

П. І. ТИНСЬКИЙ

РОЗРАХУНОК ЛАМПОВИХ RC-ФІЛЬТРІВ

RC-фільтри часто застосовуються у каскадах лампових та напівпровідникових підсилювачів, що працюють на низьких і високих частотах, а також тоді, коли треба розділити високі та низькі частоти.

Якщо в схемі рис. 1 підібрати елементи так, що $C_1 = C_2 = 2C$, а $R_1 = R_2 = \frac{R}{2}$, то на якійсь частоті квазірезонансу f_0 струми i_1 та i_2 однакові за величиною і протилежні за фазою, а струм i в опорі навантаження R_H дорівнюватиме нулю. Коефіцієнт передачі на цій

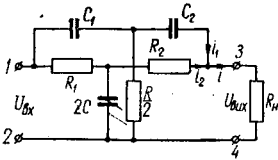


Рис. 1.

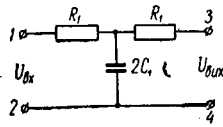


Рис. 2.

частоті теж дорівнюватиме нулю. При зміні частоти коефіцієнт передачі змінюватиметься за відомим законом.

Побудова схеми фільтра здвоеного містка — складне завдання. Тому спочатку Т-подібні паралельні чотириполюсники слід перетворити в більш прості П-подібні, а потім знайти еквівалентний опір останнього.

Використавши метод трансфігурації електричних схем, запишемо формулу переходу схеми рис. 2 у схему трикутника

$$Z_{12} = \frac{Z_{10}Z_{20}}{Z_0}; \quad Z_{13} = \frac{Z_{10}Z_{30}}{Z_0}; \quad Z_{23} = \frac{Z_{20}Z_{30}}{Z_0}. \quad (1)$$

Виразимо опір Z_0 через його провідність Y_0

$$Y_0 = \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{Z_{10}} + \frac{1}{Z_{20}} + \frac{1}{Z_{30}}. \quad (2)$$

Для першого Т-подібного чотириполюсника

$$Z_{10} = R_1; \quad Z_{20} = \frac{1}{2j\omega C_1}; \quad Z_{30} = R_1, \quad (3)$$

тоді

$$Y_0 = \frac{2}{R_1} + 2j\omega C_1. \quad (4)$$

Знайдемо опір Z_{12}

$$Z_{12} = \frac{2R_1(1 + j\omega C_1 R_1)}{2j\omega C_1 R_1} = \frac{1 + j\omega C_1 R_1}{j\omega C_1}. \quad (5)$$

Позначимо опір $\frac{1}{R_1 C_1} = \frac{1}{\tau_1} = \omega_0$, тоді

$$Z_{12} = \frac{1 + j\omega C_1 R_1}{j\omega C_1}. \quad (6)$$

Знайдемо опір Z_{13}

$$Z_{13} = \frac{Z_{10} \cdot Z_{30}}{Z_0} = \frac{R_1}{2(1 + j\omega C_1 R_1)}. \quad (7)$$

Після простих перетворень одержимо

$$Z_{13} = 2R_1(1 + j\omega\tau). \quad (8)$$

Опір Z_{23} матиме такий вигляд, як і Z_{12} , тому

$$Z_{23} = Z_{12} = \frac{1 + j\omega\tau}{j\omega C_1}. \quad (9)$$

Перетворимо другий Т-подібний чотириполюсник в П-подібний. Запишемо опори

$$Z'_{10} = \frac{1}{j\omega C_1}; \quad Z'_{20} = \frac{R_1}{2}; \quad Z'_{30} = \frac{1}{j\omega C_1}. \quad (10)$$

Виразимо опір Z'_0 через його провідність $\frac{1}{Z'_0}$

$$\frac{1}{Z'_0} = j\omega C_1 + \frac{2}{R_1} + j\omega C_1 = \frac{2(1 + j\omega C_1 R_1)}{R_1} = \frac{1}{Z_0}; \quad (11)$$

тоді

$$Z_0 = \frac{R_1}{2(1 + j\omega C_1 R_1)}. \quad (12)$$

Визначимо опір Z'_{12}

$$Z'_{12} = \frac{2R_1(1 + j\omega C_1 R_1)}{2j\omega C_1 R_1} = \frac{1 + j\omega\tau}{j\omega C_1}, \quad (13)$$

який дорівнює опору Z_{12} .

Знайдемо опір Z'_{13}

$$Z'_{13} = \frac{Z'_{10} Z'_{30}}{Z'_0} = \frac{2R_1(1 + j\omega C_1 R_1)}{j\omega C_1 \cdot j\omega C_1 R_1}. \quad (14)$$

Остаточню одержимо

$$Z'_{13} = \frac{2\omega_0}{j\omega} \left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right). \quad (15)$$

Опори $Z'_{23} = Z'_{12}$, тому що $Z'_{13} = Z'_{30}$.

Таким чином, два Т-подібних чотириполосники замінено на два П-подібних. Тепер маємо можливість два П-подібних замінити одним П-подібним чотириполосником.

Відомо, що $Z_{12} = Z'_{12} = Z_{23} = Z'_{23}$.

Визначимо опір Z_1

$$Z_1 = \frac{Z_{12} Z'_{12}}{Z_{12} + Z'_{12}}. \quad (16)$$

Якщо підставити значення кожного опору і зробити перетворення, одержимо вираз для Z_1

$$Z_1 = \frac{1 + j\omega\tau}{2j\omega C_1}, \quad (17)$$

де $\tau = R_1 C_1$.

Знайдемо опір Z_{12}

$$Z_{12} = \frac{Z_{13} Z'_{13}}{Z_{13} + Z'_{13}}. \quad (18)$$

Зробимо такі ж перетворення, що і з (16), одержимо

$$Z_{12} = \frac{2R_1(1 + j\omega\tau)}{1 - \omega^2\tau^2}. \quad (19)$$

Знайдемо коефіцієнт передачі та фазову характеристику лампової схеми з чотириполосником, який підімкнено паралельно опору анодного навантаження.

Використавши теорему Тевеніна, знайдемо еквівалентний внутрішній опір $Z_{i\text{екв}}$

$$Z_{i\text{екв}} = \frac{R_i Z_1}{R_i + Z_1}. \quad (20)$$

Якщо замість Z_1 підставити його значення, зробити перетворення, скорочення та деяку заміну, одержимо формулу еквівалентного опору

$$Z_{i\text{екв}} = \frac{r_i(1 + j\omega\tau)}{1 + j\omega\tau + 2r_i j\omega C_1}, \quad (21)$$

де $r_i = \frac{R_i R_a}{R_i + R_a}$.

Таким чином одержана спрощена схема каскаду, наведена на рис. 3.

Еквівалентний коефіцієнт підсилення має вигляд

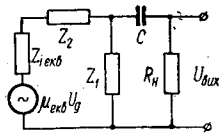


Рис. 3.

$$\mu_{\text{екв}} = \rho \mu, \quad (22)$$

$$\rho = \frac{R_a}{R_i + R_a} (1 + j\omega\tau) \quad (23)$$

де $\mu_{\text{екв}}$ — еквівалентний коефіцієнт підсилення, визначений через $Z_{i\text{екв}}$,

$$\mu_{\text{екв}} = \frac{r_i}{R_i} \mu Z_{i\text{екв}} = \frac{r_i S (1 + j\omega\tau)}{1 + j\omega\tau + 2r_i j\omega C_1}, \quad (24)$$

де S — крутість характеристики лампи.

Виходячи з рис. 3, запишемо вираз для коефіцієнта передачі

$$K = \frac{\dot{U}_H}{\dot{U}_g} = \frac{\mu_{\text{екв}} \dot{U}_g \frac{Z_1 \left(R_H + \frac{1}{j\omega C} \right) R_H}{Z_1 + R_H + \frac{1}{j\omega C}}}{\left[Z_{i\text{екв}} + Z_2 + \frac{Z_1 \left(R_H + \frac{1}{j\omega C} \right)}{Z_1 + R_H + \frac{1}{j\omega C}} \right] \dot{U}_g \left(R_H + \frac{1}{j\omega C} \right)} \quad (25)$$

Після деяких перетворень одержимо

$$K = \frac{\mu_{\text{екв}} Z_1 R_H}{(Z_{i\text{екв}} + Z_2) \left(Z_1 + R_H + \frac{1}{j\omega C} \right) + Z_1 \left(R_H + \frac{1}{j\omega C} \right)} \quad (26)$$

Проведемо заміну в (23) $1 + j\omega\tau = M$; $1 + 2j\omega\tau = M_i$, де $\tau_i = r_i C_1$, тоді

$$\mu_{\text{екв}} = \frac{S r_i M}{1 + j\omega(\tau + 2\tau_i)} \quad (27)$$

На практиці $\tau \ll 2\tau_i$, тоді (27) буде

$$\mu_{\text{екв}} = S r_i \frac{M}{M_i} \quad (28)$$

Добуток $S r_i$ є коефіцієнт підсилення за анодним навантаженням, отже,

$$\mu_{\text{екв}} = K_a \frac{M}{M_i} \quad (29)$$

Еквівалентний опір $Z_{i\text{екв}}$ можна записати у вигляді

$$Z_{i\text{екв}} = r_i \frac{M}{M_i} = \frac{\mu_{\text{екв}}}{S}, \quad (30)$$

звідки знаходимо $\mu_{\text{екв}}$, виражене через $Z_{i_{\text{екв}}}$,

$$\mu_{\text{екв}} = SZ_{i_{\text{екв}}}. \quad (31)$$

Запишемо вираз (17) та (18) через нові заміщення

$$Z_1 = \frac{M}{2j\omega C_1}; \quad Z_2 = \frac{2R_1 M}{1 - \omega^2 \tau^2}. \quad (32)$$

Підставимо (29), (30) і (32) в (26), одержимо формулу коефіцієнта передачі каскаду з RC -фільтром

$$K = \frac{K_a \frac{M}{M_i} \cdot \frac{M}{2j\omega C_1} R_H}{\left(r_i \frac{M}{M_i} + \frac{2R_1 M}{1 - \omega^2 \tau^2} \right) \left(\frac{M}{2j\omega C_1} + R_H + \frac{1}{j\omega C_1} \right) + \frac{M}{j\omega C_1} \left(R_H + \frac{1}{j\omega C} \right)}. \quad (33)$$

Після деяких скорочень, замін і перетворень одержимо вираз для коефіцієнта передачі

$$K = \frac{K_a (1 - \omega^2 \tau^2) \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}{\sqrt{[m - \omega^2 \tau^2 m + 2(A - B\omega^2)]^2 + \left[(1 - \omega^2 \tau^2) \tau_i m \omega - \frac{2(1 - \omega^2 \tau^2)}{\omega \tau_H} + 2\omega \tau_0 \right]^2}}, \quad (34)$$

де

$$m = 4 + \frac{R_1}{R_H}; \quad A = h \frac{R_1}{R_H}; \quad h = 1 + 2 \frac{C_1}{C}; \quad B = \left(2 + \frac{R_1}{R_H} \right) \tau \tau_i;$$

$$\tau_0 = \tau_i h \frac{R_1}{R_H} + \tau \left(2 + \frac{R_1}{R_H} \right); \quad \tau_H = R_H C.$$

Якщо внутрішній опір лампи R_i малий, як при використанні тріодів або пентодів з малим внутрішнім опором, (34) матиме вигляд

$$K = \frac{\mu (1 - \omega^2 \tau^2) \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}{\sqrt{[m - \omega^2 \tau^2 m + 2(A - B\omega^2)]^2 + \left[(1 - \omega^2 \tau^2) \tau_i m \omega - \frac{2(1 - \omega^2 \tau^2)}{\omega \tau_H} + 2\omega \tau_0 \right]^2}}. \quad (35)$$

Використавши (34), знайдемо фазовий зсув між вхідною та вихідною напругами

$$\text{tg } \varphi = \frac{(1 - \omega^2 \tau^2) \tau_i m \omega - \frac{2(1 - \omega^2 \tau^2)}{\omega \tau_H} + 2\omega \tau_0}{m - \omega^2 \tau^2 m + 2(A - B\omega^2)}. \quad (36)$$

Із (35) випливає, що для каскадів RC -фільтрів треба брати лампи з великими S та μ і малим внутрішнім опом R_i , при цьому коефіцієнт підсилення буде великим. Збільшення його залежить від зростання опору навантаження R_H . При частоті квазірезонансу

коефіцієнт передачі дорівнює нулю. Перехідна ємність C впливає на частотну характеристику лише на низьких частотах, коефіцієнт передачі при цьому зменшується.

ЛІТЕРАТУРА

1. С и г о р с к и й В. П., Общая теория четырехполюсника, Издательство АН УССР, 1955.
2. С а а к о в Э. О., Теория и расчет избирательных RC -систем, Госэнергоиздат, 1954.
3. К р и к с у н о в В. Г., Реостатно-емкостные генераторы синусоидальных колебаний, Гостехиздат УССР, 1958.
4. Б о с ы й Н. Д., Электрические фильтры, Гостехиздат УССР, 1959.

P. I. TYNSKY

ON THE CALCULATION OF THE VACUUM-TUBE RC -FILTER

S u m m a r y

Herein a circuit of a vacuum-tube RC -filter with a twin-T RC bridge connected across the plate load is being considered.

Expressions to be used in computation have been obtained.