

А. А. АРУТИОНЯН

О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ СТАЦИОНАРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕОСТАТНО-УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

Введение

При расчете различных электронных схем используются приближенные формулы, полученные для усилительного каскада. Эти приближенные формулы, в частности при оценке квазирезонансной частоты и усиления каскада, не обеспечивают необходимой точности, вследствие чего наладка рассчитанных схем значительно затрудняется.

Конечно, в руководствах можно встретить ряд необходимых практических советов для наладки схем, но они в основном отражают качественную сторону вопроса, вследствие чего наладка рассчитанных схем существенно зависит от индивидуальных навыков наладчика. Это обстоятельство приводит к тому, что однотипные схемы с одинаковыми техническими требованиями, наложенные различными лицами, не удовлетворяют требованиям, взаимозаменяемости, как это необходимо, например, в вычислительной технике.

Вышеизложенное ставит требования для получения более точных формул расчета усилительного каскада, которые одновременно давали бы оптимальные методы проектирования, наладки и коррекции электронных схем.

Безусловно, такие уточненные формулы значительно усложняют расчет, но на уровне современной вычислительной техники легко реализуются.

В Вычислительном центре Академии наук АрмССР и Ереванском государственном университете уже сделаны первые шаги в этом направлении. Полученные результаты не только удовлетворяют в достаточной степени указанным требованиям, но и открывают новые широкие возможности для дальнейших исследований.

§ 1. Реостатно-усилительный каскад

На рис. 1а. представлена схема обычного реостатно-усилительного каскада, а на рис. 1б. соответствующая эквивалентная схема по переменной составляющей.

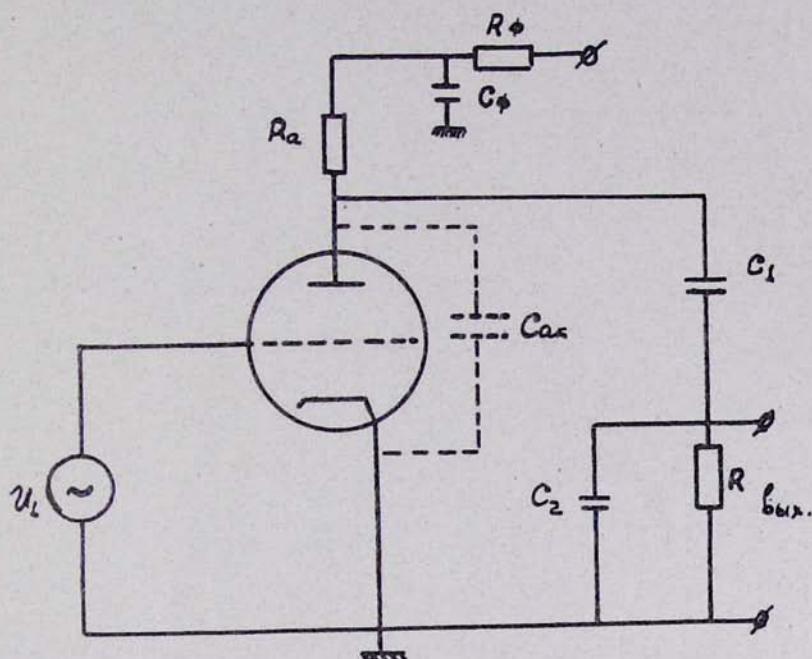


Рис. 1а.

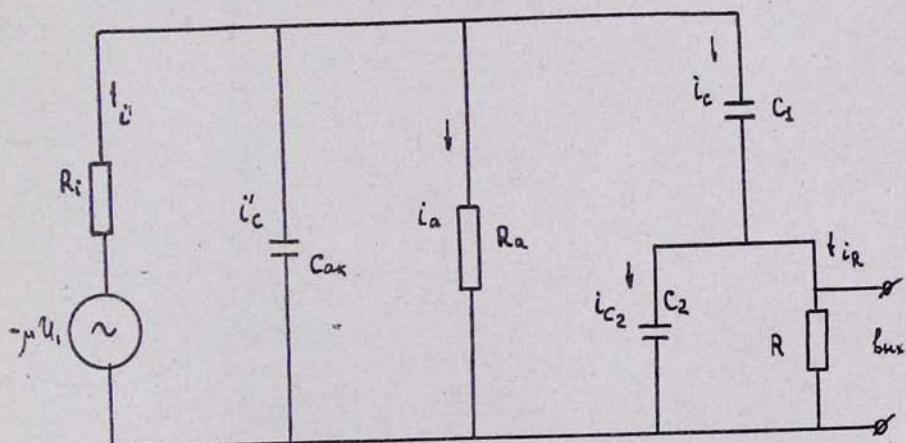


Рис. 1б.

Согласно обозначениям эквивалентной схемы (рис. 1б.) можно написать:

$$\left. \begin{array}{l} -\mu u_1 = R_i i + \frac{1}{C_{ak}} \int i_c' dt; \quad i = i_a + i_c + i_c'; \\ i_c = i_R + i_{c_2}; \quad R i_R = \frac{1}{C_2} \int i_{c_2} dt; \\ R_a i_a = \frac{1}{C_{ak}} \int i_c' dt = \frac{1}{C_1} \int i_c dt + R i_R. \end{array} \right\} \quad (1.1)$$

Из системы уравнений 1.1 получаем

$$\begin{aligned} -\mu u_1 &= \left[R_i + \frac{R R_i}{R_a C_1} (C_1 + C_2) + \frac{R_i C_{ak}}{C_1} + \frac{R (C_1 + C_2)}{C_1} \right] i_R + \\ &+ \left[R R_i C_2 + \frac{R R_i C_{ak}}{C_1} (C_1 + C_2) \right] \frac{d i_R}{dt} + \left(\frac{R_i + R_a}{R_a C_1} \right) \int i_R dt. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Из уравнения (1.2) величину квазирезонансной частоты можно представить следующим уравнением:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{R_i + R_a}{R R_i R_a (C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak})}}. \quad (1.3)$$

При наличии квазирезонансности усиление каскада

$$K_0 = -\frac{S}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_i} + \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_i} \right) \frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{R} \frac{C_{ak}}{C_1}}. \quad (1.4)$$

Если $C_1 > C_2$ и $C_2 \gg C_{ak}$, то, пренебрегая соответствующими величинами, уравнения 1.3 и 1.4 совпадут с приближенными формулами, приведенными в руководствах [1, 2].

§ 2. Усилительный каскад (общий случай)

В общем случае схему реостатно-усилительного каскада можно представить рисунком 2а., а соответствующую эквивалентную схему рис. 2б. Согласно обозначениям на эквивалентной схеме можно написать

$$\left. \begin{array}{l} -\mu u_1 = R_i i + \frac{1}{C_1} \int i_c dt + R i_R; \quad i = i_a + i_c + i_c'; \\ i_c = i_R + i_c'; \quad R i_R = \frac{1}{C_2} \int i_c' dt; \quad i_a = i_r + i_{c_\phi}; \\ i_r R_\phi = \frac{1}{C_\phi} \int i_{c_\phi} dt; \quad i_a R_a + i_r R_\phi = \frac{1}{C_1} \int i_c dt + R i_R = \frac{1}{C_{ak}} \int i_c' dt. \end{array} \right\} \quad (2.1)$$

Из системы уравнений 2.1 получим

$$a \frac{d^2 u_1}{dt^2} + b \frac{du_1}{dt} = m \frac{d^3 i_R}{dt^3} + n \frac{d^2 i_R}{dt^2} + p \frac{di_R}{dt} + q i_R. \quad (2.2)$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} a = -\frac{\mu R_a C_\phi}{R_t}; \quad b = -\frac{\mu}{R_t} \left(1 + \frac{R_a}{R_\phi} \right); \quad q = \left[\left(1 + \frac{R_a}{R_\phi} \right) \frac{1}{R_t C_1} + \frac{1}{R_\phi C_1} \right]; \\ p = \left[\left(1 + \frac{R_a}{R_\phi} \right) \left(1 + \frac{C_{ak}}{C_1} + \frac{R}{R_t} + \frac{R_a C_2}{R_t C_1} \right) + \frac{R_a C_\phi}{R_t C_1} + \frac{R C_2}{R_\phi C_1} + \frac{R}{R_\phi} + \frac{C_\phi}{C_1} \right]; \\ n = \left[\left(1 + \frac{R_a}{R_\phi} \right) \frac{R}{C_1} \left(C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak} \right) + R_a C_\phi \left(1 + \frac{C_{ak}}{C_1} + \frac{R}{R_t} + \frac{R C_2}{R_t C_1} \right) + \frac{R C_2 C_\phi}{C_1} + R C_\phi \right]; \\ m = \frac{R R_a C_\phi}{C_1} \left(C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak} \right). \end{array} \right. \quad (2.3)$$

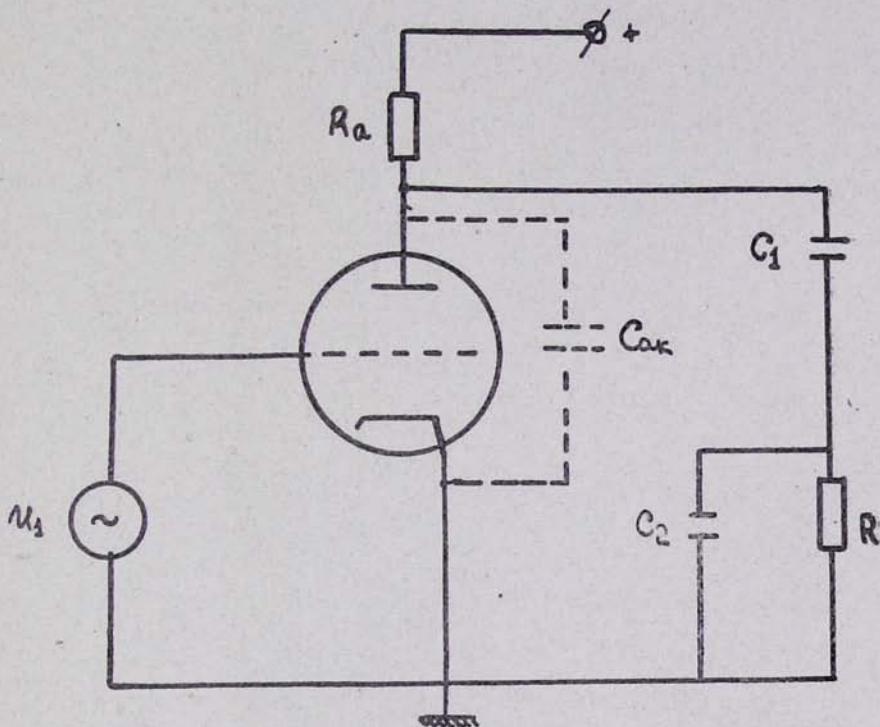


Рис. 2а.

Непосредственно из рис. 2б. применением комплексного метода или из уравнения 2б. для гармонического решения получим

$$-(a^2 \omega^4 + \omega^2 b^2) \dot{U}_1 = [aq\omega^2 - a\omega^4 - \omega^2 b(p - m\omega^2)] \dot{I}_R + j\omega [bq - \omega^2 bn + pa\omega^2 - ma\omega^4] \dot{I}_R. \quad (2.4)$$

Условие квазирезонансности выразится уравнением

$$ma\omega_0^4 + (bn - ap)\omega_0^2 - bq = 0. \quad (2.5)$$

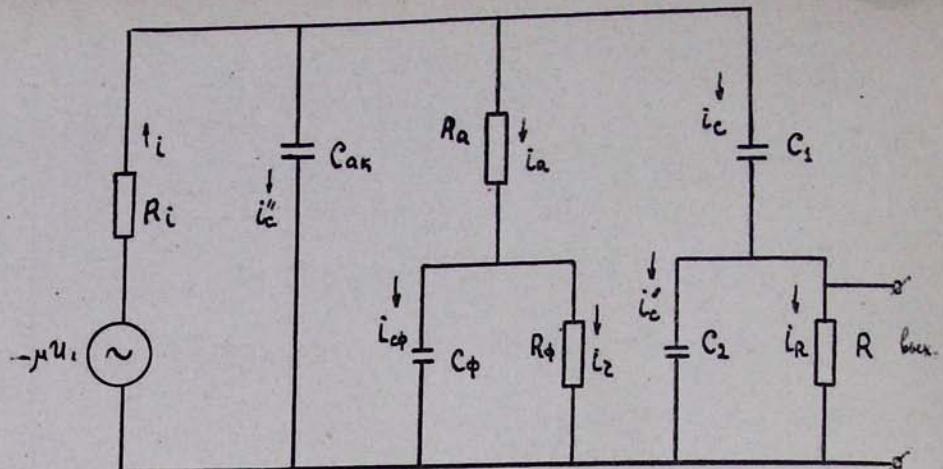


Рис. 2б.

Подставляя значения a, b, m, n, p и q из 2.3 в 2.5, получим

$$\begin{aligned} & RR_i R_a^2 R_\phi^2 C_\phi^2 (C_1 C_2 + C_2 C_{ak} + C_1 C_{ak}) \omega_0^4 + [(R_a + R_\phi)^2 R R_i (C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + \\ & + C_2 C_{ak}) + R_\phi^2 R (C_1 + C_2) - R_a C_\phi] C_\phi - R_a^2 R_\phi^2 C_\phi^2 \} \omega_0^2 - [(R_a + \\ & + R_\phi)(R_i + R_a + R_\phi)] = 0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Преобразуем 2.6 и внесем обозначения

$$\left. \begin{aligned} A &= R_a^2 (C_1 C_2 + C_2 C_{ak} + C_1 C_{ak}); \\ B &= \left(1 + \frac{R_a}{R_\phi}\right) \frac{C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak}}{C_\phi^2} + \frac{C_1 + C_2}{C_\phi}; \\ C &= \frac{R_a}{R} \left(1 + \frac{R_a}{R_i}\right); \\ D &+ \frac{1}{RR_i C_\phi^2} \left(1 + \frac{R_a}{R_\phi}\right) \left(1 + \frac{R_a + R_i}{R_\phi}\right), \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

тогда получим

$$A \omega_0^4 + (B - C) \omega_0^2 - D = 0. \quad (2.8)$$

Из последнего уравнения для ω_0 находим

$$\omega_0^2 = \frac{(C - B) + \sqrt{(C - B)^2 + 4AD}}{2A}. \quad (2.9)$$

Исследования показывают, что ω_0 имеет экстремум относительно C_ϕ :

$$\omega_{\text{экст}}^2 = \frac{2d}{2b + C_\phi (C_1 + G_2)}, \quad (2.10)$$

где

$$b = \left(1 + \frac{R_a}{R_\phi}\right)^2 (C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak}); \quad (2.11)$$

$$d = \frac{1}{RR_1} \left(1 + \frac{R_a}{R_\phi} \right) \left(1 + \frac{R_a + R_j}{R_\phi} \right). \quad (2.12)$$

Из (2.2) и (2.10) получаем уравнение относительно C_ϕ

$$C_\phi^2 - \left[\frac{2(bC - Ad)}{C(C_1 + C_2)} + \frac{C_1 + C_2}{2C} \right] C_\phi - \frac{b}{C} = 0. \quad (2.13)$$

Можно показать, что значение C_ϕ из уравнения (2.13) дает минимум ω_0 .

Сотрудниками лаборатории С. Буюкяном, К. Егиазаряном и Л. Татевосяном произведен ряд экспериментов для выявления хода кривой зависимости f_0 от C_ϕ и определения f_{0min} для усилительного каскада.

На рис. 2c представлена принципиальная схема эксперимента, а на рис. 2d — график функции $f_0 = \varphi(C_\phi)$.

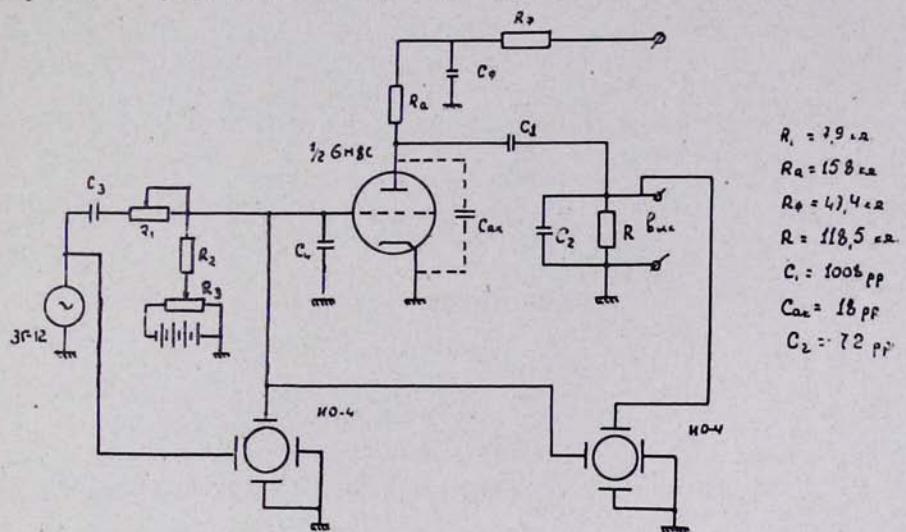


Рис. 2c.

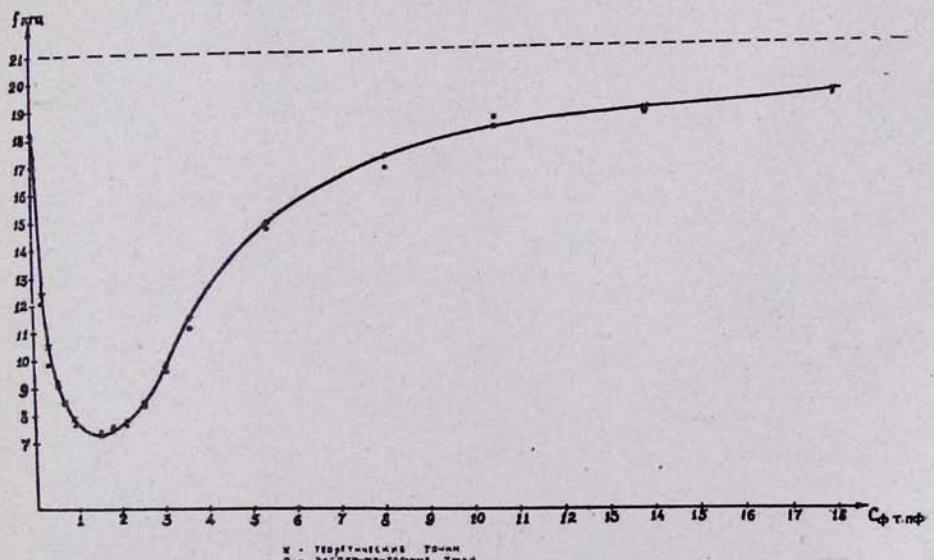


Рис. 2d.

Нетрудно заметить, что при $R_t = R_\phi$

$$\frac{bC - Ad}{C(C_1 + C_2)} = \frac{C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak}}{C_1 + C_2}.$$

Учитывая последнее, (2.13) можно переписать в следующем виде:

$$C_\phi^2 - \left[2 \frac{C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak}}{C_1 + C_2} + \frac{C_1 + C_2}{2C} \right] C_\phi - \frac{b}{C} = 0. \quad (2.14)$$

Можно также доказать, что всегда $bC > Ad$.

Действительно подставляя значения b , C , A , d и произведя элементарные преобразования для отношения $\frac{bC}{Ad}$, получим

$$\frac{bC}{Ad} = 1 + \frac{R_\phi R_t}{R_a^2 + R_a R_\phi + R_a R_t}. \quad (2.15)$$

В пределе, когда $R_\phi \rightarrow 0$, из уравнения (2.6) для ω_0 получим следующее уравнение

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_a + R_t}{R_a R R_t (C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak})}}, \quad (2.16)$$

которое совпадает с (1.3).

Ряд частных случаев также приводит к (1.3).

В самом деле:

1. $C_\phi \rightarrow 0$. Из (2.6) получим

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_a + R_\phi + R_t}{(R_a + R_\phi) R R_t (C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak})}}. \quad (2.17)$$

В этом случае $R_a + R_\phi$ является анодной нагрузкой и (2.27) совпадает с (1.3).

2. $A \rightarrow 0$, то есть $R_a \rightarrow 0$, то

$$B \rightarrow \frac{C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak}}{C_\phi^2} + \frac{C_1 + C_2}{C_\phi};$$

$$C \rightarrow 0; \quad D \rightarrow \frac{1}{R R_t C_\phi^2} \left(1 + \frac{R_t}{R_\phi} \right);$$

из (2.8)

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{B}} = \sqrt{\frac{R_\phi + R_t}{R_\phi R R_t [(C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak}) + C_\phi (C_1 + C_2)]}}. \quad (2.18)$$

В этом случае C_ϕ оказывается включенным параллельно C_{ak} , R_ϕ является анодной нагрузкой и когда $C_\phi \rightarrow 0$, (2.18) тоже совпадает с (1.3).

3. Наконец, когда $C_\phi \rightarrow \infty$ из (2.8) и (2.7) следует

$$A\omega_0^4 - C\omega_0^2 = 0,$$

откуда

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{A}} = \sqrt{\frac{R_a + R_t}{R R_t R_a (C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak})}}, \quad (2.19)$$

что также совпадает с (1.3)

При наличии квазирезонансности из (2.4) следует, что

$$U_1 = - \frac{(aq - bp) + (mb - an) \omega_0^2}{a^2 \omega_0^2 + b^2} I_k.$$

Следовательно, усиление каскада

$$K_0 = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} = - \frac{(a^2 \omega_0^2 + b^2) R}{(aq - bp) + (mb - an) \omega_0^2}. \quad (2.20)$$

Как мы видели, квазирезонансная частота зависит от C_ϕ , значит и K_0 должно зависеть от C_ϕ . Но можно получить условие, при котором изменение частоты ω_0 не влияло бы на величину K_0 .

Для этого достаточно потребовать, чтобы производная (2.20) по ω_0 равнялась бы нулю. Тогда для коэффициента усиления каскада получим

$$K_{on} = \frac{a^2 R}{an - mb}. \quad (2.21)$$

Представляя соответствующие значения, после преобразования получим

$$K_{on} = - \frac{S}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R_t} + \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_t} \right) \frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{R} \frac{C_{ak}}{C_1}}, \quad (2.22)$$

которое совпадает с (1.4).

С помощью (2.20) и (2.21) можно получить необходимое и достаточное условие постоянства коэффициента усиления, независящее от изменения ω_0 ,

$$\frac{an - mb}{ab - aq} = \frac{a^2}{b^2}.$$

Подставляя соответствующие значения, получим

$$R(C_1 + C_2) = \frac{R_a R_\phi}{R_a + R_\phi} C_\phi. \quad (2.23)$$

Таким образом, чтобы усиление каскада оставалось бы постоянным, т. е. не зависело от ω_0 , необходимо и достаточно выполнение соотношения (2.23).

Так как в (2.23) не входят только R_ϕ и C_ϕ , то изменение квазирезонансной частоты, совместно с требованием постоянства коэффициента усиления, можно производить при помощи R_ϕ и C_ϕ , причем значение всегда необходимо выбирать так, чтобы выполнялось условие (2.23).

$$R_\phi = \frac{RR_a(C_1 + C_2)}{R_a C_\phi - R(C_1 + C_2)}. \quad (2.24)$$

По данным схемы рис. 2с, согласно (2.24), график зависимости R_ϕ от C_ϕ изображен на рис. 2е.

При условии (2.24) в системе уравнений (2.7) подвергаются изменениям только величины B и D , и тогда (2.7) можно переписать в следующем виде:

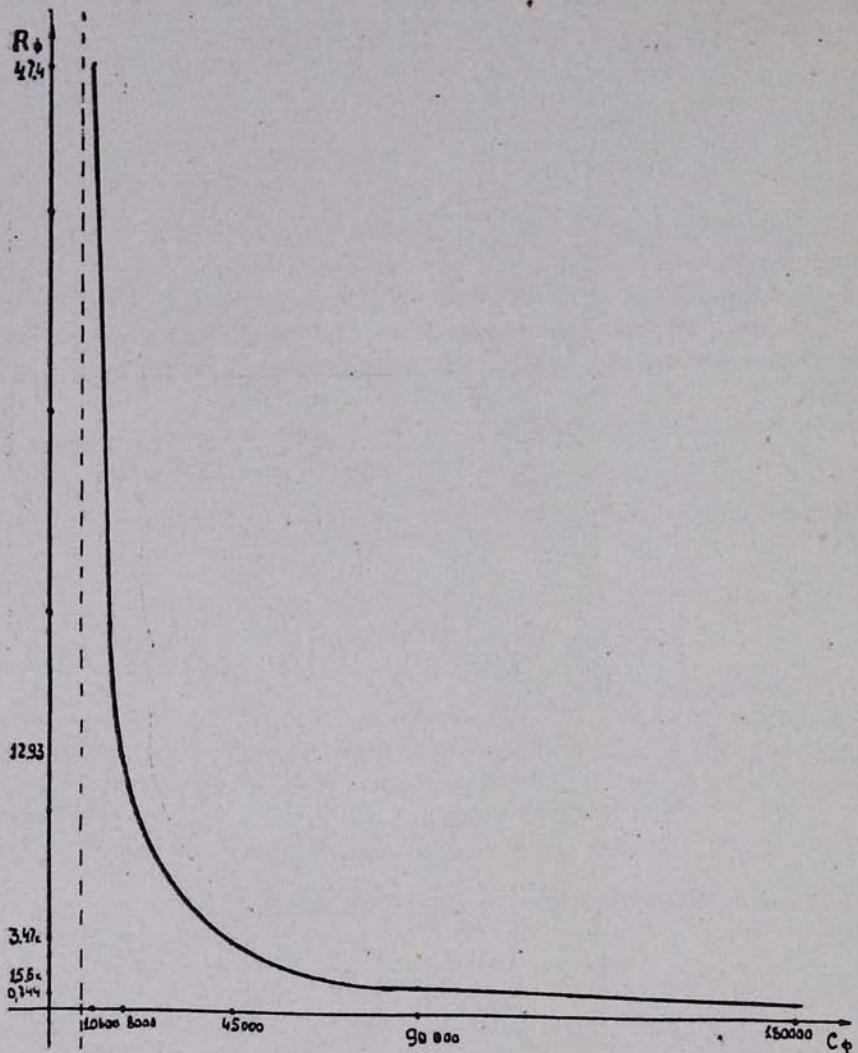


Рис. 2е.

$$A = R_a^2 (C_1 C_2 + C_1 C_{ak} + C_2 C_{ak});$$

$$B = \frac{A}{R^2 (C_1 + C_2)^2} + \frac{1}{R \left(\frac{1}{R_a} + \frac{2}{R_\phi} \right)}; \quad C = \frac{R_a}{R} \left(1 + \frac{R_\phi}{R_t} \right); \quad (2.25)$$

$$D = \frac{R_a^2}{R^3 (C_1 + C_2)^2} \left[\frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_a + R_\phi} \right].$$

В том же эксперименте, согласно вычислениям по данным рис. 2с, получаются следующие результаты:

$$R_\phi = 47,4 \text{ k}\Omega \quad C_\phi \approx 108000 \text{ pF} \quad f_0 = 18183 \text{ Гц},$$

$$R_\phi = 744 \Omega \quad C_\phi \approx 180000 \text{ pF} \quad f_0 \approx 20851 \text{ Гц},$$

которые с достаточной точностью подтверждаются опытом.

Из вышеизложенного следует, что, оставляя неизменными все параметры усиительного каскада, только с помощью C_ϕ можно производить коррекцию квазирезонансной частоты в широком интервале.

Уравнение (2.14) дает возможность определять то значение, при котором квазирезонансная частота имеет минимум.

Заслуживает внимания то обстоятельство, что для перехода от минимальной квазирезонансной частоты к более высоким частотам коррекцию можно производить как увеличением, так и уменьшением величины C_ϕ , но в последнем случае увеличивается и усиление каскада, так как при уменьшении величины C_ϕ увеличивается анодная нагрузка. Предельное значение квазирезонансной частоты можно оценить при помощи уравнения (2.19).

Что касается коррекции квазирезонансной частоты при условии постоянства коэффициента усиления, то этот вопрос уже был рассмотрен выше.

Поступило 9. XII 1963

II. Հ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ԻՆՍՏԱՏԱՅԻՆ ՈՒԺԵՂԱՑՈՒՑԻՉ ԿԱՍԿԱԴԻ ՍՏԱՑԻՈՆԱՐ
ԲԵՐԻՄԱԳՐԻՑԻ ՈՐՈՇ ՀԱՐՑԵՐԻ ՇՈՒՐՋԸ

Ա. Մ Փ Պ Փ Վ Մ

Հոգվածում շարադրված են պարզագույն ուժեղացուցիչ կասկադին և $R_\phi C_\phi$ էլեմենտներով ցածր հաճախականության կորեկցիային վերաբերվող հարցերը։ Կազմված են համապատասխան էկվիվալենտ սխեմաների դիֆերենցիալ հավասարումները և արված է նրանց ճշգրիտ լուծումը, որոնք հնարավորություն են տալիս կատարել սեռոտատաշին ուժեղացուցիչ կասկադում տեղի ունեցող պրոցեսների մանրակրկիտ վերլուծությունը։

Մասնավորապես ուշագրավ է C_ϕ էլեմենտով ω_0 քվազիունգոնանսացին հաճախականության կորեկցիան, որտեղ ցուց է տրվում, որ ω_0 -ն ունի մինիմում։ Հնարավոր է բավականաչափ ճշգրիտ կերպով գնահատել առում-ի և նրան համապատասխան C_ϕ արժեքը։ Ստացված են նաև բանաձևեր, որոնց օգնությամբ կարելի է գնահատել քվազիունգոնանսային հաճախականության կորեկցիան՝ բավականաչափ լայն սահմաններում հաստատուն պահելով կասկադի ուժեղացումը։

Ստացված բանաձևերի մասնավոր դեպքերը համընկնում են դասագրքերում արտածված բանաձևերի հետ։

Տեսական արդյունքները ստուգված են բազմաթիվ փորձերով։

Լ И Т Е Р А Т У Р А

¹ Бонч-Бруевич А. М. Применение электронных ламп в экспериментальной физике. 1956.

² Войшвило Г. В. Усилители низкой частоты на электронных лампах. 1959.