

POMIARY REZYSTANCJI IZOLACJI w TEORII i PRAKTYCE (1)

Okresowe, regularne kontrole stanu izolacji zapobiegają niebezpiecznym dla życia wypadkom, ograniczają koszty związane z naprawami i utraconą produkcją. Opisano metody pomiarowe, które służą do oceny stanu izolacji. Praktyczne ich zastosowanie omówiono na przykładzie jednego z najbardziej rozbudowanych funkcjonalnie przyrządów tego rodzaju - miernika BM25 firmy Megger.

Jest 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 wskutek oddziaływania wszystkich tych czynników. Regularne wykonywanie pomiarów izolacji pomaga w wykryciu pogarszającego się stanu ochrony. W pewnych sytuacjach pomiary jednorazowe są traktowane jako obiektywne wskaźniki jakości ochrony – np. podczas instalowania sprzętu, gdy sprawdzana jest zgodność z wyspecyfikowanymi przez producenta poziomami parametrów. Dla sprzętu znajdującego się w ruchu, najważniejszym wskaźnikiem są jednak tendencje zmian wyników pomiarów zgromadzonych w wyniku systematycznych kontroli. Z tego powodu bardzo istotne jest archiwizowanie wyników badań, w odpowiedniej relacji do warunków w jakich zostały wykonane.

Pierwsze na świecie przyrządy do pomiaru rezystancji izolacji wyprodukowała w 1889 roku brytyjska firma Megger. Firma nieustannie rozwijała produkcję tych urządzeń, osiągając pozycję lidera w tej branży. Dlatego w wielu krajach nazwa "Megger" stała się synonimem przyrządu do pomiaru rezystancji izolacji. Obecnie

Megger produkuje kilkadziesiąt różnych typów megaomomierzy. Wiele z nich przeznaczonych jest do konkretnych zastosowań, np. do telekomunikacji, instalatorstwa elektrycznego. W 1997 roku, miernik rezystancji izolacji BM25 uzyskał prestiżową europejską nagrodę Manufacturing Industry Achievement (MIA) w kategorii "elektroniczny wyrób roku". Na przykładzie tego właśnie miernika omówimy praktyczne zastosowanie metod pomiaru rezystancji izolacji.

Koncepcja pomiaru izolacji

Rezystancja izolacji, zgodnie z prawem Ohma, jest równa ilorazowi przyłożonego napięcia i natężenia płynącego prądu: $R = U/I$. Aby pomiar izolacji uznać za rzetelny, należy jednak dodatkowo uwzględnić dwa następujące czynniki:

- charakter prądu płynącego przez i po izolacji,
 - czas, jaki upłynął od chwili przyłożenia napięcia.
- Te dwa czynniki, powiązane wzajemnie, mają wpływ na uzyskane wyniki.

Całkowity prąd jest sumą trzech prądów składowych (rys. 1):

- Prąd ładowania pojemności. Prąd ten, początkowo duży, zanika do zera w miarę jak ładowana jest pojemność. Szybkość zaniku zależy od wartości pojemności badanego obiektu. Duże obiekty, o większej pojemności – np. długie kable energetyczne, ładują się dłużej czas. Izolator ładuje się w ten sam sposób, jak dielektryk w kondensatorze.

- Prąd absorpcji (polaryzacji). Prąd ten jest również początkowo duży, ale maleje w dużo wolniejszym tempie niż prąd ładowania pojemności. Jest wynikiem przemieszczania się ładunków oraz dipoli wewnątrz izolatora pod wpływem pola elektrycznego. Dipole ustawiają się równoległe do linii zewnętrznego pola elektrycznego. Po wyłączeniu przyłożonego

napięcia powracają do swoich pozycji spoczynkowych generując prąd reabsorpcji. Zjawisko absorpcji jest, w dużej mierze, powodowane przez wilgoć i zanieczyszczenia w izolacji.

- Prąd przewodzenia lub upływności. Jest to mały, ustalony prąd o charakterze rezystancyjnym, w którym można wydzielić dwie składowe:

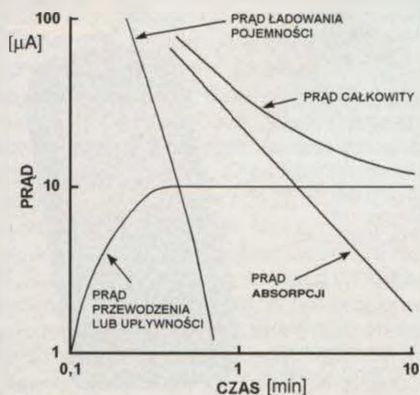
- (a) prąd płynący wzdłuż ścieżek przewodzących przez materiał izolacji,
- (b) prąd płynący wzdłuż ścieżek przewodzących po powierzchni materiału izolacji.

Prąd upływności narasta szybko do pewnej stałej wartości i pozostaje niezmienny dla danego napięcia probierczego. Zwiększenie się tego prądu upływności wskazuje na możliwość przyszłych kłopotów spowodowanych pogorszeniem stanu izolacji. Prąd upływności powinien być mierzony, kiedy izolator jest w pełni naładowany i ustały zjawiska absorpcji.

Z wykresu na rys. 1 można wyciągnąć wniosek, że wyniki pomiaru rezystancji izolacji są zmienne w czasie. Ogólnie biorąc, w ciągu pierwszych sekund po rozpoczęciu pomiaru jest rejestrowany głównie prąd pojemnościowy. Objawia się to charakterystycznym "wspinaniem" wskazówki na skali miernika izolacji. Prąd ten spada relatywnie szybko po tym, jak badany obiekt naładowuje się. Po upływie 1 minuty mierzony prąd jest kombinacją prądów polaryzacji oraz upływności. Prąd absorpcji maleje relatywnie wolniej w porównaniu z prądem ładowania pojemności. Wynika to z natury zjawisk fizycznych zachodzących w materiałach izolacyjnych. Dopiero po 10 minutach kontrolowany prąd ma charakter wyłącznie upływnościowy, chociaż bywa, że ze względu na zjawisko polaryzacji okres ten wydłuża się nawet do 30 minut. Prawo Ohma ma w tym przypadku teoretycznie zastosowanie po czasie nieskończonym, gdyż dopiero wtedy izolacja ma charakter całkowicie rezystancyjny.

Pomiar chwilowy izolacji (natychmiastowe rozpoznanie)

Jest to najprostszy, tradycyjny pomiar rezystancji izolacji dający natychmiastową kontrolę stanu izolatora. Rezultatem badania jest wartość rezystancji w megaomach. Próbę wykonuje się w ciągu krótkiego, ale określonego przedziału czasu, po którym odczytywany jest wynik. Okres ten typowo wynosi 30 lub 60 sekund, co eliminuje wpływ prądu ładowania pojemności. Niektóre mierniki (np. BM25 firmy Megger) umożliwiają ustawienie przedziału czasu, po upływie którego pomiar kończy się automatycznie. Nie jest konieczne, aby wynik



Rys. 1. Składniki prądu pomiarowego izolacji

był wartością ustabilizowaną i maksymalną. Jeżeli ten sam okres czasu jest stosowany do każdego pomiaru, wówczas są porównywane analogiczne punkty na krzywej wzrastającej rezystancji. W przypadku pomiaru nowo zainstalowanego obiektu rezultaty trzeba porównać z minimalnymi wymaganymi w specyfikacji producenta. Późniejsze kontrole, przeprowadzane w związku z przeglądami, powinny być rejestrowane dla oceny trendu zmian parametrów izolacji. Analiza wyników musi uwzględniać poprawkę na panujące podczas pomiarów warunki środowiskowe: temperaturę i wilgotność.

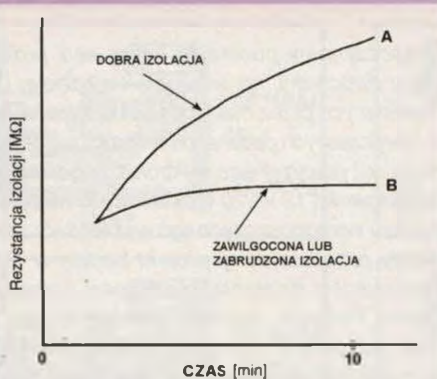
W mierniku BM25 jest możliwy pomiar chwilowy dla czterech ustalonych wartości napięć probierczych: 500 V, 1000 V, 2500 V, 5000 V oraz jednego napięcia regulowanego w zakresie od 50 do 5000 V z krokiem 25 V. Są dwa tryby pomiaru:

□ Pomiar rezystancji izolacji (R). Izolacja jest badana w sposób ciągły przy wybranym napięciu pomiarowym. Końcowy wynik pomiaru jest prezentowany sekwencyjnie z odnośną wartością prądu upływu oraz wartością pojemności obiektu.

□ Pomiar prądu upływu (I). Izolacja jest badana w sposób ciągły przy wybranym napięciu pomiarowym, ale na wyświetlaczu pokazywana jest wartość prądu upływu. Umożliwia to pomiar większych wartości rezystancji. Uwzględniając jednak fakt, że prąd upływu dąży do zera, dokładność pomiaru zmniejsza się. Teoretycznie możliwy jest pomiar do 500 TΩ przy 5000 V, ale wymaga to wykonania kalibracji rozwartym obwodem w celu ustalenia prądu upływu obwodu pomiarowego oraz przewodów pomiarowych (wynosi on ok. ±0,2 nA w normalnej temperaturze, z nowymi, czystymi przewodami pomiarowymi). Na skali analogowej jest zawsze pokazywana wartość rezystancji. Końcowy wynik pomiaru jest prezentowany sekwencyjnie z odnośną wartością rezystancji oraz wartością pojemności obiektu.

Pomiar wskaźnika polaryzacji – absorpcji (PI - Polarization Index)

Metoda ta jest szczególnym przypadkiem pomiaru zmian rezystancji izolacji w funkcji cza-



Rys. 2. Krzywe zależności rezystancji od czasu trwania próby dla izolacji sprawnej i wadliwej

su. Sprawdzenie polega na porównaniu odczytów po upływie ściśle określonych czasów od chwili rozpoczęcia próby, np. po 15 i 60 sekundach, wówczas $PI = R_{60}/R_{15}$ przy czym R_{60} , R_{15} – rezystancje izolacji po 60 s i 15 s trwania próby. Stwierdzono doświadczalnie, że dobra izolacja, wykazuje wzrost rezystancji w okresie 10 minut.

W zanieczyszczonym izolatorze, zjawiska absorpcji są maskowane przez duże prądy upływu i krzywa pomiarowa jest z tego powodu całkowicie płaska (rys. 2). Ten sposób oceny parametrów izolacji ma znaczną przewagę nad pomiarem chwilowym z uwagi na niezależność od temperatury. Pomiar PI jest szczególnie użyteczny w sytuacjach, kiedy mamy ograniczony dostęp do wyników prób wykonanych w przeszłości. Wartość PI uzyskana w wyniku jednorazowego badania daje zgrubną informację co do stanu ochrony. Poniżej podano zależność oceny jakości izolacji od wartości wskaźnika PI obliczonego jako stosunek rezystancji zmierzonych po 10 minutach i po 1 minucie.

Wynik pomiaru PI (wartości typowe R_{10}/R_1)	Stan izolacji
<1,0	nie satysfakcjonujący
1,0+2,0	wątpliwy
2,0+4,0	dobry
>4,0	bardzo dobry

Wyniki pomiaru trzeba interpretować uwzględniając "historię" sprzętu oraz korzystając z własnego doświadczenia. Najcenniejszą in-

formacją jest ustalenie trendu zmian. Dużo łatwiej określa się trend przy pomiarach wskaźnika polaryzacji niż przy pomiarach chwilowych, ponieważ, jak już wspomniano wcześniej, w tym ostatnim przypadku konieczna jest korekcja temperaturowa. Jeżeli PI zmniejsza się, spada o 30% lub więcej względem długookresowej średniej, to należy rozważyć przeprowadzenie czynności naprawczych lub zapobiegawczych.

Miernik BM25 automatycznie oblicza dwa wskaźniki polaryzacji przy dowolnym napięciu probierczym. Operator ma możliwość określenia trzech wartości czasu: T1, T2 i T3 w zakresie od 15 s do 90 min. Przyrząd rejestruje wartości rezystancji po upływie tych czasów oraz ustala wartości wskaźników PI jako zależności $PI1 = R(T2)/R(T1)$, $PI2 = R(T3)/R(T2)$. Pomiar może być przeprowadzany przy dowolnym napięciu. Końcowy wynik PI1, PI2 jest prezentowany sekwencyjnie z rezystancją dla T1, T2 i T3 oraz wartością pojemności.

Badanie napięciem narastającym schodkowo (SV – Step Voltage)

Ta metoda pomiaru jest oparta na fakcie, że idealny izolator daje – niezależnie od napięcia pomiarowego – jednakowe wyniki pomiarów rezystancji. W izolatorze niesprawnym wyniki pomiaru rezystancji są mniejsze przy wyższych napięciach.

Pomiar SV miernikiem BM25 jest przeprowadzany w czasie 5 minut. Napięcie zwiększa się o jeden krok co minutę (od 500 V do 2,5 kV lub do 5,0 kV). Pomiary są rejestrowane. Na zakończenie pomiaru każdy z pięciu oddzielnych wyników dla poszczególnych napięć probierczych jest sekwencyjnie wyświetlany wraz z wartością pojemności obiektu. ■

Tomasz Koczorowicz

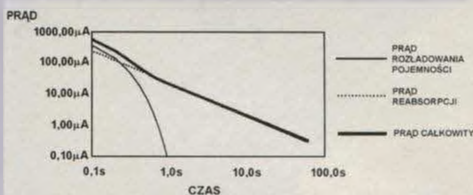
Materiał informacyjny firmy TOMTRONIX

Wyłącznym dystrybutorem przyrządów firmy Megger jest w Polsce firma Tomtronix z Łodzi (tel.0-42 6760633)

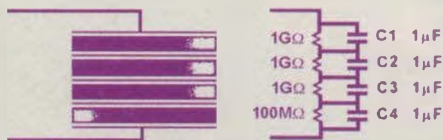
POMIARY REZYSTANCJI IZOLACJI W TEORII I PRAKTYCE (2)

Pomiar rozładowania dielektryka (DD - Dielectric Discharge)

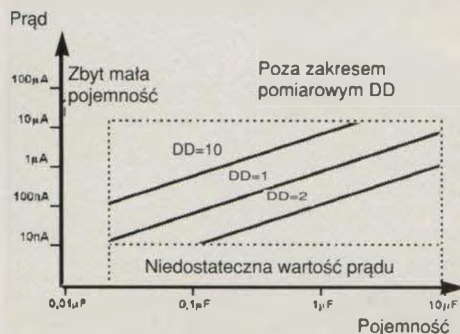
Istnieje szereg technik pomiarowych związanych z procesem rozładowania dielektryka. Ich celem jest sprawdzenie zachowania się polaryzacji izolatora. Obecność wszystkich trzech składowych prądu podczas fazy ładowania izolatora (ładowania pojemności, polaryzacji i upływności) powoduje, że wyznaczenie prądu polaryzacji jest kłopotliwe (patrz rys.1). W fazie rozładowania można szybciej usunąć te niechciane prądy (ładowania pojemności oraz upływności), uzyskując możliwość oceny stopnia polaryzacji izolacji, jej zależności od zawilgocenia oraz innych czynników. Podczas pomiaru współczynnika DD izolator jest ładowany przez pewien czas, na tyle długi, aby osiągnąć stan pełnej absorpcji. Stan ten oznacza zakończenie procesów ładowania i polaryzacji. Jedyną aktywną składową pozostaje prąd upływności. Następnie izolator jest rozładowywany, a prąd towarzyszący procesowi kontrolowany. Prąd, w początkowym stadium, zawiera składową związaną z procesem rozładowania pojemności oraz reabsorpcji (rys.3).



Rys. 3. Składowe prądu rozładowania izolatora



Rys. 4. Schemat zastępczy izolatora wielowarstwowego



Rys. 5. Zależność prądu rozładowania od pojemności izolatora dla określonych wartości wskaźnika DD

czasową (do kilku minut). Jest powodowany przez jony, których dipole powracają do spoczynkowego, chaotycznego położenia wewnątrz izolatora. Na wynik pomiaru nie ma wpływu upływność powierzchniowa oraz skrośna, które są pomijalne przy zwartym obwodzie zewnętrznym (braku napięcia). Prąd jest mierzony po upływie ściśle określonego czasu od początku fazy rozładowania (1 minuta), aby wyeliminować składową rozładowania pojemności oraz w celu stosowania w przyszłości diagnostyki porównawczej. Duży prąd reabsorpcji jest efektem zanieczyszczenia izolatora. Oprócz prądu, mierzona jest pojemność obiektu i końcowe napięcie probieczer fazy ładowania. Wartość współczynnika DD jest obliczana z równania:

$$DD = I_1 / U C \text{ [mA/VF]}$$

przy czym: I_1 – prąd po czasie 1 min. Wskaźnik DD jest zależny od temperatury. Ważne jest, aby pomiary przeprowadzane były w temperaturze odniesienia lub każdorazowo notowana była ich wartość.

Pomiar rozładowania dielektryka DD diagnozuje jeden z problemów związanych z izolacją, występujący przede wszystkim w sprzecz WN, np. generatorach. Sprawa dotyczy wielowarstwowych izolatorów. Każdą z warstw takiego izolatora można opisać jako pojemność oraz skojarzoną rezystancję upływności (rys.4). Przy produkcji tego typu izolacji każdą warstwę wykonuje się tak, aby osiągnąć równomierny rozkład napięć. W trakcie trwania procesu rozładowania zgromadzony na każdej warstwie ładunek będzie zmniejszał się jednakowo. W przypadku uszkodzenia takiej izolacji rezystancja upływności pojedynczej warstwy często maleje, ale pojemność prawdopodobnie pozostanie taka sama. Ten typ uszkodzenia nie jest możliwy do wykrycia przy standardowych próbach izolacji, ponieważ całkowita rezystancja będzie nadal duża z powodu pozostałych, sprawnych warstw. Podobnie inne pomiary, np. rezystancji w funkcji czasu, pomiar napięciem schodkowym lub pojemności niekoniecznie wykryją ten szczególny przypadek osłabienia izolatora.

Na rys. 4 przedstawiono schemat zastępczy izolatora z uszkodzoną warstwą w strukturze. Analizując ten schemat dochodzi się do następujących wniosków:

- Po długim okresie ładowania, przyłożone napięcie, powiedzmy 500 V, jest podzielone głównie między kondensatorami C1, C2 i C3. Napięcie na kondensatorze C4 jest bardzo małe.
- Po kilku sekundach rozładowania, napięcie na zaciskach będzie prawie równe zero, ale indywidualne warstwy pojemności będą nadal naładowane.
- Po jednej minucie, prąd reabsorpcji będzie nadal płynął przez rezystor 100 MΩ (stała czasowa rozładowania wynosi 33 s). Prąd ten (około 0,3 µA) da w wyniku wartość DD wynoszącą około 2,5.

Jednorodne izolatory zawsze generują wartość DD równą zero. Sprawne, niejednorodne izolatory dają wartość większą - typowo około 1. Jest to spowodowane większą, w tym przypadku, absorpcją dielektryka. Uszkodzone warstwy izolacji (np. zawilgoczone) powodują wzrost wartości współczyn-

nika. Jeśli wartość DD jest większa niż 2, to można przypuszczać, że w jednej z warstw izolacja jest niedobra. Poniżej przedstawiono zależność oceny jakości izolacji od wskaźnika DD.

Wynik pomiaru DD	Stan izolacji
>7	zły
>4	staby
2+4	do zakwestionowania
<2	dobry

Pomiary współczynnika DD mogą być przeprowadzane w szerokim zakresie prądów (nie przekraczających 10 mA) i pojemności (od 0,2 do 10 µF) – rys. 5.

W mierniku BM25 domyślnymi nastawami przy wyznaczeniu współczynnika DD są: napięcie ładowania 500 V i czas ładowania 30 minut. Wartości te mogą być zmieniane według potrzeb. W celu osiągnięcia stanu pełnej absorpcji, do badanego izolatora przez 30 minut przykładane jest napięcie 500 V. Następnie przeprowadza się szybkie rozładowanie, podczas którego mierzona jest pojemność obiektu. Pomiar prądu reabsorpcji wykonywany jest po upływie 1 minuty od momentu wyłączenia napięcia zewnętrznego. Końcowy wynik prezento-



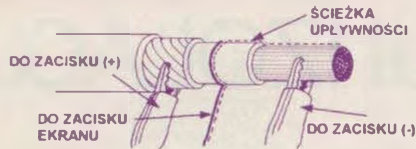
Rys. 7. Miernik Megger BM25

wany jest sekwencyjnie wraz ze zmierzonym prądem reabsorpcji oraz wartością pojemności.

Lokalizacja uszkodzenia BURN (wypalanie)

Metoda polega na ciągłym oddziaływaniu napięciem probieczerem na izolację, również w obecności ciągłego przebiecia. Ten sposób diagnozy zakłada ograniczenie maksymalnego prądu do wartości gwarantującej, że określony zostanie optycznie, w sposób nieniszczący, słaby punkt izolacji.

Miernik BM25 umożliwia pomiar w stanie ciągłego przebiecia. Przy tej metodzie przyrząd automatycznie ogranicza prąd znamionowy do 2 mA. Jeżeli nie wystąpi całkowite przebiecie, końcowa mierzona wartość rezystancji izolacji jest wyświetlana sekwencyjnie z odpowiadającym prądem upływu i wartością pojemności.



Rys. 6.
Podłączenie p
rzewodów
pomiarowych
do kabla
z wykorzystaniem
zacisku ekranującego

Stosowanie zacisku ekranującego podczas pomiarów

Wszędzie tam, gdzie prawdopodobieństwo występowania upływu powierzchniowego jest małe, nie ma konieczności stosowania zacisku ekranującego. Dotyczy to szczególnie sytuacji, w których izolator jest czysty i nie występują ścieżki prądowe. Ścieżki upływu powierzchniowego po izolacji mogą istnieć podczas badań zawilgoconych i zanieczyszczonych kabli, między żyłą kabla i jego zewnętrznym ekranem. Jeżeli jest wymagane usunięcie efektu tego upływu, szczególnie przy pomiarach wysokimi napięciami, goły drut powinien zostać ściśle owinięty dookoła izolacji i podłączony przez trzeci przewód pomiarowy do zacisku ekranującego miernika (rys. 6). Zacisk ekranujący 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 izolatora. Przyrząd mierzy wyłącznie prąd płynący przez izolator, ignorując prądy płynące po jego powierzchni. ■

Tomasz Koczorowicz

Wyłącznym dystrybutorem przyrządów firmy Megger jest w Polsce firma Tomtronix z Łodzi (tel. 0-42 6760633)

Wybrane parametry techniczne miernika Megger BM25

Napięcia probiercze	500 V, 1000 V, 2500 V i 5000 V 50÷5000 V, regulowane z krokiem 25 V
Zakres rezystancji izolacji	100 kΩ÷1 TΩ (analogowo) 10 kΩ÷5 TΩ (cyfrowo)
Dokładność pomiaru rezystancji izolacji	±5% (1 MΩ÷1 TΩ przy 5 kV) ±5% (1 MΩ÷100 GΩ przy 500 V) ±5% (1 MΩ÷10 GΩ przy 50 V) ±20% (100 kΩ÷1 MΩ i 1 TΩ ÷5 TΩ przy 5 kV) ±20% (100 kΩ÷1 MΩ i 100 GΩ ÷500 GΩ przy 500V)
Prąd zwarcia	2 mA
Zakres prądu upływu	0,01 nA÷999 mA
Dokładność pomiaru prądu upływu	±5% ±0,2 nA
Zakres pojemności	0,01 μF÷10,0 μF
Dokładność pomiaru pojemności	±15% ±0,03 μF
Zakres napięcia	50÷1000 V a.c. lub d.c.
Dokładność pomiaru napięcia	±5% ±1 V
Czas ładowania pojemności	<5 s/μF przy ładowaniu do 5 kV
Czas rozładowania pojemności	<2 s/μF przy rozładowaniu do <50 V
Zasilanie	2 x 12 V, 2 A · h, ołowiuowo-kwasowe akumulatory. czas ładowania: 16 godzin. czas pracy: typowo 8 godzin ciągłej pracy.
Zakres temperatury pracy	-20°C÷+50°C
Zakres temperatury przechowywania	-25°C÷+65°C
Masa	5,6 kg