

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТРАНЗИСТОРНОГО КАСКАДА С ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕМ ОПТИМАЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

М. Г. ТОХМАХЯН

Рассматриваются некоторые особенности работы транзисторного каскада на индуктивную нагрузку с относительно малой активной составляющей. Предлагается метод уменьшения выбросов напряжения с сохранением высокого быстродействия каскада. Приводятся расчетные соотношения и графики для определения амплитуды выброса напряжения, а также времени установления тока в индуктивной ветви эквивалентного контура.

При работе транзисторного импульсного усилителя (рис. 1а) на индуктивную нагрузку выбросы напряжения, возникающие при запираии транзистора внешним входным сигналом, могут значительно превышать предельно допустимые значения соответствующих параметров транзистора и привести к электрическому пробое последнего. Включение шунтирующих нелинейных двухполюсников — диодов, стабилизаторов, ограничивающих напряжение на транзисторе в пределах допу-

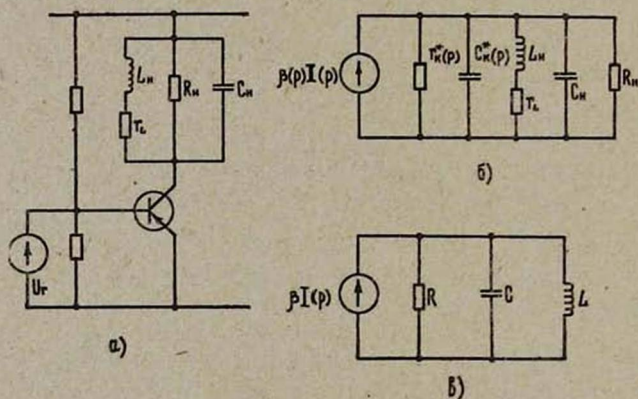


Рис. 1.

стимого значения, приводит к заметному увеличению времени установления тока в индуктивности. В случае, когда транзисторный каскад возбуждается входными сигналами отпирающей полярности, при выполнении условия

$$L_n \frac{di_L}{dt} \geq E_a - V_{\text{пнс}} \quad (1)$$

он оказывается в режиме насыщения.

Здесь и на рис. 1 приняты следующие обозначения:

L_n — индуктивность нагрузки,

C_n — емкостная составляющая нагрузки,

$R_{ш}$ — шунтирующее сопротивление для обеспечения расчетного режима установления тока,

i_L — ток через индуктивную ветвь контура,

$E_{п}$ — напряжение питания каскада,

$V_{нас}$ — напряжение насыщения транзистора,

r_L — активное сопротивление катушки индуктивности.

В режиме насыщения нарастание тока в индуктивности происходит по линейному закону (если пренебречь сопротивлением транзистора в этом режиме), и при заданной нагрузке время нарастания определяется напряжением питания каскада. После выхода транзистора из насыщения закон изменения тока определяется режимом эквивалентного контура, представленного на рис. 16. В практических схемах время нарастания тока в режиме насыщения составляет 90–95% от полного времени установления тока [1], которым и определяется быстродействие каскада.

По вышеуказанным причинам усилители с индуктивной нагрузкой имеют существенно низкое быстродействие, что, в конечном итоге, определяет технически низкие показатели по быстродействию таких устройств, как знакогенерирующие ЭЛТ, устройства радиоавтоматики и т. д.

Возможность электрического пробоя можно предотвратить и существенно сократить время установления тока в индуктивной нагрузке, если применять схемные решения, позволяющие поддерживать на коллекторе транзистора напряжение, необходимое для его работы в активном режиме. Возможность применения подобных схемных решений в значительной мере определяется величиной выброса напряжения, возникающего при отпирании или запираании транзистора, обладающего характеристиками генератора тока. С этой точки зрения определенный интерес представляют методы уменьшения выбросов напряжения с одновременным сохранением возможно минимального времени установления тока в индуктивной ветви. В данной работе рассматриваются два метода возбуждения эквивалентного контура (рис. 16), составленного для простейшего транзисторного каскада с индуктивной нагрузкой (рис. 1а): возбуждение генератором тока, обеспечивающим идеальный скачок тока, и возбуждение генератором тока, обеспечивающим экспоненциальное нарастание фронта тока. Критерием оптимальности при оценке результатов в данном случае принимается минимальное время нарастания тока при заданном значении выброса напряжения.

Анализ работы транзисторного каскада можно выполнить на основе эквивалентной схемы, представленной на рис. 16. Она легко получается из полной эквивалентной схемы [2], если принять $r_g = 0$, $r_{эк} = 0$ и $r_L = 0$, что имеет место для выходных каскадов, реализованных на транзисторах средней и большой мощности и работающих при сравнительно больших токах. Если время установления тока в индук-

тивной ветви $T_{уст} \gg \tau_\beta$, что выполняется для большинства практических схем усилителей с индуктивной нагрузкой, то допустимы также следующие приближения:

$$r_k^*(p) \approx \frac{r_k}{1 + \beta}, \quad C_k^*(p) \approx C_k(1 + \beta), \quad \beta(p) I(p) \approx \beta I(p).$$

На рис. 1в¹ приведена эквивалентная схема после сделанных допущений, где приняты следующие обозначения:

$C = C_n + C_k(1 + \beta)$ — эквивалентная емкость контура,

$R = R_n \parallel \frac{r_k}{1 + \beta}$ — эквивалентное сопротивление контура,

$L = L_n$ — индуктивность нагрузки.

Рассмотрим сначала возбуждение эквивалентного контура (рис. 1в) генератором тока, обеспечивающим идеальный перепад тока. Анализ переходных характеристик в аperiodическом, критическом и колебательном режимах, описываемых операторным выражением второго порядка для выбросов малой величины, содержится в работе [2]. Большие значения выбросов напряжения, характерные при работе транзисторного каскада на значительную индуктивную нагрузку, в частности, на электромагнитную отклоняющую систему ЭЛТ, требующую также большой точности установления тока $\pm 0,5\%$, не позволяют использовать результаты, приведенные в [2].

На рис. 2, 3 изображены графики функций $U_m = f(m)$ и $T_{уст} = f(m)$, представляющие собой зависимости максимального нор-

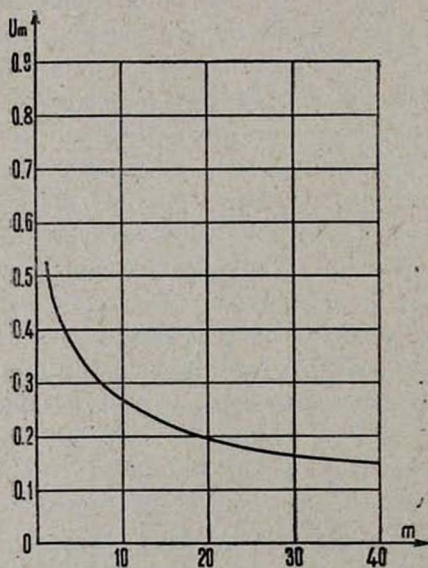


Рис. 2.

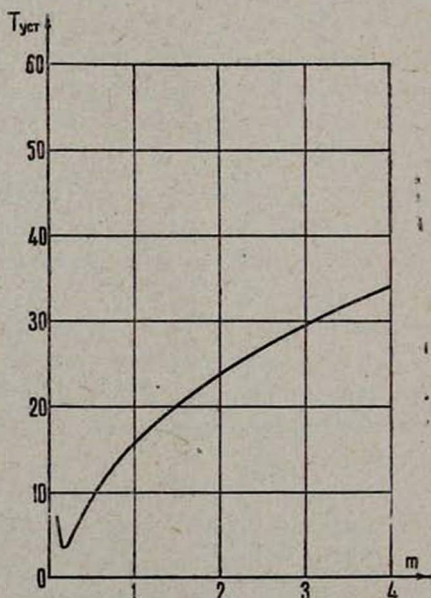


Рис. 3.

мированного значения выброса напряжения U_m и нормированного вре-

мени $T_{уст}$ установления тока в индуктивной ветви от параметра контура m , где приняты следующие обозначения:

$$m = \frac{L}{R^2 C} - \text{коэффициент, определяющий режим контура,}$$

$$U_m = \frac{V_m}{I_p} - \text{максимальное нормированное значение напряжения на контуре,}$$

$$T_{уст} = \frac{t_{уст}}{\sqrt{LC}} - \text{нормированное время установления тока в индуктивной ветви с точностью } \pm 0,5\%,$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} - \text{волновое сопротивление контура.}$$

Рассмотрим теперь случай возбуждения эквивалентного контура генератором тока, обеспечивающим экспоненциальное нарастание фронта тока с постоянной времени γ . Для этого случая переходные характеристики для напряжения и тока записываются в следующей форме:

$$V(T) = Ae^{-\frac{\sqrt{m}}{2}T} \sin \frac{\sqrt{4-m}}{2} T - Be^{-\frac{\sqrt{m}}{2}T} \cos \frac{\sqrt{4-m}}{2} T + Be^{-k\frac{\sqrt{m}}{2}T}, \quad (2)$$

$$i_L(T) = 1 - (1-C)e^{-k\frac{\sqrt{m}}{2}T} - Ce^{-\frac{\sqrt{m}}{2}T} \cos \frac{\sqrt{4-m}}{2} T - De^{-\frac{\sqrt{m}}{2}T} \sin \frac{\sqrt{4-m}}{2} T, \quad (3)$$

где

$$A = \frac{2k(k-1)}{\sqrt{4-m} \left[(k-1)^2 + \frac{4-m}{m} \right]},$$

$$B = \frac{2k}{\sqrt{m} \left[(k-1)^2 + \frac{4-m}{m} \right]},$$

$$C = \frac{k(k-2)}{(k-1)^2 + \frac{4-m}{m}},$$

$$D = \frac{k \left[(k-1) + \frac{4-m}{m} \right] \sqrt{m}}{\sqrt{4-m} \left[(k-1)^2 + \frac{4-m}{m} \right]},$$

а безразмерная постоянная времени k определяется как

$$k = \frac{2}{m} \frac{\sqrt{LC}}{\gamma}. \quad (4)$$

На рис. 4, 5 приведены графики функций $U_m = f(m)_{k=\text{const}}$ и $T_{\text{уст}} = f(m)_{k=\text{const}}$, представляющие собой зависимости максимального нормированного значения напряжения U_m на контуре и нормированного времени $T_{\text{уст}}$ установления тока в индуктивной ветви от парамет-

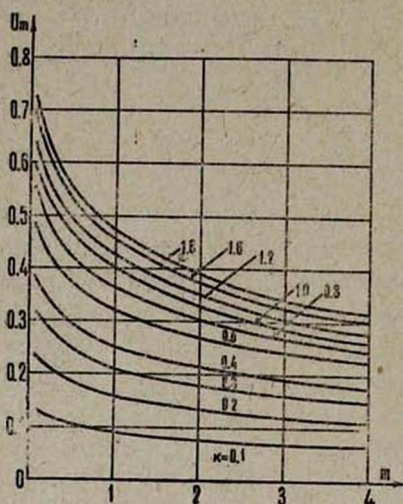


Рис. 4.

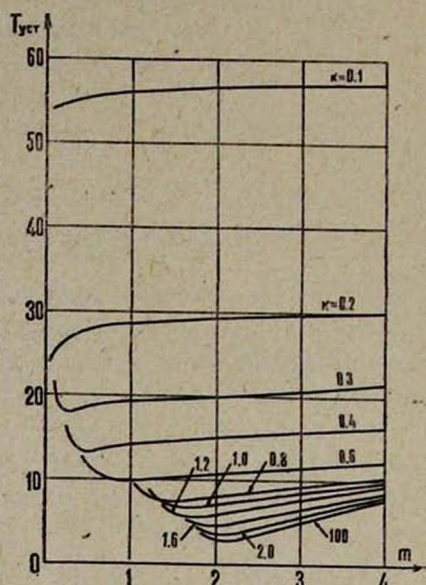


Рис. 5.

ра контура m для ряда значений безразмерной постоянной времени k . Графики построены на основе функциональных соотношений (2) и (3).

Сопоставляя графики функций $U_m = f(m)$ (рис. 2) и $T_{\text{уст}} = f(m)$ (рис. 3) с соответствующими графиками при возбуждении контура сигналом экспоненциальной формы, нетрудно убедиться, что при значениях нормированного выброса напряжения $0,1 \div 0,3$ время установления тока (с точностью $\pm 0,5\%$) получается минимальным в случае возбуждения эквивалентного контура генератором тока, обеспечивающим экспоненциальное нарастание фронта тока. В среднем выигрыш по быстродействию составляет $30 \div 40\%$. Для наглядной иллюстрации вышесказанного рассмотрим простейший пример: $L = 10^{-3}$ гн, $C = 1000$ пф.

1. Возбуждение контура генератором тока, обеспечивающим единственный скачок.

Примем $U_m = 0,2$; тогда согласно графику рис. 2 $m = 20$ и для такого значения m из графика рис. 3 находим $T_{\text{уст}} = 24$ и, следовательно,

$$t_{\text{уст}} = \sqrt{LC} T_{\text{уст}} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$$

2. Возбуждение контура генератором тока, обеспечивающим экспоненциальное нарастание фронта с безразмерной постоянной времени k . Возьмем $k = 0,4$; тогда согласно графику рис. 4 значению

$U_m = 0,2$ соответствует $m = 2,7$ и из графика рис. 5 находим $T_{уст} = 15$ и $t_{уст} = \sqrt{LC} T_{уст} = 15 \cdot 10^{-6}$ сек.

Постоянная времени возбуждающего сигнала при этом определяется из выражения (4)

$$\tau = \frac{2}{mk} \sqrt{LC} = 1,85 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$$

Таким образом, возбуждение эквивалентного контура генератором тока, обеспечивающим экспоненциальное нарастание фронта тока, следует считать оптимальным, если за критерий оптимальности принимать минимальное время установления тока в индуктивной ветви при заданном значении выброса напряжения на контуре.

Институт радиопизики и электроники
АН АрмССР

Поступила 20.IV.1973

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А. Е. Поподі. Electronic Design, 16, 4 (1968).
2. Т. М. Алахян. Линейные импульсные усилители, Изд. Связь, 1970.

ԻՆՏԵՐՆԱԿԻ ԲԵՌՈՎ ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐԱՅԻՆ ԿԱՍԿԱԴԻ ԳՐԳՌՄԱՆ
ՄԻ ՍԿԶՐՈՒՆՔԻ ՄԱՍԻՆ, ՈՐԸ ԱՊԱՀՈՎՈՒՄ Է ՀՈՍԱՆՔԻ ԵՎ
ԼԱՐՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼ ԱՆՑՈՂԻԿ ԲԵՌՈՒԹԱԳՐԵՐԸ

Մ. Գ. ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ

Դիտարկվում են դիմադրության համեմատաբար փոքր ակտիվ ակտիվ բաղադրիչ ունեցող ինդուկտիվ բեռով տրանզիստորային կասկադի աշխատանքի որոշ առանձնահատկությունները: Առաջարկվում է մի սկզբունք, որը պահպանելով կասկադի բարձր արագագործությունը թույլ է տալիս փոքրացնել լարման խոլանների մեծությունը: Բերվում են լարման խոլանների ամպլիտուդի և էկվիվալենտ կոնտուրի ճյուղում հոսանքի հաստատման ժամանակի որոշման համար հաշվարկային բանաձևեր և գրաֆիկներ:

ON THE METHOD OF EXCITEMENT OF TRANSISTOR STAGE WITH INDUCTIVE LOAD, ENSURING OPTIMAL TRANSIENT CURRENT AND VOLTAGE CHARACTERISTICS

M. G. TOKHMAKHIAN

Certain features in the operation of transistor stage loaded by impedance with relatively small active component are considered. A method is suggested that reduces the overshooting of voltage and retains the high level of operation rate. Formulas and graphs are given for the estimation of amplitude of voltage overshootings as well as for current equilibrium time in the inductive branch of equivalent circuit.