

# pomiary rezystancji izolacji w teorii i w praktyce

Tomasz Koczorowicz – TOMTRONIX

**Brytyjski MEGGER w 1889 r. jako pierwszy na świecie wyprodukował przyrządy do pomiaru rezystancji izolacji. Od tego czasu firma nieustannie rozwija ich produkcję, osiągając pozycję niekwestionowanego lidera. Obecnie MEGGER produkuje kilkadziesiąt różnych typów megaomomierzy do zastosowań m.in. w energetyce, telekomunikacji oraz branży elektrycznej. W artykule przedstawiono zagadnienia związane z pomiarem rezystancji izolacji. Część teoretyczną uzupełniono opisem możliwości praktycznych, jakie oferuje miernik Megger BM25. Przyrząd ten zdobył duże uznanie w środowisku energetycznym, uzyskując m.in. prestiżową europejską nagrodę „Manufacturing Industry Achievement” w kategorii elektroniczny wyrób roku.**

Kiedy w XIX w. zaczęto praktycznie wykorzystywać elektryczność w życiu codziennym i w przemyśle, nie zwracano większej uwagi na zagadnienia związane z izolacją elektryczną, ponieważ nie znano procedur, według których można byłoby weryfikować jej jakość. Nie sprzyjało to rozwojowi elektryczności. Firma Evershed & Vignoles Ltd. z Londynu (jedna z firm, która w połączeniu z innymi dała początek firmie MEGGER) jako pierwsza odkryła, że struktura izolacji traci swoje właściwości z upływem czasu i dlatego jest konieczne jej okresowe sprawdzanie.

Współcześnie, okresowe badania stanu izolacji są stałym elementem programu działań profilaktycznych w przedsiębiorstwie. Systematycznie wykonywane pomiary zapobiegają niebezpiecznym dla życia wypadkom, ograniczają koszty związane z naprawami, nie zrealizowaną produkcją, straconymi zyskami, itp. Konsekwentne wykonywanie pomiarów pomaga w wykryciu pogarszającego się stanu ochrony przeciwporażeniowej. Istnieje pięć podstawowych czynników mających wpływ na degradację izolacji: narażenia elektryczne i mechaniczne, agresja chemiczna, narażenia termiczne oraz zanieczyszczenia środowiska. W czasie normalnej eksploatacji izolacja starzeje się na

skutek ich oddziaływania. W niektórych przypadkach jednorazowe pomiary rezystancji izolacji są traktowane jako obiektywny wskaźnik jakości ochrony. Takie podejście jest właściwe wówczas, gdy podczas instalowania urządzeń jest sprawdzana zgodność z parametrami podanymi przez producenta. Dla eksploatowanych urządzeń najważniejszym wskaźnikiem są natomiast tendencje do zmian wartości parametrów zgromadzonych w wyniku systematycznych kontroli. Z tego powodu istotne jest archiwizowanie wyników badań oraz ich ocena z uwzględnieniem warunków, w jakich zostały wykonane.

## koncepcja pomiarów izolacji

Rezystancja izolacji może być wyznaczona prawem Ohma. Zgodnie z nim, mierzona rezystancja jest równa ilorazowi wartości – przyłożonego napięcia oraz płynącego prądu:

$$R = \frac{U}{I}$$

Aby uznać ocenę za rzetelną, należy dodatkowo uwzględnić dwa czynniki:

- charakter prądu płynącego wskroś izolacji i po jej powierzchni,

- czas, jaki upłynął od chwili przyłożenia napięcia.

Te czynniki są wzajemnie związane i znajdują odzwierciedlenie w uzyskanych wynikach.

Całkowity prąd płynący przez izolację jest sumą trzech prądów składowych (rys. 1). Należą do nich:

- **prąd ładowania pojemności**

Prąd ten początkowo jest duży, a następnie dąży do zera w miarę ładowania pojemności. Szybkość zanikania prądu zależy od wartości pojemności badanego obiektu. Duże obiekty z większą pojemnością, np. kable elektroenergetyczne, ładują się w dłuższym czasie. Izolacja ładuje się w ten sam sposób jak dielektryk w kondensatorze.

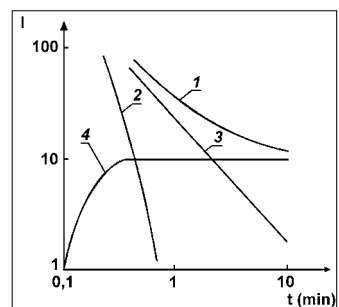
- **prąd absorpcji (polaryzacji)**

Prąd ten początkowo jest również duży, lecz zmniejsza się w znacznie wolniejszym tempie niż prąd ładowania pojemności. Jest wynikiem przemieszczania się ładunków oraz dipoli w izolacji pod wpływem pola elektrycznego. Dipole ustawiają się równolegle do linii zewnętrznego pola elektrycznego. Po wyłączeniu przyłożonego napięcia powracają do swoich pozycji spoczynkowych generując prąd reabsorpcji. Zjawisko absorpcji w dużej mierze jest powodowane wilgocią i zanieczyszczeniami w izolacji.

- **prąd przewodzenia lub upływowy**

Jest to mały, ustalony prąd o charakterze rezystancyjnym, płynący wzdłuż ścieżek przewodzących, z którego można wydzielić dwie składowe, tj. prąd płynący przez materiał izolacji oraz po powierzchni materiału izolacji. Prąd ten narasta szybko do pewnej stałej wartości i pozostaje niezmienny dla określonego napięcia probierczego. Zwiększenie prądu upływowego może być w przyszłości źródłem uszkodzeń. Prąd ten powinien być mierzony wtedy, kiedy kondensator reprezentujący pojemność izolacji jest naładowany, a zjawiska absorpcji ustaly.

Z wykresu przedstawionego na rysunku 1 można wyciągnąć wniosek, że wyniki pomiarów rezystancji izolacji są zmienne w czasie. Na



**Rys. 1** Prąd w izolacji podczas pomiaru: 1 – prąd całkowity, 2 – prąd ładowania pojemności, 3 – prąd absorpcji, 4 – prąd przewodzenia lub upływowy

ogół przez pierwsze sekundy po rozpoczęciu pomiaru jest rejestrowany głównie prąd pojemnościowy. Objawia się to charakterystycznym wzrostem wychylenia wskazówki na analogowej skali miernika izolacji. Prąd pojemnościowy zmniejsza się relatywnie szybko, po tym, jak badany obiekt się ładuje. Po upływie 1 min mierzony prąd jest kombinacją prądu polaryzacji i prądu upływowego. Prąd absorpcji maleje relatywnie wolniej w porównaniu z prądem ładowania pojemności. Wynika to z natury zjawisk fizycznych zachodzących w materiałach izolacyjnych. Dopiero po 10 min kontrolowany prąd ma charakter wyłącznie upływowy, chociaż ze względu na zjawisko polaryzacji okres ten czasami wydłuża się nawet do 30 min. Prawo Ohma ma teoretyczne zastosowanie po czasie nieskończenie długim.

### pomiar chwilowy izolacji (natychmiastowe rozpoznanie)

Jest to najprostszy, tradycyjny pomiar rezystancji izolacji, który umożliwia przeprowadzenie natychmiastowej kontroli jej stanu. W rezultacie badania uzyskuje się wartość rezystancji wyrażoną w MΩ. Próba jest wykonywana w ciągu krótkiego, ale określonego czasu, po upływie którego odczytywany jest wynik. Czas ten wynosi typowo 30 lub 60 s, co eliminuje wpływ prądu ładowania pojemności na pomiar. Niektóre mierniki firmy MEGGER (np. BM25) umożliwiają ustawienie czasu, po upływie którego pomiar kończy się automatycznie. Nie jest konieczne, aby wynik był wartością ustabilizowaną i maksymalną. Jeżeli ten sam okres obowiązuje dla każdego pomiaru, to jest porównywany analogiczny punkt na krzywej wzrastającej rezystancji. W przypadku pomiaru nowo zainstalowanego obiektu rezultaty muszą zostać porównane z minimalnymi wymaganiami podanymi przez producenta. Późniejsze kontrole prowadzone w związku z przeglądami powinny



Fot 1. Miernik BM25 firmy MEGGER



Fot. 2 Zestaw specjalnych silikonowych przewodów pomiarowych z małą upływnością własną

być rejestrowane w celu oceny kierunku zmian parametrów izolacji. W analizie wyników należy uwzględnić poprawkę na panujące podczas pomiarów warunki środowiskowe: temperaturę i wilgotność.

#### ■ pomiar chwilowy przez BM25

Przyrząd umożliwia dwa rodzaje pomiaru chwilowego dla czterech ustalonych wartości napięcia probierczego 500, 1000, 2500, 5000V oraz jednego napięcia regulowanego w zakresie od 50 do 5000V z krokiem 25V. Po zakończeniu pomiaru automatycznie rozładowywana jest pojemność badanego obiektu, a wartość obniżającego się napięcia jest wyświetlana dopóty, dopóki nie będzie ono niższe niż bezpieczny poziom. Pulsujące segmenty wskaźnika LCD oraz migotanie czerwonej diody LED ostrzegają o obecności niebezpiecznego napięcia.

#### ■ pomiar rezystancji izolacji R

Izolacja jest badana w sposób ciągły przy wybranym napięciu probierczym. Końcowy wynik pomiaru jest prezentowany sekwencyjnie wraz z wartością prądu upływowego oraz wartością pojemności obiektu.

#### ■ pomiar prądu upływowego I

Izolacja jest badana w sposób ciągły przy wybranym napięciu probierczym, a na wyświetlaczu jest pokazywana wartość prądu upływowego. Umożliwia to pomiar większych wartości rezystancji izolacji. Wówczas jed-

nak prąd upływowy jest bardzo mały, co powoduje, że dokładność pomiaru zmniejsza się. Teoretycznie jest możliwy pomiar rezystancji do 500 TΩ przy napięciu 5000V, ale wymaga to wykonania kalibracji przy rozwartym obwodzie w celu ustalenia prądu upływowego obwodu pomiarowego oraz przewodów pomiarowych (wynosi on ok. ±2 nA w normalnej temperaturze, przy nowych, czystych przewodach pomiarowych). Skala analogowa zawsze pokazuje wartość rezystancji. Końcowy wynik pomiaru jest prezentowany sekwencyjnie wraz z wartością rezystancji oraz wartością pojemności obiektu.

### pomiar wskaźnika polaryzacji (PI – Polarization Index)

Metoda ta jest szczególnym przypadkiem pomiaru rezystancji izolacji w ściśle określonym czasie. Sprawdzenie polega na wykonaniu odczytów np. po 15 i 60 s próby. Wówczas:

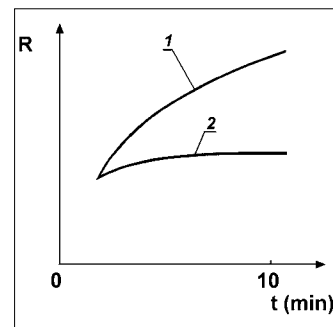
$$PI = \frac{R_{60}}{R_{15}}$$

Stwierdzono doświadczalnie, że dobra izolacja zwykle wykazuje wzrost rezystancji w ciągu 10 min. W izolacji zawilgoconej lub zabrudzonej zjawiska absorpcji są maskowane przez duży prąd upływowy, a wy-

niki pomiarów prawie się nie zmieniają i krzywa jest całkowicie płaska (rys. 2). Ten sposób oceny stanu izolacji ma ogromną przewagę nad pomiarem chwilowym, z uwagi na niezależność od temperatury. Pomiar wskaźnika PI jest przydatny wówczas, gdy nie mamy dostępu do wyników prób wykonanych w przeszłości. Wartość PI uzyskana podczas jednorazowego badania daje informację o stanie ochrony. Ogólną ocenę jakości izolacji w zależności od wartości wskaźnika PI ( $R_{10min}/R_{1min}$ ) – jeżeli przepisy szczegółowe nie stanowią inaczej – można dokonać następująco:

- PI < 1, niesatysfakcjonujący stan izolacji,
- PI = 1÷2, wątpliwy stan izolacji,
- PI = 2÷4, dobry stan izolacji,
- PI > 4, bardzo dobry stan izolacji.

Wyniki pomiaru będą zawsze lepiej interpretowane z uwzględnie-



Rys. 2 Krzywe zależności rezystancji izolacji od czasu trwania próby dla izolacji dobrej (1) i wadliwej (2)



Fot. 3 BM25 podczas wykonywania pomiarów

niem historii badanego obiektu oraz własnego doświadczenia. Najcenniejszą informacją jest ustalenie kierunku zmian parametru. Łatwiej określa się go przy pomiarach wskaźnika polaryzacji niż przy pomiarach chwilowych, ponieważ w tym ostatnim przypadku jest konieczna korekcja temperaturowa. Jeżeli PI zmniejsza się o 30% lub więcej względem długookresowej średniej, należy rozważyć konieczność wykonania czynności naprawczych lub zapobiegawczych.

■  **pomiar PI przez BM25**

Miernik automatycznie oblicza wskaźniki polaryzacji przy dowolnym napięciu probierczym. Opera-

tor może wybrać trzy wartości czasu  $t_1$ ,  $t_2$  i  $t_3$  w zakresie od 15 s do 90 min. Przyrząd zarejestruje wartość rezystancji dla nich oraz ustali wartości wskaźników PI jako zależności:

$$PI_1 = \frac{R_{t2}}{R_{t1}} \quad \text{lub} \quad PI_2 = \frac{R_{t3}}{R_{t2}}$$

Pomiar może być wykonany przy dowolnym napięciu. Końcowy wynik  $PI_1$  oraz  $PI_2$  jest prezentowany sekwencyjnie z rezystancją izolacji dla czasu  $t_1$ ,  $t_2$  i  $t_3$ , a także wartością pojemności obiektu.

**badanie napięciem narastającym schodkowo (SV – Step Voltage)**

Ta metoda pomiaru uwzględnia prawidłowość, że idealna izolacja ma jednakową rezystancję (identyczne wyniki pomiarów) niezależnie od napięcia probierczego. Izolacja wadliwa ma mniejszą rezystancję przy wyższych napięciach.

■  **pomiar SV przez BM25**

Pomiar jest wykonywany przez 5 min. Napięcie podwyższa się (od 500 V do 2,5 kV lub do 5 kV) o jeden krok co 1 min. Wyniki pomiarów cząstkowych są rejestrowane. Na zakończenie każdy z pięciu wyników pomiarów rezystancji przy kolejnych wartościach napięcia jest wyświetlany sekwencyjnie wraz z wartością pojemności obiektu.

**pomiar rozładowania dielektryka (DD – Dielectric Discharge)**

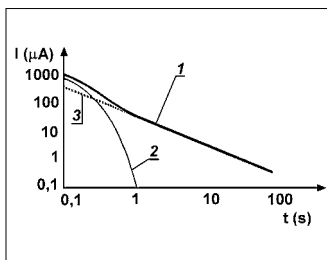
Istnieje wiele technik pomiarowych związanych z rozładowaniem dielektryka, stosowanych do sprawdzenia wpływu jego polaryzacji. Obecność wszystkich trzech składowych prądu podczas ładowania izolacji (prąd ładowania pojemności, prąd absorpcji i prąd upływowy) powoduje, że wyznaczenie prądu polaryzacji jest kłopotliwe (rys. 1). W fazie rozładowania można szybciej usunąć niechciany prąd (ładowania pojemności oraz upływowy), otrzymując możliwość oceny stopnia polaryzacji izolacji, jej zależności od zawilgocenia oraz innych czynników. Podczas pomiaru DD izolacja jest ładowana przez na tyle długi czas, aby osiągnąć stan pełnej absorpcji. Stan ten oznacza zakończenie procesów ładowania i polaryzacji. Jedyną aktywną składową pozostaje prąd upływowy. Następnie izolacja jest rozładowywana, a prąd towarzyszący procesowi kontrolowany. Prąd w początkowym stadium zawiera składową związaną z procesem rozładowania pojemności oraz reabsorpcji (rys. 3). Prąd pojemnościowy zanika szybko, począwszy od dużej wartości, z relatywnie krótką stałą czasową (kilka sekund). Prąd reabsorpcji najpierw jest mniejszy od niego, lecz ma znacznie większą stałą czasową (do kilku minut). Jest powodowany jonami, których dipole po-

wracają do spoczynkowego, chaotycznego położenia wewnątrz izolatora. Na wynik pomiaru nie ma wpływu upływność powierzchniowa i skrośna, które są pomijalne przy zwartym obwodzie zewnętrznym (braku napięcia). Prąd jest mierzony po upływie ściśle określonego czasu od początku fazy rozładowania (1 min), aby wyeliminować składową rozładowania pojemności oraz w celu stosowania w przyszłości dia-

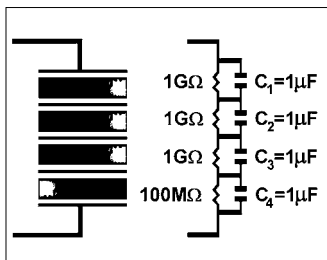
gnostyki porównawczej. Duży prąd reabsorpcji jest efektem zanieczyszczenia izolacji. Oprócz prądu jest mierzona pojemność obiektu C i końcowe napięcie probiercze U fazy ładowania. Wartość wskaźnika DD jest wyrażana w [mA/V×F] i jest obliczana z równania:

$$DD = \frac{I_{1min}}{U \times C}$$

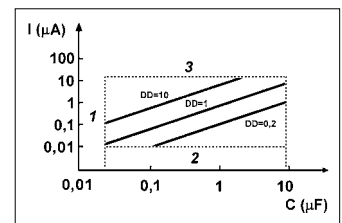
Wskaźnik DD zależy od temperatury. Jest ważne, aby pomiary wykonywać w temperaturze odniesienia lub każdorazowo ją notować. Wskaźnik DD jest przydatny do oceny izolacji przede wszystkim w urządzeniach WN, np. generatorach. Dotyczy wielowarstwowych dielektryków. Każdą z warstw takiej izolacji można opisać jako pojemność oraz skojarzoną rezystancję upływności (rys. 4). Izolacja taka powinna być wykonana w ten sposób, aby na każdej warstwie osiągnąć równomier-



Rys. 3 Prąd rozładowania izolatora płynący w izolacji: 1 – prąd całkowity, 2 – prąd rozładowania pojemności, 3 – prąd reabsorpcji



Rys. 4 Schemat zastępczy izolacji wielowarstwowej



Rys. 5 Zależność prądu rozładowania od pojemności izolacji dla określonych wartości wskaźnika DD: 1 – obszar zbyt małej pojemności, 2 – obszar niedostatecznej wartości prądu, 3 – poza zakresem pomiarowym

ny rozkład napięcia. Podczas trwania procesu rozładowania zgromadzony na każdej warstwie ładunek będzie zmniejszał się jednakowo. W przypadku uszkodzenia takiej izolacji często rezystancja upływności pojedynczej warstwy maleje, ale pojemność prawdopodobnie pozostanie taka sama. Uszkodzenia takiego nie można wykryć przy standardowych próbach izolacji, ponieważ całkowita rezystancja będzie nadal duża z powodu dobrego stanu pozostałych warstw. Podobnie inne pomiary, np. rezystancji w funkcji czasu, pomiar

ły wzrost wartości wskaźnika. Wartość DD większa niż 2 sugeruje, że w jednej z nich występuje problem z izolacją. Poniżej pokazano przykładową zależność oceny jakości izolacji od wskaźnika DD:

- $DD > 7$ , zły stan izolacji,
- $DD > 4$ , słaby stan izolacji,
- $DD = 2 \div 4$ , stan izolacji do zakwestionowania,
- $DD < 2$ , dobry stan izolacji.

Pomiary wskaźnika DD mogą być prowadzone w szerokim zakresie wartości prądu i pojemności.

#### ■ pomiar DD przez BM25

Do myślnymi (wstępnie ustalonymi przez producenta) nastawami przy wyznaczaniu DD dla BM25 są: napięcie ładowania 500 V i czas ładowania 30 min. Wartości te mogą być

zmieniane według potrzeb. W celu osiągnięcia stanu pełnej absorpcji, do badanej izolacji przez 30 min jest przykładane napięcie 500 V. Następnie ma miejsce szybkie rozładowanie, podczas którego jest mierzona pojemność obiektu. Pomiar prądu reabsorpcji jest wykonywany po upływie 1 min od chwili włączenia napięcia zewnętrznego. Wyniki DD będą osiągnięte dla pojemności w zakresie  $0,2 \div 10 \mu\text{F}$  i prądzie rozładowania nie przekraczającym 10 mA. Końcowy wynik jest prezentowany sekwencyjnie wraz ze zmierzonym prądem reabsorpcji oraz wartością pojemności.

## lokalizacja uszkodzenia BURN (wypalanie)

Metoda ta polega na ciągłym, również w przypadku przebicia, oddziaływaniu napięciem probierczym na izolację. Ten sposób diagnozy zakłada ograniczenie maksymalnej wartości prądu do wartości, która gwarantuje, że w sposób nieniszczący zostanie optycznie określony słaby punkt izolacji.

#### ■ pomiar BURN przez BM25

Miernik umożliwia pomiar w stanie przebicia. Przyrząd przy tej metodzie automatycznie ogranicza prąd obciążenia do 2 mA. Jeżeli nie wystąpi całkowite przebicie, końcowa zmierzona wartość rezystancji izolacji jest wyświetlana sekwencyjnie wraz z prądem upływowym i wartością pojemności.

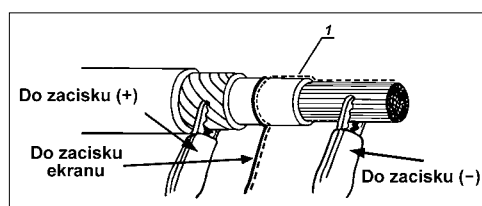
## stosowanie zacisku ekranu podczas pomiarów

Wszędzie tam, gdzie istnieje małe prawdopodobieństwo występowania upływności powierzchniowej, nie jest konieczne stosowanie zacisku ekranu. Dotyczy to zwłaszcza przypadków, gdy izolacja jest czysta i nie występują ścieżki prądowe. Ścieżki upływności powierzchniowej po izolacji mogą występować podczas badań zawilgoconych i zanieczyszczonych kabli między żyłą kabla a ekranem na izolacji żyły. Jeżeli jest wymagane usunięcie efektu tego zjawiska, szczególnie przy wysokim napięciu, należy ściśle owinąć goły drut dookoła izolacji i przyłączyć przez trze-

ci przewód pomiarowy do zacisku ekranu miernika (rys. 6). Zacisk ekranu ma ten sam potencjał, co zacisk ujemny. Rezystancja upływności powierzchniowej jest składową równoległą do rezystancji mierzonej. Użycie ekranu powoduje, że prąd płynący po powierzchni jest oddzielany od prądu płynącego wskroś izolacji. Przyrząd mierzy wyłącznie prąd płynący przez izolację, bez prądu płynącego po powierzchni izolacji.

Megger BM25 wyposażono w interfejs komunikacyjny RS232 oraz oprogramowanie do współpracy z komputerem. Miernik zasilany jest z wewnętrznego akumulatora, został wyposażony w ładowarkę akumulatora. Stan naładowania akumulatora jest kontrolowany w sposób ciągły i sygnalizowany na wyświetlaczu.

W wielu krajach nazwa MEGGER jest synonimem przyrządu do pomiaru rezystancji izolacji. Kilkadziesiąt lat temu mierniki Megger serii SL, SH w drewnianych obudowach były w ramach dużych kontraktów sprowadzone do Polski. Pracownicy działów elektrycznych większych przedsiębiorstw w naszym kraju, takich jak: elektrownie, zakłady energetyczne, stocznie, firmy branży energetycznej, do dziś posługują się nimi, często traktując je jako urządzenia wzorcowe. BM 25 podobnie jak wszystkie mierniki firmy MEGGER jest produkowany zgodnie z prawem Unii Europejskiej w systemie jakości ISO 9001. Jest oznaczony znakiem zgodności CE. Posiada indywidualne świadectwo sprawdzenia wydane przez producenta.



Rys. 6 Przyłączenie przewodów pomiarowych do kabla z wykorzystaniem zacisku ekranu: 1 – ścieżka upływności

napięciem schodkowym lub pojemności, nie zawsze wykryją ten szczególny przypadek. Schemat zastępczy na rysunku 4 jest przykładem izolacji z uszkodzoną warstwą w strukturze. W czasie pomiaru urządzenia z taką izolacją stwierdza się:

- po długim okresie ładowania przyłożone napięcie, np. 500 V, jest podzielone głównie między  $C_1$ ,  $C_2$  i  $C_3$ ; napięcie na  $C_4$  jest bardzo niskie,
- po kilku sekundach rozładowania napięcie na zaciskach będzie prawie równe zeru, ale poszczególne warstwy pojemności będą nadal naładowane,
- po 1 minucie prąd reabsorpcji będzie nadal płynął przez rezystor  $100 \text{ M}\Omega$  (stała czasowa rozładowania wynosi 33 s); prąd ten (ok.  $0,3 \mu\text{A}$ ) da w wyniku wartość DD wynoszącą ok. 2,5.

Jednorodna izolacja ma zawsze wartość DD równą zeru. Sprawna, niejednorodna izolacja ma wartość większą, najczęściej ok. 1. Jest to spowodowane większą absorpcją dielektryka. Uszkodzone warstwy izolacji (np. zawilgocone) będą powodowa-



# Sprawdź ceny serii Megger BM !

## TOMTRONIX

tomtronix@tomtronix.com.pl TEL.FAX.(42) 6747455  
www.tomtronix.com.pl TEL.(42) 6760633

reklama