wpływu na pozostałą część układu pomiarowego. Próba obniżenia potencjału wysokonapięciowego węzła poniżej zera spowoduje pojawienie się na wyjściu wzmacniacza W3 napięcia dodatniego, co z kolei spowoduje spolaryzowanie diody D1 w kierunku przewodzenia i ostatecznie – utrzymanie potencjału na poziomie potencjału masy.

Maksymalna wartość napięcia wysokopotencjałowej elektrody jest programowana napięciem wyjściowym przetwornika c/a. Wzmacniacz W4, wysokonapięciowy tranzystor T2 oraz dzielnik pomiarowy R4 i R5 stanowią układ precyzyjnego porównania wyjściowego napięcia przetwornika c/a i podzielonego dzielnikiem pomiarowym napięcia wysokopotencjałowej elektrody. Mniejsze od zadanego napięcie wysokopotencjałowej elektrody powoduje ujemne przesterowanie wzmacniacza U4, całkowite odcięcie tranzystora T2 i w konsekwencji brak wpływu ogranicznika na układ pomiarowy. Zwiększenie potencjału wysokonapięciowej elektrody do wartości zadanej powoduje wejście wzmacniacza W4 i tranzystora T2 w obszar aktywny i ostre ograniczenie dalszego wzrostu napięcia.

Sterowanie układem pomiarowym polega na nastawieniu odpowiedniej wartości napięcia ładowania U_l na przetworniku c/a, uruchomieniu przetwornicy wysokiego napięcia oraz na wygenerowaniu sygnałów sterujących kluczem elektronicznym ES i przekaźnikiem kontaktowym S. Zastosowanie w układzie elementu elektromechanicznego, jakim jest przekaźnik, bardzo pożądanego ze względu na wyjątkowo dużą rezystancję rozwartych styków, powoduje pewne opóźnienie jego zadziałania w stosunku do podanego sygnału sterującego. Zmiana stanu przekaźnika następuje w momencie rozpoczęcia fazy pomiaru (rozwarcie styków) i w momencie jej zakończenia (zwarcie styków). Opóźnienie zwarcia styków nie jest krytyczne, ponieważ odbywa się zawsze po zakończeniu pomiarów. Natomiast opóźnienie rozwarcia styków powoduje wydłużenie czasu rozładowania t_r o czas reakcji przekaźnika, którego wartość wynosi kilka milisekund. Dla najkrótszych czasów rozładowania jest to wartość znacząca i dlatego sygnał sterujący przekaźnikiem podawany jest z wyprzedzeniem uwzględniającym jego bezwładność.

3. WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWE I METROLOGICZNE MIERNIKA

Miernik napięcia powrotnego umożliwia wybór jednej z trzech podstawowych opcji, określających jego tryb pracy. Przyjęto następujące nazwy tych opcji:

- **PARAMETRY,**
- **POMIAR,**
- **TRANSMISJA.**

Opcja **PARAMETRY** umożliwia nastawienie (wybór) wartości różnych wielkości, określających warunki wykonania pomiaru, a więc umożliwia wstępne przygotowanie pomiaru. W tej opcji można nastawić wartości następujących wielkości:

- U_1 – wartość napięcia ładowania, w zakresie od 1 V do 800 V z rozdzielczością 1 V;
- t_1 – wartość czasu ładowania w dwóch podzakresach:
 - w sekundach od 0,02 s do 99,99 s z rozdzielczością 0,01 s,
 - w minutach od 0,01 min do 99,99 min z rozdzielczością 0,01 min;
- t_r – wartość czasu rozładowania w dwóch podzakresach:
 - w sekundach od 0,01 s do 99,99 s z rozdzielczością 0,01 s,
 - w minutach od 0,01 min do 99,99 min z rozdzielczością 0,01 min;
- $t_z : t_1$ – stosunek czasu zerowania t_z (stanowiącego czas pomiędzy zakończeniem jednego cyklu pomiarowego i rozpoczęciem nowego, niezbędny do powrotu badanej próbki dielektryka do stanu początkowego) do czasu ładowania t_1 w zakresie od 1,0 do 9,9 z rozdzielczością 0,1;
- $t_{n+1} : t_n$ – stosunek czasów ładowania w kolejnych pomiarach cyklu automatycznego w zakresie od 1,0 do 9,9 z rozdzielczością 0,1;
- N – ilość pomiarów w cyklu automatycznym w zakresie od 2 do 99.

W omawianej opcji **PARAMETRY** znajdują się również podopcje nastawiania daty (roku, miesiąca i dnia) oraz czasu (godziny, minuty i sekundy).

Opcja **POMIAR** umożliwia określenie sposobu przeprowadzenia pomiaru oraz sposobu rejestracji wyników poprzez wybór jednej z podopcji:

- **CYKL POJEDYNCZY,**
- **CYKL AUTOMATYCZNY**

Po wybraniu opcji **CYKL POJEDYNCZY**, miernik uruchamia kolejno: ładowanie zgodnie z zadanymi wartościami napięcia U_1 i czasu t_1 , rozładowanie zgodnie z zadaną wartością t_r oraz pomiar wartości chwilowych napięcia powrotnego U_p wraz z ich pełną rejestracją.

Cykl pojedynczy trwa aż do ręcznego zatrzymania. Zatrzymanie jest możliwe w każdej chwili od rozpoczęcia cyklu, również w fazie ładowania i rozładowania. Zatrzymanie powoduje przejście miernika do stanu zerowania (identycznego z fazą rozładowywania), trwającego aż do ponownego rozpoczęcia pomiarów w cyklu pojedynczym (lub automatycznym). W czasie trwania cyklu pojedynczego na wyświetlaczu wyświetlana jest na bieżąco wartość napięcia powrotnego U_p .

Po wybraniu opcji CYKL AUTOMATYCZNY miernik uruchamia kolejno: ładowanie zgodnie z zadanymi wartościami napięcia U_l i czasu t_l , rozładowanie zgodnie z zadaną wartością t_r i następnie pomiar wartości chwilowych napięcia powrotnego U_p wraz z ich pełną rejestracją. W trakcie pomiaru porównywane są kolejne wartości chwilowe aż do wykrycia maksymalnej wartości napięcia powrotnego U_{pmax} . Miernik rejestruje tę wartość napięcia oraz czas jej osiągnięcia. Pomiar wartości chwilowych napięcia powrotnego i rejestracja trwają dalej, aż do czasu, gdy wartość napięcia powrotnego spadnie do poziomu $0,9U_{pmax}$. W tym momencie rozpoczyna się zerowanie i trwa przez okres czasu t_z , wynikający z zadanej wartości stosunku $t_z : t_l$. Po zerowaniu zostaje automatycznie uruchomiony następny cykl pomiarowy o czasach ładowania, rozładowania i zerowania wynikających z zadanych wartości stosunków $t_{n+1} : t_n$ oraz $t_z : t_l$, przy czym równocześnie następuje śledzenie i rejestracja chwilowych wartości napięcia powrotnego oraz wykrywanie wartości maksymalnej. Po zerowaniu uruchomiony zostaje kolejny cykl pomiarowy i tak dalej, aż do wyczerpania zadanej liczby pomiarów N .

W cyklu automatycznym, podobnie jak w cyklu pojedynczym, może nastąpić ręczne zatrzymanie pomiaru w dowolnym momencie. Również w czasie trwania cyklu automatycznego na wyświetlaczu wyświetlana jest na bieżąco wartość napięcia powrotnego U_p .

Opcja **TRANSMISJA** uruchamia transfer szeregowy zgromadzonych w pamięci wyników rejestracji do sprzężonego z przyrządem komputera. Parametry transmisji są stałe i nie wymagają wcześniejszego ustawienia. Są one następujące:

- szybkość transmisji – 4800 bodów,
- liczba bitów w transmitowanym słowie – 8,
- kontrola parzystości – brak,
- liczba bitów stopu – 1.

W celu doświadczalnego zweryfikowania opracowanej konstrukcji miernika i sprawdzenia słuszności przyjętych założeń początkowych - wykonano pomiary wybranych jego parametrów. Uzyskano następujące wyniki:

- całkowity prąd upływu (w III fazie pomiaru) – mniejszy niż 1 pA,
- zakres pomiaru napięcia powrotnego – 1000 V,
- niepewność pomiaru napięcia powrotnego – mniejsza niż 0,1% zakresu pomiarowego,
- maksymalna częstotliwość próbkowania napięcia powrotnego – 10 kHz,
- niepewność nastawienia napięcia ładowania U_l : $\forall 0,5$ V,
- niepewność nastawienia czasu ładowania t_l : $\forall 0,01$ ms,
- niepewność nastawienia napięcia rozładowania U_r : $\forall 0,1$ V,
- niepewność nastawienia czasu rozładowania t_r : $\forall 0,3$ ms.

Ocenę całkowitego prądu upływu w III fazie pomiaru napięcia powrotnego wykonano pośrednio poprzez pomiar przyrostu napięcia na kondensatorze o znanej pojemności i znikomo małej upływności (użyto kondensatora polipropylenowego MKP 2,2 nF/1,5 kV).

Pomiary napięcia powrotnego wykonywano na złożonym modelu RC badanego dielektryka, z wykorzystaniem diod półprzewodnikowych jako elementów typu „R” [10].

LITERATURA

1. Gross B.: On Discharge Voltage and Return Voltage Curves for Absorptive Capacitors. *Physical Review*, vol. 62, nr 1, 15, 1942.
2. Vajda D.: Issledowanja powrzdienij izolacji. Tłum. z węg., wyd. Energija, Moskwa 1968.
3. Nemeth E.: Zerstörungsfreie Prüfung von Isolationen mit der Methode der Entlade und Rückspannungen. XI Internatinal Wiss. Koll. TH Illmenau 1966.
4. Pluciński M., Szadkowska T.: Badanie warstwowych materiałów izolacyjnych prądem stałym. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, 1967.
5. Pluciński M., Szadkowska T., Szadkowski B.: Układ do pomiaru napięć powrotnych. *Zesz. Nauk. Pol. Śl. ser. Elektryka*, z. 37, Gliwice 1973.
6. Szadkowska T.: Analiza metod pomiaru funkcji charakteryzującej wolnozmiennie polaryzacje dielektryków stałych. Rozprawa doktorska, Wyd. Elektryczny Politechniki Śląskiej, Gliwice 1975.
7. Bognar A., Kalocsai L., Csepes G., Nemeth E., Schmidt J.: Diagnostic Tests of High Voltage Oil-Paper Insulating Systems (in Particular Transformer Insulation) Using DC Dielectrometrics. CIGRE Session, report 15/33-08, 26 th August - 1 th September, 1990.
8. Schlag A. G.: The Recovery Voltage Method for Transformer Diagnosis. *Wyd. Tettex Instrument*, 1994/5.
9. Kuenen J. C., Meijer G. C.: Measurement of dielectric absorption of capacitors and analysis of its effects on VCO's. *IEEE Trans.on Instr. And Meas.*, V.45, no 1, Febr.1996.
10. Tokarski J., Szadkowska T., Szadkowski B.: Układ do pomiaru napięć powrotnych w dielektrykach. *Zesz. Nauk. Pol. Śl. ser. Elektryka*, z. 162, Gliwice 1998, s. 11-21.
11. National Semiconductor Corporation: LMC6082 Precision CMOS Dual Operational Amplifier. *Operational Amplifiers Databook - 1993 Edition*. s. od 1-824 do 1-833, USA 1992.
12. MAXIM: MAX187 - 5V, Low-Power, 12-Bit Serial ADCs. 1995 New Releases Data Book vol. IV, s. od 7-14 do 7-60, USA 1994.
13. MAXIM: MAX538 - 5V, Low-Power, Voltage-Output, 12-Bit Serial DACs. 1995 New Releases Data Book, vol. IV, s. od 9-39 do 9-52, USA 1994.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt Kuśmierk

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 czerwca 1999 r.

Abstract

Measurements of recovery voltages are used in diagnostic of transformer and electric machine insulation systems. There are three stages of the recovery voltage measurement process: a stage of charging the tested insulation sample with a dc voltage, a stage of discharging the sample and a stage of the recovery voltage measurement between the opened terminals of the tested sample. The recovery voltage measurement is correct when it is made in the circuit

insulated entirely so that there is no current leakage, which causes considerable constructional problems in the classical measuring system circuit and requires the use of expensive, high-voltage electronic elements.

A new idea of the circuit for recovery voltage measurement ensuring the effective compensation of the leakage currents is proposed in the paper. The principle of operation of the compensating circuit consists in applying an additional current to the high-voltage electrode, which is to compensate all the leakage currents due to the supply source, switches and the measuring element. An operational amplifier with negative feedback loop ensures fully automatic operation of the compensating circuit. The essential advantage of the proposed measuring circuit is decrease in number of complex, high-voltage elements.

The new idea of the measuring circuit is used for construction of a recovery voltage meter. The meter except for indicating and storing the most important measurement results makes it possible to record digitally the recovery voltage waveforms. The last type of operation determines the structure of the meter microprocessor controller, which contains the high capacity data memory, the real time clock and the battery backup switching for CMOS RAM and RTC. A simple keyboard with an alphanumeric display allows for input of the recording parameters. A high-voltage converter supplies the measuring circuit with a non-stabilized voltage of 1 kV value. The value of the measuring voltage is adjusted by means of a C/A converter, which together with an output transistor is a high-voltage stabilizer programmed in a digital way. The recovery voltage measurement is made by means of a fast successive approximation A/C converter.

The meter enables making and recording the single measuring cycle or the series of measurements (in an automatic way) consisting of many records of the recovery voltage for the charging and discharging times of the tested insulation sample rising exponentially. The most important operational properties of the meter are:

- programming of the measuring voltage value up to 800 V (1 V resolution),
- independent programming of the charging and discharging times within the range from 20 ms to 100 min,
- possibility of recording more than 65000 measurement results,
- possibility of the measurement results serial transfer to a computer in order to process digitally and visualize.