

В. І. ГУЗЬ, С. А. ХОЗЯЇНОВ

ФАЗОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНИХ RC-ФІЛЬТРІВ НИЖНІХ ЧАСТОТ

У деяких випадках при проектуванні радіоелектронної апаратури потрібний фільтр нижніх частот з малою крутістю фазової характеристики $\frac{\partial\varphi}{\partial\omega}$ і малою абсолютною величиною зсуву фаз у значній смузі частот. Крім того, такий фільтр повинен забезпечувати достатній коефіцієнт фільтрації на частотах, що відрізняються від частоти корисного сигналу. Необхідність в ньому може виник-

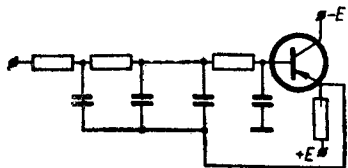


Рис. 1. Активний RC-фільтр з позитивним зворотним зв'язком.

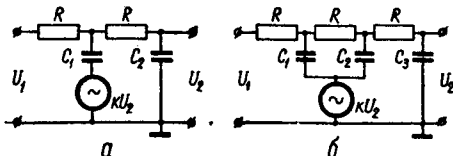


Рис. 2. Еквівалентні схеми дво- та триланкових RC-фільтрів.

нути при проектуванні деяких фазометричних пристроїв, пристроїв автоматики та ін.

Фільтр нижніх частот, який задовольняє усім цим вимогам, можна виконати у вигляді активного RC-фільтра з позитивним зворотним зв'язком (рис. 1).

Застосування позитивного зворотного зв'язку дозволяє, при відповідному виборі параметрів фільтра, притиснути його фазову характеристику до осі частот. Еквівалентні схеми для дво- та триланкових активних RC-фільтрів зображені на рис. 2.

При складанні еквівалентної схеми були прийняті такі припущення та позначення:

- 1) вихідний опір емітерного повторювача малий ($R_{\text{вих}} \rightarrow 0$);
- 2) шунтуючою дією вхідного опору емітерного повторювача $R_{\text{вх}}$ на RC-коло можна знехтувати;

3) коефіцієнт передачі емітерного повторювача k — дійсна величина;

4) $C'_n = C_n + C_{вх}$, де $C_{вх}$ — вхідна ємність емітерного повторювача.

Для схеми на рис. 2, а дійсні співвідношення

$$\begin{aligned}\vec{U}_{вх} &= \vec{I}_1(R_1 + \vec{X}_1) - \vec{I}_2\vec{X}_1 + k\vec{I}_2\vec{X}_2; \\ k\vec{I}_2\vec{X}_2 &= \vec{I}_2(\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + R_2) - \vec{I}_1\vec{X}_1, \\ &\text{де } k\vec{I}_2\vec{X}_2 = k\vec{U}_2.\end{aligned}$$

Після нескладних перетворень одержимо вираз для модуля і фази коефіцієнта передачі активного дволанкового RC-фільтра

$$K_{\text{акт}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\sqrt{(1 - \omega^2 T_1 T_2)^2 + \omega^2 [T_{12} + T_1(1 - k) + T_2]^2}}{(1 - \omega^2 T_1 T_2)^2 + \omega^2 [T_{12} + T_1(1 - k) + T_2]^2}; \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{акт}} = -\arctg \frac{\omega [T_{12} + T_1(1 - k) + T_2]}{1 - \omega^2 T_1 T_2}. \quad (2)$$

Відповідні вирази для пасивного RC-фільтра, складеного з тих самих елементів, можна одержати з (1) і (2), поклавши $k = 0$,

$$K_{\text{пас}} = \frac{\sqrt{(1 - \omega^2 T_1 T_2)^2 + \omega^2 (T_{12} + T_1 + T_2)^2}}{(1 - \omega^2 T_1 T_2)^2 + \omega^2 (T_{12} + T_1 + T_2)^2}; \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{пас}} = -\arctg \frac{\omega (T_1 + T_2 + T_{12})}{1 - \omega^2 T_1 T_2}, \quad (4)$$

де $T_1 = R_1 C_1$; $T_2 = R_2 C_2$; $T_{12} = R_1 C_2$, k — коефіцієнт передачі емітерного повторювача. При $k = 1$ і малих аргументах рівняння (2) і (4) наберуть вигляду

$$\varphi_{\text{акт}} \cong -\frac{\omega (T_{12} + T_2)}{1 - \omega^2 T_1 T_2}; \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{пас}} \cong -\frac{\omega (T_1 + T_2 + T_{12})}{1 - \omega^2 T_1 T_2}. \quad (6)$$

З виразів (5) і (6) можна знайти відношення $\frac{\partial \varphi_{\text{пас}}}{\partial \omega} / \frac{\partial \varphi_{\text{акт}}}{\partial \omega}$ і оцінити, наскільки позитивний зворотний зв'язок притискує фазову характеристику до осі частот (в області малих фазових зсувів).

Після нескладних перетворень одержимо

$$\frac{\partial \varphi_{\text{пас}}}{\partial \omega} / \frac{\partial \varphi_{\text{акт}}}{\partial \omega} = 1 + \frac{T_1}{T_{12} + T_2};$$

$$\frac{\varphi_{\text{пас}}}{\varphi_{\text{акт}}} \cong 1 + \frac{T_1}{T_2 + T_{12}}.$$

При $R_1 = R_2$

$$\frac{\varphi_{\text{пас}}}{\varphi_{\text{акт}}} \cong 1 + \frac{T_1}{2T_2}. \quad (7)$$

На рис. 3 зображені амплітудні та фазові характеристики активних та пасивних дволанкових RC-фільтрів.

На тому ж рисунку зображені характеристики одноланкового RC-фільтра з постійною часу T_1 . Характеристики, обчислені за формулами (1) і (2), практично повністю збігаються з експеримен-

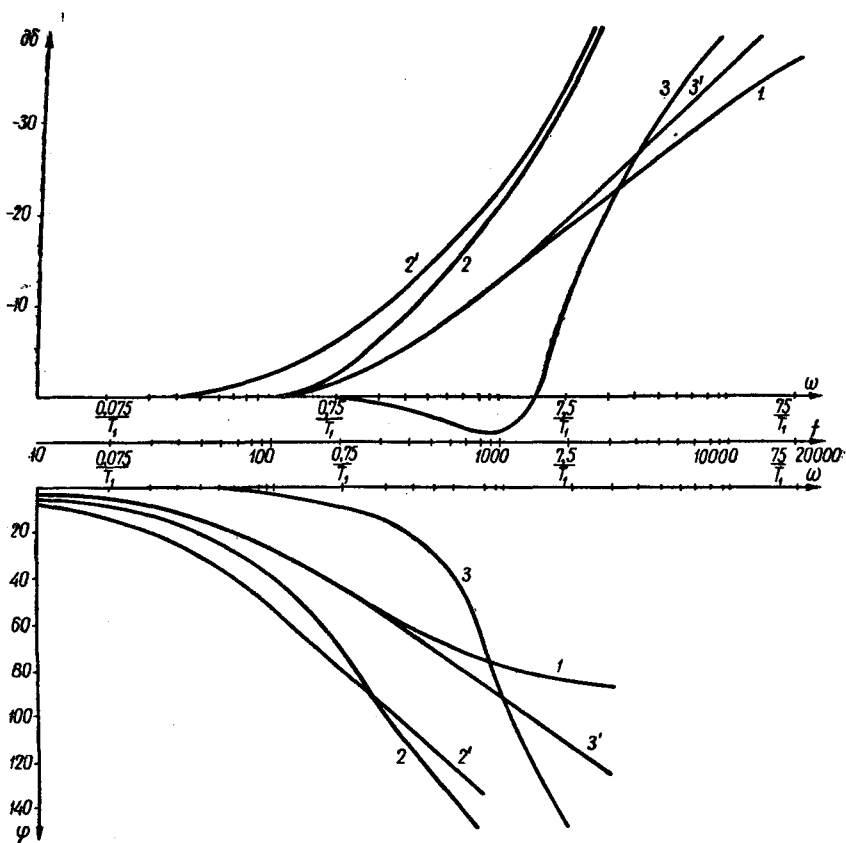


Рис. 3. Амплітудні та фазові характеристики RC-фільтрів:

1 — одноланковий фільтр; 2 — дволанковий фільтр (активний), $T_2 = T_1$; 2' — дволанковий фільтр (пасивний), $T_2 = T_1$; 3 — дволанковий фільтр (активний), $T_2 = \frac{T_1}{15}$

3' — дволанковий фільтр (пасивний), $T_2 = \frac{T_1}{15}$.

тальними. Підйом амплітудної характеристики при нерівності T_1 і T_2 у деяких пристроях небажаний. Цей недолік можна легко усунути, обравши k трохи менше за одиницю. Хід фазової характеристики при цьому змінюється незначно.

На рис. 4 зображені амплітудні та фазові характеристики фільтра при $k \cong 1$ і $k = 0,9$.

Для активного триланкового фільтра вирази для коефіцієнта передачі мають вигляд

$$K_{\text{акт}} = \frac{\{[1 - \omega^2 T_3 T_{12} - \omega^2 T_1 T_3 - \omega^2 T_1 T_2 - \omega^2 T_1 T_2 (1-k) - \omega^2 T_2 T_3]^2 + \rightarrow \\ \rightarrow + [\omega T_{13} + \omega T_{12}(1-k) + \omega T_1(1-k) - \omega^3 T_1 T_2 T_3 + \omega T_3 + \omega T_{23} + \omega T_2(1-k)]\}^{1/2}}{[1 - \omega^2 T_3 T_{12} - \omega^2 T_1 T_3 - \omega^2 T_1 T_2 - \omega^2 T_1 T_2 (1-k) - \omega^2 T_2 T_3]^2 + \rightarrow \\ \rightarrow + [\omega T_{13} + \omega T_{12}(1-k) + \omega T_1(1-k) - \omega^3 T_1 T_2 T_3 + \omega T_3 + \omega T_{23} + \omega T_2(1-k)]^2} \quad (8)$$

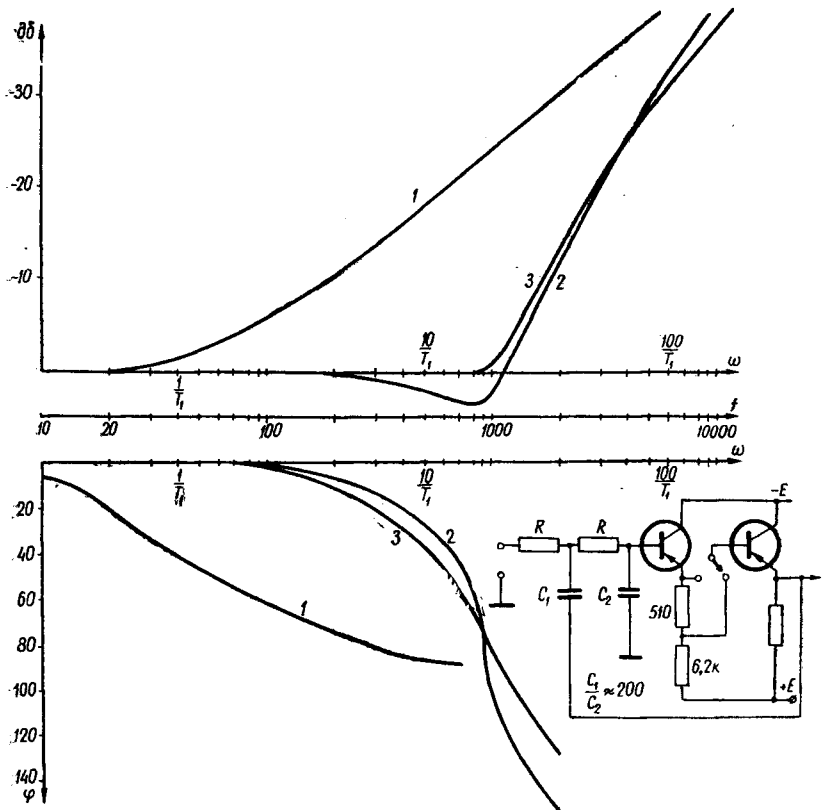


Рис. 4. Амплітудні та фазові характеристики фільтра при $k = 1$ і $k = 0,9$:
 1 — дволанковий фільтр (пасивний), $k = 1$, $T_2 = \frac{T_1}{200}$; 2 — дволанковий фільтр (активний), $k \approx 1$, $T_2 = \frac{T_1}{200}$; 3 — дволанковий фільтр (активний) $k = 0,9$, $T_2 = \frac{T_1}{200}$.

$$\text{tg } \varphi_{\text{акт}} = \frac{\omega T_{13} + \omega T_{12}(1-k) + \omega T_1(1-k) - \omega^3 T_1 T_2 T_3 + \omega T_3 + \omega T_{23} + \omega T_2(1-k)}{1 - \omega^2 T_3 T_{12} - \omega^2 T_1 T_3 - \omega^2 T_1 T_2 - \omega^2 T_1 T_2 (1-k) - \omega^2 T_2 T_3} \quad (9)$$

При $k = 1$ вираз (9) спрощується

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{акт}} = - \frac{\omega T_{13} + \omega T_3 + \omega T_{23} - \omega^2 T_1 T_2 T_3}{1 - \omega^2 T_3 T_{12} - \omega^2 T_1 T_3 - \omega^2 T_1 T_2 - \omega^2 T_2 T_3}. \quad (10)$$

Поклавши у (8) і (9) $k=0$, одержимо відповідні вирази для пасивного триланкового фільтра. На рис. 5 для порівняння зображені

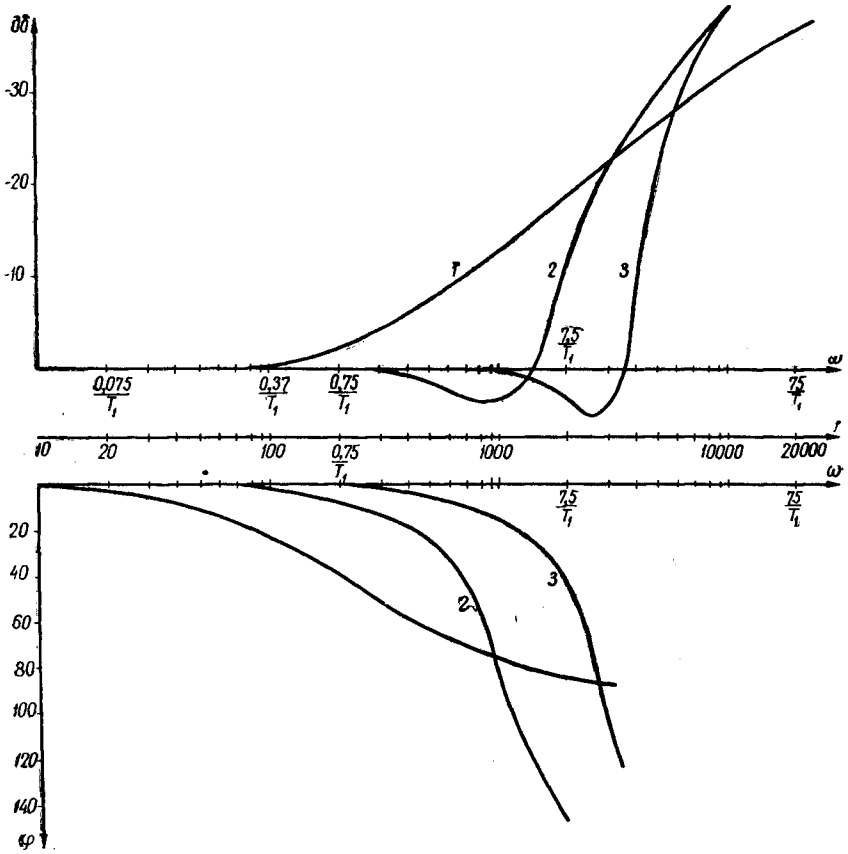


Рис. 5. Характеристики одно-, дво- та триланкового фільтрів:

1 — одноланковий фільтр; 2 — дволанковий активний фільтр $T_2 = \frac{T_1}{15}$; 3 — триланковий активний фільтр, $T_3 = \frac{T_2}{15} = \frac{T_1}{225}$.

характеристики одно-, дво- та триланкового активних RC-фільтрів. Вирази (1), (2) і (8), (9) правильні при зроблених раніше припущеннях. Скінченна величина вихідного опору повторювача може значно змінити хід амплітудних та фазових характеристик, розрахованих за (1), (2), (8) і (9).

Застосування каскадно включених емітерних повторювачів у схемах активних RC -фільтрів забезпечує малу величину вихідного опору (порядку 1—3 ом). Знайдені за формулами (1) — (10) характеристики практично збігаються з експериментальними при $R_{\text{вих}} \ll \ll \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$.

Висновки

1. Активні RC -фільтри нижніх частот забезпечують достатнє затухання на частотах, які лежать за межами смуги пропускання.

2. Фазові характеристики активних RC -фільтрів більш притиснуті до осі частот, ніж характеристики пасивних RC -фільтрів, складених з тих самих елементів (для області частот, де фазовий зсув, внесений пасивним RC -фільтром, не перевищує $\frac{\pi}{2}$).

3. Нахил фазової характеристики активного RC -фільтра залежить від відношення $\frac{T_1}{T_n}$. Чим воно більше, тим сильніше притиснута фазова характеристика до осі частот і тим менше нахил фазової характеристики активного RC -фільтра порівняно з фазовою характеристикою пасивного RC -фільтра (для області частот, де виконується з достатньою точністю рівність $\text{tg } \varphi_{\text{пас}} \cong \varphi_{\text{пас}}$).

4. Усунути підйом амплітудної характеристики активного RC -фільтра при $T_1 \neq T_2$ можна, трохи зменшивши коефіцієнт передачі емітерного повторювача. Хід фазової характеристики при цьому змінюється незначно (рис. 4). З рівняння (2) випливає, що притиснути фазову характеристику до осі частот можна, обравши k більше за одиницю. Але при цьому виникає значний підйом амплітудної характеристики та можливість самозбудження.

V. I. GUZE, S. A. HOZAINOV

PHASE PERFORMANCES OF ACTIVE RC-FILTERS

S u m m a r y

Phase performances of active RC filters are examined.