

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

М. Г. ТОХМАХЯН

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В УСИЛИТЕЛЯХ ТОКА С ИНДУКТИВНОЙ
НАГРУЗКОЙ

Одним из эффективных методов повышения быстродействия усилителей тока с индуктивной нагрузкой является метод компенсации, осуществляемый введением последовательно в цепь индуктивной нагрузки напряжением, равным по величине и противофазным по отношению к э. д. с. самоиндукции [1].

При разработке практических схем быстродействующих усилителей тока с индуктивной нагрузкой, одним из факторов, ограничивающих реализацию высокого потенциального быстродействия метода компенсации, является формирование значительных по амплитуде (>200 В) напряжений компенсации [2]. Поэтому определенный практический интерес представляют методы, позволяющие при заданной амплитуде выброса напряжения сократить время нарастания (спада) тока в индуктивности.

На рис. 1а приведена упрощенная эквивалентная схема транзисторного каскада с индуктивной нагрузкой (без системы компенсации). При выполнении условия $\tau_p \ll \sqrt{LC}$ такая эквивалентная схема получается с учетом следующих приближений и принятых обозначений:

$$C_k = \frac{\beta}{1 + p\tau_p} \doteq \beta C_k; \quad r_k \frac{1 + p\tau_p}{\beta} \doteq \frac{r_k}{\beta}; \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C}};$$

$$R = R_n \parallel \frac{r_k}{\beta}; \quad C = C_n \parallel \beta C_k; \quad \frac{r_L}{\rho} \approx 0; \quad r_s \approx 0,$$

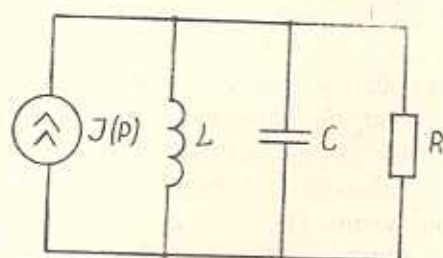
здесь τ_p — постоянная времени коэффициента передачи тока базы; ρ — характеристическое сопротивление эквивалентного контура; R_n — внешнее шунтирующее сопротивление для реализации критического режима; r_L — активное сопротивление обмотки; L — индуктивная компонента нагрузки; C_n — паразитная (конструктивная) емкость нагрузки; r_s — сопротивление эмиттерного перехода; $C_k \frac{\beta}{1 + p\tau_p}$, $r_k \frac{1 + p\tau_p}{\beta}$ — записанные в операторной форме емкость и дифференциальное сопротивление коллекторного перехода. Для критического режима

($R = 0,5\rho$) эквивалентного контура (рис. 1а) имеют место следующие соотношения для переходных процессов тока в индуктивной ветви $i_L(t)$ и напряжения на контуре $U(t)$:

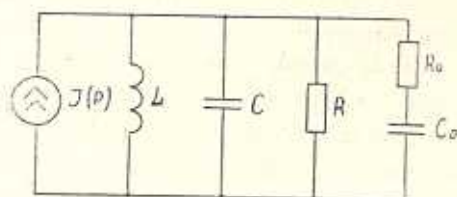
$$i_L(\vartheta) = J[1 - e^{-\vartheta}(1 + \vartheta)]; \quad (1)$$

$$U(\vartheta) = J\rho e^{-\vartheta}, \quad (2)$$

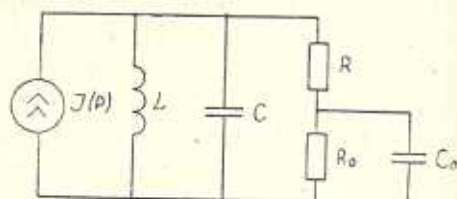
где J — установившееся значение тока коллектора; $\vartheta = \frac{t}{\sqrt{LC}}$ — нормированное время; $\sqrt{m} \frac{\rho}{R} = 2$ — коэффициент, характеризующий режим контура (для критического режима $m = 4$).



а.



б.



в.

Рис. 1.

Время установления тока, определяемое по формуле (1), составляет:

$$\text{при } \delta = -0,005, \quad \vartheta_{\text{уст}} = 7,4; \quad (3)$$

$$\text{при } \delta = -0,05, \quad \vartheta_{\text{уст}} = 4,8, \quad (4)$$

где $\delta = \frac{\Delta i_L}{J}$ — заданная точность установления тока $i_L(t)$.

Ввиду монотонности переходного процесса нарастания тока $i_L(t)$ время установления определено по уровню $J(1 - \delta)$. Согласно формуле (2) максимальное значение выброса напряжения составляет $U_{\text{max}} = 0,37J\rho$. Рассмотрим теперь две сложные конфигурации контуров (рис. 1б, в), которые получаются добавлением к исходной схеме (рис. 1а) внешних элементов R_0 , C_0 и отличаются простотой технической реализации.

Переходные характеристики тока в индуктивной ветви $i_L(t)$ и напряжения на контуре $U(t)$ в операторной форме и общем виде для этих схем запишем в форме:

$$i_L(S) = J \frac{DS + 1}{S^2 + BS^2 + AS + 1}; \quad (5)$$

$$U(S) = J_0 \frac{1}{\sqrt{D}} \frac{S(DS + 1)}{S^2 + BS^2 + AS + 1}. \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) приняты следующие обозначения:
схема на рис. 1б—

$$S = p \sqrt{LC} \sqrt{\frac{\gamma k}{V \bar{m}}}; \quad \gamma = \frac{R_0}{R}; \quad k = \frac{C_0}{C}; \quad V \bar{m} = \frac{\rho}{R};$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad A = (k\gamma + m) \frac{1}{\sqrt[3]{km\gamma}};$$

$$B = [1 + k(1 + \gamma)] \sqrt[3]{\frac{m}{\gamma^2 k^2}}; \quad D = \sqrt[5]{\frac{\gamma^2 k^2}{m}};$$

схема на рисунке 1в—

$$S = p \sqrt{LC} \sqrt{\frac{\gamma k}{(\gamma + 1)V \bar{m}}}; \quad A = [\gamma(1 + k) + m] \sqrt[3]{\frac{m}{km\gamma(\gamma + 1)}};$$

$$B = [1 + \gamma(1 + k)] \sqrt[3]{\frac{m}{\gamma^2 k^2(\gamma + 1)}}.$$

В оригиналах, соответствующих выражениям (5) и (6), нормированное время определяется следующим образом:
схема на рис. 1б—

$$\theta = \frac{t}{\sqrt{LC}} \sqrt[3]{\frac{V \bar{m}}{\gamma k}};$$

схема на рис. 1в—

$$\theta = \frac{t}{\sqrt{LC}} \sqrt[3]{\frac{(\gamma + 1)V \bar{m}}{\gamma k}}.$$

При значениях коэффициентов $A=B=3$ в формулах (5) и (6) соответствующие переходные характеристики описывают критический режим тока $i_L(t)$ и напряжения $U(t)$. При этом для значений $D \ll 1$ переходной процесс нарастания тока носит монотонный характер. Переходная характеристика тока $i_L(t)$ в критическом режиме записывается следующим образом:

$$i_L(\theta) = J[1 - 0,5[\theta^2(1 - D) + 2(\theta + 1)]e^{-\theta}]. \quad (7)$$

При значениях $D > 1$ величину выброса тока ($+\delta$) можно определить по формуле:

$$\delta = (D - 1) e^{-\frac{2D}{D-1}}.$$

Для определения времени установления тока $\vartheta_{уст}$ по уровням 0; $(1 - \delta)$, из формулы (7) получается соотношение:

$$2\delta = e^{-\vartheta_{уст}} [\vartheta_{уст}^2 (1 - D) + 2(D + 1)].$$

Переходной процесс для напряжения $U(\vartheta)$ в критическом режиме, согласно изображению (6), записывается в виде:

$$U(\vartheta) = J_p \frac{1}{\sqrt{D}} e^{-\vartheta} [D\vartheta - 0,5(D - 1)\vartheta^2]. \quad (8)$$

Максимальное значение напряжения $U(\vartheta)$ (амплитуда выброса) определяется по формуле (8) при $\vartheta = \vartheta_m$, $[U_{max} = U(\vartheta_m)]$, а

$$\vartheta_m = \frac{2D - 1 - \sqrt{2D(D - 1) + 1}}{D - 1}. \quad (9)$$

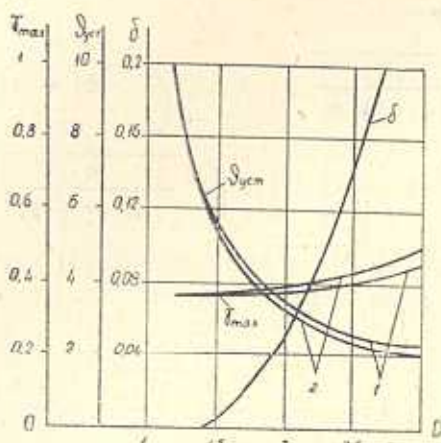


Рис. 2. Графики зависимостей $\delta = f_1(D)$, $\vartheta_{уст} = f_2(D)$, $\gamma_{max} = f_3(D)$.
Значения $\vartheta_{уст}$ и γ_{max} для схем: 1 — рис. 1б; 2 — рис. 1в.

На рис. 2 приведены графики функций $\delta = f(D)$, $\vartheta_{уст} = f(D)$, $\gamma_{max} = f(D)$, рассчитанные на основе соотношений (7)–(9). Таким образом, при заданной точности установления тока δ по графику $\delta = f(D)$ можно определить величину коэффициента D , а затем $\vartheta_{уст}$ и U_{max} для схем, представленных на рис. 1б, в. Используя результаты (3), (4) и сопоставляя их с графиком на рис. 2, нетрудно убедиться в следующем.

При заданной точности установления $\delta = \pm 0,005$ и одинаковом значении выбросов напряжения $U_{max} = 0,37J_p$ схемы на рис. 1б, в

Обеспечивают времена установления, соответственно, $\theta_{уст} = 5,6$ и $\theta_{уст} = 5,4$. Сокращение времени установления тока, в среднем, для обеих схем составляет 25%. При точности установления $\delta = \pm 0,05$ сокращение времени установления для схем по рис. 1б, в составляет 30%. При этом амплитуды выбросов напряжения увеличиваются на 7%.

Приведем также соотношения, устанавливающие связь между коэффициентами k , γ , m и позволяющие при заданном значении точности установления $\delta(D)$ определить значения внешних элементов $R_0 = \gamma R$, $C_0 = kC$.

Схема по рис. 1б:

$$k = D^2 - 3D^2 - 3D - 1; \quad \gamma = \frac{3D - k - 1}{k}; \quad m = \frac{k^2 \gamma^2}{D^2};$$

схема по рис. 1в:

$$\gamma = \frac{3D - 1}{D^2(3 - D)} - 1; \quad k = \frac{3D(\gamma + 1) - 1}{\gamma} - 1; \quad m = \frac{k^2 \gamma^2}{(\gamma + 1)^2} \frac{1}{D^2}.$$

Մ. Գ. ԹՈԽՄԱԿՅԱՆ

ԱՆՅՈՂՈՒԿ ԳՐՈՑԵՄՆԵՐԻ ՕԳՏԻՄԻՉԱՑՈՒՄԸ ԻՆԴՈՒԿՏԻՎ ԲԵՌՈՎ
ՀՈՍԱՆՔԻ ՈՒԺԵՂԱՑՈՒՑԻՉՆԵՐՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Օպերատորային մեթոդի կիրառմամբ հետազոտված են լարման և հոսանքի անցողիկ պրոցեսները ինդուկտիվ բեռով տրանզիստորային կասկադներում: Բացահայտված են ինդուկտիվ բեռում հոսանքի հաստատման ժամանակի կրճատման և արագագործության բարձրացման բարձրացման հնարավորությունները՝ ախտիկապես պարզ սկզբունքներով:

Հաշվարկների համար բերված են անհրաժեշտ հարաբերակցություններ և գրաֆիկներ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А. С. 465710 (СССР), Импульсный усилитель/Т. М. Агаханян.—Опубли. в Б. И., 1975, № 5.
2. Тохмалян М. Г. Широкополосный усилитель тока для индуктивных нагрузок.—Приборы и техника эксперимента, 1978, № 5, с. 149—151.