

Konstanty Bielański
Instytut Elektroenergetyki
Politechniki Częstochowskiej

PRZEBIEGI OKRESOWO ZMIENNE I ICH POMIARY

1. Określenia i definicje

Przebieg okresowo (periodycznie) zmienny jest to przebieg, który spełnia następującą zależność

$$w(t) = w(t \pm T) \quad (1)$$

gdzie $w(t)$ jest wielkością fizyczną (np. napięcie, prąd...) zależną od czasu t , która powtarza się co okres czasu T .

Pełną informację o przebiegu periodycznym zawiera funkcja czasu $w(t)$.

W praktyce bardzo często posługujemy się nie funkcją czasu, lecz pewnymi wartościami wynikającymi z funkcji czasu, stanowiącymi tylko część informacji o funkcji. Poniżej zestawiono najczęściej stosowane wartości:

w - wartość chwilowa (np. napięcie u , prąd i ...)

\bar{w} lub w_{sr} - wartość stała, średnia, składowa stała (np. \bar{U} , \bar{I} ... lub U_{sr} , I_{sr} ...)

W - wartość skuteczna (np. U , I ...)

w_m - wartość maksymalna (amplituda)

w_{ms} - wartość międzyszozytowa (np. U_{ms} , I_{ms} ...)

Wartość średnia lub składowa stała:

$$\bar{w} = \frac{1}{T} \int_0^T w(t) dt \quad (2)$$

Wzór (2) ma zastosowanie gdy przebieg $w(t)$ jest dany w formie matematycznej.

$$W = \frac{1}{n} \sum_1^n w_n = \frac{1}{n} \sum_0^{n-1} w_n \quad (3)$$

Wzór (3) ma zastosowanie, gdy przebieg jest dany w formie wykresu lub osylogramu.

Wartość średnia stanowi średnią rzędną funkcji $w(t)$ na przestrzeni okresu. W przypadku posiadania funkcji $w(t)$ w formie wykresu dzielimy okres T na n równych części otrzymując $(n + 1)$ rzędnych (skrajne rzędne są równe). Wynik otrzymujemy z pewnym błędem, tym mniejszym, im większe jest n .

Wartość średnią przebiegu możemy także otrzymać przez planimetrowanie krzywej na przestrzeni jednego lub kilku okresów T i podzielenie otrzymanej powierzchni odpowiednio przez czas jednego lub kilku okresów.

Wartość średnia może być dodatnia lub ujemna.

Wartość skuteczna

$$W = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T w^2(t) dt} \quad (4)$$

Wzór (4) ma zastosowanie, gdy przebieg $w(t)$ jest dany w formie matematycznej.

$$W = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n w_n^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_0^{n-1} w_n^2} \quad (5)$$

Wzór (5) ma zastosowanie, gdy przebieg jest dany w formie wykresu lub osylogramu. Wartość skuteczna jest zawsze dodatnia.

Wartość maksymalna (amplituda)

Wartość maksymalna dotyczy przebiegów sinusoidalnych i niesinusoidalnych ale bez składowej stałej. Amplitudy dodatnia i ujemna mogą być oo do wartości równe lub różne.

Wartość międzyszozytowa

Wartość międzyszozytowa jest to bezwzględna wartość różnicy między największą a najmniejszą wartością funkcji $w(t)$ w okresie, tj. między szczytem górnym a dolnym. Wartość międzyszozytowa jest zawsze dodatnia.

Rozkład przebiegu na składowe

Każdy przebieg periodyczny w ogólnym przypadku można rozłożyć na 2 składowe: składową stałą i zmienną.

Oznacząc:

przebieg $w(t)$ przez w

składową stałą przez \bar{w}

składową zmienną przez \bar{w}

otrzymujemy

$$w = \bar{w} + \tilde{w} \quad (6)$$

We wzorze (6) składowa zmienna \tilde{w} jest periodyczną funkcją czasu podobną pod względem kształtu do "w", lecz z przesuniętą osią czasu.

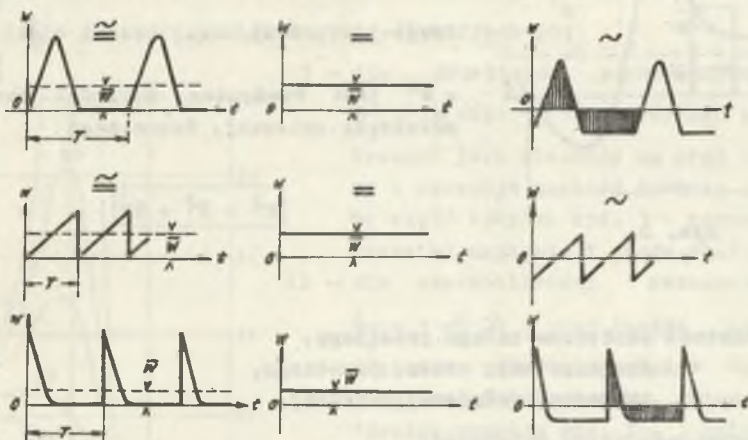
W ten sposób:

$$\frac{1}{T} \int_0^T w \, dt = \bar{w}$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \tilde{w} \, dt = 0$$

Wartość średnia składowej zmiennej jest zawsze równa zero.

Przykłady rozkładu na składowe przedstawia rys. 1.



Rys. 1

Zależności między wartościami

Rys. 2 przedstawia dowolny przebieg periodyczny $w = \bar{w} + \tilde{w}$. Według definicji jego wartość średnia wynosi

$$\frac{1}{T} \int_0^T w \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T (\bar{w} + \tilde{w}) \, dt = \frac{1}{T} \bar{w} \int_0^T dt + \frac{1}{T} \int_0^T \tilde{w} \, dt.$$

Ostatni wyraz jako wartość średnia składowej zmiennej

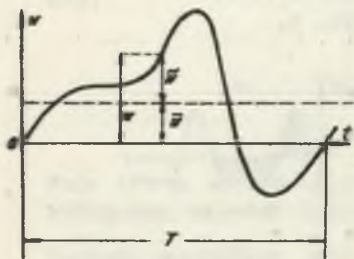
$$\frac{1}{T} \int_0^T \bar{w} dt = 0,$$

Wobec czego wartość średnia przebiegu

$$\frac{1}{T} \bar{w} \int_0^T dt = \bar{w}$$

Obliczmy kwadrat wartości skutecznej przebiegu:

$$w^2 = \frac{1}{T} \int_0^T w^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T (\bar{w} + \bar{w})^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T (\bar{w}^2 + 2\bar{w}\bar{w} + \bar{w}^2) dt$$



Rys. 2

Po scałkowaniu pierwszy człon wynosi \bar{w}^2 , drugi jest równy zeru, trzeci = $\frac{1}{T} \int_0^T \bar{w}^2 dt = \bar{w}^2$ jest kwadratem wartości skutecznej składowej zmiennej. Wobec tego

$$w^2 = \bar{w}^2 + \bar{w}^2 \quad (7)$$

gdzie:

- w - wartość skuteczna całego przebiegu,
- \bar{w} - " " średnia (skł. stała) przebiegu,
- \bar{w} - " " skuteczna składowej zmiennej.

Stąd otrzymujemy ważną zależność:

Kwadrat wartości skutecznej przebiegu periodycznego jest równy sumie kwadratu składowej stałej i kwadratu skutecznej wartości składowej zmiennej.

2. Pomiary przebiegów periodycznych

Pomiar wartości średniej (składowej stałej)

Do pomiaru wartości stałej i wartości średniej stosuje się szeroko rozpowszechniony przyrząd magnetoelektryczny. Jego wychylenie jest wprost proporcjonalne do prądu i

$$\alpha = c i \quad (8)$$

Zależność ta jest ważna tylko dla przebiegów wolnozmiennych. Wynika to ze znanej analizy równań ruchu przyrządu. Rys. 3, przedstawia zależność stosunku wychyleń $\frac{\alpha}{\alpha_0}$ od stosunku częstotliwości $\frac{f}{f_0}$. Na rys. 3 oznaczenia są następujące:

f_0 - częstotliwość własna systemu obrotowego przyrządu

f - częstotliwość przebiegu

α_0 - wychylenie przy prądzie stałym \bar{i}

α - amplituda wychylenia przy prądzie przemiennym o amplitudzie $I_m = \bar{i}$

b - współczynnik tłumienia.

Wyrażenie $\frac{\alpha}{\alpha_0}$ oznacza stosunek wychylenia przy prądzie przemiennym do wychylenia przy prądzie stałym o wartości równej amplitudzie prądu przemiennego. Stosunek ten zależy od stosunku częstotliwości $\frac{f}{f_0}$. Można tu rozróżnić trzy rodzaje pracy przyrządu magneto-elektrycznego:

I - dla przebiegów szybkozmiennych.

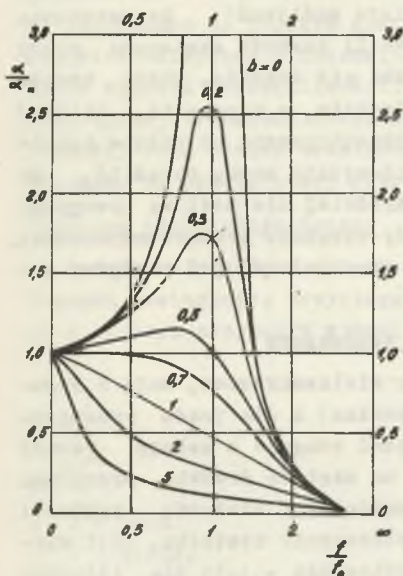
$\frac{f}{f_0} \gg 1$ oraz $\frac{\alpha}{\alpha_0} \ll 1$ przyrząd praktycznie jest nieczuły na prąd zmienny i wskazuje wartość średnią (prawa część wykresu rys. 3 - wszystkie mierniki napięcia i prądu stałego),

II - dla częstotliwości rezonansowej

$\frac{f}{f_0} = 1$ $\frac{\alpha}{\alpha_0} \gg 1$ przy bardzo słabym tłumieniu przyrząd posiada bardzo dużą czułość dla prądu zmiennego (środek wykresu rys. 3 - galvanometr wibracyjny),

III - dla przebiegów wolnozmiennych $\frac{f}{f_0} \ll 1$

oraz $\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1$, i odpowiednio dobranym tłumieniem ($b \approx 0,7$) przyrząd wskazuje wartości chwilowe (lewa część wykresu rys. 3, oscylograf pętlicowy).



Rys. 3

Przyrząd magnetoelektryczny, którego okres wahań własnych jest na ogół rzędu 1 s ($f_0 = 1$ Hz) przy zasilaniu go prądem o częstotliwości $f = 50$ Hz bez składowej stałej pracuje na prawej stronie wykresu (rys. 3) praktycznie nie wychylając się, gdyż wartość średnia jest równa zeru, co najwyżej można niekiedy zauważyć lekkie drżenie wskazówki w okolicy zera skali.

Gdy prąd płynący przez przyrząd zawiera składową stałą i zmienną, wskazówka wskazuje składową stałą, a rzadko kiedy można zauważyć ledwo widoczne drżenie wskazówki wokół składowej stałej.

Przyrząd magnetoelektryczny nadaje się więc do pomiaru wartości średniej, czyli składowej stałej dowolnego przebiegu okresowego, ale tylko dla $f \gg f_0$.

Ten sam przyrząd, przy zasilaniu go prądem o częstotliwości $f \ll f_0$, będzie się zachowywał zupełnie inaczej, mianowicie będzie wskazywał wartości chwilowe prądu o małej częstotliwości f , podobnie jak oscylograf pętlicowy. Ten zakres pracy odpowiada lewej części wykresu (rys. 3), gdzie, przy dobranym tłumieniu jest $\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1$. Przypadek ten może mieć zastosowanie np. przy pomiarze prądu wolnozmiennego w wirniku silnika asynchronicznego (0,5 ... 2 Hz), ale przy spełnieniu warunku $\frac{f}{f_0} < 1$ aby było zachowane $\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1$.

Nagrzewanie

Należy zwrócić uwagę, że przy pomiarze wartości średniej przebiegu za pomocą przyrządu magnetoelektrycznego, istnieje możliwość przeciążenia cieplnego przyrządu, a nawet spalenia go, jeżeli wartość skuteczna prądu płynącego przez przyrząd jest znacznie większa niż średnia. Wtedy bowiem wychylenie jest małe, bo mała jest wartość średnia, a nagrzanie, zależne od wartości skutecznej, duże. Dlatego przy przechodzeniu na niższe zakresy przyrządu trzeba to brać pod uwagę. Orientacyjnie można określić, że 1,5 do 2 razy większa wartość skuteczna od średniej nie powinna przegrzać przyrządu, gdyż cewka przyrządu jest z reguły cieplnie przedymensjonowana. Ewentualne opory do zmiany zakresów trzeba skontrolować pod względem nagrzania.

Przyrząd magnetoelektryczny z prostownikiem wbudowanym

Przyrządy te, budowane jako uniwersalne i wielozakresowe, mają z reguły dwie skale: dla prądu stałego (bez prostownika) i dla prądu przemiennego sinusoidalnego (z prostownikiem). Przyrząd reaguje z natury rzeczy na wartość średnią. Z prostownikiem reaguje na wartość średnią przebiegu wyprostowanego. Ponieważ w przebiegach sinusoidalnych stosunek wartości skutecznej do średniej prostowanej, tzw. współczynnik kształtu, jest wartością stałą i znaną (dla dwupółkowego prostowania - 1,11 dla jednopółkowego prostowania - 1,57), można przyrząd wyskalować bezpośrednio w wartościach skutecznych, co z reguły jest stosowane. Dla przebiegów nie-

sinusoidalnych stosunek ten nie jest znany, skalowanie traci swą ważność, przyrząd nie może służyć do mierzenia wartości skutecznej. Prócz tego, przy krzywych bardzo spiczastych, może nastąpić przebicie prostownika.

Pomiar wartości skutecznej

Następujące przyrządy reagują na wartość skuteczną:

- cieplny (także magnetoelektryczny z termoelementem),
- elektromagnetyczny,
- elektrodynamiczny,
- elektrostatyczny,
- indukcyjny (tylko dla jednej częstotliwości).

W ogólnym przypadku, przyrządy, których moment napędzający jest proporcjonalny do kwadratu prądu względnie napięcia, reagują na wartość skuteczną. Jeżeli prąd jest przemienny $i = f(t)$, a moment napędzający proporcjonalny do i^2 , to moment jest funkcją czasu. Z powodu bezwładności systemu obrotowego przyrządu nie będzie on drgał z częstotliwością funkcji i^2 , lecz ustali się na wartości średniej momentu, odpowiadającej średniej kwadratowej prądu. Można wyskalować przyrząd dla wartości skutecznych. Częstotliwość własna wahań wskazówki powinna być znacznie mniejsza od częstotliwości funkcji i^2 (podwójna częstotliwość), co z reguły jest spełnione, gdyż częstotliwość własna przyrządu jest rzędu 1 Hz.

Przyrząd cieplny

Najlepszym do pomiaru wartości skutecznej jest przyrząd cieplny oraz magnetoelektryczny z termoelementem, gdyż wskazuje prawidłowo dla szerokiego zakresu częstotliwości. O termicznej stałej czasowej przetworznika (grzejnik-termoelement-miernik) decyduje w większości przypadków sam miernik, rola bowiem bezwładności cieplnej termoelementu jest pomijalna w stosunku do bezwładności miernika.

Przyrząd elektromagnetyczny

Działa na zasadzie dynamicznego oddziaływania między cewką a żelazną blaszką (wołaganie, przyciąganie, odpychanie 2 blaszek). Moment napędzający w ogólnym przypadku wynosi:

$$M = c i^2 \frac{dL}{d\alpha} \quad (9)$$

gdzie:

- i - prąd,
- c - stała,
- L - indukcyjność cewki z żelazem (blaszką),
- α - wychylenie (położenie wzajemne żelaza względem cewki).

Indukcyjność samej oewki powietrznej jest stała, ale do wzoru (9) wchodzi indukcyjność oewki łącznie z ruchomą blaszką zatem zmienia się zależnie od ich wzajemnego położenia, co oznacza, że

$$L = f(\alpha) \quad (10)$$

Jeżeli L zależy tylko od położenia wskazówki α , to dla pewnego α , wyraz $\frac{dL}{d\alpha} = \text{const}$, zaś moment M jest funkcją czasu, gdyż i^2 jest funkcją czasu. Wskazówka przyrzędu, z powodu bezwładności systemu obrotowego, ustawi się stosownie do wartości średniej momentu na wychyleniu α . Ponieważ jako moment zwrotny przyrzędu M_z stosuje się sprężynkę, to

$$M_z = k\alpha \quad (11)$$

Średnia wartość momentu napędzającego (9) wynosi

$$M_{\text{śr}} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = \frac{dL}{d\alpha} \circ \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \circ \frac{dL}{d\alpha} I^2 \quad (12)$$

Wyraz $\frac{dL}{d\alpha}$ wyciągnięto przed oalkę, gdyż na przestrzeni okresu prądu zmiennego położenie wskazówki nie ulega zmianie.

W stanie ustalonym będzie

$$M_{\text{śr}} = M_z = k\alpha$$

Po wstawieniu wzoru (11) do wzoru (12) otrzymany

$$\circ \frac{dL}{d\alpha} I^2 = k\alpha, \quad \text{stąd}$$

$$I^2 = \frac{k}{\circ} \alpha \frac{d\alpha}{dL} \quad \text{oraz}$$

$$I = \sqrt{\frac{k}{\circ} \alpha \frac{d\alpha}{dL}} = F(\alpha) \quad (13)$$

skąd wynika, że przyrząd można wyskalować w wartościach skutecznych. W wymienionych warunkach będzie on wskazywał prawidłowo wartość skuteczną prądu niezależnie od częstotliwości ani od kształtu krzywej przebiegu.

Kształt funkcji $L = f(\alpha)$ będzie wpływał tylko na charakter skali przyrzędu. Raz wykonana skala przyrzędu będzie ważna dla dowolnych częstotliwości. Jest to przypadek wyidealizowany.

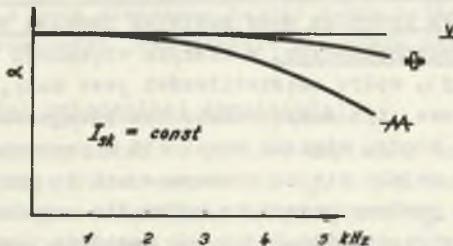
W rzeczywistości w przyrządach elektromagnetycznych indukcyjność L cewki z żelazem nie jest dla danego α zawsze taka sama, lecz zależy również w pewnym małym stopniu od wartości prądu oraz w większym stopniu od częstotliwości f . Przy większym bowiem prądzie może następować nasycenie żelaza, a przy większej częstotliwości zwiększy się demagnesujące działanie prądów wirowych w żelazie, co wpłynie na zmniejszenie L , a to oznacza, że L nie będzie tylko funkcją α lecz

$$L = f(\alpha, I, f) \quad (14)$$

tym samym wzory (12) i (13) nie będą słuszne, moment M nie będzie wrażliwy proporcjonalnie do i^2 , lecz wolniej, co powoduje błędy wskazań. Gdy $\alpha = \text{const}$ oraz $I_{sk} = \text{const}$, ale częstotliwość f rośnie, prądy wirowe w blaszce rosną, amperozwoje przeciwdziałające amperozwojom cewki rosną, w rezultacie moment, zamiast pozostać niezmiennym – maleje. Nie tylko pozostałe prądy wirowe w blaszce osłabiają strumień, ale także inne metalowe części konstrukcyjne przyrządu działają podobnie w miarę wzrostu częstotliwości. W rezultacie mimo stałości wartości skutecznej prądu w cewce moment przy wzroście f maleje, co powoduje błędne wskazania przyrządu.

Przy przebiegach zmiennych zawierających dużą składową stałą, może zaobserwować nasycenie żelaznej blaszki, co także zwiększa błędy wskazań.

Praktycznie przyrząd elektromagnetyczny nadaje się do mierzenia wartości skutecznej dla częstotliwości 50 Hz wraz z kilkoma harmonicznymi, natomiast dla częstotliwości akustycznych (powyżej 1000 Hz), wskazania jego wyraźnie maleją i błędy rosną (rys. 4) co przekreśla możliwość stosowania go dla tych częstotliwości.



Rys. 4

Przyrząd elektrodynamiczny (bez żelaza)

Moment napędzający tego przyrządu w ogólnym przypadku jest wyrażony zależnością

$$M = c i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{d\theta} \quad (15)$$

gdzie:

i_1, i_2 - prądy w cewkach,

M_{12} - współczynnik indukcyjności wzajemnej między obu cewkami,

α - wychylenie.

Współczynnik indukcyjności wzajemnej M_{12} jest zależny tylko od wzajemnego położenia cewek,

$$M_{12} = f(\alpha) \quad (16)$$

natomiast jest niezależny od prądów i częstotliwości. Prądy wirowe prawie nie występują, zatem nie ma osłabienia strumienia. W istniejących zawsze jakichś metalowych częściach konstrukcyjnych przyrządu powstają wprawdzie słabe prądy wirowe, ale ich wpływ uwidacznia się dopiero przy dużych częstotliwościach, powyżej akustycznych (rys. 4).

Aby przyrząd elektrodynamiczny reagował na wartość skuteczną prądu, musi mieć obie cewki połączone w szereg. Wtedy jego moment

$$M = 0 \cdot i^2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} \quad (17)$$

Gdyby cewki były połączone równolegle, moment mógłby zależeć od częstotliwości, gdyż prądy i_1 oraz i_2 nie muszą być w fazie z powodu różnych stosunków reaktancji do rezystancji w każdej z gałęzi równoległych. Wtedy zależność (17) nie byłaby ważna.

Przyrząd elektrodynamiczny z cewkami połączonymi w szereg nadaje się do pomiaru wartości skutecznej dla częstotliwości nie przekraczających akustycznych, przy czym przebieg może zawierać dowolną składową stałą.

W przyrządach ferrodynamicznych, w których większość drogi strumieni stanowi żelazo (blachy), wpływ częstotliwości jest duży, gdyż przy wzroście f rosną prądy wirowe, tym samym rośnie ich odmagnesowujące działanie, pojawiają się znaczne błędy, większe nawet niż w przyrządzie elektromagnetycznym. Przyrządy te zwykle nie są stosowane ani do pomiaru prądu ani napięcia, lecz tylko do pomiaru mocy i to tylko dla częstotliwości 50 Hz.

Przyrząd elektrostatyczny, działający na zasadzie przyciągania się 2 okładek kondensatora pod napięciem, posiada moment napędzający wyrażony wzorem ogólnym

$$M = 0 \cdot u^2 \frac{dC}{d\alpha} \quad (18)$$

gdzie:

c - stała

u - napięcie

C - pojemność między okładką stałą a ruchomą.

Przyrząd ten, w przypadku gdy pojemność C zależy tylko od położenia α , na zasadzie podobnego rozumowania jak w przyrządzie elektromagnetycznym, (wzory 11, 12, 13), nadaje się do pomiaru wartości skutecznej napięcia praktycznie niezależnie od częstotliwości.

Przyrząd indukcyjny nadaje się jedynie do pomiaru wartości skutecznych przebiegów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz, bez składowej stałej.

Uwagi ogólne dotyczące pomiarów wartości skutecznej

Wymienione poprzednio przyrządy do pomiaru wartości skutecznych są miernikami prądu z wyjątkiem przyrządu elektrostatycznego, który jest miernikiem napięcia. W zasadzie każdy przyrząd może być użyty do mierzenia zarówno prądu jak i napięcia, ale należy wziąć pod uwagę impedancję przyrządu $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, która jest zależna od częstotliwości. Zmiana częstotliwości przy zachowaniu wartości skutecznej prądu, nie wpłynie na zmianę wskazania amperomierza, ale wpłynie na spadek napięcia na jego końcówkach.

Choć zastosować miernik prądu do pomiaru napięcia, trzeba dać w szereg duży opór R' , aby prąd był proporcjonalny do napięcia. Opór R' powinien spełniać warunek

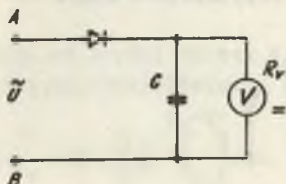
$$R' \gg Z \quad (19)$$

Przy pomiarach przebiegów odkształconych wchodzi zatem w rachubę tylko mierniki prądu, a przy mierzeniu napięć także tylko mierniki prądu z dużymi oporami szeregowymi, aby kształt przebiegu nie uległ zmianie.

Pomiar wartości maksymalnej (amplitudy)

Rys. 5 przedstawia układ do pomiaru amplitudy napięcia przemiennego \tilde{u} . Kondensator C ładuje się do amplitudy U_m , a jej wartość wskazuje magneto-elektryczny woltomierz o możliwie dużym oporze R_v . Stała czasowa wyładowania kondensatora przez woltomierz wynosi

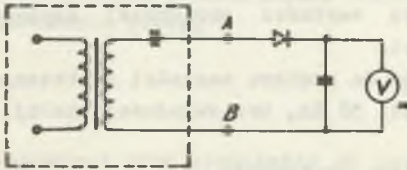
$$\tau = R_v C \quad (20)$$



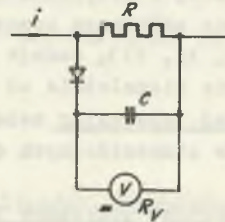
Rys. 5

Praktycznie wystarczy, aby $\tau > 10 T$, gdzie T - okres podstawowej harmonicznej. Dla przeciętnych woltomierzy uniwersalnych, pobierających prąd rzędu 1 ... 3 mA wystarcza zwykle $C \approx 1 \mu F$. Odwrócenie prostownika pozwala zmierzyć drugą amplitudę.

Warunkiem działania układu z rys. 5 jest istnienie galwanicznego połączenia między końcówkami AB źródła napięcia (np. pomiar napięcia na oporze lub na uswojeniu transformatora). W przypadku braku takiego połączenia rys. 6, woltomierz wskaże zero, gdyż składowa stała prądu woltomierza nie ma obrotu zamkniętego z powodu obecności kondensatora C_1 .



Rys. 6



Rys. 7

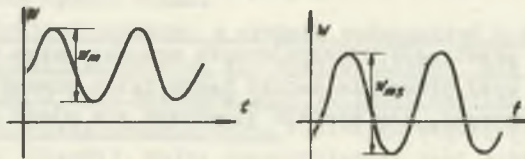
Rys. 7 przedstawia sposób pomiaru amplitudy prądu i , przy czym podobnie jak poprzednio

$$\tau = R_V C \geq 10 T$$

(por. także rozdział następny).

Pomiar wartości międzyszozytowej

Wartość międzyszozytowa W_{ms} nie zależy od ewentualnej składowej stałej przebiegu, rys. 8.

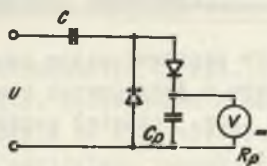


Rys. 8

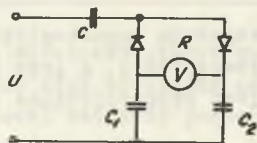
Układy do pomiaru wartości międzyszozytowej napięcia są przedstawione na rys. 9 i 10. Kondensator C w obu układach o dużej pojemności, aby składowa zmienna spadku napięcia na nim była pomijalna wobec napięcia u , służy do oddzielenia składowej stałej przebiegu. Kondensator C_p rys. 9 ładuje się do wartości międzyszozytowej, którą wskazuje woltomierz o dużym oporze R_p . Powinno być

$$R_p C_p \gg T, \quad (21)$$

gdzie T - okres podstawowej harmonicznej.



Rys. 9

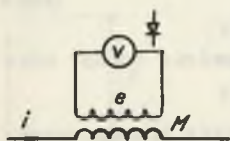


Rys. 10

Dla układu rys. 10 powinno być

$$R_p \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \gg T \quad (22)$$

Układ do pomiaru wartości międzyszozytowej prądu przedstawiono na rys. 11. Zastosowano w nim transformator powietrzny. Tu wartość średnia SEM-nej po stronie wtórnej e jest proporcjonalna do wartości międzyszozytowej prądu i . Woltomierz magnetoelektryczny o dużym oporze z prostownikiem ma wskazanie proporcjonalne do sumy amplitud prądu i , czyli do wartości międzyszozytowej prądu. Rys. 12 wyjaśnia zasadę



Rys. 11

$$\text{SEM } e = M \frac{di}{dt} \quad (23)$$

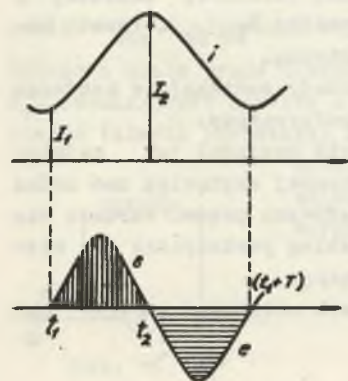
$$edt = Mdi,$$

po scałkowaniu

$$\int_{t_1}^{t_2} edt = M (I_2 - I_1) \quad \text{gdzie}$$

$$I_2 - I_1 = I_{ms}$$

Wyrażenie $\int_{t_1}^{t_2} edt$ jest proporcjonalne do



Rys. 12

wartości średniej e na przestrzeni $t_1 \dots t_2$ (w tym przedziale $e > 0$), podobnie dla pozostałej części okresu $t_2 \dots (t_1 + T)$ ($e < 0$), zatem po wyprostowaniu e jedno czy dwupółokowym można napisać

$$\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} edt + \left| \frac{1}{T} \int_{t_2}^{t_1+T} edt \right| = 2 \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} edt = k E_{sr} = k(I_2 - I_1) = kI_{ms} \quad (24)$$

Wskazanie przyrządu magnetoelektrycznego jest zatem proporcjonalne do wartości międzyszozytowej, a przy przebiegu przemiennym o jednakowych obu amplitudach, jest proporcjonalne do amplitudy prądu (por. rozdział poprzedni).

Należy zaznaczyć, że zależność (24) jest ważna tylko wtedy, gdy krzywa prądu i ma nie więcej niż dwa ekstrema w okresie T , co w większości przebiegów ma miejsce (np. pomiar amplitudy odkształconego prądu magnesującego w aparacie Epsteina przy pomocy transformatora powietrznego i przyrządu magnetoelektrycznego z prostownikiem).

Pomiary oddzielne składowych stałej i zmiennej

W przebiegu periodycznym, przedstawionym w formie ogólnej

$$w = \bar{w} + \tilde{w} \quad (25)$$

nie wszystkie wartości można mierzyć oddzielnie. Bezpośrednio można mierzyć następujące:

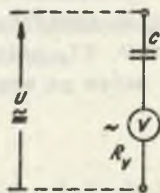
- wartość średnią, czyli składową stałą \bar{w} przebiegu przy pomocy przyrządu magnetoelektrycznego założonego bezpośrednio na cały przebieg (p.p. 2, pomiar wartości średniej).
- wartość skuteczną W funkcji w (całego przebiegu) przy pomocy odpowiedniego przyrządu, założonego bezpośrednio na cały przebieg (p.p. 2 pomiar wartości skutecznej).

Nie można natomiast bezpośrednio zmierzyć samej składowej zmiennej \tilde{w} (jej wartości skutecznej \tilde{W} lub średniej wyprostowanej \tilde{W}_{sr}). Trzeba zastosować układ rozdzielający składowe stałą i zmienną.

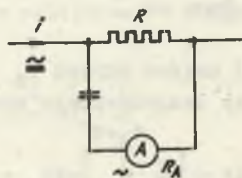
W celu rozdzielenia składowych stosuje się układy zawierające kondensatory, dławiki oraz z pewnymi zastrzeżeniami transformatory.

Ogólną zasadą jest, aby układ mierzący napięcie posiadał jak największy opór zarówno dla składowej stałej jak i zmiennej napięcia, zaś układ mierzący prąd, jak najmniejszy opór dla obu składowych prądu. Warunek ten jest konieczny z tego powodu, żeby mierzony przebieg periodyczny nie ulegał zniekształceniu przez obecność układu mierzającego.

Na rys. 13 i 14 przedstawiono układy do pomiaru składowej zmiennej napięcia i prądu.



Rys. 13



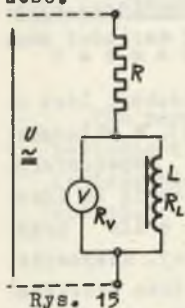
Rys. 14

Kondensator C, rys. 13, nie przepuszcza składowej stałej prądu woltomierza. Kondensator C powinien mieć możliwie dużą pojemność ażeby spadek napięcia na nim, wywołany przepływem składowej zmiennej prądu woltomierza był pomijalny. Zaobowiązuje nierówność

$$R_V \gg \frac{1}{C\omega} \quad (26)$$

gdzie ω - odpowiada podstawowej harmonicznej przebiegu mierzonego.

Układ z rys. 14, do pomiaru składowej zmiennej prądu powinien również spełniać warunek (26). Spełnienie tego warunku jest tu znacznie trudniejsze niż w układzie poprzednim, gdyż opór amperomierza (ew. miliwoltomierza) jest mały, tym samym kondensator musi mieć znacznie większą pojemność.



Na rys. 15 pokazano układ z dławikiem do pomiaru składowej zmiennej napięcia u. Tu powinny być spełnione warunki:

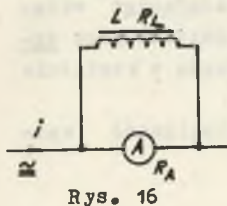
$$\left. \begin{aligned} L\omega_{\max} &\ll R \\ R_L &\ll R_V \\ L_V &\ll L \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

gdzie ω_{\max} - odpowiada najwyższej harmonicznej przebiegu mierzonego.

Składowa stała prądu przepływa przez R i R_L , składowa zmienna przez R i R_V . Indukcyjność dławika L nie powinna zależeć od podmagnesowania prądem stałym (dławik powietrzny lub rdzeniowy ze szczeliną).

Rys. 16 przedstawia układ do pomiaru składowej zmiennej prądu.

Warunki:



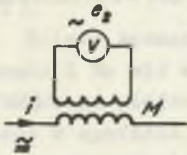
$$\left. \begin{aligned} L\omega &\gg R_A \\ R_L &\ll R_A \\ L &\gg L_A \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

gdzie ω - odpowiada podstawowej harmonicznej.

Składowa stała prądu płynie przez dławik gdyż $R_L \ll R_A$.

Składowa zmienna prądu płynie przez amperomierz, gdyż $L\omega \gg R_A$.

Spośród innych sposobów pomiaru składowej zmiennej prądu można wymie-
nić sposób z zastosowaniem transformatora powietrznego lub rdzeniowego a-
le z pewnymi zastrzeżeniami.



Rys. 17

Na rys. 17 przedstawiono układ z transformatorem
powietrznym M. Układ ten nadaje się w zasadzie do po-
miaru sinusoidalnej składowej zmiennej prądu, gdyż
 $e_2 = M \frac{di}{dt}$,

oraz

$$E_2 = I M \omega.$$

Można wtedy wyskalować woltomierz w wartościach skutecznych czy średnich
prostowanych składowej zmiennej prądu i , gdyż składowa stała nie transfor-
muje się na stronę wtórną i nie wywiera żadnego wpływu na wskazania wol-
tomierza. W przypadku prądu i , zawierającego także wyższe harmoniczne, wska-
zanie przyrządu, jako proporcjonalne do pochodnej prądu (jej wartości sku-
tecznej czy średniej prostowanej) nie będzie prawidłowe.



Rys. 18

Na rys. 18 przedstawiono układ podobny, lecz z
transformatorem rdzeniowym (prądowym). W układzie
tym po stronie wtórnej znajduje się amperomierz
(znikomy opór), w którym prąd praktycznie ma iden-
tyczny przebieg jak prąd pierwotny, o ile prąd
pierwotny nie zawiera składowej stałej. Nasylenie
rdzenia nigdy nie występuje, gdyż amperozwoje pierwotne i wtórne praktycz-
nie się znoszą. Zatem, jeżeli prąd pierwotny nie zawiera składowej stałej,
amperomierz wskazuje prawidłowo także przy niesinusoidalnym prądzie pier-
wotnym. Natomiast istnienie nawet małej składowej stałej w prądzie pier-
wotnym powoduje nasylenie się rdzenia i bardzo silne zniekształcenie prą-
du wtórnego w stosunku do pierwotnego, co praktycznie przekreśla stosowa-
nie tego układu do pomiaru składowej zmiennej prądu.

Zatem układ z rys. 17 nadaje się do pomiaru prądu posiadającego skła-
dową stałą i zmienną, ale tylko w przypadku gdy składowa zmienna jest si-
nusoidalna. Układ rys. 18 - nadaje się tylko do pomiaru prądu o kształcie
dowolnym, ale bez składowej stałej.

Zastosowanie transformatora rdzeniowego ogranicza częstotliwość wyż-
szych harmonicznych przebiegu do kilkuset Hz.

Wpłynęło do redakcji w kwietniu 1971 r.

ПЕРИОДИЧНО ПЕРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Резюме

В статье представлены применяемые дефиниции величин выведенных из периодических функций времени как среднее значение, эффективные и др., обсуждено также некоторые типы приборов и схем для измерения этих значений.

THE PERIODIC FUNCTIONS AND ITS MEASUREMENTS

Summary:

The paper presents the applied difinitions of values resulting from periodic-time-functions (f.ex. mean value, rms value etc). The types of instruments and the schemes of connections to measure this values are described.