

**ОПТИМИЗАЦИЯ НОРМИРОВАННОЙ ПЕРЕХОДНОЙ
ФУНКЦИИ ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ, ОПИСЫВАЕМОЙ
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ УРАВНЕНИЕМ 4-го ПОРЯДКА**

Д. И. СВИРЯКИН

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института
электронной интроскопии)

Исследование временных характеристик усилителей всегда имело большое значение и в теоретическом, и в практическом планах, так как без этого немислимо полное использование свойств усилителей. Одним из средств улучшения импульсных характеристик усилителей является коррекция в области малых времен, что ведет к повышению степени характеристического уравнения, описывающего схему. Полный анализ дан в литературе [1, 2, 3] для схем усилителей лишь с квадратными уравнениями или же с приведением более высоких степеней уравнений ко второй. Такой расчет допустим в тех случаях, когда при доводке усилителя возможна подстройка и подбор его элементов. Современные же методы производства интегральных схем требуют более точного расчета усилителей со степенями характеристических уравнений выше второй, так как наладка схем после изготовления практически исключена. Крайне ограниченное количество работ, посвященных разработке таких методов расчета, говорит о том, что задача определения параметров, обеспечивающих минимальное время установления переходной характеристики при заданных или минимальных выбросах, является в усилительной технике одной из наиболее сложных задач на экстремум. При наличии нескольких варьируемых параметров (коэффициентов коррекции), т. е. при характеристических уравнениях выше 2-й степени, задача значительно усложняется и случайным варьированием или машинным перебором сочетаний параметров [4] решить ее чрезвычайно трудно. Вместе с тем задачи на экстремум не новость для математики, они встречались и решались на протяжении всей истории математики. Но интенсивное и последовательное их изучение началось сравнительно недавно, когда, с одной стороны, запросы экономики и автоматического управления сделали решение этих задач неотложным делом, а, с другой стороны, появление электронных вычислительных машин (ЭВМ) дало в руки исследователей мощное средство, с помощью которого решение может быть доведено до конечного итога — численного результата.

Известный метод равных модулей [1] не обеспечивает получение наилучших из всех возможных результатов, приближенные методы анализа требуют предварительного определения условия монотонности протекания переходного процесса [2], что в общем случае является весьма сложной задачей, и не гарантируют достаточно высокой точности [5].

Чаще всего при расчете усилителя необходимо найти не только па-

параметры немонотонной переходной характеристики, но и определить значения коэффициентов коррекции, минимизирующие время установления при заданных величинах выбросов и максимальном коэффициенте усиления. Аналитического решения такой задачи нет и без применения методов и средств вычислительной техники решить ее методами численного анализа практически тоже невозможно.

Методы анализа усилителей с характеристическим уравнением третьей степени, описанные в литературе [3], позволяют оценить характер переходного процесса и область устойчивой работы, но для определения оптимальных параметров схем эти методы непригодны. В данной работе изложена методика и алгоритм численного решения на цифровой электронно-вычислительной машине (ЭВМ) задачи определения оптимальных значений коэффициентов коррекции при известных исходных параметрах усилителя, имеющего нормированный коэффициент передачи вида

$$M(p) = \frac{1 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3}{1 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3 + b_4 p^4}$$

и переходную характеристику

$$h(\tau) = 1 + A_1 e^{-\alpha_1 \tau} \sin(\omega_1 \tau + \varphi) + A_2 e^{-\alpha_2 \tau} \sin(\omega_2 \tau + \psi),$$

где $p = j\omega C_0 R_a$, $j = \sqrt{-1}$, ω — циклическая частота;

$\alpha_1, \alpha_2, \omega_1, \omega_2$ являются действительными и мнимыми частями корней $p_{1,2} = -\alpha_1 \pm j\omega_1$, $p_{3,4} = -\alpha_2 \pm j\omega_2$ характеристического уравнения

$$1 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3 + b_4 p^4 = 0.$$

Произведение $C_0 R_a$ есть постоянная времени анодной (коллекторной) цепи активного элемента рассчитываемого каскада усилителя. Далее

$$b_1 = 1 - x + (1 - b)k_2 + b(q + xm) + xb,$$

$$b_2 = (k_1 + k_2)[1 - x(1 - b)] + bk_2(q + xm - 1) + b[q + xm(1 - x)],$$

$$b_3 = (1 - x)(1 - b)k_1 k_2 + b(k_1 + k_2)[q + xm(1 - x)],$$

$$b_4 + bk_1 k_2 [q + xm(1 - x)],$$

$$A_1 = \frac{1}{\omega_1 b_4} \sqrt{\frac{T_1^2 + \omega_1^2 S_1^2}{R_1 P Q}},$$

$$A_2 = \frac{1}{\omega_2 b_4} \sqrt{\frac{T_2^2 + \omega_2^2 S_2^2}{R_2 P Q}},$$

$$T_1 = 1 - \alpha_1 a_1 + (\alpha_1^2 - \omega_1^2) a_2 + (-\alpha_1^3 + 3\alpha_1 \omega_1^2) a_3,$$

$$T_2 = 1 - \alpha_2 a_1 + (\alpha_2^2 - \omega_2^2) a_2 + (-\alpha_2^3 + 3\alpha_2 \omega_2^2) a_3,$$

$$S_1 = a_1 - 2\alpha_1 a_2 + (3\alpha_1^2 - \omega_1^2) a_3,$$

$$S_2 = a_1 - 2\alpha_2 a_2 + (3\alpha_2^2 - \omega_2^2) a_3,$$

$$R_1 = \alpha_1^2 + \omega_1^2,$$

$$R_2 = \alpha_2^2 + \omega_2^2,$$

$$P = (\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2,$$

$$Q = (\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\omega_1 + \omega_2)^2,$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega_1 S_1}{T_1} - \arctg \frac{\omega_1}{\alpha_1} - \arctg \frac{\omega_1 - \omega_2}{\alpha_2 - \alpha_1} - \arctg \frac{\omega_1 + \omega_2}{\alpha_2 - \alpha_1},$$

$$\psi = \arctg \frac{\omega_2 S_2}{T_2} - \arctg \frac{\omega_2}{-\alpha_2} - \arctg \frac{\omega_2 - \omega_1}{\alpha_1 - \alpha_2} - \arctg \frac{\omega_1 - \omega_2}{\alpha_1 - \alpha_2},$$

$$a_1 = q + k_1,$$

$$a_2 = q(k_1 + k_2),$$

$$a_3 = qk_1k_2.$$

Исходными параметрами каскада являются b , m , x , искомыми коэффициентами коррекции — k_1 , k_2 и q . Например, для пентодного каскада [6] эти параметры и коэффициенты записываются через выражения

$$b = \frac{1}{1 + SR_k}, \quad m = \frac{R_k}{R_a}, \quad x = \frac{C_{\text{ВЫХ}} + C_{\text{ВХ}}}{C_0},$$

$$k_1 = \frac{L_a}{C_0 R_a^2}, \quad k_2 = \frac{L_k}{C_k R_a R_k}, \quad g = \frac{C_k R_k}{C_0 R_a},$$

где S — крутизна анодного тока пентода;

$C_0 = C_{\text{ВЫХ}} + C_{\text{ВХ}} + C_M$; $C_{\text{ВЫХ}}$, $C_{\text{ВХ}}$, C_M — соответственно емкости выхода, входа пентода и монтажа;

R_a и R_k — резисторы в анодной и катодной цепях;

C_k — корректирующий конденсатор в катодной цепи;

L_a и L_k — корректирующие индуктивности в анодной и катодной цепях.

Для определения нормированного времени установления U используется выражение $U = \tau_{0,9} - \tau_{0,1}$. Здесь $\tau_{0,1}$ и $\tau_{0,9}$ — моменты времени, где функция принимает значения, соответственно равные 0,1 и 0,9. Первый и второй выбросы соответственно равны $\delta_1 = h(\tau_{m1}) - 1$ и $\delta_2 = h(\tau_{m2}) - 2$, где τ_{m1} и τ_{m2} — моменты времени, соответствующие экстремальным значениям функции $h(\tau)$ при $\tau > 0$. Здесь: $\tau = \frac{t}{C_0 R_a}$, t — время в секундах.

Сложную схему коррекции, описываемую уравнением 4-й степени, можно представить в виде сочетания двух более простых схем, каждая из которых получается отключением корректирующих элементов и приравниванием соответственно коэффициентов k_1 или k_2 нулю. (Как будет показано далее, для удобства вычислений лучше брать не $k_1 = 0$ или $k_2 = 0$, а приравнивать их к очень малой величине, например, $k_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ или $k_2 = 1 \cdot 10^{-5}$). Поэтому программа, составленная для вычислений основных параметров переходной характеристики u , δ_1 и δ_2 , пригодна как для сложной, так и для более простых схем. Предварительные исследования, проведенные с помощью ЭВМ, показали, что в схеме с двумя коэффициентами коррекции q и k_1 возникает задача определения оптимальных значений этих коэффициентов для получения минимального времени установления при заданной допустимой величине δ_1 , так как для любого сочетания значений b , m , x можно получить выброс, равный при большом числе сочетаний коэффициентов q и k_1 , но при отнюдь не минимальном времени установления (рис. 1). Схема с коэффициентами q и k_2 может дать переходную характеристику, у которой второй выброс сравним или даже больше первого. Но в этой схеме каждое сочетание значений q и k_2 обеспечивает только одно сочетание величин выбросов δ_1 и δ_2 , поэтому, зная предельно допустимые величины δ_1 и δ_2 , можно определить значения q и k_2 .

При трех коэффициентах коррекции q , k_1 и k_2 зависимости между ними и параметрами переходной характеристики усложняются и здесь при поиске оптимальных значений q , k_1 и k_2 необходимо обеспечить не только минимальное время установления, но и выбросы, величины которых не превышают заданных значений δ_{13} и δ_{23} . Для известных значений исходных параметров b , x , m поиск оптимальных коэффициентов коррекции производится по разности между полученными для случайно взятых сочетаний значений q , k_1 , k_2 и заданными допустимыми величинами выбросов δ_{13} , δ_{23} и по «сбегу» приращения времени установ-

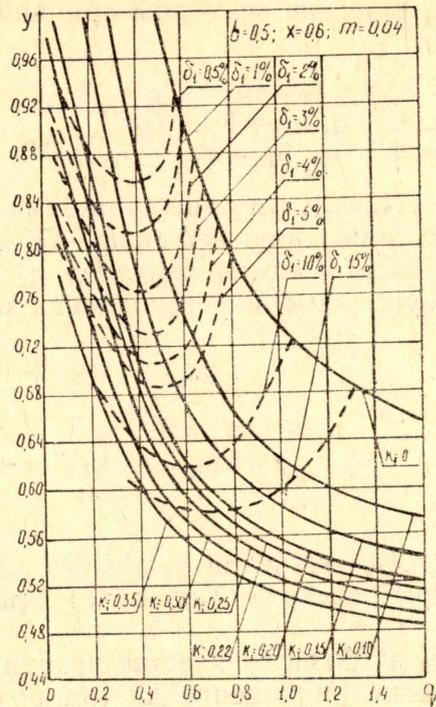


Рис. 1. Кривые зависимости $Y=f(q)$ при разных значениях k_1 с нанесенными на них кривыми неизменных выбросов δ_1 (пунктир), иллюстрирующими наличие Y_{\min} при оптимальных сочетаниях q и k_1 .

ления (ΔY) при последовательном переходе от варианта к варианту, где были получены выбросы, равные заданным. Называя программу для определения с помощью ЭВМ параметров Y , δ_1 и δ_2 основной [6], поиск оптимальных значений коэффициентов q , k_1 , k_2 проводится следующим образом.

I. Определить исходные параметры каскада b , x , m , используя величину коэффициента усиления на средних частотах и паспортные параметры выбранного активного элемента.

II. а) Для исходных значений b , x , m и заданного допустимого значения выброса δ_{13} , пользуясь основной программой и приняв $k_2 = 1 \cdot 10^{-5}$, взять три значения q (в диапазоне $q = 0,3 \div 0,8$), отличающиеся друг от друга на Δq (например, $\Delta q = 0,05$), и по результатам вычислений основной программы произвести проверку выполнения неравенства $y < 2b$ для каждого значения q , приняв при этом $k_1 = 0,1 \div 0,3$.

б) Если неравенство не выполняется, увеличить q на 0,1 и повторить все сначала.

в) В случае выполнения неравенства для каждого из принятых значений q определить величину k_1 , при которой выброс δ_1 получается равным заданному (т. е. $\delta_1 = \delta_{13}$). Для этого задаться величиной $\Delta k_1 = 0,001 \div 0,005$ и по основной программе вычислить при неизменном q два варианта: 1) при k_1 , где получается выброс δ_1^I ; 2) при $k_1' = k_1 + \Delta k_1$, где получается δ_1'' . Определив алгебраическую разность $\Delta \delta_1 = \delta_1'' - \delta_1^I$, найти нужное значение k_1 по формуле

$$k_1'' = k_1 + \Delta k_1 \frac{\delta_{13} - \delta_1^I}{\Delta \delta_1},$$

г) Произвести проверку найденного значения k_1'' по разности $\delta_{13} - \delta_{1\text{п}}$, где $\delta_{1\text{п}}$ — выброс, полученный по основной программе для k_1'' .

Если $\delta_{13} - \delta_{1\text{п}} > \pm \epsilon$, то взяв за исходные найденное значение k_1'' и прежнее значение q и уменьшив приращение Δk_1 (например, в 5 раз), повторять вычисления до выполнения условия $\delta_{13} - \delta_{1\text{п}} \leq \pm \epsilon$, где ϵ — заданная погрешность.

III а) Имея три варианта с одинаковыми величинами выбросов, но с разными временами установления и значениями q и k_1 , определить

алгебраические величины приращений времени установления и коэффициента.

- 1) $q_I, k''_{1,I}, \delta_{1II} = \delta_{13}, Y_I$ } $\Delta k_1' = k''_{1,II} - k''_{1,I}; \Delta Y' = Y_{II} - Y_I;$
- 2) $q_{II}, k''_{1,II}, \delta_{1II} = \delta_{13}, Y_{II}$ } $\Delta k_1'' = k''_{1,III} - k''_{1,II}; \Delta Y'' = Y_{III} - Y_{II}.$
- 3) $q_{III}, k''_{1,III}, \delta_{1II} = \delta_{13}, Y_{III}$ }

б) Используя кривую равных выбросов, соответствующую значению δ_{13} , по изменению величины ΔY при переходе от варианта к варианту определить искомые значения q и k_1 , при которых будет наблюдаться минимум времени установления по формулам

$$q_{иск} = q_{III} + \Delta q \frac{\Delta Y''}{\Delta Y' - \Delta Y''},$$

$$k_{1иск} = k_{1,III} + \frac{\Delta Y''}{\frac{\Delta Y'}{\Delta k_1'} - \frac{\Delta Y''}{\Delta k_1''}}.$$

в) Для значений $q_{иск}$ и $k_{1иск}$ вычислить по основной программе параметры переходной характеристики и заслать в запоминающее устройство.

IV а) Взяв в качестве исходных найденные значения $q_{иск}$ и $k_{1иск}$ и уменьшив приращение Δq (например, в 5 раз), повторить поиск, начиная с пункта Ia.

б) Сравнить результаты вычислений этапов III и IVa по величинам δ_1 и Y .

Повторять вычисления до совпадения с заданной точностью величин δ_1 и Y , полученных на последнем этапе с величинами этих же параметров предыдущего этапа.

V а) Приняв найденные на IV этапе значения коэффициентов q и k_1 за исходные (увеличив при этом для сокращения времени поиска найденное также на IV этапе значение q примерно на $0,2 \div 0,4$), задать некоторое значение коэффициента k_2 (например, $k_2 = 0,2 \div 0,5$) и величины приращений $\Delta q = 0,05 \div 0,1$ и $\Delta k_2 = 0,01 \div 0,05$ и вычислить по основной программе параметры Y, δ_1, δ_2 для трех вариантов: 1) q, k_1, k_2 , где получаются Y, δ_1, δ_2 ; 2) $q' = q + \Delta q, k_1, k_2$, где получаются Y', δ_1', δ_2' ; 3) $q, k_1, k_2' = k_2 + \Delta k_2$, где получаются Y'', δ_1'' и δ_2'' .

Если в варианте 1) имеет место неравенство $Y > 2b$ или $\delta_1 < 0$, задать новое значение q (например, $q + 0,1 \div 0,2$) и повторить вычисления с начала этапа Va.

б) Может оказаться, что условие $Y < 2b$ не выполняется ни при одном из принимаемых значений q . В таком случае взять среднее из опробованных значение q и менять величину k_2 .

Если условие $Y < 2b$ опять не выполняется ни в одном из вариантов, это значит, что по сравнению с некоррелированным каскадом рассчитываемая схема коррекции при полученном сочетании исходных параметров b, x, m не может дать выигрыша во времени установления больше чем на 10%. Поэтому следует сменить активный элемент и начать вычисления при новых значениях b, x, m .

в) Если $Y < 2b$ — продолжить вычисления.

VI, а) Определить приращения выбросов при изменении q и k_2 на Δq и Δk_2 , а также приращение $\Delta Y_{\Delta q}$ при изменении q .

$$\Delta \delta_{1\Delta q} = \delta_1' - \delta_1, \quad \Delta \delta_{2\Delta q} = \delta_2' - \delta_2, \quad \Delta Y_{\Delta q} = Y' - Y,$$

$$\Delta \delta_{1\Delta k_2} = \delta_1'' - \delta_1, \quad \Delta \delta_{2\Delta k_2} = \delta_2'' - \delta_2.$$

б) Проверить отношение $\frac{\Delta Y_{\Delta q}}{\Delta \delta_{1\Delta q}}$. Если $\frac{\Delta Y_{\Delta q}}{\Delta \delta_{1\Delta q}} > 0$, дать приращение по q и начать снова вычисления с пункта Va.

в) Если $\frac{\Delta Y_{\Delta q}}{\Delta \delta_{1\Delta q}} < 0$ — продолжить вычисления.

VII. а) Определить количества шагов по q и k_2 , необходимых для получения значений q и k_2 , при которых предполагается выполнение равенств $\delta_1 = \delta_{13}$ и $\delta_2 = \delta_{23}$ по формулам

$$n = \frac{\delta_{13} - \delta_1 - \frac{\Delta \delta_{1\Delta k_2}}{\Delta \delta_{2\Delta k_2}} (\delta_{23} - \delta_2)}{\Delta \delta_{1\Delta q} - \Delta \delta_{2\Delta q} \frac{\Delta \delta_{1\Delta k_2}}{\Delta \delta_{2\Delta k_2}}} \quad (\text{число шагов по } q),$$

$$m = \frac{\delta_{23} - \delta_2 - \Delta \delta_{2\Delta q} \cdot n}{\Delta \delta_{2\Delta k_2}} \quad (\text{число шагов по } k_2).$$

б) Изменить q и k_2 до значений $q'' = q + n \cdot \Delta q$ и $k_2'' = k_2 + m \cdot \Delta k_2$, вычислить снова значения δ_1 и δ_2 и, если они расходятся с δ_{13} и δ_{23} более, чем на заданную величину, то уменьшить шаг по q и k_2 до значений $\Delta q' = (0,2 \div 0,5) \cdot \Delta q$, $\Delta k_2' = (0,2 \div 0,5) \Delta k_2$ и повторять цикл вычислений, начиная с VI этапа до получения значений δ_1 и δ_2 с заданной точностью. Заслать полученные в последнем цикле значения Y , δ_1 , δ_2 в запоминающее устройство.

VIII. а) Взяв значения q и k_2 , полученные в последнем цикле этапа VIIб, и значение k_1 , использованное в этом же цикле, за исходные и, задавшись приращением $\Delta k_1 = (0,005 \div 0,01)$, повторить вычисления по этапам VI—VIII для значений $k_1' = k_1 - \Delta k_1$ и $k_1'' = k_1 + \Delta k_1$.

б) Имея три варианта, в которых $\delta_1 = \delta_{13}$ и $\delta_2 = \delta_{23}$,

$$\begin{array}{l} 1) q^I, k_1^I = k_1 - \Delta k_1, k_2^I, Y^I \\ 2) q^{II}, k_1^{II} = k_1, k_2^{II}, Y^{II} \\ 3) q^{III}, k_1^{III} = k_1 + \Delta k_1, k_2^{III}, Y^{III} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \Delta Y^I = Y^{II} - Y^I, \Delta k_2 = k_2^{II} - k_2^I, \Delta q^I = q^{II} - q^I, \\ \Delta Y^{II} = Y^{III} - Y^{II}, \Delta k_2^{II} = k_2^{III} - k_2^{II}, \\ \Delta q^{II} = q^{III} - q^{II}. \end{array} \right.$$

Определить число шагов по k_1 , которое необходимо сделать, чтобы достигнуть предполагаемого оптимального значения или значения близкого к оптимальному.

$$n_{k_1} = \frac{\Delta Y''}{\Delta Y' - \Delta Y''}.$$

Предполагаемое оптимальное значение определить как

$$k_{1 \text{ опт}} = k_1 + n_{k_1} \cdot \Delta k_1.$$

в) Предполагаемые оптимальные значения q и k_2 определить по формулам

$$q_{\text{опт}} = q''' + \frac{\Delta Y''}{\frac{\Delta Y'}{\Delta q'} - \frac{\Delta Y''}{\Delta q''}},$$

$$k_{2 \text{ опт}} = k_2''' + \frac{\Delta Y''}{\frac{\Delta Y'}{\Delta k_2'} - \frac{\Delta Y''}{\Delta k_2''}}.$$

г) Для найденных значений $q_{\text{опт}}$, $k_{1 \text{ опт}}$, $k_{2 \text{ опт}}$ вычислить по основной программе значения Y , δ_1 , δ_2 и заслать в запоминающее устройство.

IX а) Приняв значения $q_{\text{опт}}$, $k_{1 \text{ опт}}$, $k_{2 \text{ опт}}$, найденные на VIII этапе, за исходные, повторить цикл вычислений, начиная с V этапа (не увеличивая q на $0,2 \div 0,4$), и получить значения коэффициентов $q'_{\text{опт}}$, $k'_{1 \text{ опт}}$, $k'_{2 \text{ опт}}$ более близкие, по сравнению с полученными в предыдущем цикле, к оптимальным.

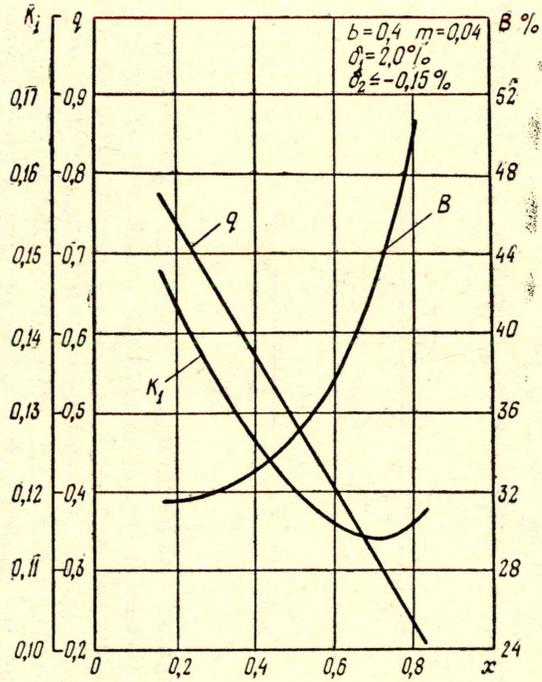


Рис. 2. Кривые зависимости $V_{\max} = f(x)$ при $q_{\text{опт}} = f_1(x)$, $k_{1\text{опт}} = f_2(x)$ и выбросах $\delta_1 = 2\%$ и $\delta_2 \leq -0,15\%$.

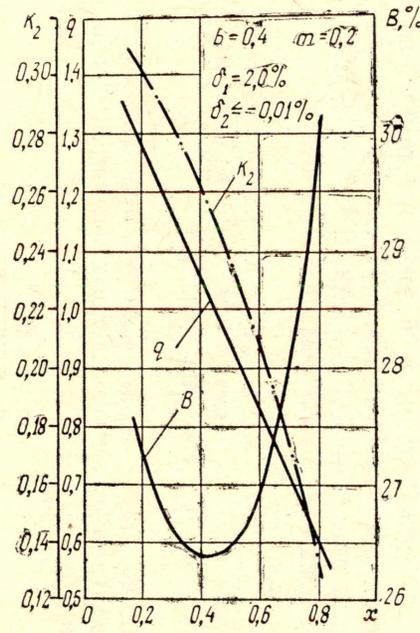


Рис. 3. Кривые зависимости $V_{\max} = f(x)$ при $q_{\text{опт}} = f(x)$, $k_{2\text{опт}} = f_2(x)$ и выбросах $\delta_1 = 2\%$ и $\delta_2 \leq -0,01\%$.

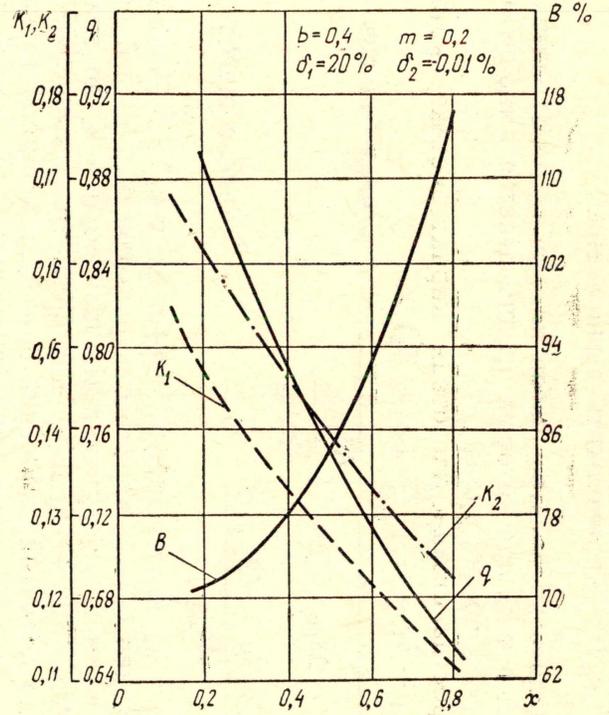


Рис. 4. Кривые зависимости $V_{\max} = f(x)$ при $q_{\text{опт}} = f_1(x)$, $k_{1\text{опт}} = f_2(x)$, $k_{2\text{опт}} = f_3(x)$ и выбросах $\delta_1 = 20\%$ и $\delta_2 = -0,01\%$.

б) Сравнить времена установления, полученные в первом (Y_1) и во втором (Y_2) циклах. Если $Y_1 - Y_2 \leq \pm \varepsilon$ (где ε — заданная погрешность), можно считать $q'_{\text{опт}}$, $k'_{1\text{опт}}$, $k'_{2\text{опт}}$ оптимальными значениями коэффициентов коррекции. Если $Y_1 - Y_2 > \pm \varepsilon$ или $\delta_{13} - \delta_1 > \pm \varepsilon_1$ и $\delta_{23} - \delta_2 > \pm \varepsilon_2$, то, взяв $q'_{\text{опт}}$, $k'_{1\text{опт}}$ и $k'_{2\text{опт}}$ в качестве исходных, снова повторить вычисления, начиная с V этапа, не увеличивая q на $0,2 \div 0,4$.

Автоматизация поиска оптимальных значений коэффициентов q , k_1 , k_2 сложной схемы коррекции сделала возможным использование этой схемы при любых значениях исходных параметров каскада b , x , m и при любых значениях (но не более $15 \div 20\%$) первого и второго выбросов, не приводя к громоздким инженерным расчетам и большим затратам времени.

На рис. 2, 3 и 4 приведены графики оптимальных значений коэффициентов q , k_1 , k_2 (или двух из них) и получаемых значений выигрыша B в зависимости от x при постоянных допустимых значениях δ_1 и δ_2 .

На определение каждого оптимального сочетания коэффициентов коррекции при работе на вычислительной машине М-20 затрачивается в зависимости от сложности схемы от трех до тридцати минут машинного времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Б. Лурье. Усилители видеочастоты. М., «Советское радио», 1961.
2. Г. К. Гаврилов. Приближенные методы анализа переходных процессов. М., «Советское радио», 1966.
3. И. Г. Мамонкин. Импульсные усилители. М., Госэнергоиздат, 1953.
4. И. В. Дубровская. Метод исследования передаточной функции линейной цепи в области малых времен с характеристическим уравнением выше третьей степени. Известия вузов СССР, «Радиоэлектроника», т. 13, № 6, 1970, 716—720.
5. Т. М. Агаханян. Приближенный расчет переходной характеристики в области малых времен. Теория и расчет импульсных и усилительных схем на полупроводниковых приборах. Сб. статей, вып. 1. М., Атомиздат, 1969.
6. Д. И. Свирыкин, И. А. Суслов. Видеоусилитель с параллельной индуктивной коррекцией в катодной и анодной цепях. Труды ТИРиЭТа, т. 7, Томск, изд-во ТГУ, 1972.