

Ć w i c z e n i e 7

SZUMY ELEKTRYCZNE

WPROWADZENIE

Celem ćwiczenia jest przedstawienie podstawowych pojęć z teorii szumów elektrycznych i przeprowadzenie najprostszych pomiarów szumów w elektronicznych układach wzmacniających.

Szumami elektrycznymi nazywa się „niepożądane sygnały zakłócające prawidłowy odczyt informacji zawartej w sygnale użytecznym” [1].

Przyczynami występowania szumów w układzie mogą być zakłócenia wywołane zewnętrznymi polami elektromagnetycznymi, zakłócenia wewnętrzne powstające wskutek niestabilnych warunków pracy, dodatkowe, niepożądane sygnały elektryczne powstające wskutek nieliniowości elementów układu, a przede wszystkim przypadkowe zmiany prądów i napięć elektrycznych, będące rezultatem dyskretnej struktury materii.

Szumy spowodowane niepożądanymi oddziaływaniami zewnętrznych pól elektromagnetycznych oraz przyczynami natury technologiczno-konstrukcyjnej można wyeliminować lub znacznie osłabić ich działanie. Szumów, których źródłem jest dyskretna struktura materii i stochastyczny charakter ustalenia się równowagi termodynamicznej układu, nie da się usunąć. Występują one we wszystkich układach elektronicznych i decydują o maksymalnych osiągalnych czułościach aparatury pomiarowej, o progu wykrywalności słabych sygnałów elektrycznych i o niezbędnych czasach rejestracji słabych sygnałów.

Tematem niniejszego ćwiczenia są pomiary szumów nie związanych z oddziaływaniem pól zewnętrznych na układ elektroniczny i badanie charakterystycznych cech tych szumów.

Przed przystąpieniem do pomiarów szumów należy zapoznać się z następującymi zagadnieniami:

- podstawowe parametry charakteryzujące sygnały stochastyczne,
- rodzaje szumów występujących w układach elektronicznych,
- parametry szumowe układów elektronicznych,
- metody pomiaru szumów i wyznaczenia parametrów szumowych układów elektronicznych.

Podstawowe parametry sygnałów stochastycznych

Przypadkowy sygnał $X(t)$ obserwowany w przedziale czasu $t \in \left[-\frac{T}{2}, +\frac{T}{2}\right]$ można scharakteryzować następującymi parametrami:

1. Wartość średnia (lub składowa stała) sygnału

$$\bar{X} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt \right]. \quad (7.1)$$

2. Wartość średnia kwadratowa (średni kwadrat) sygnału

$$\bar{X}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x^2(t) dt \right]. \quad (7.2)$$

Jeśli sygnałami są: napięcie lub natężenie prądu, to wartość ta jest proporcjonalna do całkowitej mocy średniej sygnału.

3. Wartość skuteczna sygnału

$$X_{sk} = \sqrt{\bar{X}^2}. \quad (7.3)$$

4. Średni kwadrat składowej zmiennej sygnału

$$\bar{X}_{\sim}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} [X(t) - \bar{X}]^2 dt \right]. \quad (7.4)$$

Zachodzi związek

$$\overline{X^2} = \overline{X}^2 - (\overline{X})^2. \quad (7.5)$$

5. Funkcja autokowariancji przebiegu $X(t)$

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} [X(t) - \overline{X}] [X(t+\tau) - \overline{X}] dt \right]. \quad (7.6)$$

6. Funkcja autokorelacji przebiegu $X(t)$

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) X(t+\tau) dt \right]. \quad (7.7)$$

7. Widmowa gęstość mocy przebiegu w czasie T

$$S(f, T) = \frac{1}{T} \left| \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) e^{-i2\pi f t} dt \right|^2. \quad (7.8)$$

8. Widmowa gęstość mocy

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} S(f, T). \quad (7.9)$$

Przedstawiona równaniem (7.9) widmowa gęstość mocy odnosi się do jednej tylko realizacji procesu stochastycznego. Definicja gęstości mocy^{*)} odniesiona do wszyst-

^{*)} W typowej technice pomiarowej można wydzielić tylko te składowe fourierowskie, których częstotliwości spełniają warunek $[\omega_1, \omega_2]$. Dlatego wielkością mierzoną nie jest dwustronna widmowa gęstość mocy $S(f)$, ale funkcja $G(f)$, zwana również widmową gęstością mocy, spełniającą zależność

$$G(f) = \begin{cases} 2S(f) & \text{dla } f > 0 \\ S(f) & \text{dla } f = 0 \\ 0 & \text{dla } f < 0 \end{cases}$$

kich możliwych realizacji tego procesu brzmi:

Gęstość mocy jest transformatą Fouriera funkcji autokowariancji procesu

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau. \quad (7.10)$$

Słuszne jest również przekształcenie odwrotne

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{i2\pi f\tau} df. \quad (7.11)$$

Równania (7.10) i (7.11) są słuszne dla procesów stacjonarnych o wartości średniej równej zeru.

Rodzaje szumów występujących w układach elektronicznych

W układach elektronicznych oprócz szumów pochodzących od oddziaływań zewnętrznych występują następujące rodzaje szumów:

1. *Szumy cieplne* zwane również szumami rezystencyjnymi lub szumami Johnsona. Są one związane z fluktuacjami ładunku na elemencie o oporności R . Element taki w temperaturze T można traktować jako połączenie szeregowe bezszumnego opornika R i źródła siły elektromotorycznej $\varepsilon(t)$ takiej, że jej widmowa gęstość mocy jest stała oraz spełnione są warunki

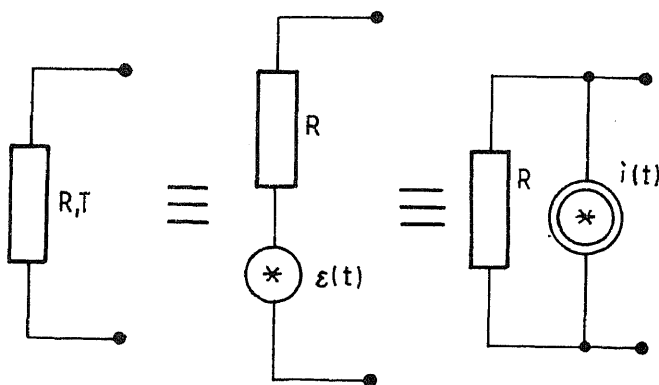
$$\bar{\varepsilon} = 0 \quad (7.12a)$$

$$\bar{\varepsilon}^2 = 4kTR\Delta f \quad (7.12b)$$

gdzie: k - stała Boltzmanna ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$), T - temperatura bezwzględna, Δf - szerokość pasma częstotliwości, R - oporność.

Zatem szum cieplny jest szumem białym (tzn. $S(f) = \text{const}$).

Na rys.7.1 przedstawiono dwa równoważne schematy zastępcze opornika R w temperaturze T . Oznaczono: $\bar{\varepsilon}^2 = 4kTR\Delta f$, $\bar{i}^2 = 4kT\Delta f/R$.

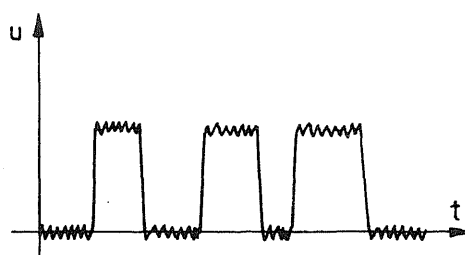


Rys. 7.1

2. *Szumy 1/f*. Są to szumy, których widmowa gęstość mocy jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości. Istnieje prawdopodobnie kilka mechanizmów ich powstawania. Według jednej z hipotez są one wywołane fluktuacjami przewodności na styku dwóch ośrodków. Występują w rezystorach, gdzie zwane są szumami nadmiarowymi, w elementach półprzewodnikowych i w lampach. Szumy te są najbardziej istotnym źródłem szumów w zakresie niskich częstotliwości.

3. *Szumy wybuchowe* (ang.: *burst noise*, *popcorn noise*). Występować mogą w diodach półprzewodnikowych, tranzystorach i układach scalonych. Mają charakter przypadkowych impulsowych zmian napięcia zawsze o tę samą wartość (rys.7.2). Wartość skoku przekraczać może wielokrotnie poziom szumów cieplnych i poziom szumów 1/f. Przyczyną tych szumów są szczegóły procesów technologicznych, powodujące wprowadzenie zanieczyszczeń do struktury przyrządu. Szumów tych można uniknąć przez staranny dobór egzemplarza przyrządu półprzewodnikowego lub w ostateczności, przez zmianę typu przyrządu.

Gęstość widmowa mocy szumów wybuchowych ma charakterystykę typu $1/f^n$, przy czym zwykle n jest równe 2.



Rys. 7.2

Parametry szumowe układów elektronicznych

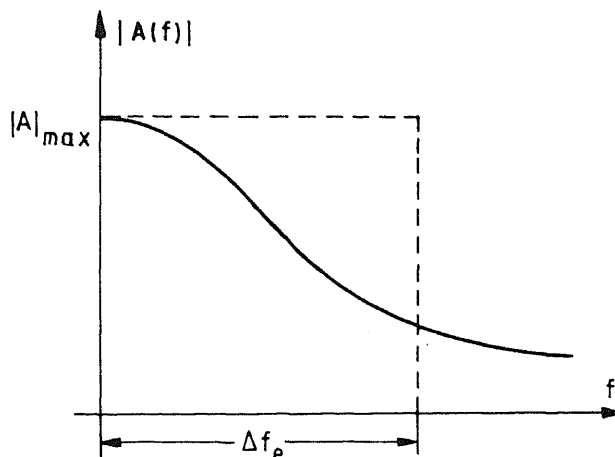
Do określenia szumów układów elektronicznych stosuje się następujące parametry:

1. *Pasma szumów*, czyli równoważna energetyczna szerokość pasma, którą musiałby mieć układ o idealnej, prostokątnej amplitudowej charakterystyce przenoszenia (rys.7.3), aby przynosił tę samą moc szumów, co układ rzeczywisty o tym samym maksymalnym współczynniku przenoszenia $|A_{\max}|$.

W odniesieniu do szumów opisanych widmową gęstością mocy $G(f)$ wartość Δf_e wyznacza się dla układów dolnoprzepustowych z zależności

$$\int_0^{\infty} G(f) |A(f)|^2 df = |A|_{\max}^2 \int_0^{\Delta f_e} G(f) df. \quad (7.13)$$

W przypadku szumu białego $G(f) = \text{const}$, wyrażenie (7.13) sprowadza się do równania



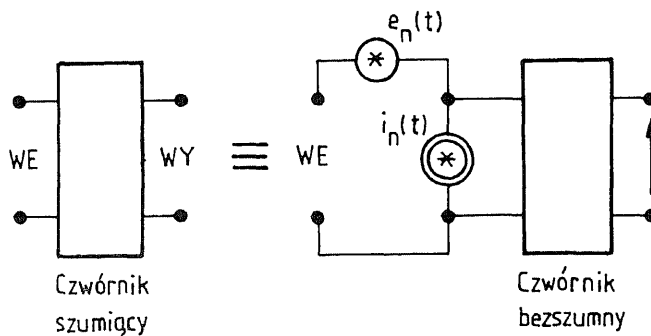
Rys. 7.3

$$\Delta f_e = \frac{1}{|A|_{\max}^2} \int_0^{\infty} |A(f)|^2 df. \quad (7.14)$$

UWAGA.

Energetyczna szerokość pasma układu nie jest równa 3-decybelowej szerokości pasma przenoszenia i zależy od rozkładu widmowej gęstości mocy szumów.

2. *Zastępcze źródła szumów.* Każdy element układu elektronicznego, w którym zachodzą straty energii, jest źródłem szumów. Jeśli układ elektroniczny jest czwórnikiem, to można wykazać, że rzeczywisty, szumiący czwórnik daje się przedstawić w postaci czwornika bezszumnego i dołączonych do jego wejścia źródeł szumów: napięciowego $e_n(t)$ i prądowego $i_n(t)$ (rys.7.4). Szumy tych źródeł mogą być częściowo



Rys. 7.4

skorelowane ze sobą. Należy więc jeszcze znać współczynnik korelacji. Najczęściej jednak przyjmuje się, że źródła: napięciowe i prądowe są nieskorelowane. Tak więc

równoważny schemat zastępczy czwórnika szumiącego z dołączonym do jego wejścia źródłem sygnału $u_s(t)$ o oporności wewnętrznej R_s ma postać przedstawioną na rys.7.5. Wprowadzono na nim następujące oznaczenia:

$u_s(t)$ – siła elektromotoryczna źródła sygnału,

R_s – oporność wewnętrzna źródła sygnału,

$u_t(t)$ – siła elektromotoryczna szumów generowanych na oporności wewnętrznej źródła sygnału,

$u_n(t)$ – źródło napięciowe reprezentujące szумы generowane w czwórniku,

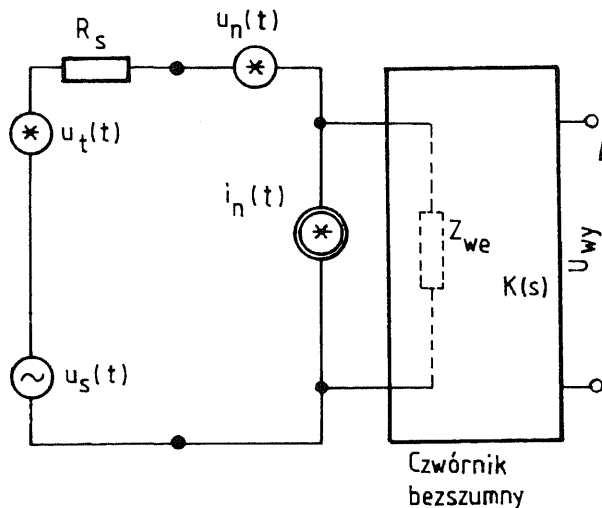
$i_n(t)$ – źródło prądowe reprezentujące szумы generowane w czwórniku,

Z_{we} – impedancja wejściowa czwórnika (bezszumna),

$K(s)$ – transmitancja czwórnika.

Taki schemat zastępczy umożliwia poprawną ocenę wartości szumów na wyjściu czwórnika, niezależnie od oporności R_s źródła sygnału.

Można założyć, że opisywany czwórnik jest wzmacniaczem o wzmocnieniu K_u , a następnie obliczyć napięcie szumów (wartość średnią kwadratową – patrz równanie (7.2) na wejściu wzmacniacza). W tym celu dwójnik dołączony do Z_{we} (rys.7.5) należy



Rys. 7.5

przekształcić tak, jak na rys.7.6. Jak widać, wpływ wszystkich źródeł szumów czwórnika można przedstawić w postaci jednego zastępczego źródła napięciowego szumów o sile elektromotorycznej

$$u_{ni}(t) = u_t(t) + u_n(t) + R_s i_n(t). \quad (7.15)$$

Wartość średnia kwadratowa tej siły elektromotorycznej wynosi

$$\overline{u_{ni}^2} = \overline{u_t^2} + \overline{u_n^2} + R_s^2 \overline{i_n^2}. \quad (7.16)$$

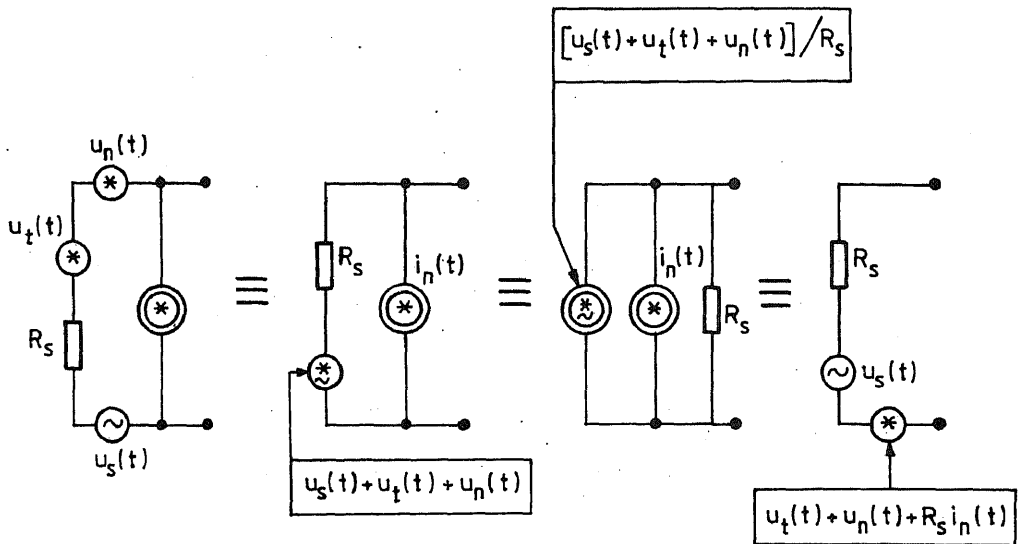
Założono przy tym, że źródła u_t , u_n oraz i_n są nieskorelowane. Schemat zastępczy czwórnika ze źródłem szumów $u_{ni}(t)$ na wejściu przedstawiono na rys.7.7. Jeśli

napięcie szumów $u_{ni}(t)$ ma widmową gęstość mocy $G_i(f)$, to można wykazać, że wartość średnia kwadratowa napięcia szumów na wyjściu czwórnika U_{n0}^2 wynosi

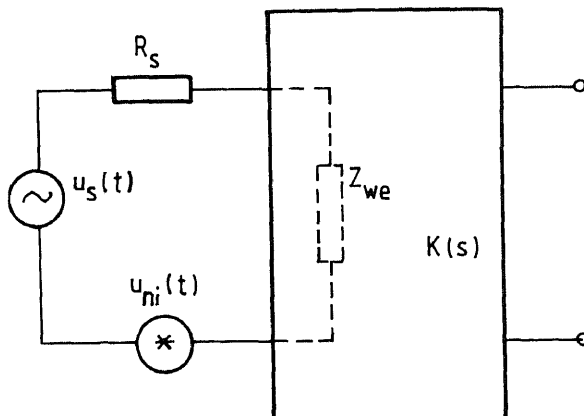
$$\overline{U_{n0}^2} = \int_0^\infty \left| \frac{K(i2\pi f) Z_{we}}{Z_{we} + R_s} \right|^2 G_i(f) df. \quad (7.17)$$

Jeśli przyjąć, że widmo gęstości mocy szumów $G_i(f) = \text{const}$, tzn., że szum jest szumem białym, to wyrażenie (7.17) daje się przedstawić w postaci

$$\overline{U_{n0}^2} = G_i \left| \frac{K(i2\pi f) Z_{we}}{Z_{we} + R_s} \right|_{\max}^2 \Delta f_e. \quad (7.18)$$



Rys. 7.6



Rys. 7.7

Wykorzystana tu zależność (7.14). Δf_e jest równoważną szerokością energetyczną pasma przenoszenia czwórnika (zwykle - wzmacniacza).

3. *Współczynnik szumów*. Do opisu właściwości szumowych czwórnika (wzmacniacza) na równi z parametrami U_n^2 i I_n^2 używa się pojęcia współczynnika szumów. Definicja współczynnika szumów jest następująca:

Współczynnik szumów F czwórnika elektrycznego jest to stosunek całkowitej dysponowanej mocy szumów pomierzonej na wejściu czwórnika w jednostce pasma częstotliwości do tej części mocy dysponowanej szumów wyjściowych, która pochodzi od źródła sygnału dołączonego do wejścia czwórnika, przy czym pomiar mocy odbywa się w standardowej temperaturze 290 K.

$$F = \frac{\text{całkowita dysponowana moc szumów na wyjściu}}{\text{część wyjściowej mocy szumów spowodowana przez szum } u_t \text{ rezystancji źródła}}. \quad (7.19)$$

Równoważne określenie współczynnika szumów

$$F = \frac{S_{we}/N_{we}}{S_{wy}/N_{wy}}, \quad (7.20)$$

gdzie: S , N - moce sygnału i szumu.

Współczynnik szumu jest więc miarą, spowodowanego szumami czwórnika, pogorszenia stosunku sygnału do szumu. Współczynnik szumu wyrażony przez U_n^2 , I_n^2 i U_t^2 wynosi

$$F = \frac{\overline{U_{ni}^2}}{U_t^2} = \frac{\overline{U_t^2} + \overline{U_n^2} + R_s^2 \overline{I_n^2}}{U_t^2}. \quad (7.21)$$

Często współczynnik szumów wyraża się w decybelach

$$NF = 10 \log_{10} F \quad (7.22)$$

(NF - ang. noise factor).

Do określenia właściwości szumowych układu w wąskim pasmie częstotliwości wykorzystuje się pojęcie wąskopasmowego współczynnika szumów. Zamiast pełnych wartości średnich kwadratowych podstawia się wówczas ich składowe widmowe

$$d\overline{U^2} = G_f df.$$

Tak określony współczynnik szumów jest funkcją częstotliwości.

Metody pomiaru szumów i wyznaczania parametrów szumowych układów elektro- nicznych

1. *Pomiar parametrów U_n i I_n wzmacniacza*. Ze względu na bardzo małe wartości szumów U_n^2 i I_n^2 zwykle można mierzyć tylko wartość skuteczną szumów na wyjściu układu. Zakłada się przy tym, że szumy wyjściowe mierzone są w tak wąskim przedziale częstotliwości Δf , iż widmową gęstość mocy można uznać za stałą. Na

podstawie tych pomiarów daje się wyznaczyć wąskopasmowe wartości $\overline{U_n^2}$ i $\overline{I_n^2}$, a stąd funkcje $\overline{U_n^2(f)}$ i $\overline{I_n^2(f)}$.

Załóżmy, że przyrząd pomiarowy ma szerokość energetyczną pasma Δf_e , a częstotliwość środkową pasma przenoszenia f . Jeśli w wyniku pomiaru wyjściowego napięcia szumów uzyska się wartość $\overline{U_{n0}^2}$, to odpowiada temu równoważna wartość napięcia wejściowego szumów

$$\overline{U_{ni}^2(f)} = \frac{1}{|K_u(f)|^2} \overline{U_{n0}^2(f)}, \quad (7.23)$$

gdzie zgodnie z równaniem (7.16)

$$\overline{U_{ni}^2(f)} = \overline{U_i^2(f)} + \overline{U_n^2(f)} + R_s \overline{I_n^2(f)}. \quad (7.24)$$

Szumy wąskopasmowe źródła sygnału wynoszą

$$\overline{U_i^2(f)} = 4kTR_s \Delta f_e. \quad (7.25)$$

Jeśli pomiar wykona się dla zwartego wejścia ($R_s = 0$), to wówczas

$$\overline{U_{ni}^2(f)} = \overline{U_n^2(f)}$$

oraz

$$\overline{U_n^2(f)} = \frac{\overline{U_{n0}^2(f)}|_{zw}}{|K_u(f)|^2}. \quad (7.26)$$

Jeśli pomiar $\overline{U_{n0}^2(f)}$ zostanie wykonany dla dużej wartości R_s , to uzyska się

$$\overline{U_{ni}^2(f)} \simeq [4kT\Delta f_e + R_s \overline{I_n^2(f)}] R_s. \quad (7.27)$$

Dla R_s spełniających warunek

$$R_s \overline{I_n^2(f)} \gg 4kT\Delta f_e \quad (7.28)$$

otrzymuje się

$$\overline{U_{ni}^2(f)} \simeq R_s^2 \overline{I_n^2(f)} \quad (7.29)$$

i ostatecznie

$$\overline{I_n^2(f)} = \frac{\overline{U_{n0}^2(f)}|_{R_s \rightarrow \infty}}{R_s^2 |K_u(f)|^2}. \quad (7.30)$$

Tak więc wyznaczenie zastępczych wąskopasmowych parametrów $\overline{U_{ni}^2(f)}$ i $\overline{I_n^2(f)}$ wymaga wykonania dwóch pomiarów napięcia wyjściowego szumów dla każdej częstotliwości.

Współczynnik (wąskopasmowy) szumów układu wyznacza się z wartości $\overline{U_{ni}^2(f)}$ i $\overline{I_n^2(f)}$ na podstawie równania (7.21).

2. *Pomiar napięcia szumów $\overline{U_{n0}^2(f)}$.* Do pomiaru szumów można używać trzech rodzajów przyrządów. Są to:

– mierniki wartości skutecznej napięcia,

- mierniki wartości średniej napięcia wyskalowane w jednostkach wartości skutecznej sygnałów harmonicznych,
- oscyloskopy.

Zastosowanie mierników wartości skutecznej nie wymaga żadnych dodatkowych korekcji i zapewnia dokładny i poprawny pomiar napięcia szumów U_{n0}^2 .

Zastosowanie mierników wartości średniej (z prostownikiem) wyskalowanych w wartości skutecznej napięć harmonicznych wymaga dodatkowej korekcji. Wynik pomiaru szumu należy pomnożyć przez 1,13 (lub dodać 1,1 dB), a pomiary wykonywać w dolnych częściach skali miernika, gdyż maksymalne napięcia szumów mogą nawet trzykrotnie przekraczać ich wartość średnią. Szerokość pasma miernika powinna być większa niż dziesięciokrotna szerokość równoważnego energetycznego pasma szumów.

Zastosowanie oscyloskopu umożliwia ocenę wartości międzyszczytowej szumów. Wartość skuteczna szumów jest w przybliżeniu równa 1/8 wartości międzyszczytowej (dla szumu białego). Mimo małej dokładności metoda oscylograficzna ma pewne zalety: pozwala odróżnić szумы od zakłóceń okresowych przedostających się do układu, a nawet umożliwia oszacowanie poziomu szumów na tle zakłóceń.

WYKONANIE ĆWICZENIA

W ćwiczeniu wykorzystuje się następujące przyrządy:

- oscyloskop,
- generator szumów (przyrząd nr 22),
- badany wzmacniacz (przyrząd nr 21),
- miernik V 640,
- wzmacniacz selektywny (przyrząd nr 16),
- generator funkcyjny.

Pomiary szumów generatora szumów

Należy zmierzyć:

1. Wartość skuteczną napięcia szumów generatora za pomocą:
 - oscyloskopu,
 - woltomierza V 640,
 - miernika wartości skutecznej.
2. Wartość skuteczną napięcia szumów generatora w wąskim przedziale częstotliwości.

Pomiary wykonać dla kilku częstotliwości (np. dla $f = 300 \text{ Hz}$, 1 kHz i 3 kHz). Do ograniczenia pasma szumów należy zastosować wzmacniacz selektywny (przyrząd nr 16). Przed przystąpieniem do pomiaru szumów należy zmierzyć wzmocnienie przyrządu i obliczyć na podstawie pomiarów jego energetyczną szerokość pasma dla szumu białego.