

## О КРИТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ В ДВУХКАСКАДНОМ ИМПУЛЬСНОМ УСИЛИТЕЛЕ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СХЕМОЙ КОРРЕКЦИИ ПРИ НЕОДИНАКОВЫХ КАСКАДАХ

Л. И. ШАРЫГИНА

(Представлено научно-технической конференцией радиотехнического  
факультета, посвященной 60-летию института)

При проектировании многокаскадных импульсных усилителей возникает вопрос о распределении искажений, допускаемых на весь усилитель, между его отдельными каскадами. В случае немонотонности переходной характеристики хотя бы одного из каскадов в теории импульсных усилителей эта задача не нашла окончательного решения.

В литературе [1, 2] имеются указания на то, что для получения оптимальных режимов в двухкаскадной системе каскады должны быть одинаковыми. Однако достаточно строго это положение не обосновывается.

С целью установления некоторых закономерностей и, в частности, для того, чтобы подойти к решению указанной задачи, рассмотрим критический режим двухкаскадного усилителя с параллельной схемой коррекции в случае неодинаковых каскадов.

В операторной форме выражение для нормированного коэффициента передачи одного каскада с параллельной схемой коррекции имеет вид

$$K_{1 \text{ пар.}} = \frac{p + \kappa}{1 + p + p^2 \kappa} = \frac{p - p_1}{(p - p_1)(p - p_2)}, \quad (1)$$

где  $\kappa$  — коэффициент коррекции,  $p$  — нормированный оператор Лапласа. Нули (корни числителя) и полюсы (корни знаменателя) этого выражения соответственно равны

$$p_1 = \lambda_1 = -\frac{1}{\kappa}, \quad p_{1,2} = -\frac{1 \pm \sqrt{1 - 4\kappa}}{2\kappa}.$$

Очевидно, что переходная характеристика, соответствующая выражению (1), может иметь три варианта решений: а) полюсы действительные неравные — режим монотонный; б) полюсы действительные равные — режим критический; в) полюсы комплексные сопряженные — режим немонотонный.

Суммарная переходная характеристика двухкаскадного усилителя имеет удвоенное число нулей и полюсов. Если суммарный режим кри-

тический, то один из входящих в систему каскадов должен иметь коэффициент коррекции больше критического (первый и второй полюсы — комплексные сопряженные)

$$p_1 = \lambda_1 = -\frac{1}{\kappa_1}, \quad p_{1,2} = -\alpha_1 \pm j\omega_1 = -\frac{1}{2\kappa_1} \pm j\frac{\sqrt{4\kappa_1-1}}{2\kappa_1};$$

второй — меньше критического (третий и четвертый полюсы — действительные)

$$p_2 = \lambda_2 = -\frac{1}{\kappa_2}, \quad p_3 = \gamma_3 = \frac{-1 + \sqrt{1-4\kappa_2}}{2\kappa_2},$$

$$p_4 = \gamma_4 = \frac{-1 - \sqrt{1-4\kappa_2}}{2\kappa_2}.$$

В частном случае второй каскад может быть некорректированным:

$$p_2 = 0, \quad p_3 = \gamma_3 = -1, \quad p_4 = \gamma_4 = 0.$$

Расположение полюсов и нулей двухкаскадного усилителя с коэффициентами коррекции  $\kappa_1 > 0,25$ ,  $\kappa_2 < 0,25$  изображено на рис. 1. Соответствующая нормированная переходная характеристика имеет вид:

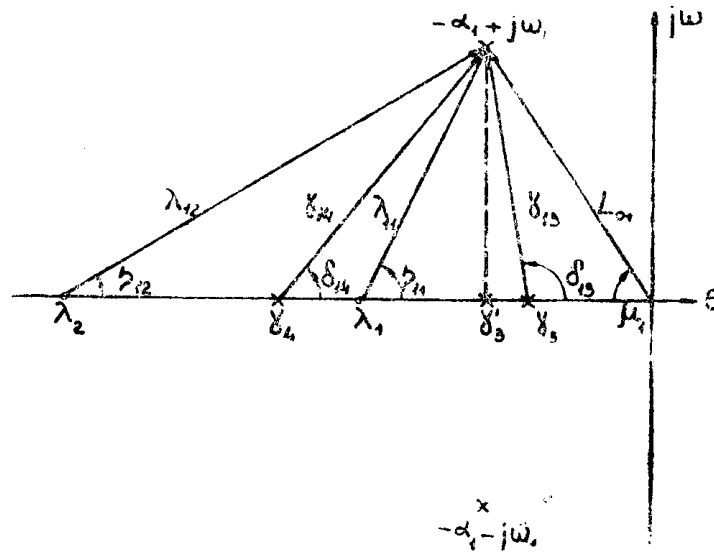


Рис. 1.

$$U_{2n}(t) = 1 - Ae^{-\alpha_1 t} \left[ \frac{c}{L_{01}} \sin(\omega_1 t + \xi_1) - \frac{a}{\gamma_3} e^{-(\gamma_3 - \alpha_1)t} - \frac{b}{\gamma_4} e^{-(\gamma_4 - \alpha_1)t} \right].$$

В этом выражении  $\xi_1 = \mu_1 + \eta_{11} + \eta_{12} - \delta_{13} - \delta_{14}$ ,

$$A = \frac{L_{01}^2 \gamma_3 \gamma_4}{\lambda \lambda_2 |\gamma_3 - \gamma_4|}, \quad b = \frac{|\lambda_1 - \gamma_4| |\lambda_2 - \gamma_4|}{\gamma_{14}^2},$$

$$a = \frac{|\lambda_1 - \gamma_3| |\lambda_2 - \gamma_3|}{\gamma_{13}^2}, \quad c = \frac{|\gamma_3 - \gamma_4| \csc \mu_1 \lambda_{11} \lambda_2}{L_{01} \gamma_{13} \gamma_{14}},$$

остальные обозначения понятны из рисунка.

Если коэффициент коррекции второго каскада равен нулю, нормированная переходная характеристика приобретает вид

$$U_{2n}(t) = 1 - De^{-\alpha_1 t} \left[ \sin(\omega_1 t + \xi_1) - L_{01} \frac{d}{dt} e^{-(\gamma_3 - \alpha_1)t} \right].$$

В этом выражении  $D = \frac{\lambda_{11} \gamma_3}{\lambda_1 \gamma_{13}}$ ,  $d = \frac{|\lambda_1 - \gamma_3| L_{01}^2}{\lambda_1 \gamma_{13}^2}$ ,  $\xi_1 = \mu_1 + \gamma_{11} - \gamma_{13}$ .

Расположение полюсов и нулей для этого случая показано на рис. 2. В выражениях (2) и (3) под  $t$  понимается безразмерное время

$$t = \frac{t'}{RC},$$

$t'$  — время в секундах,  $R$  — сопротивление нагрузки каскада,  $C$  — емкость нагрузки каскада.

Маллиджен и М. М. Айзинов [3, 4] показали, что переходная характеристика может быть монотонной, если между первой парой комплексных сопряженных полюсов

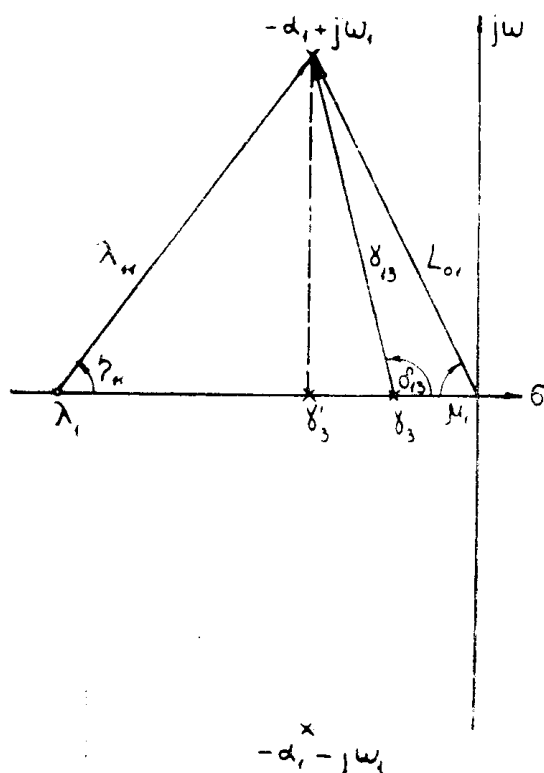


Рис. 2.

расположен по крайней мере один действительный полюс. Совпадение абсцисс первой пары комплексных сопряженных полюсов и первого действительного полюса ( $\gamma_3 = \alpha_1$ ) соответствует критическому режиму, если не существует других полюсов или их влиянием можно пренебречь. В противном случае указанное условие необходимо, но недостаточно.

В настоящей статье условие критического режима в виде  $\gamma_3 = \alpha_1$  использовано как достаточное. Получающиеся при этом погрешности исследованы ниже.

Из этого условия определялись коэффициенты коррекции одного из каскадов для различных значений коэффициента коррекции второго каскада.

Для каждого сочетания каскадов, обеспечивающих критический режим, были вычислены суммарные переходные характеристики и определено время установления.

Результаты вычислений сведены в таблицу.

На рис. 3 изображена зависимость времени установления суммарной переходной характеристики от коэффициента коррекции одного из каскадов, когда коэффициент коррекции второго каскада обеспечивает суммарный критический режим.

Как видно из графика, случай двух одинаковых каскадов, каждый из которых имеет коэффициент коррекции, равный 0,25, не является

наилучшим с точки зрения времени установления суммарной переходной характеристики. Минимальному времени установления соответствует сочетание каскадов  $\kappa_{1пер.} = 0,3869$ ,  $\kappa_{2пер.} = 0,1750$ . Выигрыш во времени установления по сравнению со случаем одинаковых каскадов составляет при этом около 8 %.

Т а б л и ц а

| $\kappa_1$ | $\kappa_2$ | $\tau_{y0,1-0,9}$ |
|------------|------------|-------------------|
| 0,0000     | 0,5000     | 2,1520            |
| 0,0500     | 0,4736     | 2,1591            |
| 0,1000     | 0,4437     | 2,1384            |
| 0,1500     | 0,4081     | 2,1225            |
| 0,1750     | 0,3869     | 2,1212            |
| 0,2000     | 0,3618     | 2,1270            |
| 0,2250     | 0,3291     | 2,1505            |
| 0,2400     | 0,3000     | 2,1865            |
| 0,2500     | 0,2500     | 2,2879            |

Для выяснения причин этого явления обратимся к выражению (2) суммарной переходной характеристики двухкаскадного усилителя и несколько упростим его с учетом того, что суммарный режим должен быть критическим

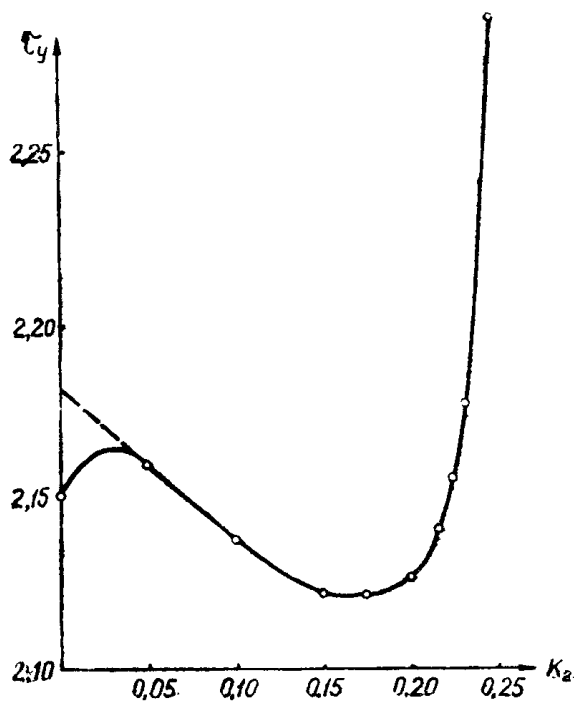


Рис. 3.

$$U_{2н}(t) = 1 - Ae^{-\alpha_1 t} \left[ \frac{c}{L_{01}} \sin(\omega_1 t + \xi_1) - \frac{a}{\gamma_3} - \frac{b}{\gamma_4} e^{-(\gamma_1 - \alpha_1)t} \right].$$

Вычисления показывают, что при увеличении  $\kappa_2$  от нуля до  $\kappa_{2пер.} = 0,1750$  влиянием члена  $\frac{b}{\gamma_4} e^{-(\gamma_1 - \alpha_1)t}$  можно пренебречь.

Переходная характеристика имеет такой же вид, как и при наличии лишь одного действительного полюса. Условие критического режима в виде  $\gamma_3 = \alpha_1$  является не только необходимым, но и достаточным. При этом  $\alpha_1$  возрастает от 1 до 1,2922, экспонента  $e^{-\alpha_1 t}$  спадает все быстрее, крутизна переходной характеристики увеличивается и время установления уменьшается. Начиная с  $\kappa_{2пер.} = 0,1750$ , на переходную характеристику оказывает влияние и второй действительный полюс  $\gamma_4$ , причем чем ближе  $\kappa_2$  к 0,2500, тем это влияние более значительно. При изменении  $\kappa_2$  от 0,1750 до 0,2500  $\gamma_4$  меняется от 4,4221 до 2,0000, экспонента  $e^{-(\gamma_4 - \alpha_1)t}$  спадает все медленнее, крутизна переходной характеристики уменьшается и время нарастания увеличивается.

Так как при  $\kappa_2 > \kappa_{2пер.}$  влиянием полюса  $\gamma_4$  пренебрегать нельзя, возникает сомнение в возможности использования условия  $\gamma_3 = \alpha_1$  в качестве критерия критического режима. Учет влияния полюса  $\gamma_4$  приведет к необходимости выбирать коэффициент коррекции первого каскада несколько большим для обеспечения суммарного критического режима, при этом время установления суммарной переходной характеристики будет несколько меньше указанного в таблице для всех точек, кроме  $\kappa_1 = \kappa_2 = 0,25$ . Однако уменьшение это настолько незна-

чительно, что не может повлиять на характер выявленных закономерностей.

Как видно из графика рис. 3, при изменении коэффициента коррекции второго каскада от 0,1750 до 0,0500 время установления суммарной переходной характеристики постепенно увеличивается, при  $\kappa_2 < 0,0500$  это увеличение замедляется, а затем при  $\kappa_2 < 0,0300$  время установления начинает уменьшаться. Однако это уменьшение времени установления лишь кажущееся. Объясняется оно тем, что при

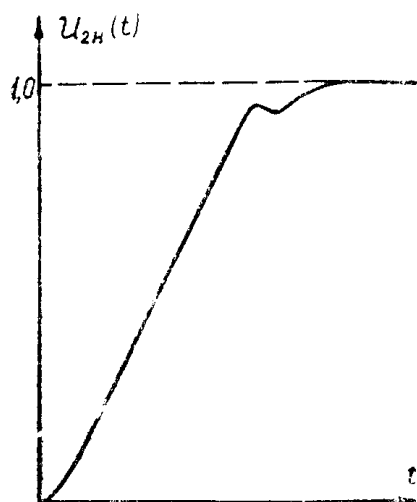


Рис. 4.

$\kappa_2 < 0,0500$ ,  $\kappa_1 > 0,4736$  суммарная переходная характеристика не является строго монотонной (рис. 4), а имеет незначительный отрицательный выброс, достигающий 0,18 % при  $\kappa_2 = 0,0000$ ,  $\kappa_1 = 0,5000$ .

Появление немонотонности объясняется большим несоответствием времен установления входящих в систему каскадов. Для устранения немонотонности суммарной переходной характеристики при малых  $\kappa_2$ , следует отказаться от критического режима и несколько уменьшить  $\kappa_1$ , при этом время установления переходной характеристики увеличится (пунктирная кривая на рис. 3). Однако искажение суммарной переходной характеристики при  $\kappa_1 = 0,5000$ ,  $\kappa_2 = 0,0000$  весьма незначительно, и в этом случае можно доверять критерию критического

режима в виде  $\alpha_1 = \gamma_3$ .

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Минимальное время нарастания суммарной переходной характеристики двухкаскадного усилителя, соответствующей критическому режиму, получается не при одинаковых, а при различных каскадах  $\kappa_1 = 0,3869$ ,  $\kappa_2 = 0,1750$ .

2. В том случае, когда выигрыш или проигрыш во времени нарастания порядка 8 % не имеет существенного значения в двухкаскадной схеме, не обязательно добиваться критического режима в каждом каскаде, можно один из каскадов сделать реостатным и добиваться нужной суммарной характеристики настройкой лишь одного каскада. Если же оба каскада скорректированы, то нужную результирующую характеристику можно получить, настраивая только один из каскадов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Г. Мамонкин. Импульсные усилители, Госэнергоиздат, 1958.
2. О. Б. Лурье. Усилители видеочастоты, Советское радио, 1955.
3. J. H. Mulligen, PIRE, № 5 1949 г. "The effect of pole and zero locations on the transient response of linear dynamic systems".
4. М. М. Айзиков. Об анализе и синтезе линейных радиотехнических цепей по параметрам переходного режима. Ученые записки, вып. 9, Ленинградское Высшее Инженерное Морское Училище им. адмирала Макарова, 1953.