

Ć w i c z e n i e 1

POMIARY SYGNAŁÓW ELEKTRYCZNYCH

WPROWADZENIE

Wszystkie sygnały charakteryzujące zjawiska fizyczne, a więc również występujące w elektronice, są bądź sygnałami zdeterminowanymi, bądź przypadkowymi (losowymi), co oznacza, że ich wartości są lub nie są określone z góry dla każdej chwili czasu. Ponieważ pojęcie sygnału odnosi się do zmian w czasie dowolnej wielkości fizycznej, to zależnie od tego, czy wielkość ta określona jest w dowolnej chwili czasu, stanowiącego zmienną ciągłą, czy też w przeliczalnym ciągu chwil, można mówić o sygnałach ciągłych – czyli analogowych lub dyskretnych – czyli cyfrowych. Ta ostatnia klasyfikacja przebiega według innego kryterium niż pierwsza, co oznacza, że zarówno sygnały ciągłe, jak i dyskretnie mogą być zdeterminowane lub nie.

Sygnały zdeterminowane można podzielić na okresowe i nieokresowe. Z kolei sygnały okresowe dzielą się na harmoniczne i nieharmoniczne (poliharmoniczne). Parametrami sygnału harmonicznego są: amplituda A , częstotliwość f i faza początkowa φ . Sygnały okresowe $x(t) = x(t \pm kT)$, $k = 1, 2, \dots$, określone dla każdego t , można rozłożyć w znany sposób na szereg Fouriera, jeśli spełnione są warunki Dirichleta. Niekiedy sygnały okresowe zawierają skończoną liczbę składowych, ale zawsze charakterystyczne jest to, że stosunki wszystkich możliwych par częstotliwości fourierowskich są liczbami wymiernymi.

Sygnały nieokresowe można podzielić na sygnały prawie okresowe i przejściowe. Pod pojęciem sygnału prawie okresowego rozumie się takie sygnały, które są sumą przebiegów harmonicznych $x(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)$ takich, że nie wszystkie ilorazy f_k/f_l są liczbami wymiernymi, ale ich widmo jest liniowe (dyskretnie). Obok nich do sygnałów nieokresowych zalicza się sygnały przejściowe (impulsowe), charakteryzujące się widmem ciągłym; do ich opisu używa się transformacji Fouriera lub transformacji Laplace'a.

Sygnały losowe można podzielić na stacjonarne i niestacjonarne, te pierwsze zaś mogą być ergodyczne lub nieergodyczne.

Różne typy sygnałów wymagają różnych metod opisu, a konsekwencją tego są różne metody pomiarowe. Pełne wyliczenie metod pomiarowych nie jest ani możliwe, ani celowe, dlatego poniżej przedstawione będą tylko wybrane metody pomiarowe sygnałów, najistotniejsze w zastosowaniach elektroniki.

Wśród sygnałów zdeterminowanych szczególne miejsce zajmują sygnały okresowe, a źródłem najpełniejszej informacji o nich (choć nie najdokładniejszej) może być oscyloskop, z zasady przysposobiony do ich rejestracji przy zastosowaniu okresowej podstawy czasu, a także nowsze przyrządy zwane rejestratorami przebiegów (waveform recorder) lub analizatorami kształtu przebiegów (boxcar). Te ostatnie umożliwiają przetworzenie badanego sygnału na sygnały dyskretne, rejestrację w pamięci cyfrowej, ewentualną obróbkę przy użyciu komputera i późniejsze odtworzenie z inną szybkością niż przy zapisie, co po przetworzeniu cyfrowo-analogowym pozwala zarejestrować badany sygnał na papierze w zwykłym rejestratorze X-Y (uproszczony boxcar będzie używany w następnych ćwiczeniach).

Nowoczesne oscyloskopy zawierają szereg układów umożliwiających pomiary niewykonalne przy użyciu prostych oscyloskopów. Wprowadzenie dwóch kanałów, obok oczywistej możliwości jednoczesnej obserwacji dwóch sygnałów nie tylko o tych samych częstotliwościach, lecz i o różnych, pozwala mierzyć sygnały napięciowe między dwoma punktami „pływającymi”, a nie tylko względem wspólnej masy (z pewnymi ograniczeniami wynikającymi z niewielkiej wartości CMRR – współczynnika tłumienia sygnału wspólnego); ta ostatnia możliwość realizowana jest w trybie pracy oscyloskopu „odejmowanie” lub „dodawanie” sygnałów z dwóch kanałów (z inwersją). Możliwe jest też proste przejście od obserwacji zależności czasowych obu badanych sygnałów do obserwacji związku między nimi (praca X-Y).

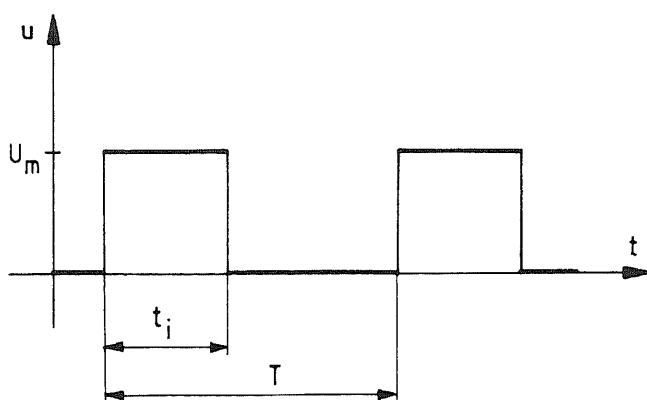
Istotne rozszerzenie możliwości pomiaru daje wprowadzenie dwóch podstaw czasu: A – zwykłej i B – opóźnionej, przy czym ich różne szybkości dają efekt „lupy czasowej: wybrane fragmenty badanego sygnału, obrazowanego za pomocą podstawy czasu A, można „rozciągnąć” w czasie przy wykorzystaniu szybszej podstawy czasu B (stosowane przy pomiarach parametrów impulsów). Bogate są też możliwości wyzwalania nowoczesnych oscyloskopów, np. wyzwalanie podstawy czasu przez sygnał zarówno w pierwszym, jak i w drugim kanale (obserwacja dwóch przebiegów o różnych częstotliwościach, sygnałów niesynchronicznych), możliwość zewnętrznego wyzwalania opóźnionej podstawy czasu B itd.

Sygnały harmoniczne wymagają pomiaru amplitudy, częstotliwości (okresu) i fazy. Chociaż oscyloskop umożliwia jednoczesny pomiar wszystkich tych wielkości, to jednak dokładność pomiaru jest niewielka i dlatego używa się specjalnych przyrządów do pomiaru każdej z tych wielkości. Pomiar amplitudy lub związanych z nią jednoznacznie wartości skutecznej lub średniej umożliwiają woltomierze (amperomierze itd.) analogowe lub cyfrowe. W najprostszej postaci są to mierniki prądu stałego z dołączonym detektorem wartości średniej, szczytowej lub skutecznej, ale z reguły wycechowane są w wartościach skutecznych. Przyrządów takich można także użyć do pomiarów sygnałów nieharmonicznych, ale konieczna jest wtedy znajomość właściwości detektora, bowiem dla znanych kształtów sygnałów można wyznaczyć związki między wartościami: szczytową, średnią i skuteczną (zadania 6, 7, 8). Zwykle mierniki uniwersalne reagują na wartość średnią prądu wyprostowanego, natomiast przyrządy wyposażone w sondę detekcyjną reagują na wartość szczytową.

Częstotliwość sygnałów harmonicznych mierzy się najdokładniej za pomocą częstotliciemierzy cyfrowych, ale można też porównać częstotliwości: nieznana i wzor-

cową przez nałożenie drgań w układzie zawierającym element nieliniowy (powstają dudnienia – metoda użyteczna dla częstotliwości akustycznych i radiowych) lub za pomocą figur Lissajous (dla częstotliwości infraakustycznych i akustycznych). Przesunięcie fazy mierzy się bądź fazometrem cyfrowym lub analogowym, bądź oscyloskopem dwukanałowym lub za pomocą figur Lissajous.

Okresowe sygnały nieharmoniczne wymagają, na ogół, użycia wyspecjalizowanych przyrządów pomiarowych. Pełnej informacji o takich sygnałach może dostarczyć rejestracja ich przebiegu w funkcji czasu (oscyloskop, boxcar) albo analiza ich widma amplitudowego i fazowego (analizatory widma). Pomiarom takich sygnałów poświęcone będą oddzielne ćwiczenia. W przypadku nieznacznie odkształconych przebiegów harmonicznych w zakresie akustycznym używa się mierników zawartości harmonicznych, czyli stosunku wartości skutecznej przebiegu z odfiltrowaną składową podstawową do wartości skutecznej badanego przebiegu.

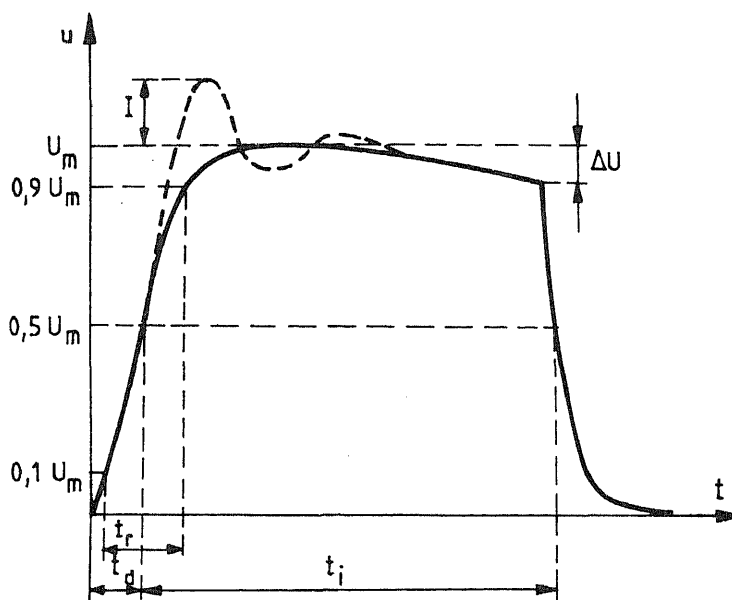


Rys. 1.1

Wśród przebiegów nieharmonicznych szczególnie ważną rolę spełniają sygnały impulsowe, powtarzające się okresowo z okresem T , o kształcie zbliżonym do prostokąta. Głównymi parametrami takich impulsów są: amplituda U_m i długość t_i (rys.1.1). Dla impulsów takich, oprócz U_m i t_i , podaje się często zamiast częstotliwości powtarzania $f = 1/T$ (lub okresu T) – współczynnik wypełnienia $\tau = t_i/T$. Kształt impulsów rzeczywistych odbiega od prostokąta, głównie z powodu skończonych czasów narastania zboczy i opóźnienia czoła impulsu, a często również zafalowań tuż za czołem (przerzutów i opadania płaskiej części wierzchołka (rys.1.2). Definiuje się następujące wielkości charakterystyczne):

- t_i długość impulsu: odstęp czasu między punktami położonymi na wysokości $0,5 U_m$,
- t_r czas narastania: odstęp czasu między punktami na zboczu położonymi na wysokościach $0,1 U_m$ i $0,9 U_m$,
- t_d opóźnienie: czas wzrostu odpowiedzi od 0 do $0,5 U_m$,
- p przerzut: wyrażony w procentach stosunek amplitudy pierwszej oscylacji do U_m ,
- z zwis: wyrażony w procentach stosunek ΔU do U_m , określony dla $t = t_i$.

Te same terminy stosuje się do odpowiedzi układu elektronicznego na pobudzenie skokiem jednostkowym. Zauważmy, że używany do pomiarów parametrów impulsów oscyloskop jest układem elektronicznym, który również charakteryzuje odpowiedź na skok jednostkowy. Odpowiedź ta wprowadza zniekształcenia idealnego impulsu prostokątnego, doprowadzonego do jego wejścia. Dlatego uwzględnienie parametrów impulsowych oscyloskopu jest niezbędne przy ocenie błędów pomiaru parametrów badanego impulsu. W szczególności, zmierzony na ekranie czas narastania impulsu t_m , rzeczywisty czas narastania impulsu t_x i czas narastania odpowiedzi impulsowej oscyloskopu t_o związane są zależnością: $t_m^2 = t_x^2 + t_o^2$.



Rys. 1.2

Czas narastania, opóźnienie, przerzut i zwis odpowiedzi układu na skok jednostkowy wiążą się z charakterystykami częstotliwościowymi tego układu, ale proste związki można podać tylko dla niektórych układów, na szczęście najważniejszych w praktyce. Czoło impulsu (czas narastania odpowiedzi na skok jednostkowy), związane z szybkimi zmianami wartości sygnału (zakres małych czasów), określone jest przez część charakterystyki częstotliwościowej układu, położoną w zakresie wielkich częstotliwości. Grzbiet impulsu natomiast (zwis odpowiedzi), związany z powolnymi zmianami wartości sygnału (zakres dużych czasów), uwarunkowany jest przebiegiem charakterystyki w zakresie małych częstotliwości.

Jeśli układ elektryczny opisany jest transmitancją operatorową, mającą pojedynczy biegun (układ jest dolnoprzepustowy, czyli całkujący): $k(s) = k_0/(1 + s\tau)$, gdzie $\tau = 1/\omega_g$, ω_g – górna częstotliwość graniczna, to odpowiedź tego układu na skok jednostkowy ma postać: $h(t) = k_0(1 - e^{-t/\tau}) \cdot 1(t)$; stąd wynika, że dla układu jednobiegunowego czas narastania $t_r = 2,2\tau = 0,35/f_g$.

Jeśli transmitancja układu ma jedno zero rzeczywiste w początku układu współrzędnych i jeden rzeczywisty biegun: $k(s) = k_0 s / (1 + \tau s)$, gdzie $\tau = 1/\omega_d$, ω_d – dolna częstotliwość graniczna (układ górnoprzepustowy, czyli różniczkujący), to odpowiedź na skok jednostkowy ma postać: $h(t) = k_0 e^{-t/\tau} \cdot 1(t) \simeq k_0 (1 - t/\tau)$; stąd zwis odpowiedzi takiego układu wynosi $z \simeq t_1/\tau = \omega_d t_1$. Jeśli układ ma nie wprowadzać zniekształceń grzbietu impulsu, to jego dolna częstotliwość graniczna powinna wynosić zero, co oznacza, że układ powinien przenosić sygnały o dowolnie małych częstotliwościach, ze składową stałą włącznie.

W przypadku układu wielostopniowego, złożonego z kilku odseparowanych wzajemnie i połączonych kaskadowo układów jednobiegunowych o czasach narastania t_{r1}, \dots, t_{rn} , odpowiedź układu na pobudzenie sygnałem wejściowym o czasie narastania t_{r0} charakteryzuje czas narastania t_r , określony (z dokładnością nie gorszą niż 10%) zależnością: $t_r \simeq 1,1 \sqrt{t_{r0}^2 + t_{r1}^2 + \dots + t_{rn}^2}$. Gdy jeden z biegunów jest dominujący, tzn. jeden z czasów narastania jest znacznie większy od pozostałych, to czas narastania całego układu jest w przybliżeniu równy temu największemu czasowi.

Jeśli transmitancja układu ma bieguny zespolone, to jego odpowiedź na skok jednostkowy wykazuje tłumione oscylacje. Czas narastania jest mniejszy niż w przypadku biegunów rzeczywistych (o tych samych częściach rzeczywistych) i w układach wielostopniowych wolniej rośnie w miarę zwiększania liczby stopni niż w poprzednim przypadku. Występują jednak oscylacje, których pierwsza amplituda, decydująca o przerzucie p , jest jednym z ważniejszych parametrów impulsu.

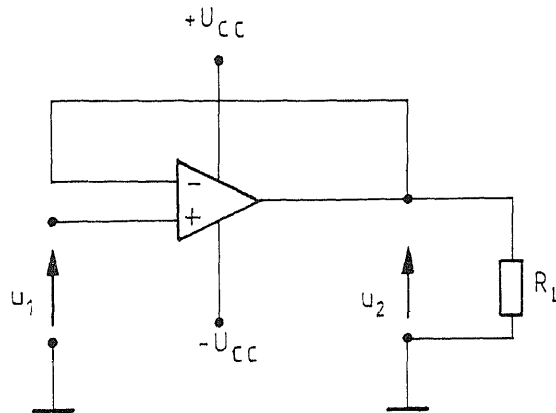
Przedstawione parametry impulsów prostokątnych dotyczą nie tylko sygnałów okresowych, lecz również nieokresowych, w tym pojedynczych. Pomiar parametrów takich sygnałów wymaga ich rejestracji przy użyciu zwykle oscyloskopów pamięciowych lub analizatorów kształtu impulsów, pracujących na zasadzie podobnej do boxcara. Istotnym zagadnieniem jest wówczas wyzwalanie tych rejestratorów, które powinno zapewnić rejestrację całego przedniego zbocza. Możliwe są dwa rozwiązania: albo źródło badanych sygnałów wysyła wcześniejszy od badanego sygnału impuls wyzwalający, albo badany sygnał wyzwala przyrząd rejestrujący, zaś sam sygnał podlega rejestracji po przejściu przez układ opóźniający.

WYKONANIE ĆWICZENIA

1. Zapoznać się z parametrami i charakterystykami miernika uniwersalnego, pracującego jako woltomierz napięć zmiennych. Przy częstotliwości mniejszej od środkowej częstotliwości charakterystycznej zakresu pracy użytego miernika uniwersalnego zmierzyć tym miernikiem napięcia: sinusoidalne, trójkątne, prostokątne. Wykorzystać przy tym oscyloskop do sprawdzenia stałości amplitud wszystkich rodzajów sygnałów i w razie potrzeby skorygować amplitudę napięcia wyjściowego użytego generatora funkcyjnego. Zwrócić uwagę na składową stałą napięcia wyjściowego generatora funkcji.
2. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć parametry impulsu prostokątnego o amplitudzie około 1 V, pochodzącego z głównego wyjścia generatora typu G432,

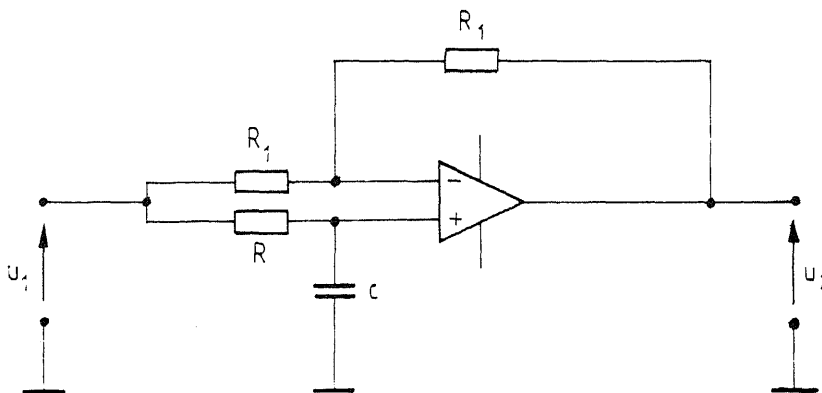
nastawionego na częstotliwość około 1 MHz. Zarejestrować kształt zbocza narastającego, zachowując skalę obu osi. Powtórzyć pomiar przy częstotliwości około 100 Hz, przełączając wejście Y oscyloskopu do pracy "AC" i zmierzyć zwis impulsu.

3. Zbudować wtórnik napięcia ze wzmacniaczem operacyjnym typu 741, zasilany napięciami $+15\text{ V}$ i -15 V (rys.1.3). Zmierzyć odpowiedź impulsową wtórника na mały sygnał (20 mV) oraz na duży sygnał (5 V). Oporność obciążenia $R_L = 2\text{ k}\Omega$, częstotliwość impulsów prostokątnych 10 kHz.



Rys. 1.3

4. Zbudować przesuwnik fazy ze wzmacniaczem operacyjnym typu 741 w układzie z rys.1.4 (filtr dolnoprzepustowy pierwszego rzędu), a następnie zmierzyć jego charakterystykę częstotliwościową. Dane są: $R_1 = 24\text{ k}\Omega$, $R = 12\text{ k}\Omega$, $C = 15\text{ nF}$. Wyniki stabelaryzować. Skala częstotliwości logarytmiczna.

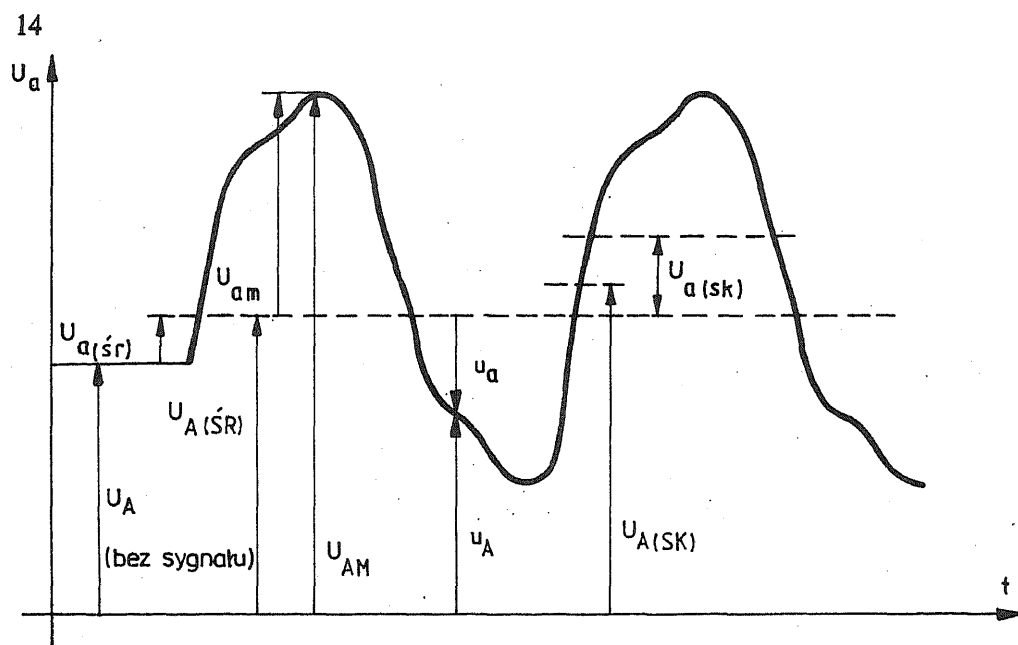


Rys. 1.4

5. W układzie z rys.1.4 zastąpić opornik R potencjometrem $25\text{ k}\Omega$ i wycechować potencjometr w stopniach kąta przesunięcia fazowego między napięciem wyjściowym i wejściowym o częstotliwości 1 kHz .

ZADANIA DO OPRACOWANIA

1. Obliczyć wskazania woltomierza napięć zmiennych dla sygnałów mierzonych w punkcie 1. Zestawić w tabeli wyniki obliczeń i wyniki pomiarów. Uzasadnić ewentualne rozbieżności.
2. Na podstawie wyników pomiarów z punktu 2 obliczyć czas narastania impulsów prostokątnych, uwzględniając czas narastania odpowiedzi oscyloskopu na skok jednostkowy (założyć, że transmitancja oscyloskopu jest funkcją jednobiegunową). Narysować zbrocze zarejestrowane na oscyloskopie i zbrocze skorygowane na podstawie obliczeń.
3. Narysować odpowiedzi wtórника napięcia ze wzmacniaczem operacyjnym typu 741 na małe i duże sygnały, a następnie wyznaczyć szybkość narastania napięcia wyjściowego S (slew rate w $\text{V}/\mu\text{s}$).
4. Obliczyć i wykreślić charakterystyki amplitudową i fazową przeasuwnika fazy z rys.1.4. Na tym samym wykresie przedstawić charakterystykę otrzymaną doświadczalnie. Skala częstotliwości logarytmiczna.
5. Obliczyć i wykreślić zależność przesunięcia fazowego transmitancji przesuwника fazy od oporności R potencjometru użytego w punkcie 5 i na tym samym wykresie sporządzić krzywą cechowania przesuwника fazy otrzymaną doświadczalnie przy 1 kHz . Podać zakres regulacji przesunięcia fazy.
6. Przebieg okresowy opisuje funkcja $u_a(t)$ (oznaczenia jak na rys.1.5). Znaleźć związki między: a) wartościami średnimi $U_{a(sr)}$ i $U_{A(SR)}$, b) wartościami skutecznymi $U_{a(sk)}$ i $U_{A(SK)}$ odpowiednio składowej zmiennej i przebiegu wypadkowego.
7. Obliczyć współczynnik kształtu k_s i współczynnik szczytu k_a (wyniki stabelaryzować dla następujących przebiegów okresowych o zerowej wartości średniej: a) sinusoidalnego, b) prostokątnego o wypełnieniu 0,5, c) prostokątnego o wypełnieniu $\tau = t_i/T$, d) trójkątnego symetrycznego, $u(t) = 180 \sin \omega t + 60 \sin 3 \omega t$).
8. Obliczyć względny błąd wskazań miernika wartości średnich przebiegu wyprostowanego przy pomiarach napięć z zadania 7, punkty b) i d), wynikający z różnych od sinusoidy kształtów tych napięć.
9. Dla jakich czasów narastania badanych impulsów prostokątnych t_{r0} błąd ich pomiaru wykonanego za pomocą oscyloskopu typu KZ 7202 nie przekracza 5%? Przyjąć, że transmitancja kanału odchyłania pionowego oscyloskopu jest funkcją jednobiegunową.



Rys. 1.5

LITERATURA

- [1] Laboratorium podstaw miernictwa. Praca zbiorowa pod red. H. Gierasimowicza. WPW, Warszawa 1986.