



Prawo autorskie

Niniejsze materiały podlegają ochronie zgodnie z **Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych** (Dz.U. 1994 nr 24 poz. 83 z późniejszymi zmianami).

Materiał ten udostępniam **do celów dydaktycznych** jako materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Metrologia prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Mogą z nich również korzystać inne osoby zainteresowane metrologią. Do tego celu materiały te można **bez ograniczeń przeglądać, drukować i kopiować wyłącznie w całości**.

Wykorzystywanie tych materiałów bez zgody autora w inny sposób i do innych celów niż te, do których zostały udostępnione, **jest zabronione**.

W szczególności **niedopuszczalne jest**: usuwanie nazwiska autora, edytowanie treści, kopiowanie fragmentów i wykorzystywanie w całości lub w części do własnych publikacji.

Eligiusz Pawłowski

Uwagi dydaktyczne

Niniejsza prezentacja stanowi **tylko i wyłącznie materiały pomocnicze** do wykładu z przedmiotu Metrologia prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Udostępnienie studentom tej prezentacji nie zwalnia ich z konieczności sporządzania **własnych notatek z wykładów** ani też nie zastępuje **samodzielnego studiowania** obowiązujących podręczników.

Tym samym zawartość niniejszej prezentacji w szczególności **nie może być** traktowana jako zakres materiału obowiązujący na egzaminie.

Na egzaminie obowiązujący jest **zakres materiału faktycznie wyłożony podczas wykładu** oraz zawarty w odpowiadających mu fragmentach **podręczników** podanych w wykazie literatury do wykładu.

Eligiusz Pawłowski

Regulamin Studiów – fragmenty §18 ÷ §23

Warunkiem zaliczenia przez studenta semestru i roku w terminie jest:

- 1) **uzyskanie zaliczeń i egzaminów** do końca sesji semestru, w którym prowadzone są dane zajęcia zgodnie z ich harmonogramem ;
- 2) **Zaliczenia poprawkowe i egzaminy** odbywają się w terminach określonych przez dziekana z uwzględnieniem organizacji roku akademickiego ustalonej zarządzeniem rektora;

Wszystkie oceny wpisywane są do protokołów w terminach przewidzianych organizacją roku akademickiego.

W przypadku nieobecności nieusprawiedliwionej na zaliczeniu lub egzaminie student otrzymuje ocenę niedostateczną.

Student ma prawo do **dwóch terminów zaliczeń poprawkowych.**

Student, który nie przystąpił do zaliczenia poprawkowego, **traci prawo** do przywrócenia terminu poprawkowego i **otrzymuje ocenę niedostateczną.**

Warunkiem przystąpienia do egzaminu z przedmiotu jest uzyskanie pozytywnej oceny ze wszystkich innych form zajęć przypisanych do tego przedmiotu.

Jeżeli student nie uzyskał zaliczenia zajęć do czasu terminów poprawkowych egzaminu, brak zaliczenia nie usprawiedliwia nieobecności na egzaminie i **skutkuje utratą wszystkich terminów egzaminów**, które odbyły się przed uzyskaniem zaliczenia.

Student (...) ma prawo do **dwóch egzaminów poprawkowych.**

Student, który nie przystąpił do egzaminu poprawkowego z przyczyn nieusprawiedliwionych, **traci prawo** do przywrócenia terminu poprawkowego i **otrzymuje ocenę niedostateczną.**

Informacje organizacyjne - przypomnienie

Przedmiot: METROLOGIA, WYKŁAD (sala E-211),

Zaliczenie: egzaminy w sesji zimowej i w **sesji letniej**. Udokumentowana obecność na wykładzie jest premiowana dodatkowymi punktami doliczanymi do wyników egzaminu: 1 punkt za 1 godzinę obecności na wykładzie (egzamin obejmuje 14 pytań ocenianych w skali od 0 do 5 punktów).

Zajęcia powiązane z wykładem : Laboratorium Metrologii (sala E-320)

Prowadzący: dr inż. Eligiusz Pawłowski

Konsultacje: pok. E-318 (2 piętro WEiI), zgodnie z grafikiem obecności

Wymiar wykładu: 7 zjazdów x 2 x 2 godz. = 28 godz. semestr zimowy (E)

7 zjazdów x 1 x 3 godz. = 21 godz. semestr letni (E)

Wymiar laboratorium: 7 zjazdów x 2 godz. = 14 godz. semestr zimowy

7 zjazdów x 3 godz. = 21 godz. semestr letni

Program, literatura itp.: gablota ogłoszeniowa przy pok. E-318

Literatura do przedmiotu

Obowiązuje wykaz literatury podany na początku wykładów w semestrze zimowym

Tematyka wykładu

Pomiary parametrów sygnałów zmiennych

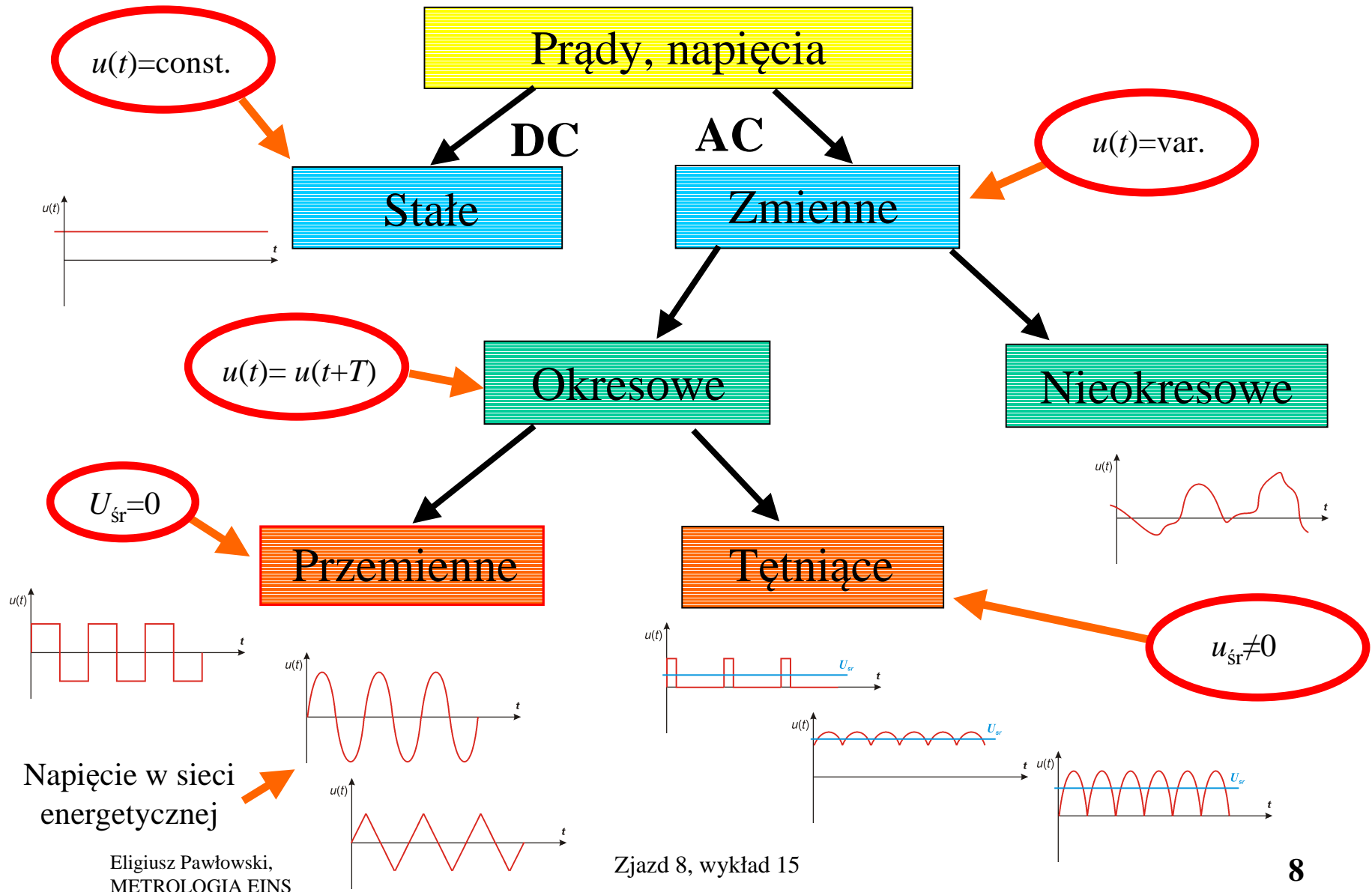
Mierniki analogowe prostownikowe

Mierniki analogowe termoelektryczne

Mierniki analogowe uniwersalne

Mierniki elektromagnetyczne

Prądy i napięcia zmienne



Parametry napięć zmiennych

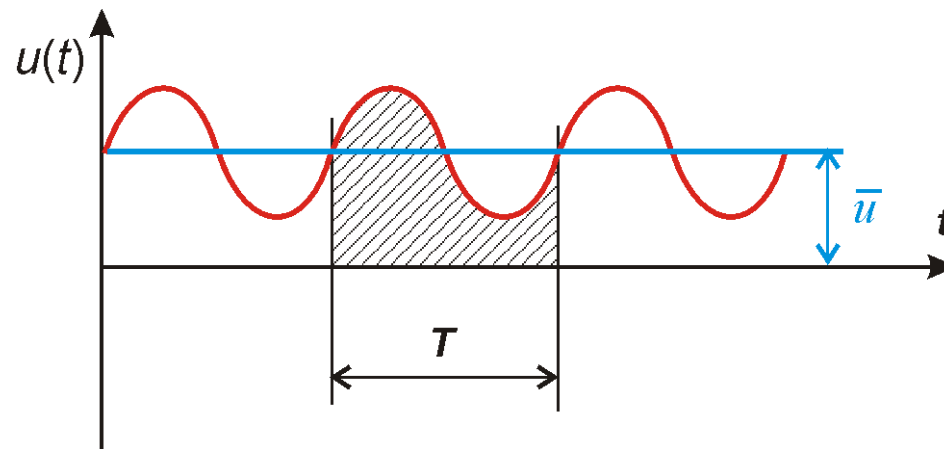
- Wartość maksymalna
- Wartość skuteczna
- Wartość średnia
- Wartość średnia wyprostowana
- Współczynnik szczytu (amplitudy)
- Współczynnik kształtu
- Współczynnik zawartości harmoniczných

Wartość średnia

Wartość średnia \bar{u}

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

Interpretacja
geometryczna



Interpretacja fizyczna: wartość średnia prądu przemiennego jest równa takiej wartości prądu stałego, która powoduje przepływ **takiego samego ładunku** w takim samym czasie.

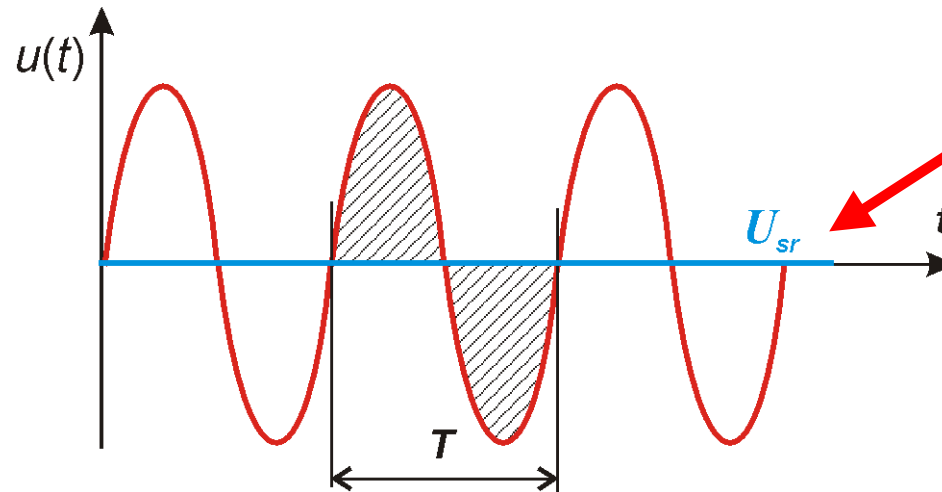
Wartość średnia napięcia sinusoidalnego

Napięcie sinusoidalne o amplitudzie U_{\max}

$$u(t) = U_{\max} \sin \omega t$$

Wartość średnia

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\max} \sin \omega t \, dt = \frac{1}{T} U_{\max} (-\cos \omega t) \Big|_0^{2\pi} = \frac{1}{T} U_{\max} (-1 - (-1)) = 0$$



Taką wartość
pokaże miernik
ME

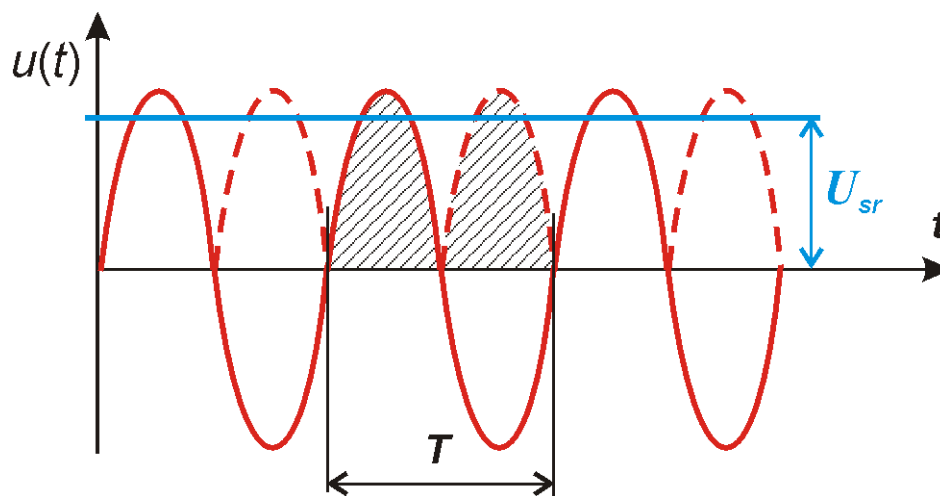
Wartość średnia wyprostowana

Wartość średnia wyprostowana U_{sr}

$$U_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} u(t) dt$$

Dla przebiegów sinusoidalnych

Interpretacja geometryczna



Wartość średnia wyprostowana napięcia sinusoidalnego

Napięcie sinusoidalne o amplitudzie U_{\max}

$$u(t) = U_{\max} \sin \omega t$$

Wartość średnia wyprostowana $U_{\acute{s}r}$

$$U_{\acute{s}r} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_{\max} \sin \omega t \, dt = \frac{2}{2\pi} U_{\max} (-\cos \omega t) \Big|_0^{\pi} =$$
$$= \frac{1}{\pi} U_{\max} (1 - (-1)) = \frac{2}{\pi} U_{\max} \approx 0,637 U_{\max}$$

Na taką wartość
reaguje miernik ME
z prostownikiem

Wartość skuteczna, wzór definicyjny

Wartość skuteczna U_{sk}

Uwaga:

nie każdy miernik mierzy
prawdziwą wartość skuteczną,
tzn. zgodną z tą definicją

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

RMS – Root Mean Square

„**Prawdziwa**” wartość skuteczna – Pierwiastek Średniego Kwadratu

Interpretacja fizyczna: wartość skuteczna prądu przemiennego jest równa takiej wartości prądu stałego, która powoduje wydzielenie się na odbiorniku **takiej samej energii** w takim samym czasie.

Wartość skuteczna napięcia sinusoidalnego

Napięcie sinusoidalne o amplitudzie U_{\max}

$$u(t) = U_{\max} \sin \omega t$$

Wartość skuteczna U_{sk}

$$U_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_{\max} \sin \omega t)^2 dt} = \sqrt{\frac{U_{\max}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\sin \omega t)^2 dt} =$$
$$= \sqrt{\frac{U_{\max}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) \right) dt} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_{\max}$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\alpha)$$

Od tej wartości
zależy moc i energia
czynna

Współczynnik szczytu

Współczynnik szczytu k_s

ang. **Crest Factor CF**

$$k_s = \frac{U_{\max}}{U_{sk}}$$

Współczynnik szczytu k_s dla napięcia **sinusoidalnego**

$$k_s = \frac{U_{\max}}{U_{sk}} = \frac{U_{\max}}{\frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}} = \sqrt{2} \approx 1,41$$

Zapamiętać !!!

Do zapamiętania: $U_{\max} = k_s \cdot U_{sk} = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ V} \approx 325 \text{ V}$

Współczynnik kształtu

Współczynnik kształtu k_k

ang. **Waveform Factor WF**

$$k_k = \frac{U_{sk}}{U_{\acute{s}r}}$$

Oczywiście tutaj jest wartość średnia
wyprostowana, bo przez zero nie dzielimy !

Współczynnik kształtu k_k dla napięcia **sinusoidalnego**

$$k_k = \frac{U_{sk}}{U_{\acute{s}r}} = \frac{\frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}}{\frac{2U_{\max}}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,111$$

Zapamiętać !!!

Współczynnik szczytu i kształtu dla sinusoidy

Zapamiętać!

U_{\max} jest zawsze
największą
wartością

$$\frac{U_{\max}}{U_{sk}} = k_s = \sqrt{2} = 1,41$$

U_{sr} jest zawsze
najmniejszą
wartością

$$\frac{U_{sk}}{U_{sr}} = k_k = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,111$$

Wartość skuteczna przebiegów odkształconych

Napięcie przemienne okresowe odkształcone jest sumą kolejnych składowych harmonicznych (tworzących szereg Fouriera)

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_{n \max} \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

Wartość skuteczna napięcia odkształconego

$$U_{sk} = \sqrt{U_{1sk}^2 + U_{2sk}^2 + U_{3sk}^2 + U_{4sk}^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_{nsk}^2}$$

Wartość skuteczną napięcia odkształconego obliczamy jako pierwiastek z sumy kwadratów, jest to tzw. **suma geometryczna**

Współczynnik zawartości harmonicznych

 *ang.* **Total Harmonic Distortion THD**

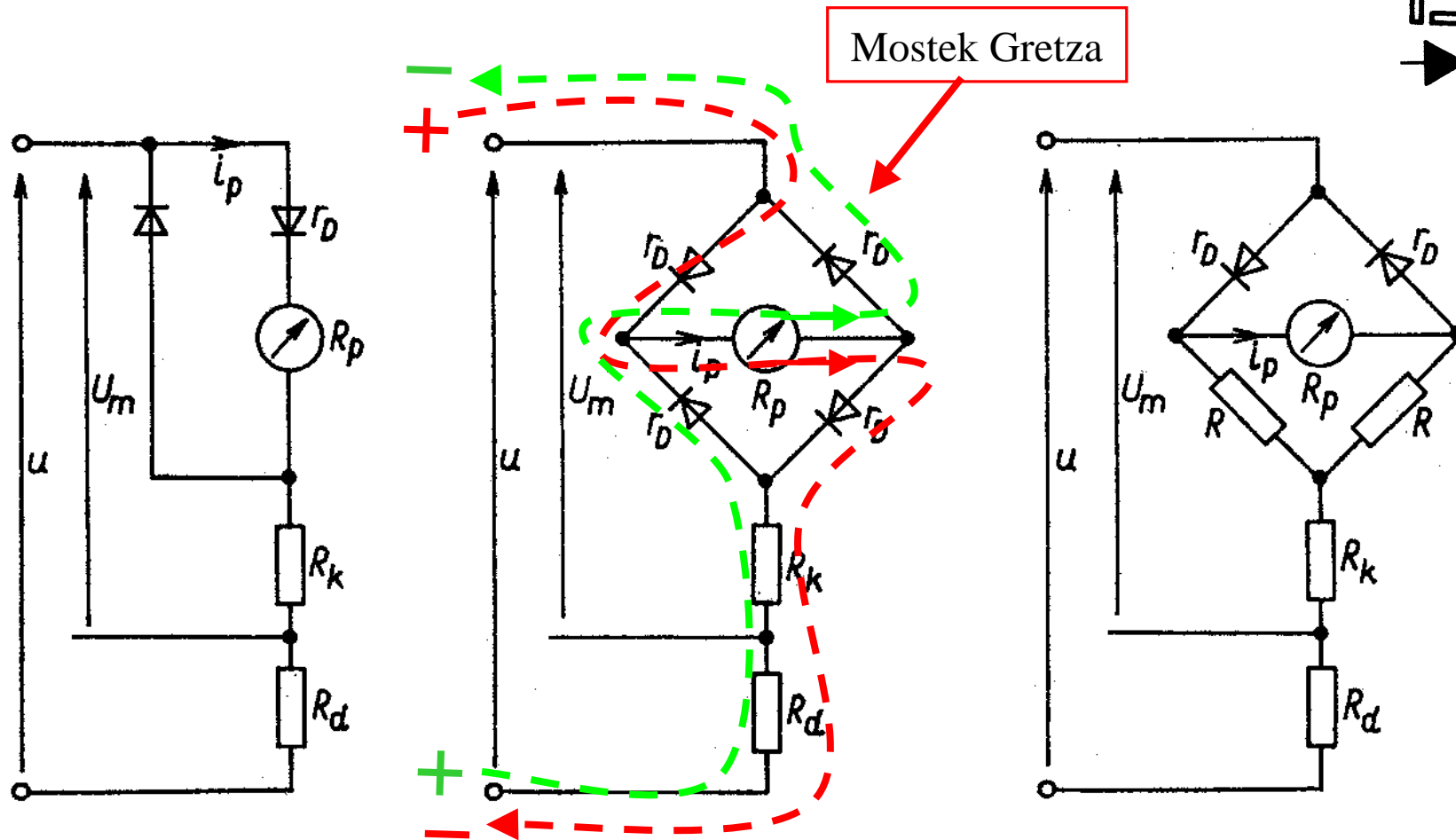
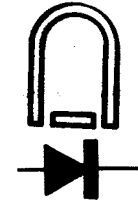
Współczynnik zawartości harmonicznych h_1

$$h_1 = \frac{\sqrt{U_{2sk}^2 + U_{3sk}^2 + U_{4sk}^2 + \dots}}{U_{1sk}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_{i sk}^2}}{U_{1sk}}$$

Współczynnik zawartości harmonicznych h_2
(współczynnik zniekształceń nieliniowych)

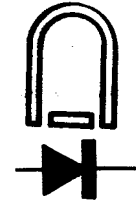
$$h_2 = \frac{\sqrt{U_{2sk}^2 + U_{3sk}^2 + U_{4sk}^2 + \dots}}{\sqrt{U_{1sk}^2 + U_{2sk}^2 + U_{3sk}^2 + U_{4sk}^2 + \dots}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_{i sk}^2}}{U_{sk}}$$

Woltomierze ME prostownikowe

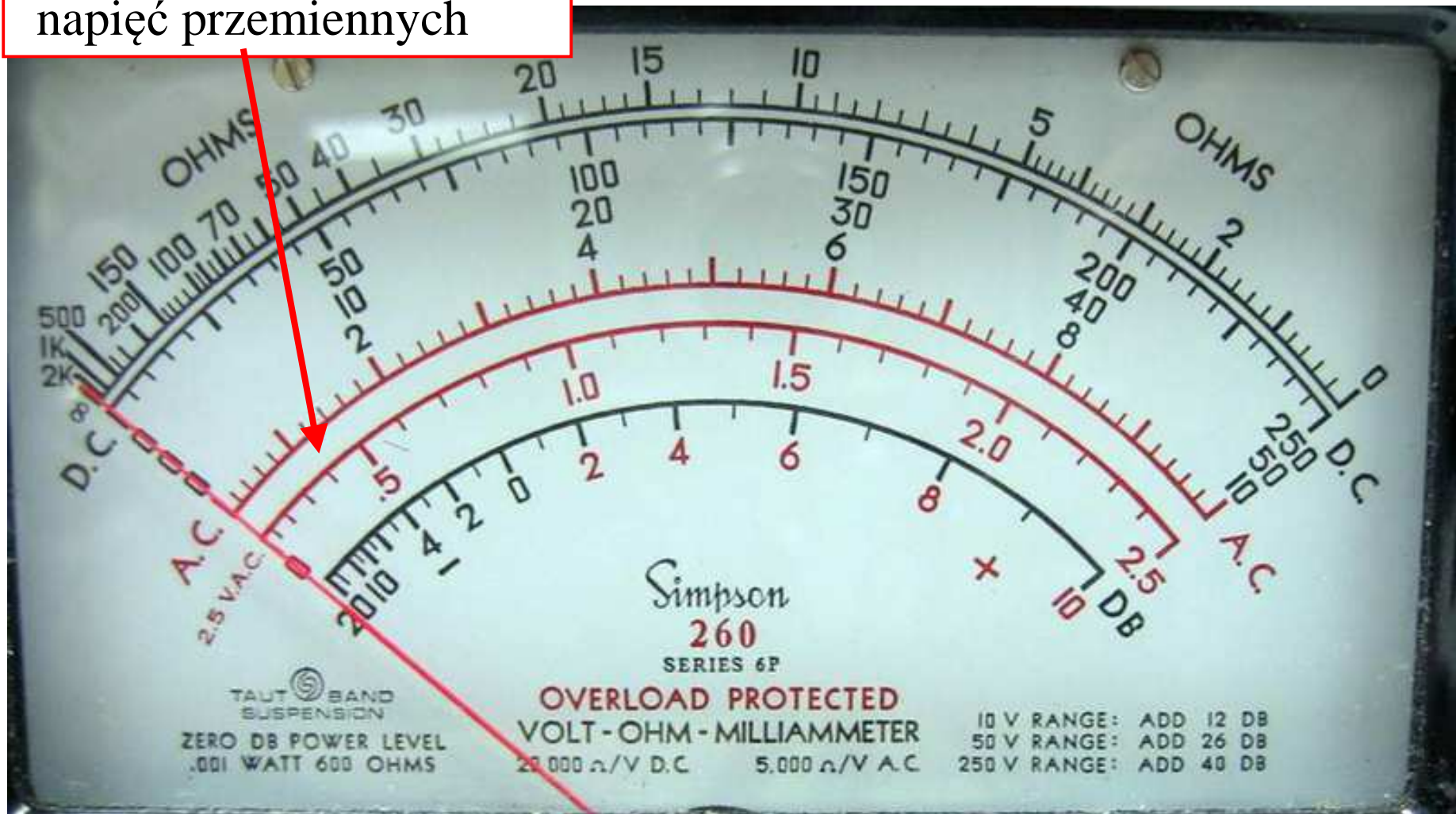


Diody wprowadzają nieliniowość podziałki!

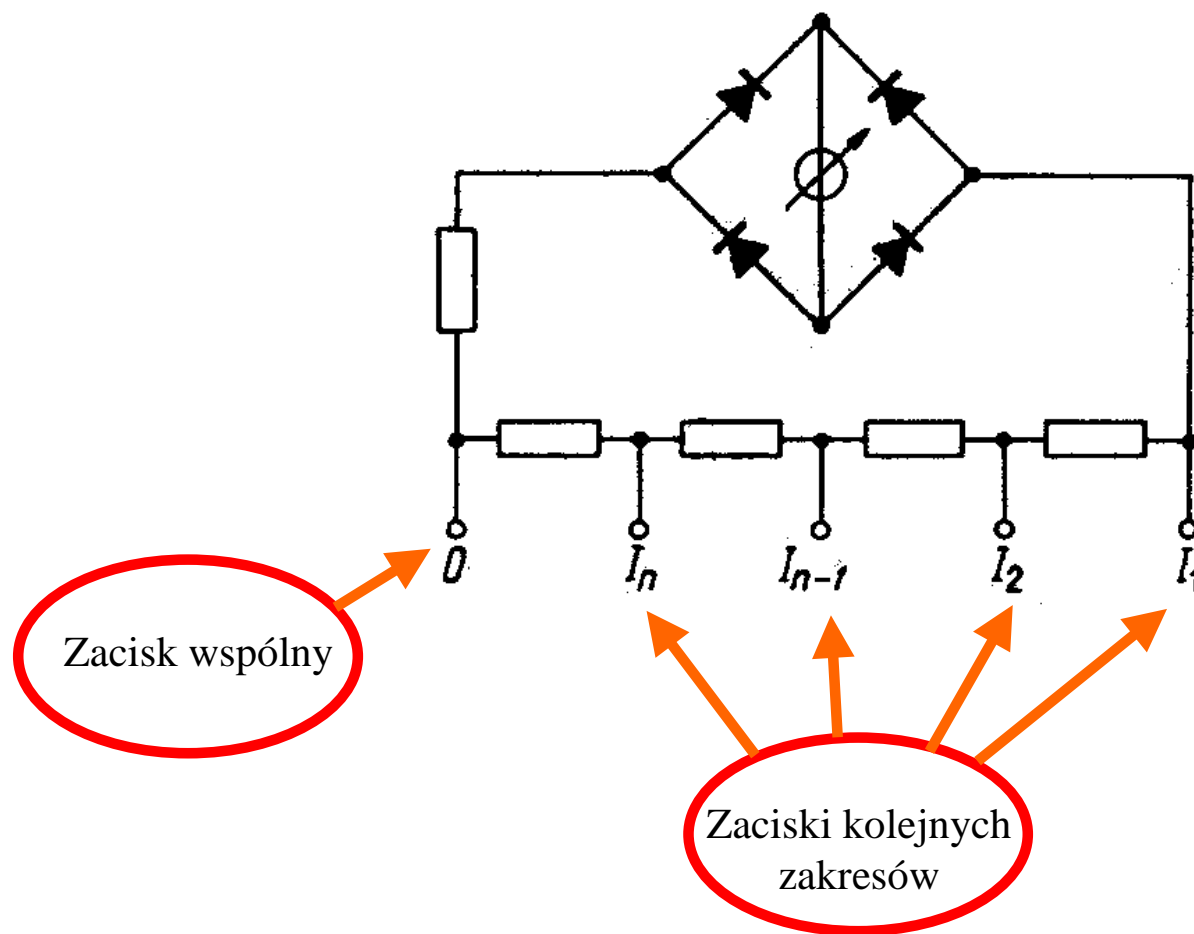
Podziałka woltomierza ME prostownikowego



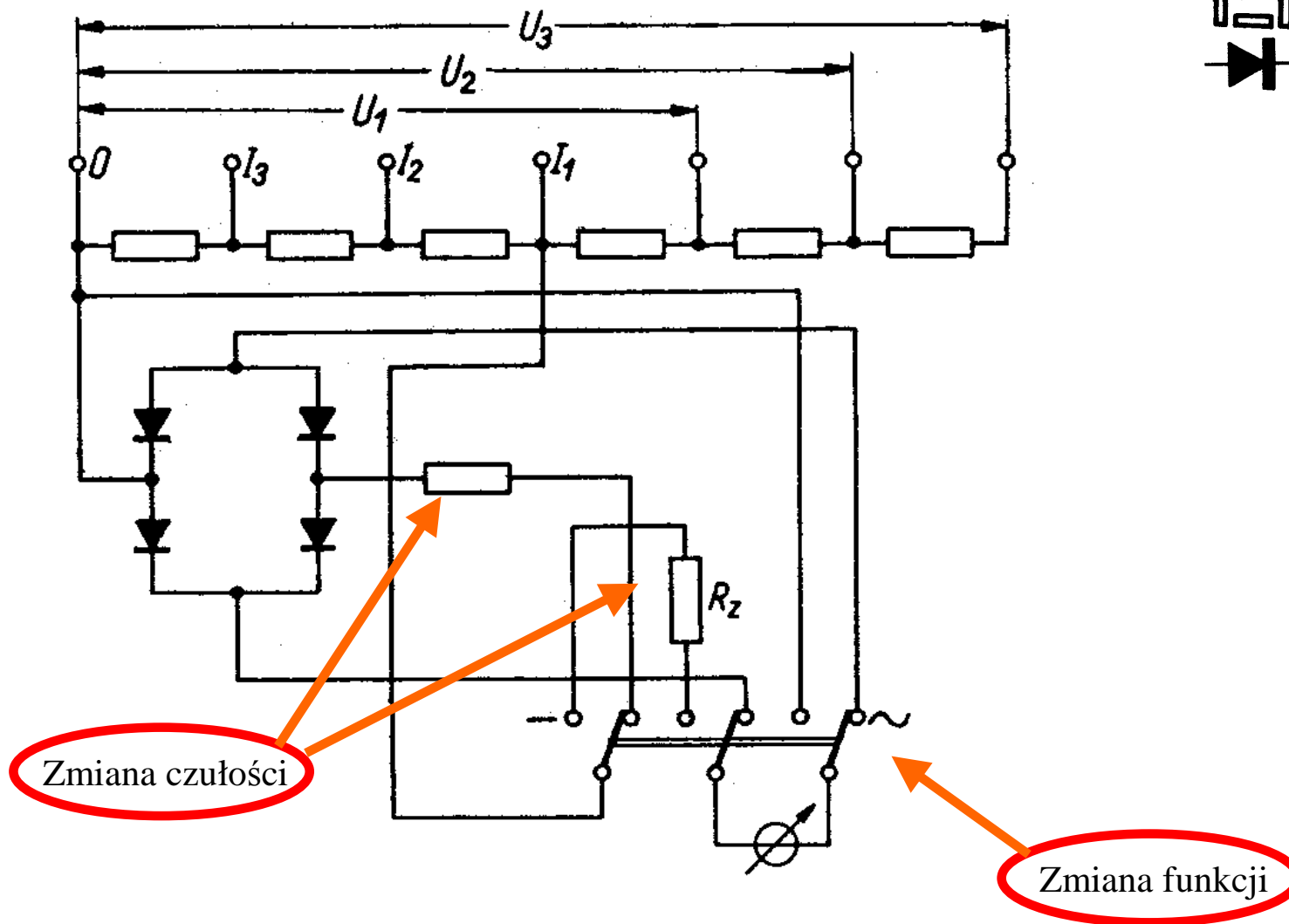
Nieliniowa podziałka dla napięć przemiennych



Amperomierze ME prostownikowe



Analogowe multimetry uniwersalne ME



Właściwości mierników ME prostownikowych



- Wskazania mierników ME prostownikowych są proporcjonalne do **wartości średniej** wyprostowanej.
- Mierniki ME prostownikowe są wyskalowane tak, aby prawidłowo pokazywały **wartość skuteczną** napięć i prądów **sinusoidalnych**, tzn. uwzględniają one współczynnik kształtu sinusoidy $k_k=1,111$.
- Przy pomiarach napięć i prądów o kształtach innych niż sinusoidalny (przebiegów odkształconych) mierniki ME prostownikowe popełniają dodatkowe błędy.

$$k_k = \frac{U_{sk}}{U_{\acute{s}r}}$$



$$U_{sk} = k_k \cdot U_{\acute{s}r}$$

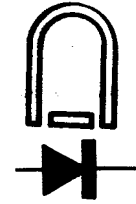
Dla dowolnego kształtu



$$U_{sk} = 1,111 \cdot U_{\acute{s}r}$$

Tylko dla sinusoidy !!!

Błąd od kształtu krzywej mierników ME



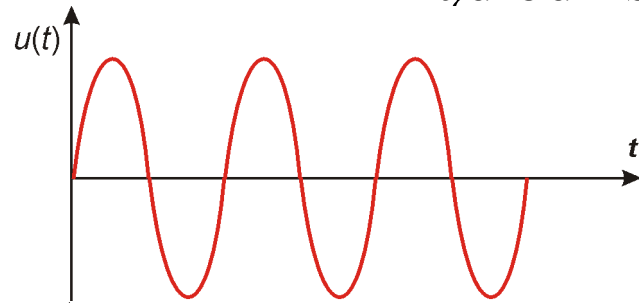
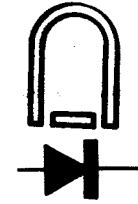
Przy pomiarach napięć i prądów o kształtach innych niż sinusoidalny (przebiegów odkształconych) mierniki ME prostownikowe popełniają dodatkowy błąd.

Jest to **błąd od kształtu krzywej** :

$$\delta = \frac{1.111}{k_k} - 1$$

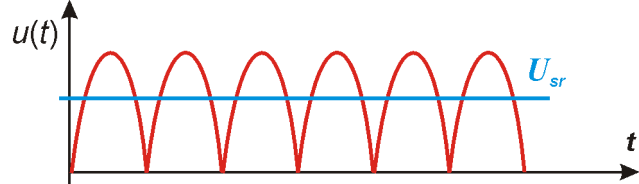
Mierniki mierzące wartość skuteczną zgodnie z definicją oznaczane są napisem **True RMS** co oznacza, że mierzą one **prawdziwą wartość skuteczną**.

Błąd od kształtu krzywej mierników ME



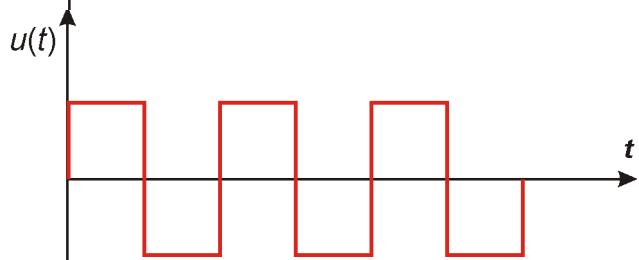
$$k_k = 1,111$$

$$\delta = 0$$



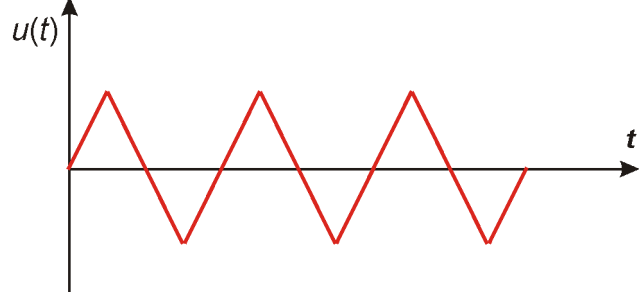
$$k_k = 1,111$$

$$\delta = 0$$



$$k_k = 1,0$$

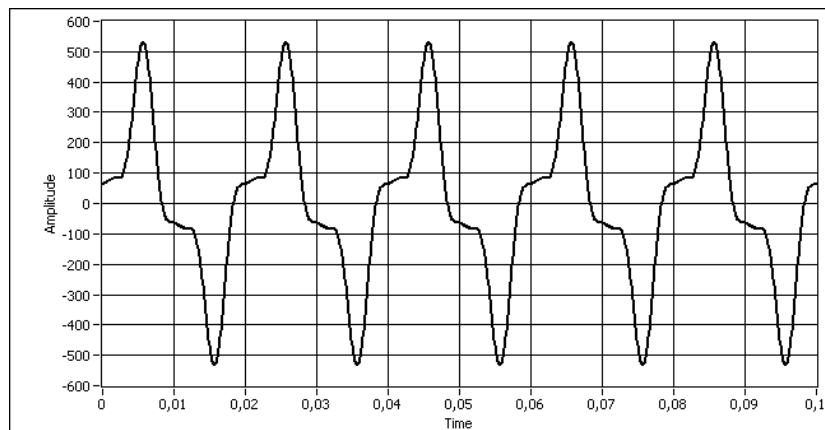
$$\delta = 11\%$$



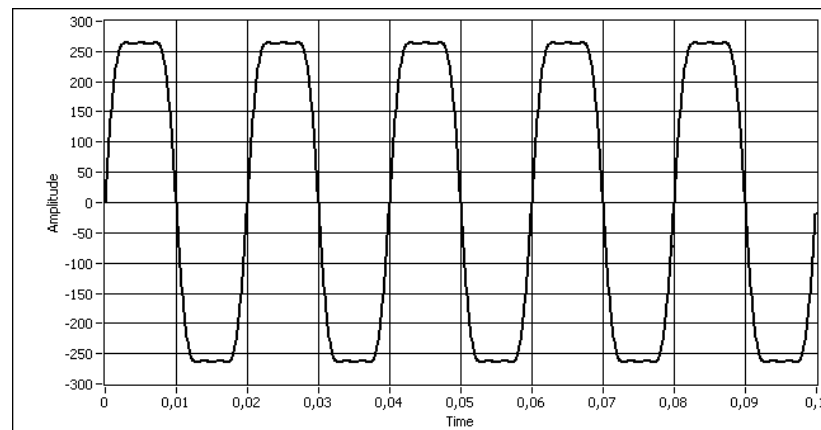
$$k_k = 1,15$$

$$\delta = -3,5\%$$

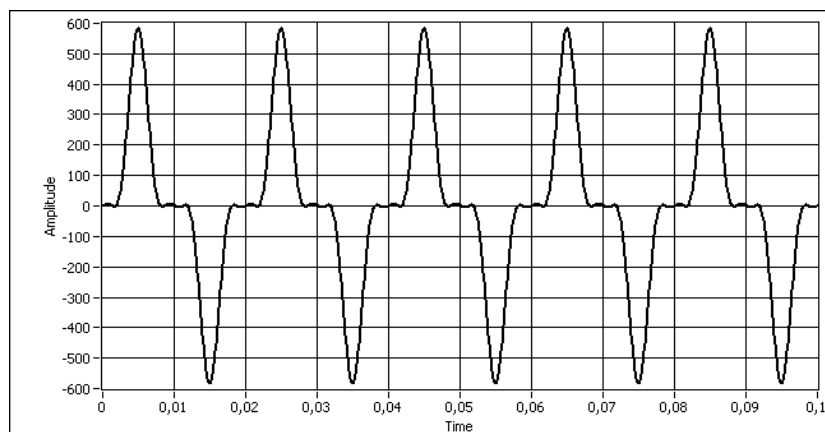
Przebiegi odkształcone w sieci energetycznej



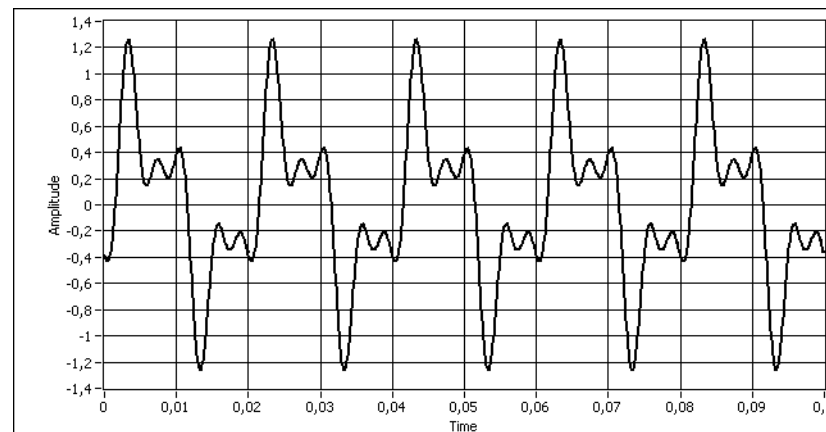
Prąd magnesujący transformatora



Napięcie z zasilacza UPS



Prąd świetłówki kompaktowej



Prąd zasilacza UPS

Miernik cyfrowy BM857 *True RMS*

Average sensing RMS calibrated

RMS (Root-Mean-Square) is the term used to describe the effective or equivalent DC value of an AC signal. Most digital multimeters use average sensing RMS calibrated technique to measure RMS values of AC signals. This technique is to obtain the average value by rectifying and filtering the AC signal. The average value is then scaled upward (calibrated) to read the RMS value of a sine wave. In measuring pure sinusoidal waveform, this technique is fast, accurate, and cost effective. In measuring non-sinusoidal waveforms, however, significant errors can be introduced because of different scaling factors relating average to RMS values.

AC True RMS

AC True RMS, normally refers as True RMS, identifies a DMM function that is AC coupled, and responds accurately only to the effective RMS AC component value regardless of the waveforms. However, DC component plays an important role in the distorted non-symmetrical waveforms, and will also be of interest sometimes. A full wave rectified sine waveform is a good example, and the AC true RMS function will only give the AC component reading which is at 43.6% of the total effective DC+AC RMS reading.

DC+AC True RMS

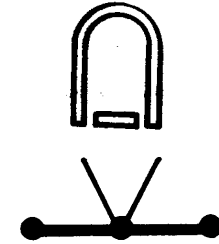
DC+AC True RMS calculates both of the AC and DC components given by the expression $\sqrt{DC^2 + (AC\ rms)^2}$ when making measurement, and can responds accurately to the total effective RMS value regardless of the waveform. Distorted waveforms with the presence of DC components and harmonics may cause:

- 1) Overheated transformers, generators and motors to burn out faster than normal
- 2) Circuit breakers to trip prematurely
- 3) Fuses to blow
- 4) Neutrals to overheat due to the triplen harmonics present on the neutral
- 5) Bus bars and electrical panels to vibrate

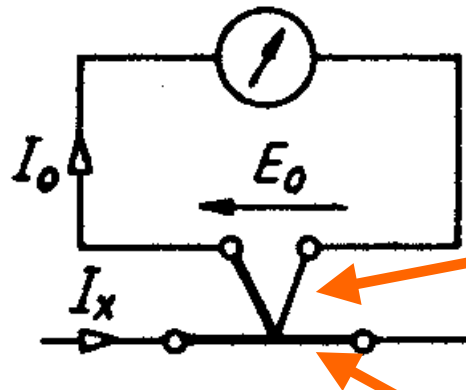
Ten miernik mierzy *True RMS*



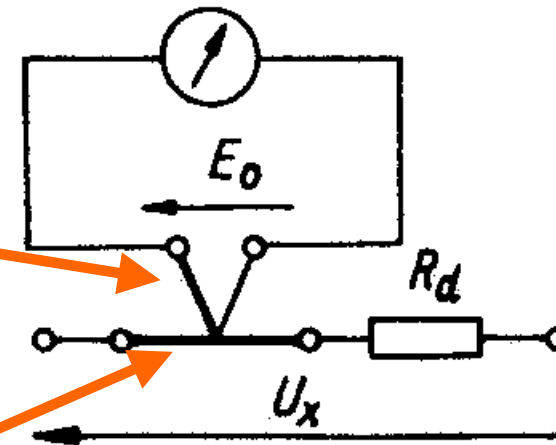
Mierniki ME termoelektryczne



Amperomierz



Woltomierz

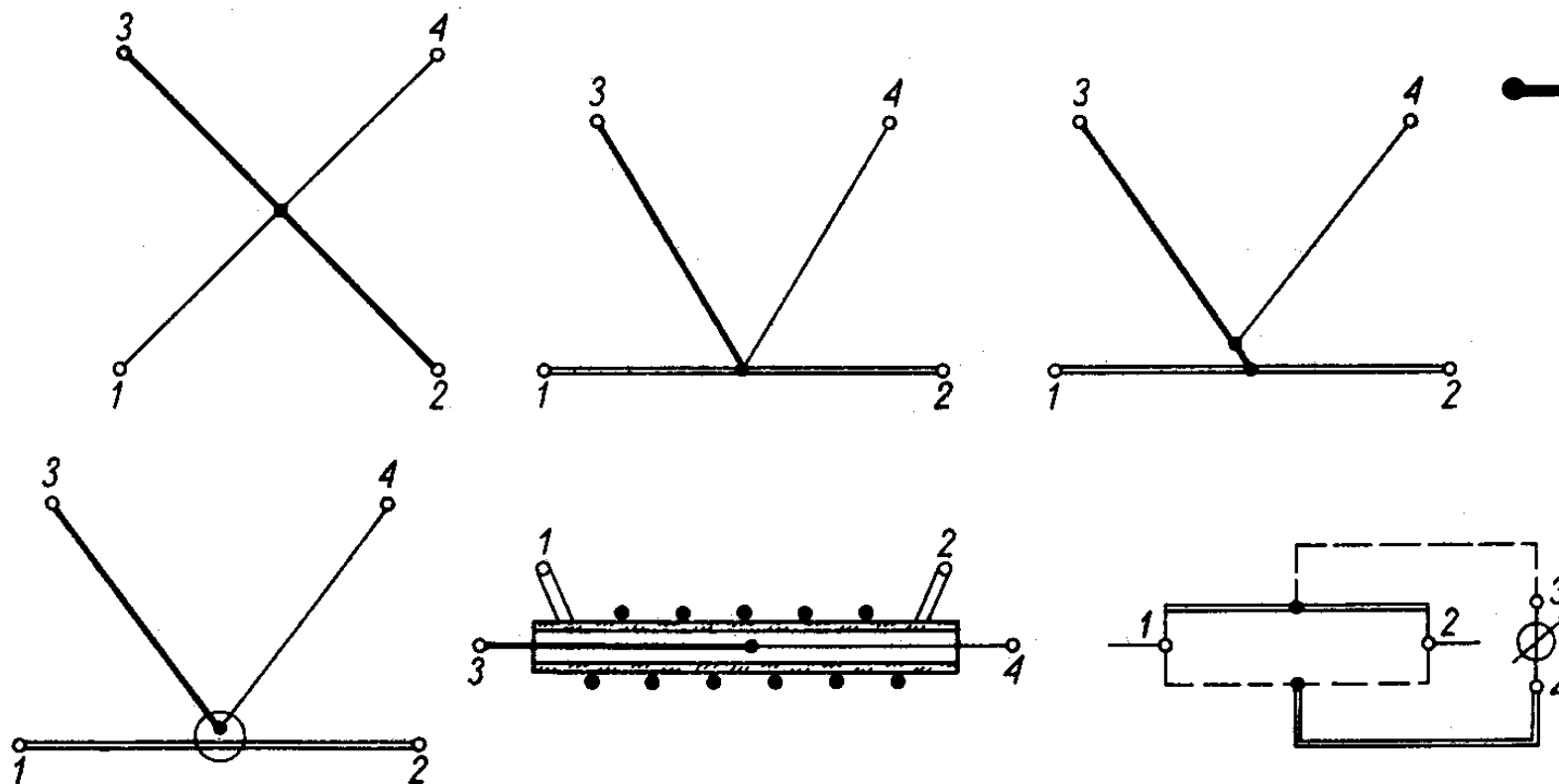
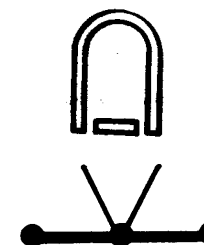


Termopara

Grzejnik

Mierniki termoelektryczne mierzą prawdziwą wartość skuteczną, oznaczane są napisem **True RMS**

Mierniki ME termoelektryczne - przetwornik



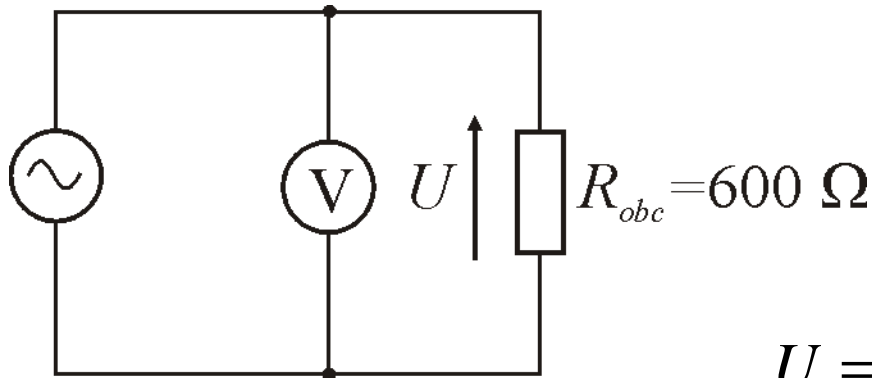
1, 2 — końcówki grzejnika, 3, 4 — zaciski termoelementu

Konstrukcje przetworników termoelektrycznych

Pomiary poziomu sygnału w telekomunikacji

W telekomunikacji poziom sygnału n mierzy się w stosunku do mocy odniesienia $P_{odn} = 1 \text{ mW}$ na obciążeniu $R_{obc} = 600 \Omega$

$$n = \log \frac{P}{P_{odn}} = \log \frac{P}{1 \text{ mW}} [\text{B}]$$



$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$U = \sqrt{P R} = \sqrt{1 \text{ mW} \cdot 600 \Omega} \approx 0,775 \text{ V}$$

W praktyce stosuje się jednostkę 10 razy mniejszą: decybel [dBm]

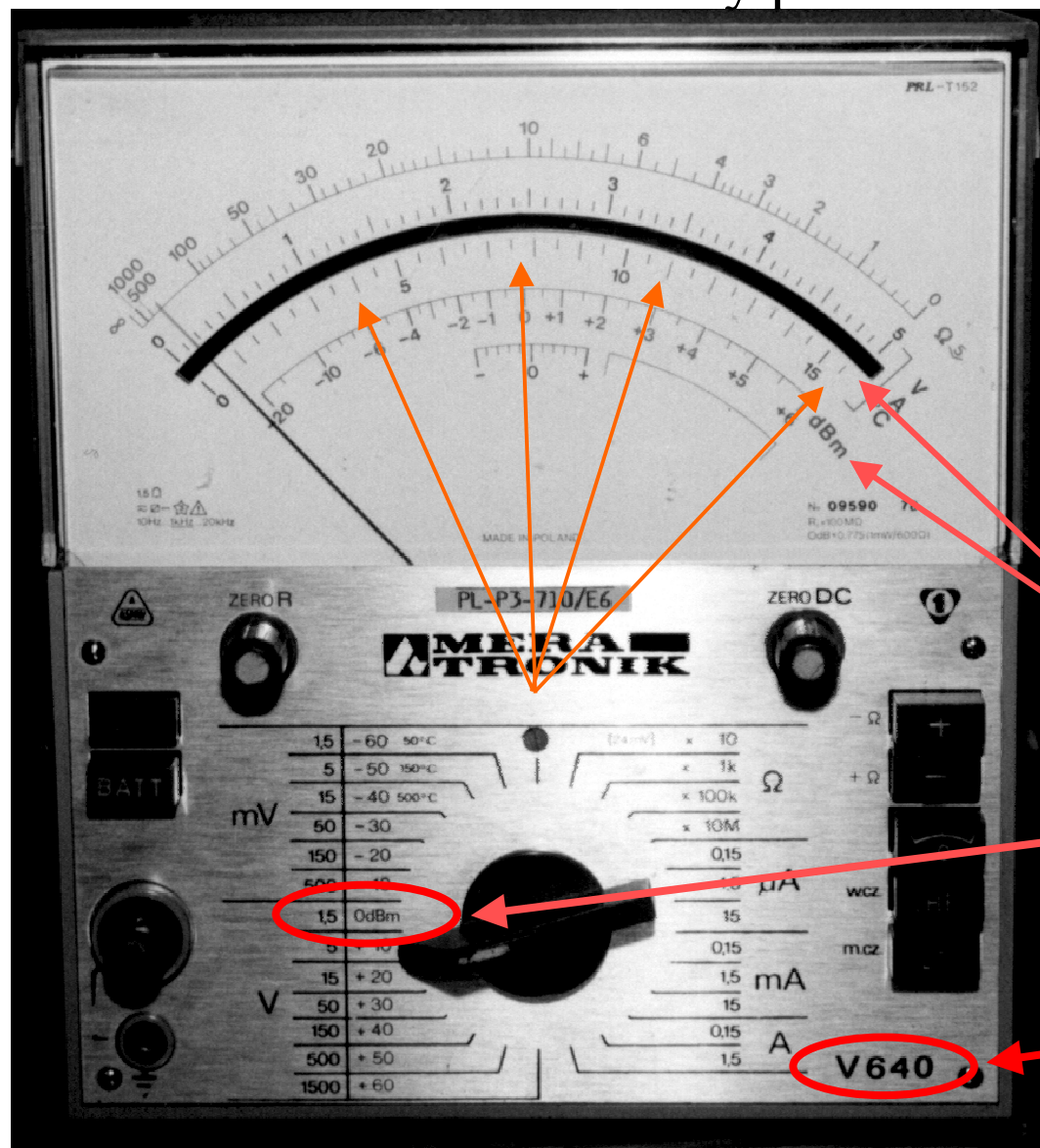
$$n = 20 \log \frac{U}{0,775 \text{ V}} [\text{dBm}]$$

Pomiary poziomu - praktyczne wartości

n	U	$U/0,775V$	P	$P/1mW$
dBm	V	-	mW	-
+6	1,550	2	4	4
+3	1,090	1,41	2	2
0	0,775	1	1	1
-6	0,388	0,5	0,25	0,25
-20	0,078	0,1	0,01	0,01

W praktyce wykorzystuje się zakres 1,5V z dodatkową skalą

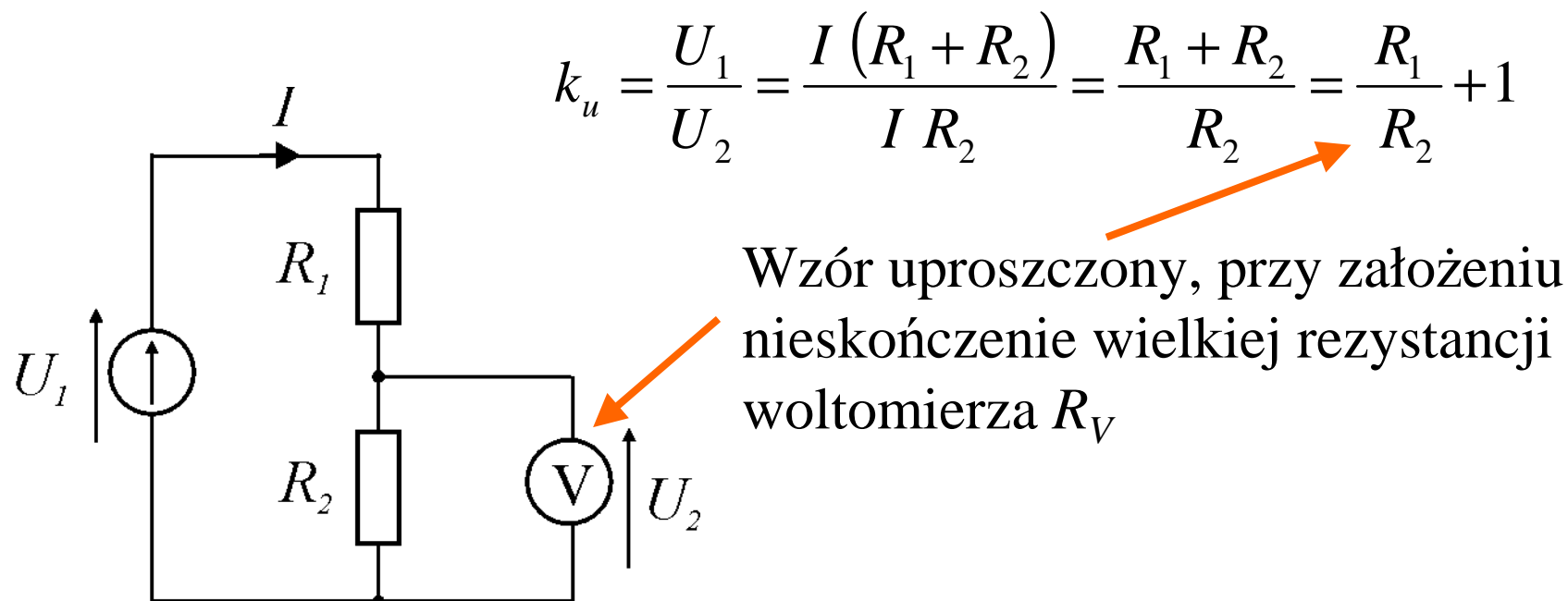
Pomiary poziomu – skala dBm



W praktyce wykorzystuje się zakres 1,5V z dodatkową skalą w dBm

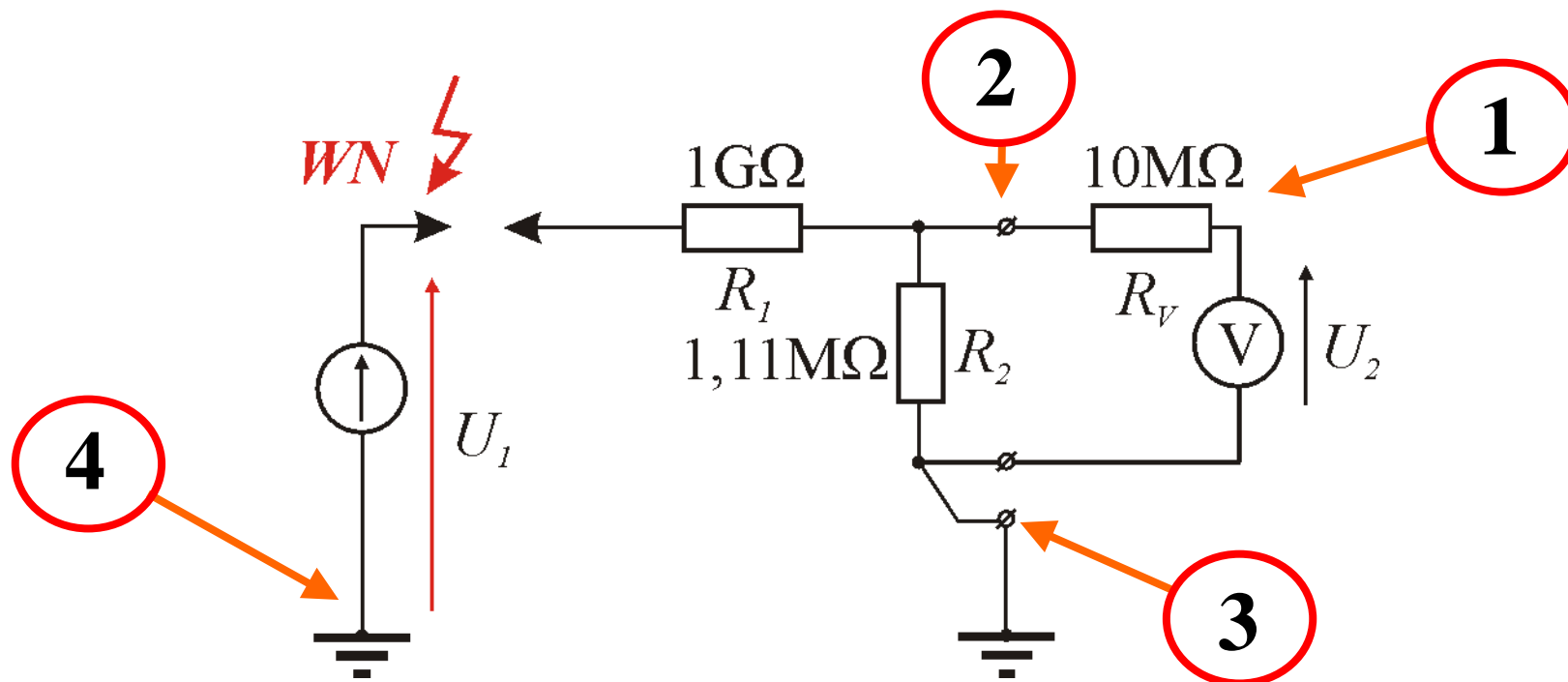
V640 „Kultowy” multimetr analogowy z czasów PRL

Pomiar wysokich napięć – dzielnik napięciowy



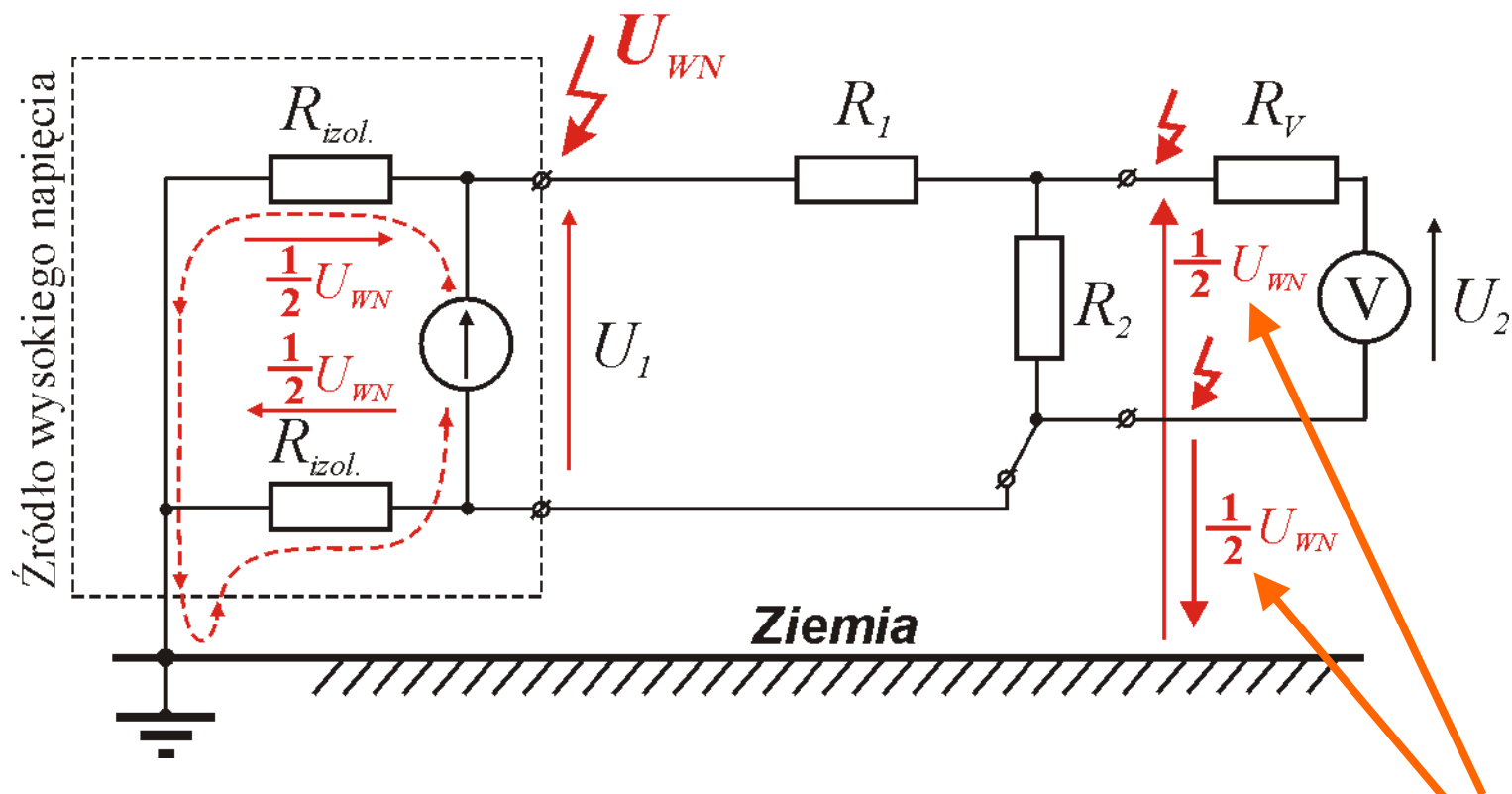
Najczęściej przekładnia dzielnika napięciowego $k_u=1000 \text{ V/V}$

Sonda WN 1000:1 budowa



1. Rezystancja woltomierza R_V jest elementem dzielnika
2. Sonda ma 3 zaciski po stronie niskiego napięcia
3. Zacisk niskiego potencjału bezwzględnie należy uziemić !!!
4. Można mierzyć tylko napięcia względem ziemi !!!

Sonda WN – niebezpieczeństwo porażenia !!!



Użycie sondy WN w **nieziemionym** układzie stwarza **ryzyko porażenia**, ze względu na występowanie nieuniknionych prądów upływu przez rezystancje izolacji.

SONDA W.N TYP: HVP 40

Sonda wysokonapięciowa spełniająca normy UL3111, IEC1919 i CE.

CECHY KONSTRUKCYJNE I UŻYTKOWE:

- Pomiar napięcia stałego do 40kV
- Pomiar napięcia przemiennego do 28kV
- Przekładnia 1000:1



DANE TECHNICZNE:

Napięcie stałe:

zakres:

max. 40kV

dokładność:

±1,0% dla 25kV

Napięcie zmienne:

zakres:

max. 28kVAC_{rms}

dokładność:

±1,0% dla 25kV

Impedancja wejściowa:

n/o

Współpraca z aparaturą pomiarową:

R_w 10M

$$\frac{40\text{kV}}{28\text{kV}} \approx 1,41$$

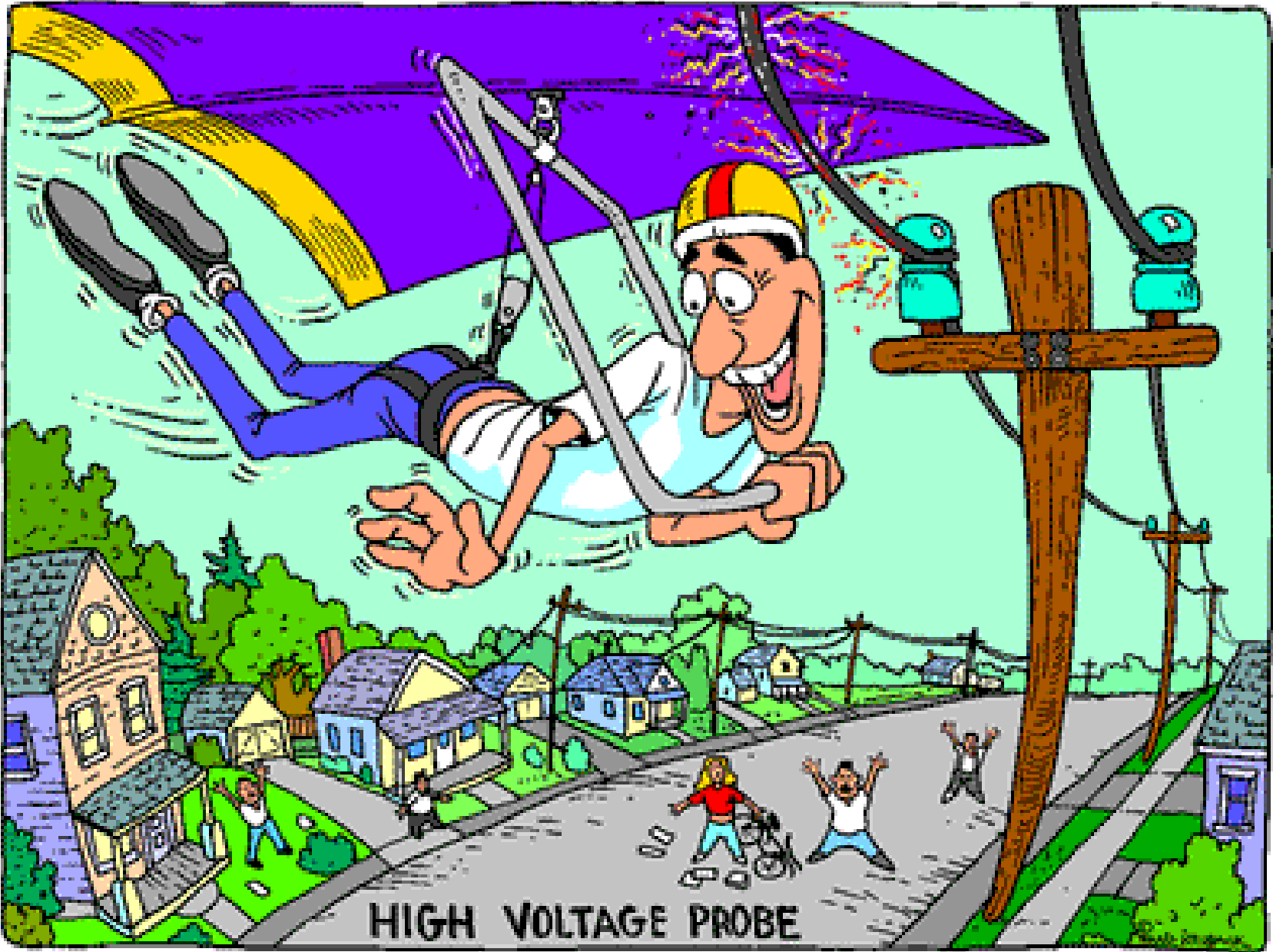
k_u

Co to za wartość ?

Rezystancja woltomierza

Zacisk uziemienia

CE

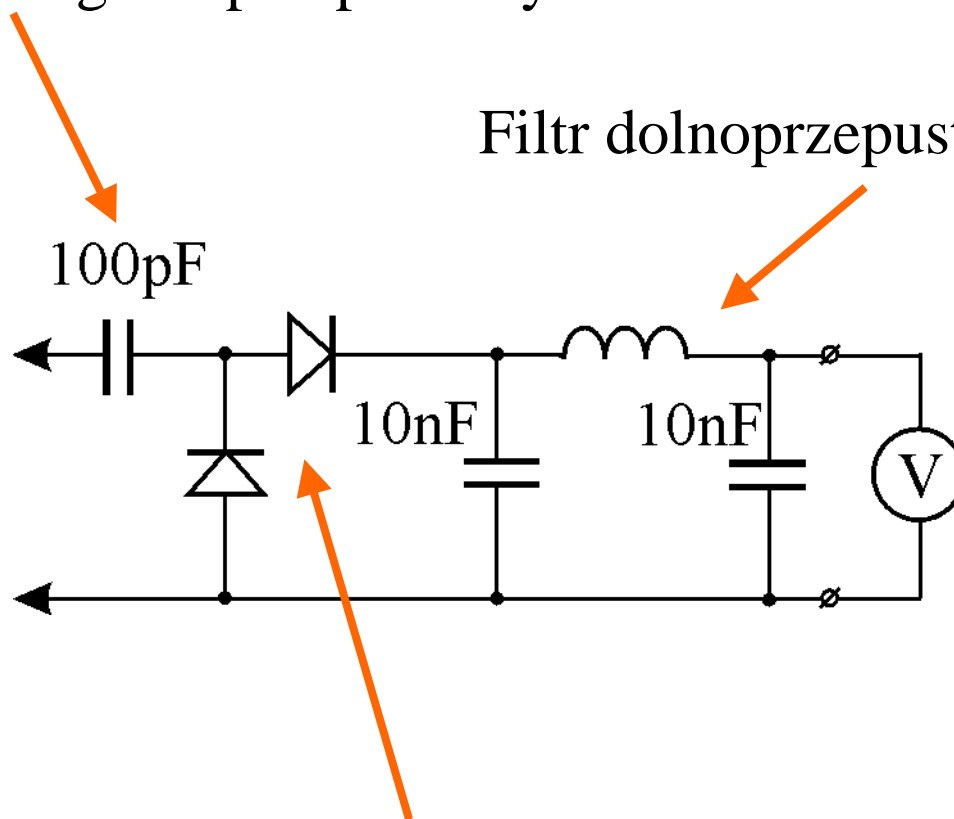


HIGH VOLTAGE PROBE

Sonda w.cz. 10V, 200MHz

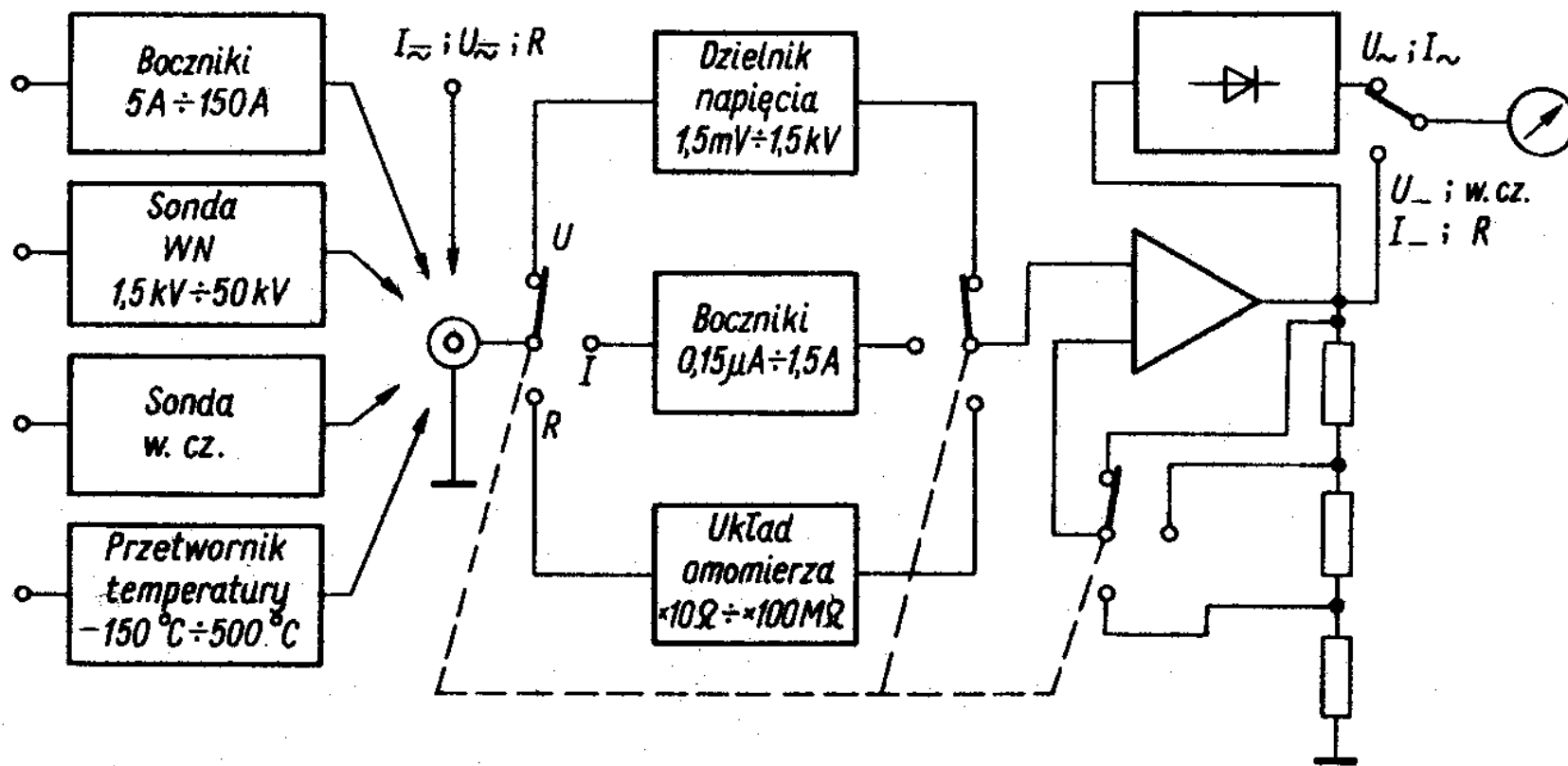
Wejściowy filtr górnoprzepustowy

Filtr dolnoprzepustowy LC typu π



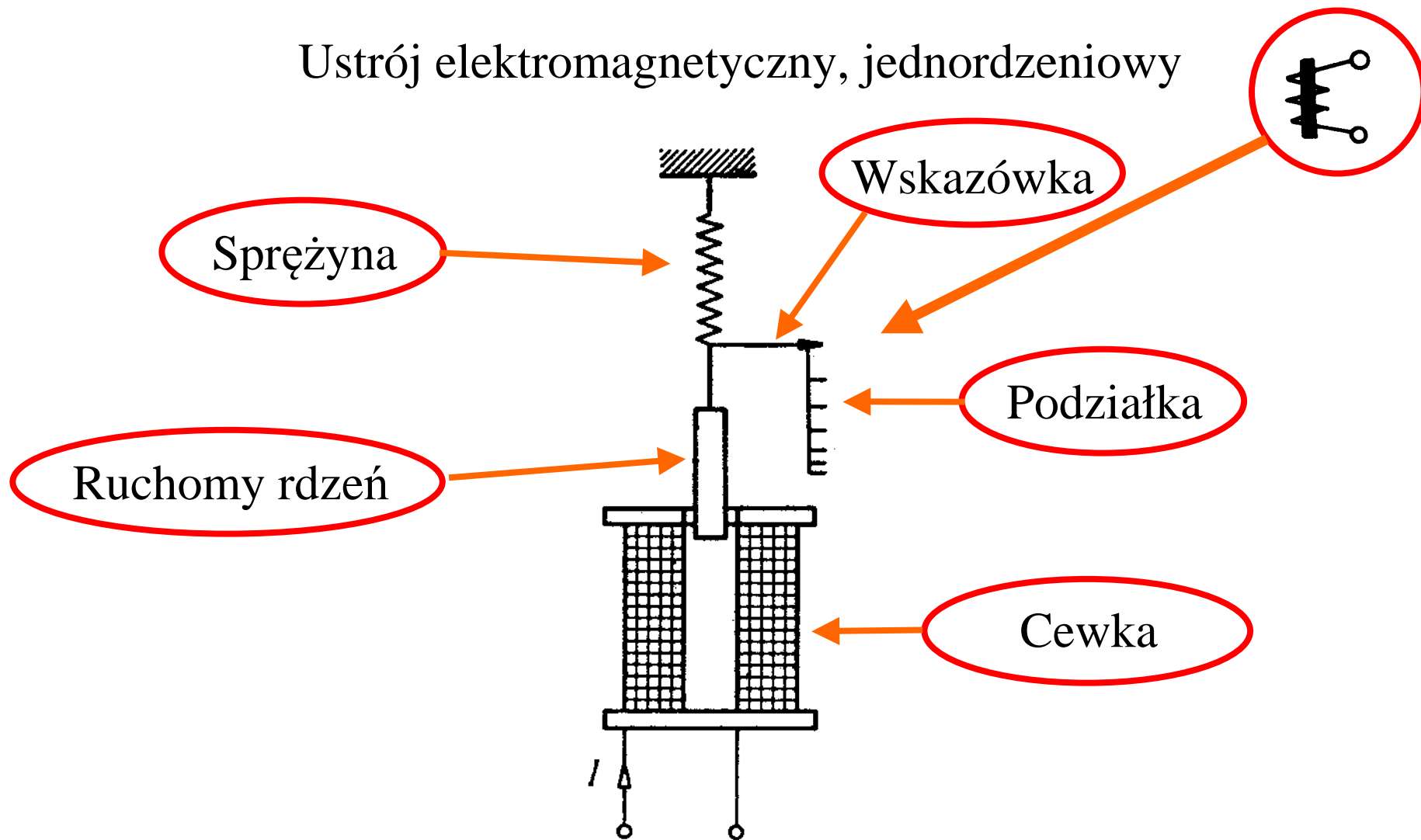
Prostownik w układzie podwajacza napięcia.

Multimetr ME elektroniczny

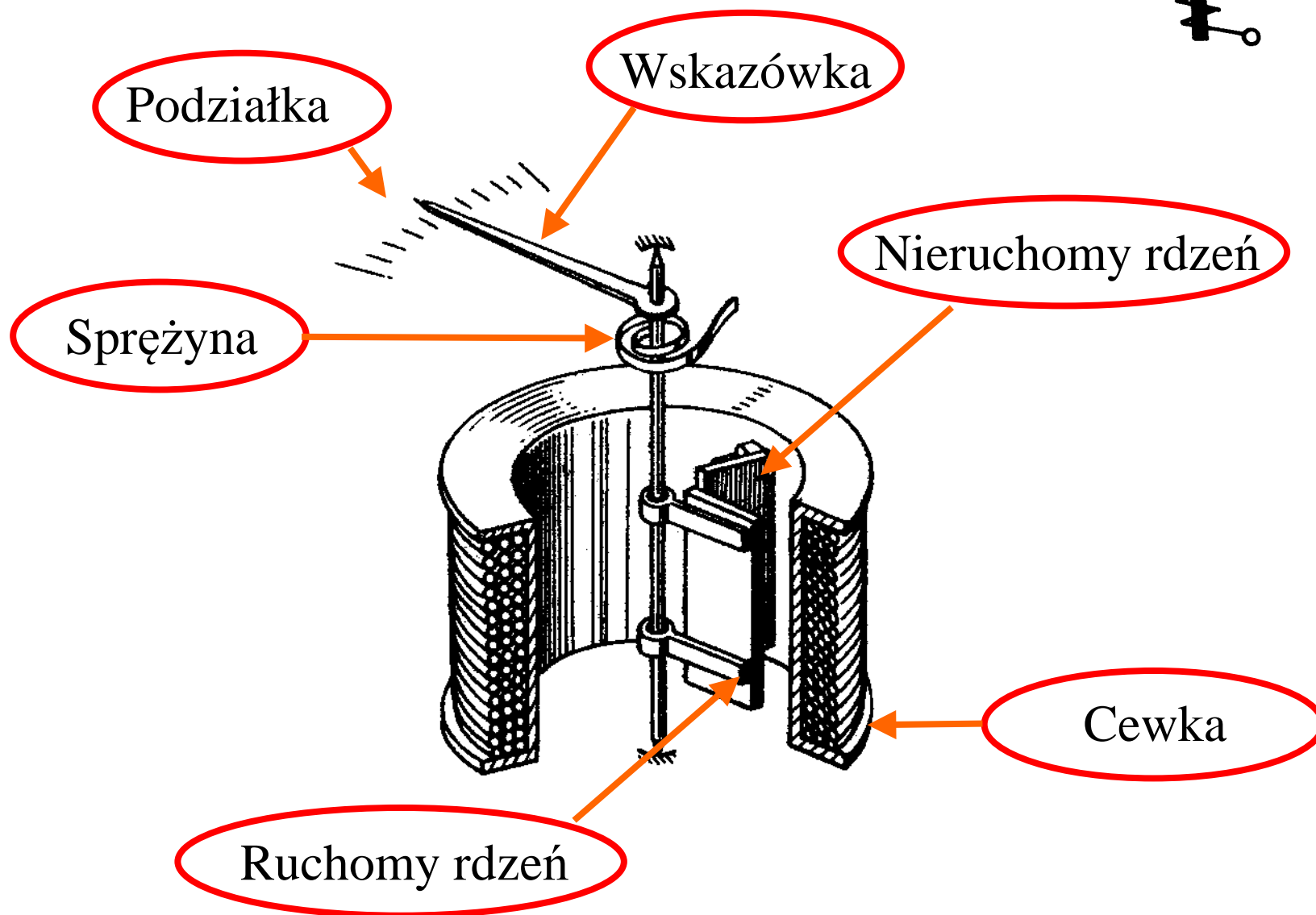
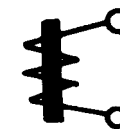


Schemat blokowy multimetru V640

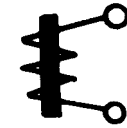
Ustrój elektromagnetyczny, jednordzeniowy



Ustrój elektromagnetyczny, dwurdzeniowy



Ustrój elektromagnetyczny, moment napędowy



Energia pola
magnetycznego cewki

$$W_m = \frac{L I^2}{2}$$

Moment napędowy

$$M_n = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2$$

Moment zwrotny

$$M_z = k\alpha$$

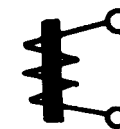
Równowaga momentów

$$M_n = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2 = k\alpha = M_z$$

Wychylenie wskazówki

$$\alpha = \frac{1}{2k} \frac{dL}{d\alpha} I^2$$

Ustrój elektromagnetyczny, właściwości



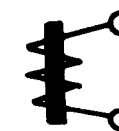
Miernik mierzy **prawdziwą**
wartość skuteczną

$$\alpha = \frac{1}{2k} \frac{dL}{d\alpha} I^2$$

True RMS

Możliwość kształtowania
charakteru podziałki poprzez
kształt obwodu magnetycznego

Ustrój elektromagnetyczny, kształtowanie skali

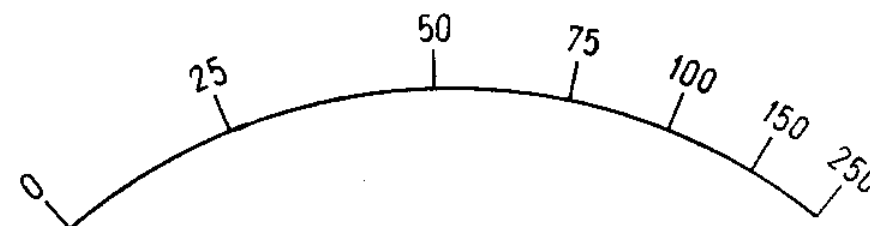


Miernik laboratoryjny
z liniową skalą



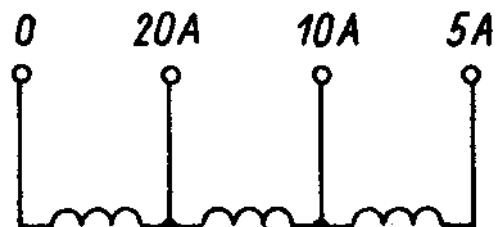
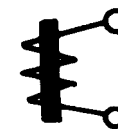
Amperomierz do
rozruchu silników

Woltomierz do kontroli
napięcia w sieci

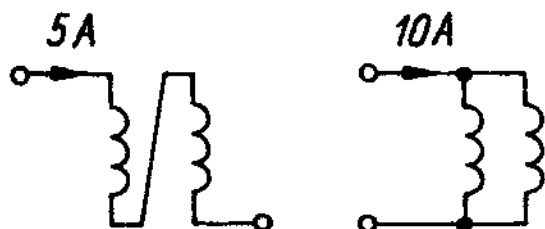


Woltomierz do
synchronizacji generatorów

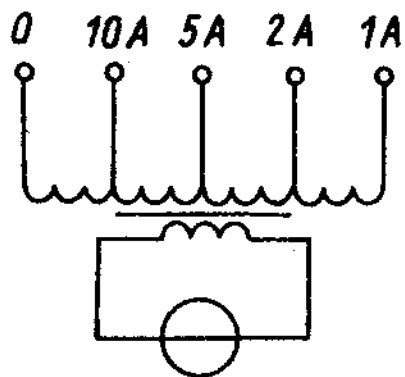
Amperomierz elektromagnetyczny, zmiana zakresów



Uzwojenie z odczepami

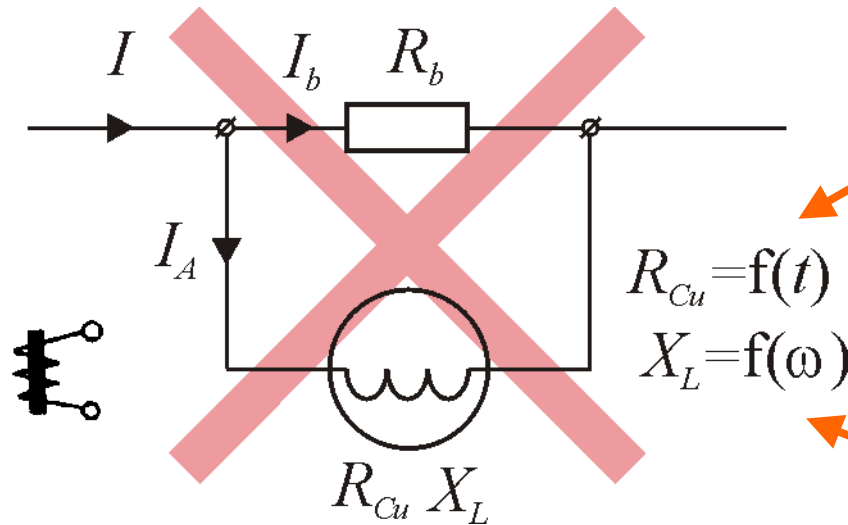
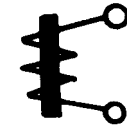


Przełączanie uzwojeń szeregowo - równoległe



Wielozakresowy przekładnik prądowy

Amperomierz elektromagnetyczny + bocznik



Rezystancja R_{Cu} miedzianego uzwojenia silnie zależy od

temperatury

Reaktancja X_L cewki o dużej indukcyjności L zależy od

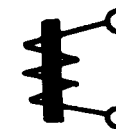
częstotliwości

Wniosek:

Do zwiększania zakresów amperomierzy elektromagnetycznych

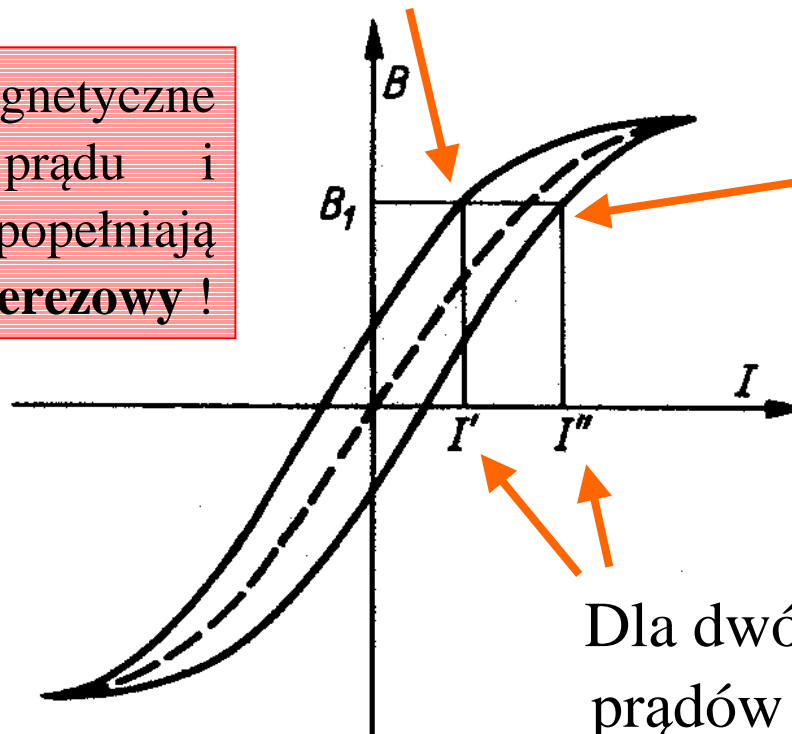
nie stosuje się boczników !

Amperomierz elektromagnetyczny, histereza



Prąd
malejący

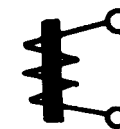
Mierniki elektromagnetyczne przy pomiarach prądu i napięcia stałego popełniają **dodatkowy błąd histerezy !**



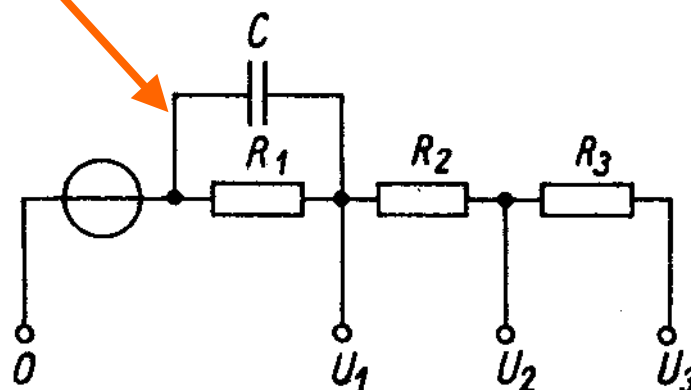
Prąd
rosnący

Dla dwóch różnych prądów mamy takie samo wskazanie !!!

Woltomierz EM, korekcja częstotliwościowa

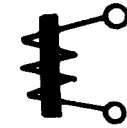


Kondensator
korekcyjny



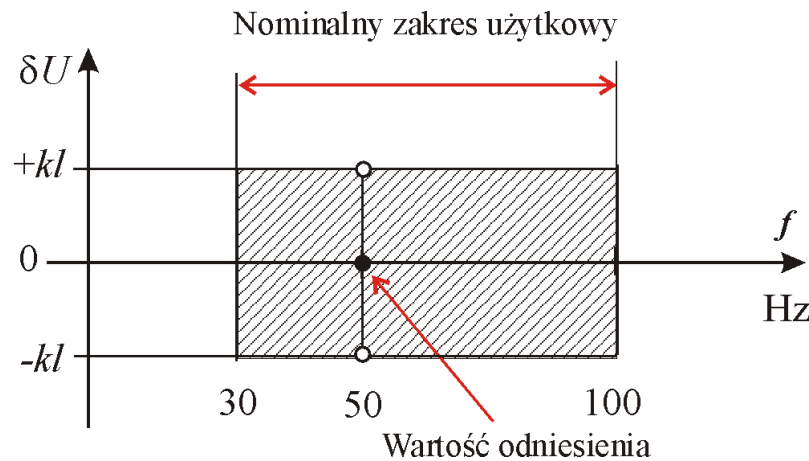
Cewka w ustroju EM posiada dość dużą indukcyjność, co powodują powstawanie ujemnych błędów częstotliwościowych.

Woltomierz EM, korekcja częstotliwościowa

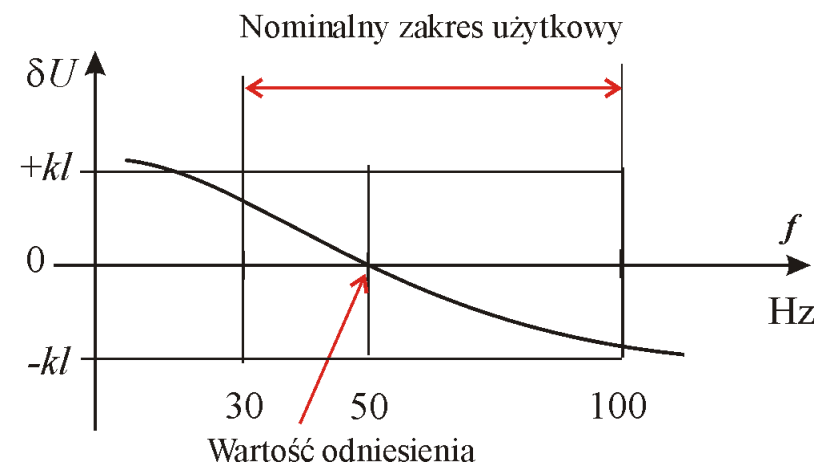


Sposób oznakowania: **wartość odniesienia 50Hz** (podkreślona), **zakres nominalny użytkowania od 30 do 50Hz i od 50 do 100Hz** (wartości graniczne oddzielone kropkami).

30 .. 50 .. 100 Hz



Graniczne wartości błędów dodatkowych od częstotliwości



Rzeczywisty przebieg błędów częstotliwościowych (w praktyce jest on użytkownikowi nieznan)

Podsumowanie

1. Mierniki ME mogą być zastosowane do pomiarów napięć przemiennych po zastosowaniu układów prostownikowych.
2. Wskazania mierników ME prostownikowych zależą od wartości średniej wyprostowanej, ale mierniki są wyskalowane do pokazywania wartości skutecznej przebiegu sinusoidalnego.
3. Dodatkowe sondy umożliwiają pomiary przy wysokich napięciach oraz przy wysokich częstotliwościach.
4. Podczas pomiaru sygnału o innym kształcie niż sinusoidalny powstają w tym miernikach błędy od kształtu krzywej.
5. Prawdziwą wartość skuteczną (True RMS) mierzą przyrządy elektromagnetyczne.
6. Zmianę zakresów amperomierzy EM realizuje się sekcjonowaniem uzwojeń i przekładnikami prądowymi
7. Z amperomierzami EM nie stosuje się boczników.

