

КОРРЕКЦИЯ КАСКАДА ВИДЕОУСИЛИТЕЛЯ ЦЕПЬЮ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В КАТОДЕ

Д. И. СВИРЯКИН

(Представлена профессором-доктором В. И. Горбуновым)

Анализ высокочастотной катодной коррекции в каскадах видеоусилителей проводился многими авторами. В качестве корректирующих элементов большинство из них использовали цепочки $R_k C_k$, а в некоторых работах [1,2] использовались контуры $L_k C_k R_k$ (рис. 1). В данной работе еще раз анализируется схема катодной коррекции контуром $L_k C_k R_k$, выявлены основные функциональные зависимости между параметрами каскада и параметрами переходной характеристики и проведено сравнение анализируемой схемы со схемой коррекции цепью $R_k C_k$. Результаты, полученные в работе, во многом расходятся с результатами работ [1,2], так как в данном случае анализ проводился с учетом влияния временного изменения входной и выходной динамических емкостей на переходную характеристику. Последнее обстоятельство несколько усложнило анализ схемы, но зато обеспечило получение результатов, лучше совпадающих с результатами эксперимента.

Принципиальная и эквивалентная схемы каскада даны соответственно на рис. 1 и 2. Анализ проводится в предположении, что выходной сигнал с анода первой лампы подается в цепь управляющей сетки второй (однотипной с первой), катодная цепь которой содержит такие же элементы, как и первая. Это обуславливает одинаковый характер зависимостей емкостей $C_{ск}$ и $C_{ак}$ от времени и позволяет входную динамическую емкость $C_{вх}$ второй лампы объединить с выходной динамической емкостью $C_{вых}$ первой [3] и обозначить их на эквивалентной схеме рис. 2 как одну емкость C'_1 . Монтажная суммарная емкость на схемах обозначена через C'_0 . Корректирующими элементами в первом каскаде являются конденсатор C_k , индуктивность L_k и резистор R_k (на принципиальной схеме соответственно C_{k1} , L_{k1} и R_{k1}). Величина резистора R_k определяется необходимым напряжением смещения, поэтому в дальнейших рассуждениях величина R_k будет предполагаться постоянной, а параметры коррекции будут изменяться за счет изменения L_k и C_k .

Для эквивалентной схемы рис. 2 теми же приемами, что и в работе [3], было получено операторное изображение переходной характеристики.

$$M(p) = \frac{A(p)}{B(p)} = \frac{1 + a_1 p + a_2 p^2}{1 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3}, \quad (1)$$

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

$$a_1 = q, \quad a_2 = q \cdot \kappa_k,$$

$$\begin{aligned} b_1 &= 1 - x + \kappa_k (1 - b) + b(q + xm) + xb, \\ b_2 &= \kappa_k [1 - x(1 - b)] + b\kappa_k (q + xm - 1) + b[q + xm(1 - x)], \\ b_3 &= b\kappa_k [q + xm(1 - x)]. \end{aligned}$$

В свою очередь

$$\begin{aligned} b &= \frac{1}{1 + SR_k}, & m &= \frac{R_k}{R_a}, & x &= \frac{C'_1}{C_0}, \\ \kappa_k &= \frac{L_k}{C_0 R_a R_k}, & q &= \frac{C_k R_k}{C_0 R_a}, \\ C_0 &= C'_0 + C'_1, & C'_1 &= C_{\text{вых}} + C_{\text{вх}}, & C'_0 &= C_{\text{мвых}} + C_{\text{мвх}}. \end{aligned}$$

Переходная характеристика каскада, согласно теореме разложения, определяется выражением

$$h(\tau) = \frac{A(0)}{B(0)} + \sum_1^k e^{p_k \tau} \cdot \frac{A(p_k)}{p_k B'(p_k)},$$

где $\tau = \frac{t}{C_0 R_a}$ — относительное время (t — время в секундах),

p_k — k -й корень характеристического уравнения

$$1 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3 = 0,$$

κ — целое положительное число, принимающее в данном случае значения 1, 2, 3.

$A(0)$ и $B(0)$ — полиномы соответственно числителя и знаменателя выражения (1) при $\omega = 0$,

$B'(p_k)$ — производная полинома $B(p_k)$.

Переходные характеристики рассматриваемого каскада могут быть с выбросами и без выбросов. Интерес представляют только характеристики, имеющие выбросы, так как в этих случаях время установления меньше, чем у характеристик без выбросов. В подавляющем большинстве случаев выбросы на переходных характеристиках появляются при комплексных корнях характеристического уравнения. Вещественные отрицательные корни указывают в основном на монотонный характер переходного процесса, то есть колебательность характеристики в этом случае минимальная. Об этом же говорят выражения для переходных характеристик. Так, при двух сопряженных комплексных и одном вещественном корнях $p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega$, $p_3 = -\beta$ — переходная характеристика имеет вид

$$h(\tau) = 1 - A_0 e^{-\beta \tau} + A e^{-\alpha \tau} \sin(\omega \tau + \varphi), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{1 - a_1 \beta + a_2 \beta^2}{b_3 \beta [(\beta - \alpha)^2 + \omega^2]}, \\ A &= \frac{1}{\omega b_3} \sqrt{\frac{[1 - a_1 \alpha + a_2 (\alpha^2 - \omega^2)]^2 + \omega^2 (a_1 - 2\alpha a_2)^2}{(\alpha^2 + \omega^2) \cdot [(\beta - \alpha)^2 + \omega^2]}}, \\ \varphi &= \arctg \frac{\omega (a_1 - 2\alpha a_2)}{1 - \alpha a_1 + (\alpha^2 - \omega^2) a_2} - \arctg \frac{\omega}{\alpha} - 2 \arctg \frac{\omega}{-\alpha}. \end{aligned}$$

В случае вещественных (отрицательных) корней переходная характеристика определяется выражением:

$$h(\tau) = 1 + A_1 e^{p_1 \tau} + A_2 e^{p_2 \tau} + A_3 e^{p_3 \tau}, \quad (3)$$

где

$$A_1 = \frac{1 + a_1 p_1 + a_2 p_1^2}{b_3 p_1 (p_1 - p_2)(p_1 - p_3)}, \quad A_2 = \frac{1 + a_1 p_2 + a_2 p_2^2}{b_3 p_2 (p_2 - p_1)(p_2 - p_3)},$$

$$A_3 = \frac{1 + a_1 p_3 + a_2 p_3^2}{b_3 p_3 (p_3 - p_1)(p_3 - p_2)}.$$

При вычислении параметров переходных характеристик (2) и (3) исходными параметрами каскада являлись b , m и x , параметрами коррекции κ_k и q . В качестве искоемых были приняты только параметры переходных характеристик: обобщенное время установления $Y = \frac{t_y}{C_0 R_a}$, (где t_y — время установления в сек.), первый δ_1 , второй δ_2 и третий δ_3 выбросы и обобщенные времена появления этих выбросов соответственно τ_{m1} , τ_{m2} , τ_{m3} .

Кроме того, для каждого варианта подсчитывался выигрыш по формуле $B = \left(\frac{2,2b}{Y} - 1 \right) \cdot 100\%$.

Значения исходных параметров каскада были следующими: $b = 0,4$; $0,5$; $m = 0,2$; $x = 0,4$. Параметры коррекции варьировались в пределах следующих дискретных значений: $\kappa_k = 0,2$; $0,3$; $0,4$; $0,6$; $0,8$; $1,0$; $q = 0,5$;

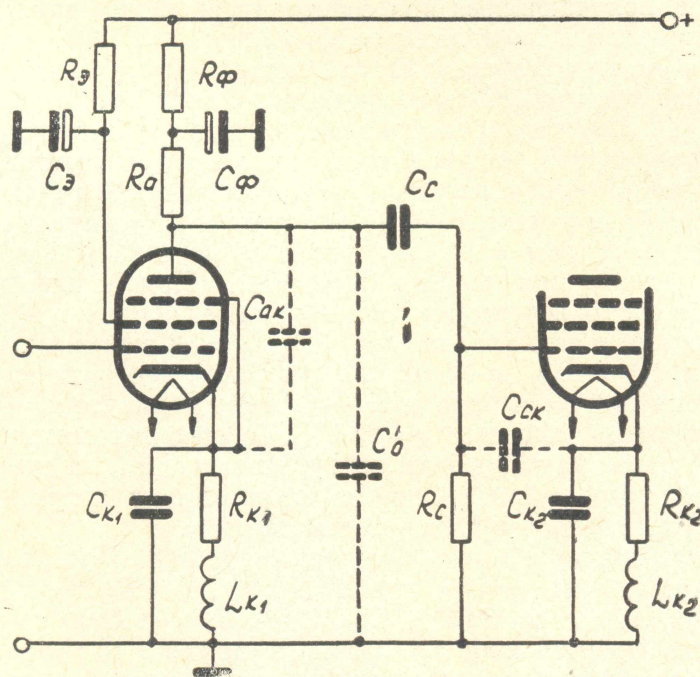


Рис. 1. Принципиальная схема каскада с катодной коррекцией контуром

0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,95; 1,0; 1,05; 1,15; 1,2; 1,25; 1,4; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0. Таким образом, число сосчитанных вариантов равнялось числу сочетаний κ_k и q . Анализ полученных данных позволил определить как оптимальные сочетания параметров коррекции, так и близкие к ним.

Кроме того, расчетным путем были выявлены зависимости вышеперечисленных параметров переходных характеристик от исходных параметров b , m , x при изменении последних в довольно широких пределах. Дискретные значения этих параметров, при которых проводились вычис-

ления, были следующие: $b=0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; m=0,02; 0,04; 0,08; 0,2; 0,4; 0,6; 1,0; x=0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$. Все вычисления проводились на электронной вычислительной машине М-20.

Если принять в качестве оптимальной переходную характеристику, первый выброс которой равен 2%, а второй выброс не превышает 1% при наименьшем для этих величин выбросов времени установления, то

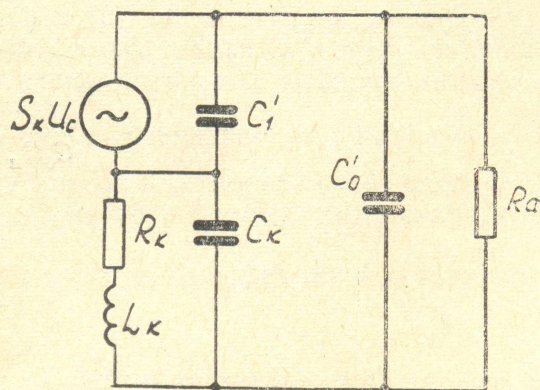


Рис. 2. Эквивалентная схема

при параметрах каскада $b=0,4; x=0,4; m=0,2$ наиболее удачным, по материалам вычислений, следует считать сочетание коэффициентов коррекции $\kappa_k=0,3$ и $q=1,1$. При этом $Y=0,06817$, $\delta_1=2,162\%$, $\delta_2=-0,142\%$, $\tau_{m1}=1,516$, $\tau_{m2}=3,449$, $B=29,08\%$.

Сравнительный анализ параметров переходных характеристик, полученных в результате вычислений, показал, что при указанных выше исходных параметрах практический интерес могут представить в основ-

ном варианты, получающиеся при сочетании значений параметров коррекции, варьируемых в пределах $q=0,9 \div 2,0$, $\kappa_k=0 \div 0,4$.

При $\kappa_k=0$ анализируемый каскад превращается в каскад с емкостной коррекцией в катод, материалы исследований которого представлены в работе [4]. Поэтому сравнение результатов вычислений, выполненных для для вариантов данной задачи при κ_k с результатами работы [4] служило проверкой правильности полученных выше формул и программы вычислений на машинке М-20. Помимо того, это сравнение показало, что коррекция контуром $L_k C_k R_k$ более эффективна, чем коррекция цепью $R_k C_k$ только при малых выбросах. При больших выбросах ($\delta_1 > 30\%$) обе схемы коррекции дают почти одинаковые результаты.

Так, например, в варианте при $\kappa_k=0$ и $q=0,8$ выигрыш равен 17,8% при выбросах $\delta_1=2,69\%$ и $\delta_2 \approx 0$. Почти такой же выброс $\delta_1=2,16\%$ и малозаметный второй выброс $\delta_2=-0,14\%$ в варианте $\kappa_k=0,3$ и $q=1,1$ позволяют получить выигрыш $B=29,1\%$. То есть при малых значениях первого выброса схема коррекции контуром $L_k C_k R_k$ за счет появления небольшого второго выброса дает по сравнению с коррекцией цепью $R_k C_k$ увеличение выигрыша более, чем на 12%.

Теперь рассмотрим область больших выбросов. Для этого сравним два варианта: $\kappa_k=0$, $q=2,5$, где $B=83,4\%$, $\delta_1=38,2\%$, $\delta_2=-0,09\%$ и $\kappa_k=0,6$, $q=3,0$, где $B=87,3\%$, $\delta_1=39,8\%$, $\delta_2=-0,56\%$.

Видим, что существенное увеличение выигрыша во втором варианте в основном объясняется несколько большим выбросом δ_1 . Второй выброс в обоих вариантах практически можно не учитывать. Таким образом, введение индуктивности L_k в катодную цепь в сочетании с конденсатором C_k эффективно только при небольших выбросах переходной характеристики каскада. В каскадах, где допустимы большие выбросы, можно ограничиться введением только корректирующей цепи $R_k C_k$.

По результатам вычислений были построены графики. Так, на рис. 3 изображены зависимости $B=f(\delta_1)$ и $\delta_2=f(\delta_1)$ при значениях коэффициента $\kappa_k=0; 0,2; 0,3; 0,4$ и изменяющемся в пределах $0,7 \div 3,0$ коэффициенте q . Для того, чтобы иметь представление о величине коэффициента q при заданном значении выброса δ_1 , на графики $B=f(\delta_1)$ и $\delta_2=f(\delta_1)$ нанесены кривые равных значений q . Графики показывают, что с возра-

станием допустимой величины выброса δ_1 увеличивается выигрыш, обеспечиваемый данной схемой коррекции. Второй выброс при $\delta_1 > 5\%$ даже для $\kappa_k = 0,4$ сравнительно мал и его можно не учитывать. Увеличение коэффициента коррекции κ_k при малых выбросах δ_1 ведет

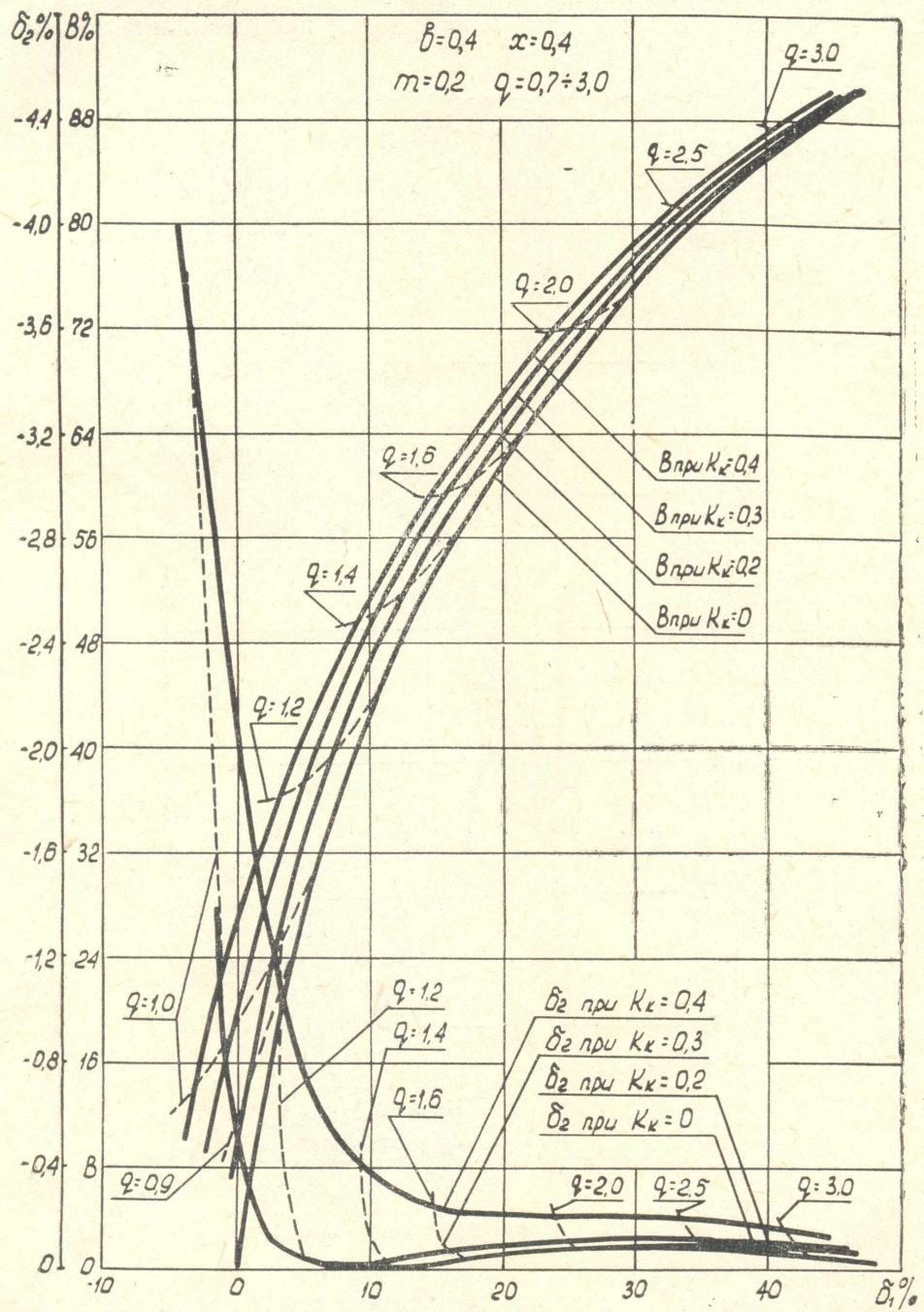


Рис. 3. Графики $B = f(\delta_1)$ и $\delta_2 = f(\delta_1)$ при $b = 0,4$, $x = 0,4$, $m = 0,2$.

к заметному увеличению выигрыша, но происходит это за счет повышения колебательности переходной характеристики, или, иными словами, за счет увеличения второго (отрицательного) δ_2 , а также третьего (положительного) δ_3 выбросов.

Если судить по графикам рис. 3, то несколько лучшим, в сравнении с вышеуказанным, по величине выигрыша значением коэффициента коррекции κ_k является 0,35 при $q=1,12$. Выигрыш при $\delta_1=2\%$ для $\kappa_k=0,35$ примерно равен 31%, а второй выброс $\delta_2 \approx -0,9\%$.

Аналогичные графики приведены и на рис. 4, не только для $b=0,5$. Этими графиками так же, как и на рис. 3, представлены зависимости

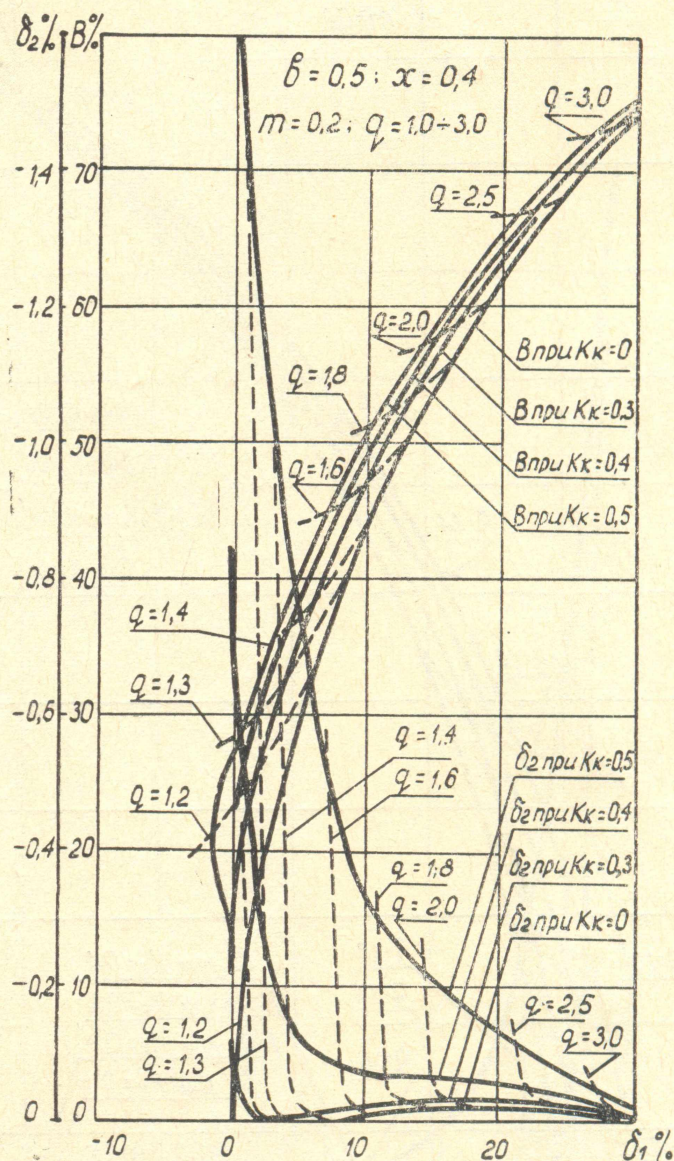


Рис. 4. Графики $B = f(\delta_1)$ и $\delta_2 = f(\delta_1)$ при $b = 0,5$, $x = 0,4$, $m = 0,2$

$B = f(\delta_1)$ и $\delta_2 = f(\delta_1)$, на которые пунктиром нанесены кривые равных значений коэффициента q . Графики показывают, что и при $b=0,5$ первый экстремум переходных характеристик для $\kappa_k=0,5$ может не достигать единичного уровня. На графике $B=f(\delta_1)$ это представлено отрицательными значениями δ_1 . Так, например, при $q=1,2$ и $\kappa_k=0,5$ первый выброс $\delta_1=-1,56\%$, выигрыш $B=21,1\%$, а второй выброс $\delta_2=-2,37\%$ (на графике он вышел за пределы рисунка). Следует заметить, что, как при $b=0,5$ (рис. 4), так и при $b=0,4$ (рис. 3) переходные характеристики с отрицательными значениями δ_1 практически никогда не используются,

так как выигрыш в этих случаях несмотря на значительную величину δ_2 всегда меньше, чем при положительных значениях первого выброса.

Ориентируясь на ранее принятый критерий оптимальности переходной характеристики и принимая во внимание графики рис. 4, можно считать для $b=0,5$; $x=0,4$; $m=0,2$ значения коэффициентов коррекции $q=1,33$ и $\kappa_k=0,45$ близкими к оптимальным, так как при этом $\delta_1=2\%$, $B \approx 31\%$, а $\delta_2=-0,85\%$.

Выигрыш при увеличении допустимого выброса δ_1 можно получить и гораздо большей величины, чем $30 \div 32\%$. Как видно из графиков $B=f(\delta_1)$ рис. 3 и 4, достигнуть этого можно увеличением коэффициента q , а если допустимо возрастание и выброса δ_2 , то и увеличением коэффициента κ_k .

Заметим, что повышение выигрыша за счет увеличения κ_k при неизменном q невозможно, так как в этом случае, как показывают рисунки, увеличение κ_k ведет к возрастанию δ_2 , уменьшению δ_1 и снижению выигрыша. То есть, желая повысить выигрыш, мы должны одновременно с увеличением κ_k увеличить q , или же увеличивать коэффициент q , оставляя κ_k неизменным. В последнем случае наряду с повышением B увеличивается выброс δ_1 , а выброс δ_2 уменьшается или же остается приблизительно постоянным.

Как меняются величины выбросов δ_1 и δ_2 с изменением коэффициента q при некоторых постоянных значениях κ_k , показывает рис. 5. Здесь график $\delta_2=f(q)$ для $\kappa_k=0$ вообще отсутствует, так как коррекция цепью $R_k C_k$ дает очень малый второй выброс. График же $\delta_1=f(q)$ для $\kappa_k=0$ проходит выше всех аналогичных графиков для $\kappa_k>0$. Это говорит о том, что введение в катод индуктивности L_k приводит при неизменном q к уменьшению δ_1 за счет появления δ_2 . Причем вторые выбросы имеют максимальную величину при минимальных значениях первых выбросов ($\delta_1=1 \div 5\%$) за исключением случаев, где $\kappa_k \leq 0,2$.

Следует обратить внимание на то, что при увеличении коэффициента κ_k выше значений $0,2$ переходная характеристика корректируемого каскада может иметь при некоторых значениях q отрицательный первый выброс. То есть численное значение нормированной переходной характеристики в точке первого перегиба не достигает единичного уровня, и величина первого выброса показывает в процентах, на сколько это значение меньше единицы. Сочетания коэффициентов коррекции, при которых получаются отрицательные первые выбросы, почти никогда не используются в практике, поэтому графики рис. 5 для $\kappa_k>0,2$ ограничиваются осью q .

Какие же значения q и κ_k обеспечивают переходную характеристику с оптимальными параметрами? Обратимся к рис. 6, на котором даны графики $Y=f(q)$ для некоторых значений κ_k . На графике $Y=f(q)$ нанесены кривые равных выбросов для нескольких значений δ_1 (1, 5, 10, 15, 20%). Увеличение κ_k , как показывает рисунок, вызывает смещение кривых $Y=f(q)$ вверх и вправо, то есть при постоянном q вызывает возрастание Y . Но это не значит, что включение в катод индуктивности L_k привело к ухудшению параметров переходной характеристики каскада. В процентном отношении время установления возросло не так сильно, как уменьшилась величина первого выброса. Это, например, можно проследить по рисункам 5 и 6 для случая, когда $q=1,2$, а κ_k изменяется скачком от 0 до 0,2.

Если обратить внимание на взаимное расположение кривых равных выбросов (рис. 6), то можно заметить, что при одновременном увеличении κ_k и q получается наибольший эффект коррекции. Особенно это заметно при малых δ_1 . Так, например, для $\kappa_k=0$ и $q=0,9$ время установления равно 0,693 при $\delta_1=5\%$, а для $\kappa_k=0,8$ и $q=1,27$ время уста-

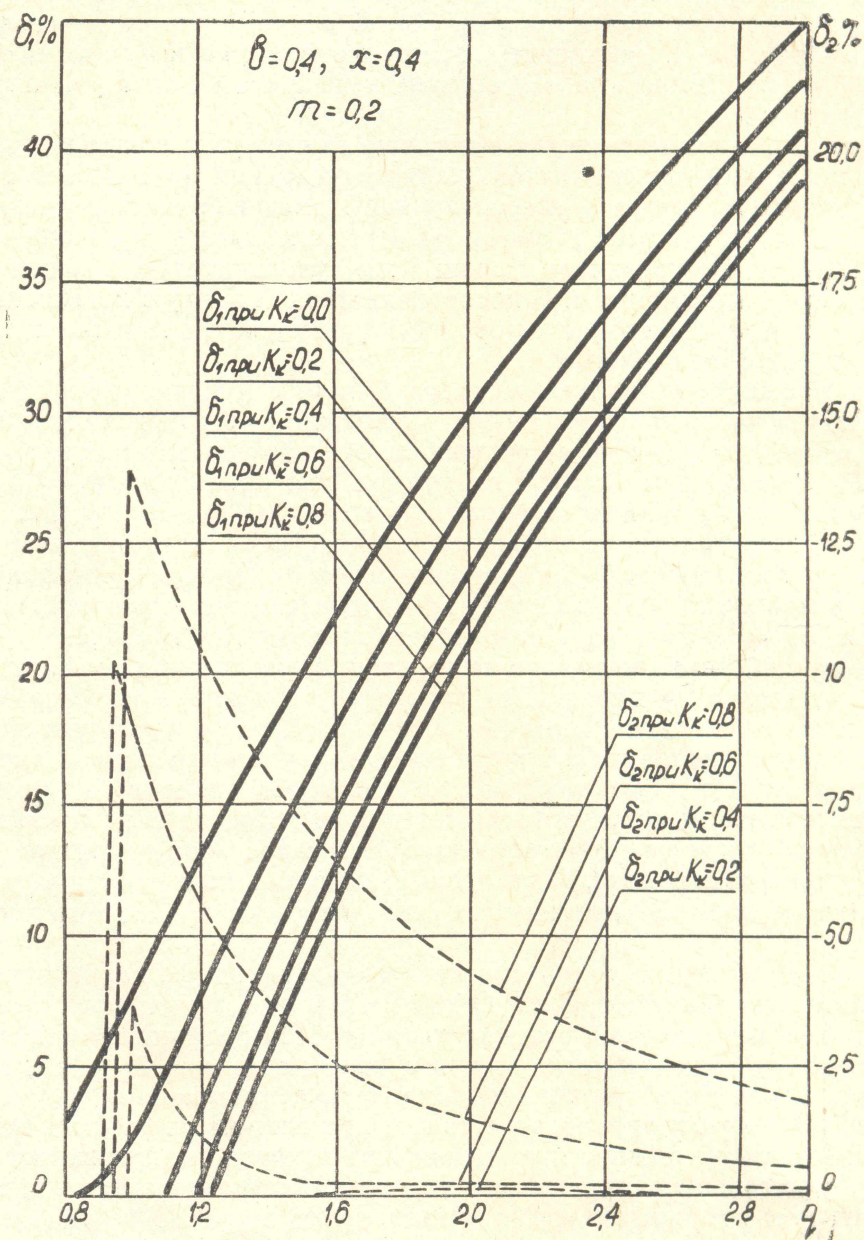


Рис. 5. Графики зависимостей величин первого и второго выбросов от коэффициента q при постоянных значениях коэффициента κ

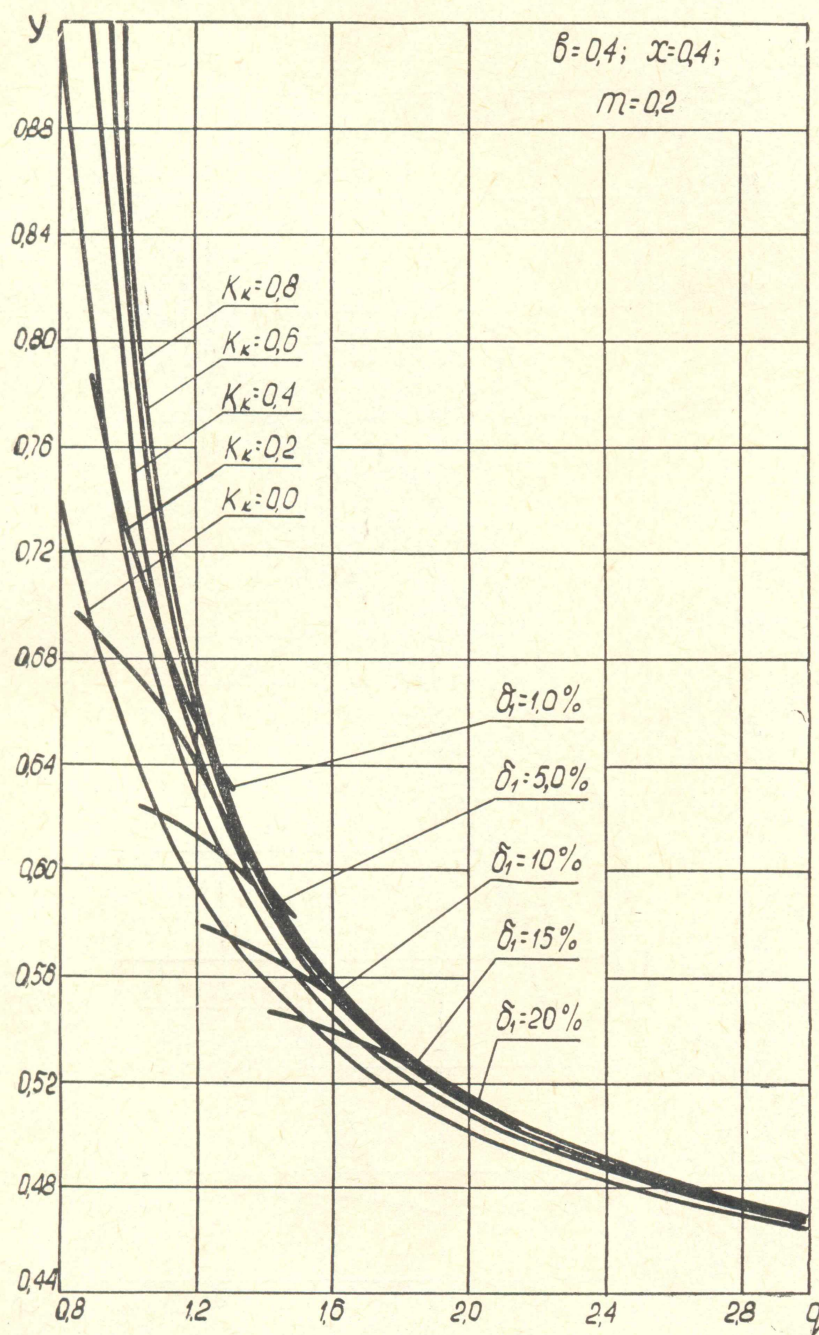


Рис. 6. Графики $Y=f(q)$ с кривыми равных выбросов

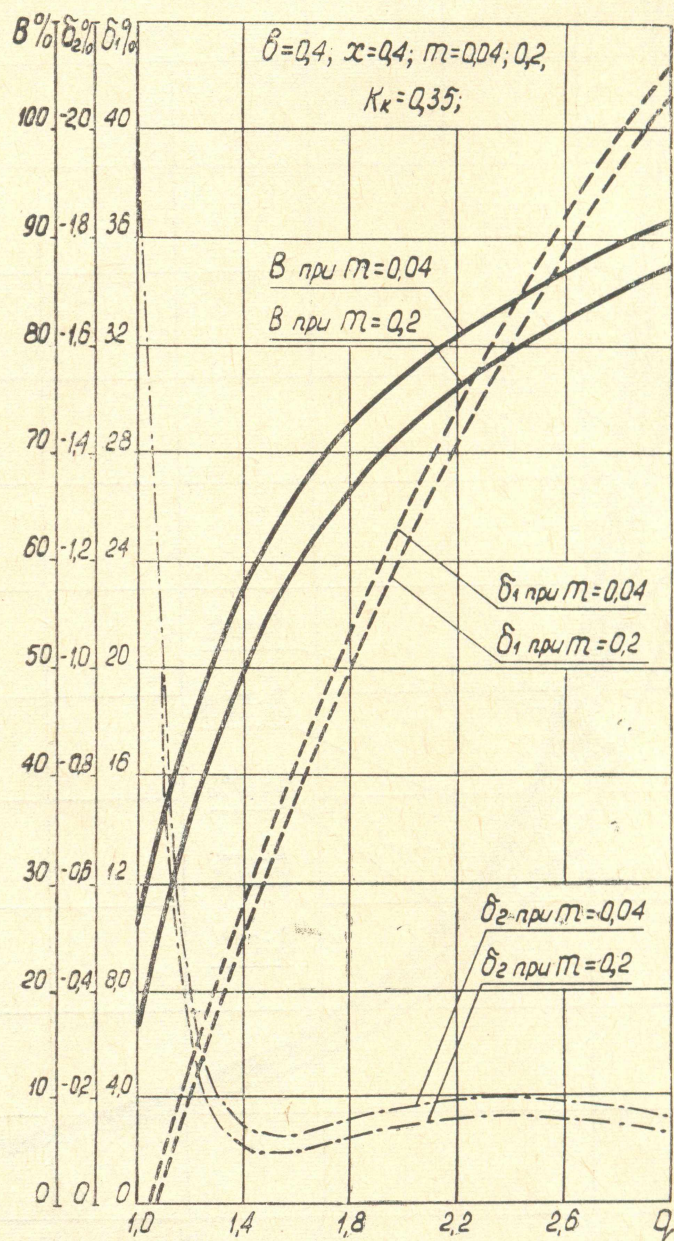


Рис. 7. Графики $B = f(q)$, $\delta_1 = f(q)$ и $\delta_2 = f(q)$ при
 $\delta = 0,4$ и $\alpha = 0,4$

новления равно 0,64 при $\delta_1=1\%$. Однако в первом случае $\delta_2=0$, а во втором $\delta_2=9,5\%$. То есть фактором, ограничивающим увеличение коэффициентов коррекции, а следовательно и выигрыша, является второй выброс. Если величины первого и второго выбросов наперед заданы

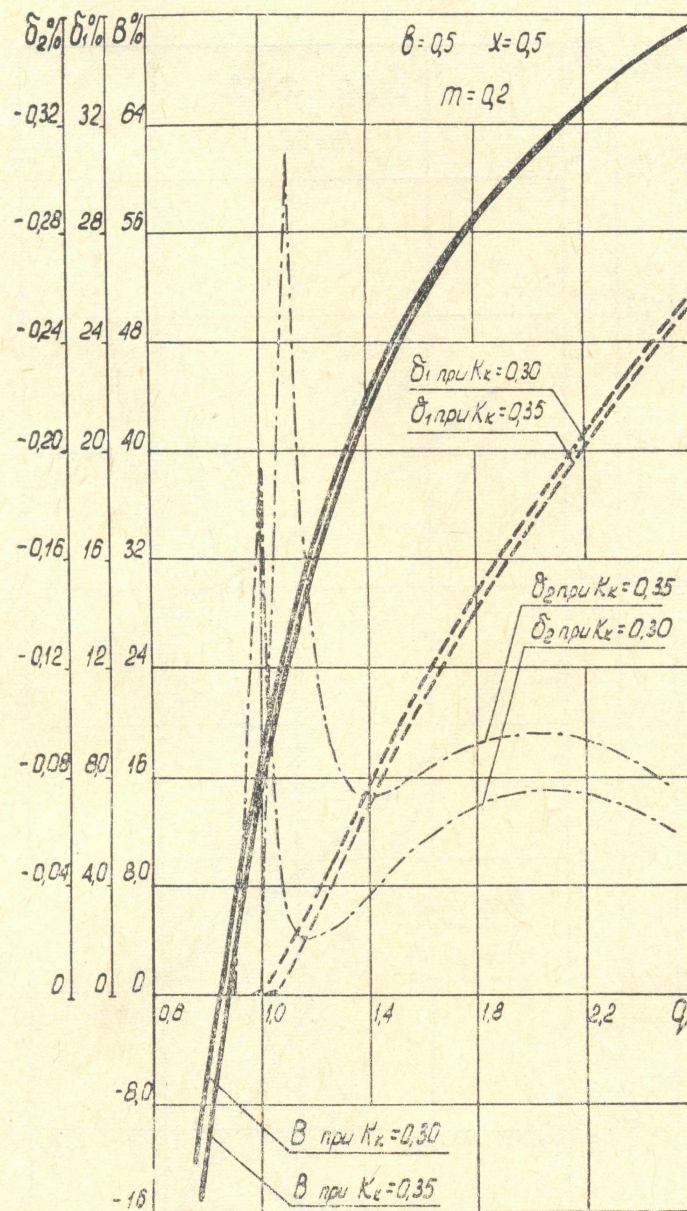


Рис. 8. Влияние подбора коэффициента κ_k на форму графиков $\delta = 0.5$, $x = 0.5$ и $m = 0.2$ при $B = f(q)$, $\delta_1 = f(q)$ и $\delta_2 = f(q)$

(так же, как заданы и исходные параметры b , x , и m), то для анализируемой схемы коррекции существует только одно сочетание значений коэффициентов коррекции, которые обеспечат минимальное время нарастания переходной характеристики.

Таким сочетанием, как указывалось выше (см. рис. 3), для $b=0.4$, $x=0.4$ и $m=0.2$ являются $q=1.12$ и $\kappa_k=0.35$. Дополнительные вычисления, проведенные для тех же значений b , x , m и κ_k , но при $q=1.15$ дали следующие результаты: $\delta_1=2.52\%$, $\delta_2=-0.55\%$, δ_3 практически равен нулю, $B=32.5\%$ и соответственно $Y=0.6639$. Несколько лучшие

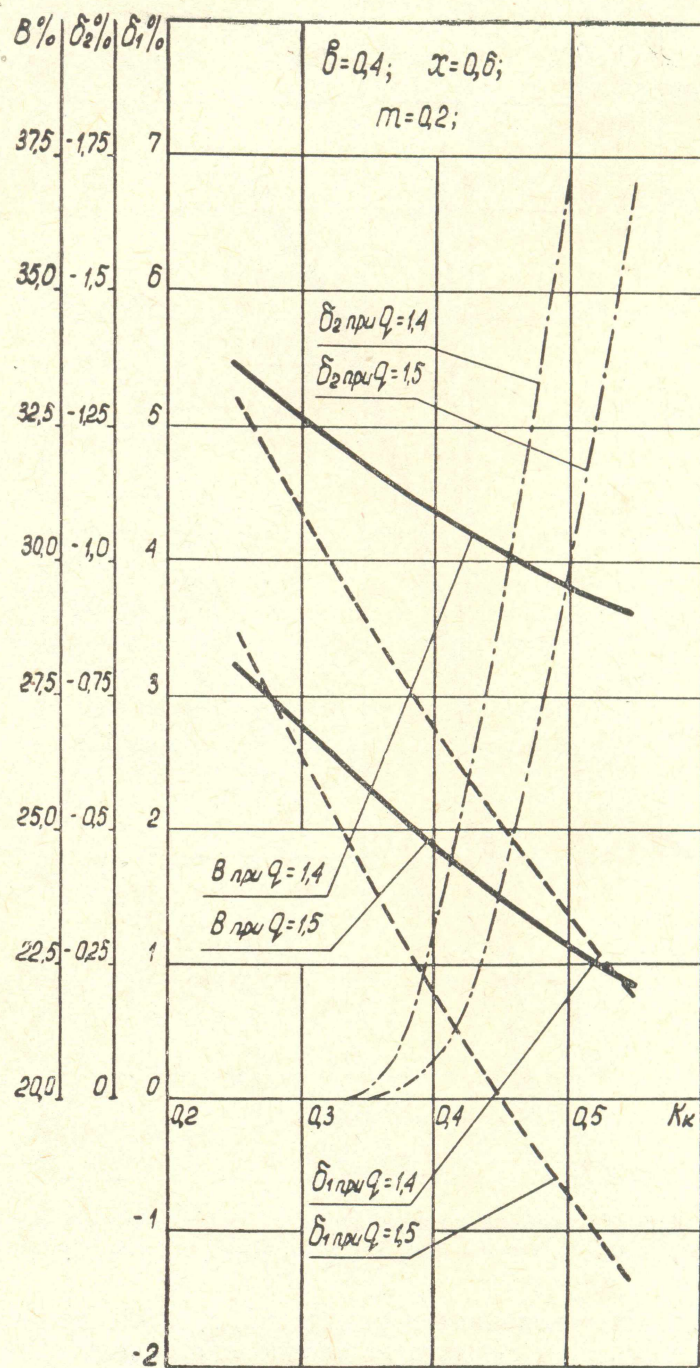


Рис. 9. Влияние варьирования коэффициентов k_k и q на величины выбросов и выигрыша, обеспечиваемого схемой

результаты получены для $m=0,04$ при тех же $b=0,4$, $x=0,4$, $\kappa_k=0,35$, но для $q=1,1$. Для этого варианта $Y=0,6438$, $\delta_1=1,88\%$, $\delta_2=-0,93\%$, $\delta_3=0$ и $B=36,7\%$. Рис. 7 своими графиками $\delta_1=f(q)$, $\delta_2=f(q)$, и $B=f(q)$ подтверждает это положение. На нем построены кривые для $m=0,04$ и $m=0,2$. Благодаря этому можно выяснить, как влияет изменение параметра m на переходную характеристику усилителя. Видим, что переход от $m=0,04$ к $m=0,2$ наиболее заметно отразился на величине B , особенно при малых допустимых выбросах, то есть в интервале значений q от 1,0 до 1,2. Величины выбросов δ_1 и δ_2 изменяются при этом не так сильно. Кроме того, на рис. 7 видно, что графики всех вышеуказанных зависимостей в интервале $q=1,0 \div 1,2$ имеют максимальную крутизну.

Как влияет подбор коэффициента κ_k на форму графиков $B=f(q)$, $\delta_1=f(q)$ и $\delta_2=f(q)$ при $v=0,5$, $x=0,5$ и $m=0,2$, показывает рис. 8. Величина выигрыша наиболее сильно зависит от коэффициента κ_k только в области своих отрицательных значений. Отрицательный выигрыш говорит о том, что каскад при $q < 0,9$ становится хуже некорректированно. В области же значений B , представляющих практический интерес, наиболее сильному изменению при переходе от $\kappa_k=0,3$ к $\kappa_k=0,35$ подвержен второй выброс. Первый выброс и выигрыш при этом почти не меняется. Но это не значит, что введение коэффициента коррекции κ_k привело только к появлению этого выброса. При варьировании этого коэффициента в больших, чем указано выше, пределах, (рис. 9), выигрыш тоже заметно изменяется. Но наиболее существенные изменения претерпевают выбросы δ_1 и δ_2 . Причем δ_1 , как и выигрыш, при увеличении κ_k уменьшается, а δ_2 возрастает. Как видно из рис. 7, 8 и 9, появление второго выброса обусловлено не только величиной коэффициента κ_k , но и значениями параметра m и коэффициента коррекции q . В процессе исследования каскада с анализируемой схемой коррекции было выявлено, что на появление и величину второго выброса, а также на величины выигрыша и первого выброса оказывают такое же заметное влияние и параметры b и x . Поэтому для осуществления оптимальной коррекции необходимо при каждом конкретном сочетании параметров b , m и x подбирать вполне определенное сочетание коэффициентов коррекции. И, благодаря тому, что при введении коэффициента коррекции κ_k первый выброс в процентном отношении уменьшается быстрее, чем выигрыш, а второй выброс появляется только при некотором значении κ_k (рис. 9) и имеет на графиках $\delta_2=f(q)$ заметно выраженный минимум (рис. 7,8), выигрыш, даваемый каскадом с высокочастотной коррекцией контуром $L_k C_k R_k$, получается в отдельных случаях в два раза выше, чем при коррекции цепью $R_k C_k$. Особенно заметна эта разница при значениях $\delta_1 < 10\%$. Введение в каскад индуктивности L_k , естественно, несколько усложнило схему и ее настройку.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Катюхин. Коррекция в видеоусилителе. Техника кино и телевидения. № 10, 1965.
2. В. Е. Катюхин, В. М. Кирпичников. Усилитель со сложной коррекцией в катоде. Радиотехника (Изв. вузов, МВ и ССО СССР), т. IX, № 3, 1966.
3. И. А. Суслов, Д. И. Свирякин. Влияние временных изменений динамических проводимостей на характеристики усилителя видеочастоты с корректирующей емкостью в катодной цепи и параллельной индуктивной коррекцией в цепи анода. Изв. ТПИ, том 105, 1960.
4. Д. И. Свирякин. К расчету каскада видеоусилителя с катодной коррекцией. Тр. ТИРиЭТА, том № 7, 1972.