

ВОПРОСЫ ЛИНЕАРИЗАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ ЛАМПОВЫХ КАСКАДОВ

Л. М. АНАНЬЕВ, Л. Е. БАРАБОШКИН

(Представлена научным семинаром кафедры промышленной электроники)

Цель данной работы — обратить внимание на целесообразность привлечения принципов успешно развивающихся теории чувствительности [1] и теории инвариантных нелинейных систем автоматического управления [2] для построения одноламповых устройств с улучшенными характеристиками. Проиллюстрируем это на примере линейризации

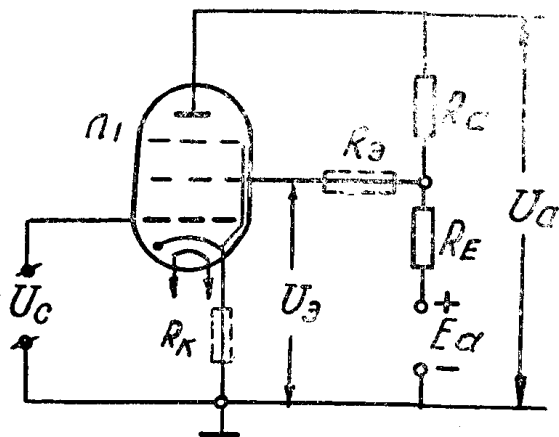


Рис. 1. Схема реостатного каскада, у которого часть нагрузки включена в общую цепь питания анода и экранной сетки

лампового каскада с использованием управления по экранной сетке рис. 1.

Будем понимать линейризацию схемы по данному показателю как приближение передаточной функции, описывающей процесс получения этого показателя, к постоянной величине в возможно большей области изменений входных воздействий, возмущений и самого выходного показателя.

Уменьшают нелинейность двумя путями: стабилизируют дифференциальные параметры (применяют отрицательную обратную связь) или компенсируют

статическую характеристику передаточной функции противоположной нелинейностью (в том числе и нелинейной обратной связью [5, 6]). В последнем случае часто бывает экономически выгоднее использовать различный характер изменений параметров в самой многоэлектродной лампе и добиться параметрической инвариантности, а следовательно, и компенсации возмущений со стороны источников питания.

Оценим возможность линейризации выходного напряжения в схеме рис. 1, которую следует рассматривать как нелинейную систему регулирования. Условием инвариантности U_a по ΔE_a при заданной

структуре системы является наличие двух каналов и реализация передаточной функции, связывающей рассматриваемую координату и внешнее возмущение [2 стр. 101]. Как следует из схемы рис. 1,

$$\Delta V_a = \Delta V_{\text{э}} - \Delta V_{R_a}. \quad (1)$$

Для качественных рассуждений воспользуемся линейной моделью лампы и применим принцип наложения. Результаты расчетов коэффициентов передачи и величин ΔV_a , $-\Delta V_{R_a}$ представлены в виде струк-

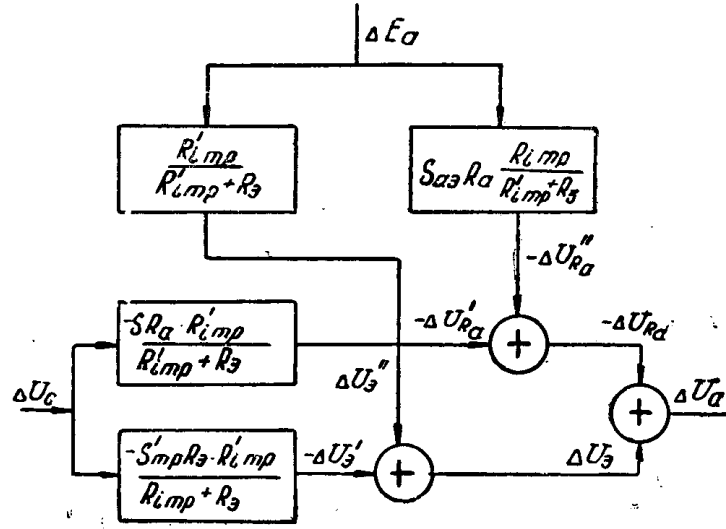


Рис. 2. Структурная схема лампового каскада по рис. 1

турной схемы рис.2, где с учетом реакции анода $R_{in} \neq \infty$ формулы переписутся так ($R_k = 0$; $R_{\text{э}} = 0$):

$$\Delta V_{\text{э}} = \Delta V_{\text{э}}' - \Delta V_{\text{э}}'' = \frac{\Delta E_a \left(1 + \frac{R_a}{n R_{in}} \right) - S'_{\text{тр}} R_{\text{э}} \Delta V_c}{1 + \frac{R_a}{n R_{in}} + \frac{R_c}{R_{\text{итр}}} + \frac{R_e}{R_{in}}};$$

$$\Delta V_{R_a} = -\Delta V_{R_a}'' - \Delta V_{R_a}' = -R_a \frac{\Delta E_a \left(S_{aэ} + \frac{1}{R_{in}} \right) + S_{ac} \Delta V_c}{1 + S_{aэ} \cdot n \cdot R_c + \frac{R_n}{R_{in}}}; \dots \quad (2)$$

В этих выражениях: $n = \frac{\Delta I_{\Sigma}}{\Delta I_a} = \frac{\Delta I_a + \Delta I_{\text{э}}}{\Delta I_a}$ — коэффициент токораспределения; $\frac{1}{R_{\text{итр}}}$; $\frac{\partial I_{\Sigma}}{\partial V_a}$; $S_{\text{тр}} = \frac{\partial I_{\Sigma}}{\partial V_c}$ — проводимость и крутизна лампы в триодном включении (т. е. $V_a = V_{\text{э}}$); $\frac{1}{R_{\text{ипт}}}$, $S'_{\text{тр}}$ — проводимость и крутизна суммарного тока при наличии R_a ($V_a \neq V_{\text{э}}$); $R_{in} = \frac{\partial V_a}{\partial I_a}$ — внутреннее сопротивление лампы по анодному току с учетом токораспределения;

$R'_{in} = \frac{\partial V_a}{\partial I_a}$ — внутреннее сопротивление лампы по анодному току без

учета токораспределения; $R_a + nR_E = R_n$ — эквивалентное полное сопротивление для анодного тока; $S_{ac} = \frac{\partial I_a}{\partial U_c}$ — крутизна анодного тока по первой сетке; $S_{aэ} = \frac{\partial I_a}{\partial V_э}$ — крутизна анодного тока по экранной сетке.

С достаточной для практики точностью можно считать, что

$$S'_{тр} \approx S_{тр} = n \cdot S_{ac}; \quad R'_{iтр} \approx R_{iтр}; \quad S_{aэ} = \frac{1}{n \cdot R'_{iтр}}; \quad nR'_{in} = R_{in};$$

$$\frac{R'_{iтр}}{R'_{iтр} + R_E} = \frac{1}{1 + nS_{aэ}R_E}.$$

Как следует из схемы рис. 2, условие инвариантности $V_{вых}$ по отношению к ΔE_a запишется:

$$\Delta V_a'' = \Delta V_э'' - \Delta V_{Ra}'' = 0, \quad \text{т. е. } 1 - S_{aэ}R_a = 0 \quad (3)$$

или

$$1 - \frac{R_a}{n \cdot R'_{iтр}} = 0. \quad (3a)$$

Выражения (3) и (3a) являются одновременно условием идеальной фильтрации, т. е. равенство коэффициента фильтрации (4) бесконечности

$$K_\Phi = \left. \frac{\Delta E_a}{\Delta V_a''} \right|_{V_c = \text{посм}} = \frac{1}{\frac{\Delta V_э''}{\Delta E_a} - \frac{\Delta V_{Ra}''}{\Delta E_a}} = \frac{1 + S_{aэ} \cdot n \cdot R_E + \frac{R_n}{R_{in}}}{1 + \frac{R_a}{R_{in}} - \left(S_{aэ} + \frac{1}{R_{in}} \right) \cdot R_a}$$

или

$$K_\Phi \cong \frac{1 + S_{aэ} \cdot n \cdot R_э}{1 - S_{aэ} \cdot R_a}, \quad (4)$$

и условием равенства нулю выходного дифференциального сопротивления

$$\rho_d = \left. \frac{\Delta V_a''}{\Delta I_a''} \right|_{V_c = \text{посм}} = \frac{\Delta V_э'' - \Delta V_{Ra}''}{\Delta I_a''} = \frac{1 - S_{aэ}R_a}{S_{aэ} + \frac{1}{R_{in}}} \dots \quad (5)$$

Аналитические выражения для $I_a = f(V_a) |_{V_c = \text{посм}}$ и $I_э = f(V_a) |_{V_c = \text{посм}}$ в схеме рис. 1, которые легко получить из (1) и (2), если положить $\Delta V_c = 0$, описывают нелинейные кривые. Построение указанных кривых удобно выполнять графически, располагая семейством анодных характеристик в пентодном и триодном режимах, как показано на рис. 3. Экспериментально снятые характеристики $I_a = f(V_a)$ для лампы 6ПЗС, изображенные на рис. 4, совпадают практически с построенными согласно рис. 3.

Как следует из выражения (3), реализовать инвариантность возможно выбором R_a или при заданном R_a подобрать режим, где $S_{aэ} = \frac{1}{R_a}$.

В триодном режиме

$$R_a = 0 \quad \text{и} \quad \rho_d = \frac{1}{S_{aэ} + \frac{1}{R_{in}}} = R_{iтр} > 0.$$

В пентодах обычно, если $R_э = 0$, R_a выбирают большим, так что

$1 - S_{a3}R_a < 0$ и $\rho_d < 0$. Однако в последнем случае все-таки имеются 2 участка характеристики, где выполняются условия $1 - \frac{R_a}{nR_{гтр}} \geq 0$. Эти участки расположены в области отпирания лампы ($R_{гтр}$ — велико) и в области больших токов, где резко возрастает n , т. е. вольтамперные характеристики имеют S-образную форму. Выбором величин R_a и R_E

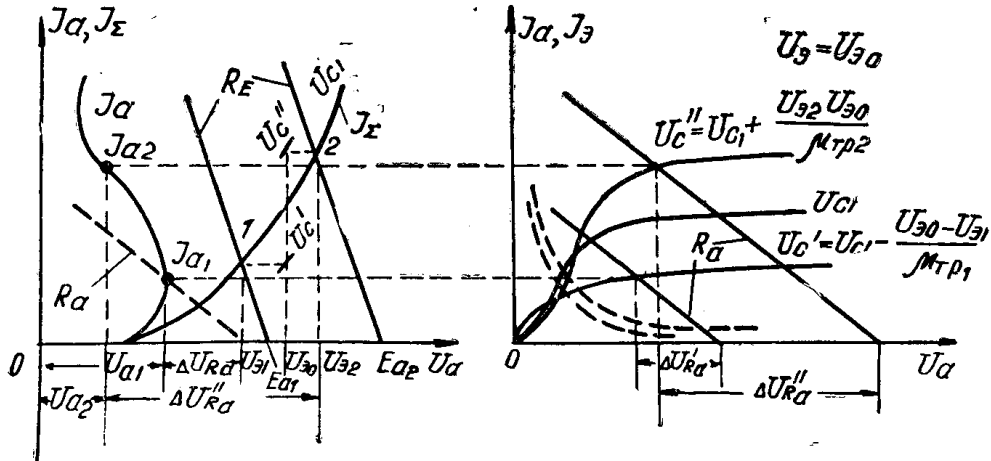


Рис. 3. Графическое построение вольт-амперных характеристик. $\mu_{гтр1}$ и $\mu_{гтр2}$ — статические коэффициенты усиления лампы, найденные графически в точках 1 и 2

можно добиться режима, при котором S-образные кривые наилучшим образом приблизятся к прямым перпендикулярным оси V_a . О форме и степени линейризации выходных характеристик можно судить по зависимости коэффициента фильтрации K_ϕ (4), который характеризует

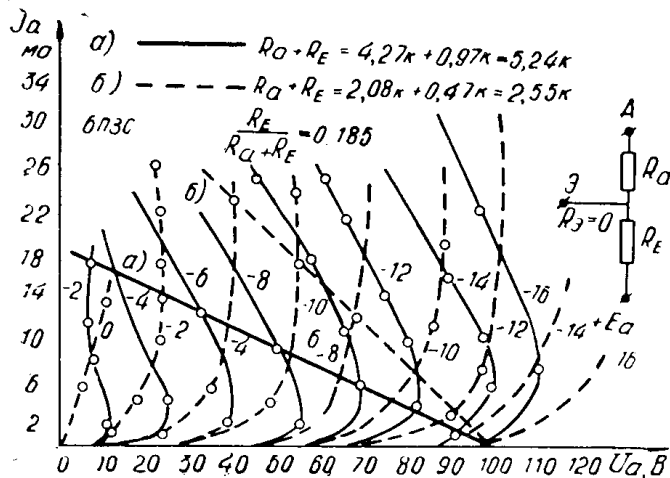


Рис. 4. Экспериментально снятые вольт-амперные характеристики лампы 6ПЗС по схеме рис. 1

передаточную функцию $\Delta V_a = f(\Delta E_a)$ при $V_c = \text{пост}$, от напряжения V_c . Из (4) следует, что для расширения области изменений V_c , где удовле-

творительно происходит компенсация, необходимо, во-первых, заменить сопротивление R_a однотипной лампой в триодном включении, тогда

$$1 - S_{a3} \cdot R_a = 1 - \frac{R_{iтр}}{nR_{iтр}} \approx 0, \dots \quad (6)$$

так как n близок к 1 (особенно у оконечных ламп 6ПЗС, 6П1 4П и др.). Если n велик (пентоды с густой экранной сеткой, например, 6Ж10Б), то экранный ток и его проводимость можно уменьшить включением ограничивающего сопротивления R_3 в цепь экранного тока (рис. 1), так как при $V_c = \text{пост}$ и $S_{a3} = \frac{1}{R_a}$ коэффициент $n = \frac{R_a}{R_{i3}} + 1$, где $R_{i3} = \frac{\partial V_3}{\partial I_3}$ — внутреннее сопротивление по I_3 .

В таком случае сопротивление R_E можно не включать, т. е. использовать только пентодный режим.

Во-вторых, параметр S_{a3} можно заставить обратной связью, включив в цепь суммарного тока $I_s = I_a + I_3$ резисторы, например, R_E и R_K . Тогда выражения (4) и (5) с учетом наличия сопротивления R_3 можно представить в форме

$$K_{\phi} = \frac{1 + \frac{R_n}{R_{incв}}}{1 - S_{a3св} \cdot R_n} \quad \text{и} \quad \rho_d = \frac{1 - S_{a3св} \cdot R_n}{S_{a3св} + \frac{1}{R_{incв}}}, \quad (7)$$

где $R_{incв} = R_{in} \{1 + n \cdot S \cdot R_K + S_{a3} [nR_E + R_3 (n-1)]\}$,

$$S_{a3св} = \frac{S_{a3}}{1 + nS_{a3}R_E + S_{a3}R_3(n-1) + n \cdot S \cdot R_K}; \quad S = \left. \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right|_{V_3 = \text{пост}}$$

Из выражений (7) следует, что с увеличением глубины обратной

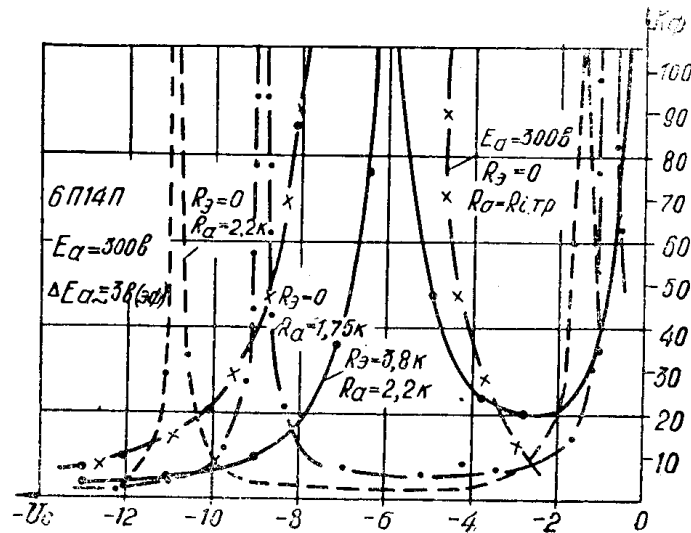


Рис. 5. Зависимость коэффициента фильтрации от потенциала 1-й сетки в схеме рис. 1 на лампе 6П14П

связи (т. е. с возрастанием R_E , R_K) необходимо увеличивать R_a . Ограничением служат максимальное значение величины $\frac{R'_{iтр} + R_3}{R'_{iтр}}$ [4], допустимое снижение коэффициента использования источника E_a и обеспечение других заданных условий [3]. На рис. 5 и 6 изображены эк-

спериментальные данные, подтверждающие вышеизложенный анализ. Смещение у нагрузочной лампы 6П14П в триодном включении (см. кривую $R_a = R_{тр}$, $E_a = 300в$, $R_s = 0$) выбиралось $-0,45в$. Коэффициент пульсаций для всех случаев равен $\frac{\Delta E_a}{E_a} = 0,015$.

Исходный режим трех случаев рис. 6 типовой ($E_{см} = -3в$, $V_s = 120в$, $V_{a0} = 120в$), коэффициенты усиления одинаковы ($K \approx 22$), ослабление пульсаций в схемах на триоде и на пентоде за счет анодного фильтра равно 40.

Выводы

1. Для повышения стабильности и линейности ламповых усилительных каскадов удобно использовать принципы построения инвариантных и малочувствительных к изменению параметров систем автоматического регулирования.

2. Используя управляющие свойства экранной сетки и приняв меры к линейаризации параметров, ламповые каскады, помимо основного назначения (усиление, генерирование), можно использовать одновременно как электронные фильтры и стабилизаторы анодного напряжения.

Авторы выражают благодарность ассистенту Барабошкиной Р. А. за оформление графического материала по результатам эксперимента.

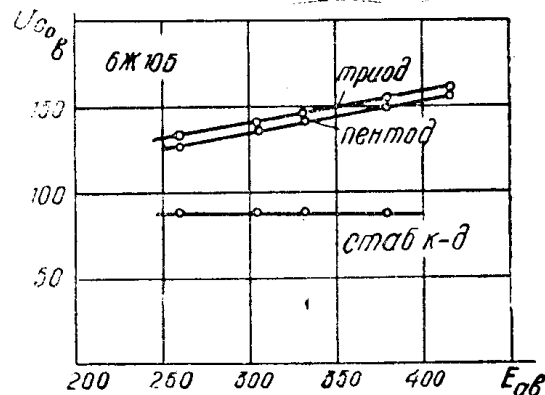


Рис. 6. Зависимость постоянной составляющей анодного напряжения от изменения ЭДС источника питания в схеме рис. 1 (стаб. каскад) с выполнением условия стабилизации и в обычных схемах на триоде и пентоде

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воронов. Основы теории автоматического управления, ч. II, М., гл. IX, 1966.
2. Б. М. Менский. Принцип инвариантности в автоматическом регулировании (уч. пособие), т. (ВЗЭИ) 1956.
3. Г. А. Шевцов. Об оптимальном значении элементов схемы реостатного усилителя. Научные записки Львовского политехнического института в. 27, сер. р/технич. 1955.
4. Е. С. Анцелиович. Влияние нелинейности внутреннего сопротивления лампы при расчете усилителей на сопротивлениях. Радиотехника, № 3, 1955.
5. Л. М. Ананьев, Л. Е. Барабошкин. Анализ схем с обратной связью по экранной сетке. Изв. ТПИ, (настоящий сборник).
6. Л. М. Ананьев, Л. Е. Барабошкин, Я. С. Пеккер. Реостатный каскад, нечувствительный к изменениям источника анодного питания.
7. Л. Е. Барабошкин. Ультранинейный режим экранированных ламп. Доклады научно-технической конференции, посвященной дню радио (краткое содержание). Томск, 1966.