

Владимирский государственный университет

СИЛОВЫЕ БИПОЛЯРНЫЕ ТРИОДЫ (БПТ)

ЧАСТЬ I

**Учебный материал
для курсового проектирования
по дисциплине «Электроника»**

Владимир 2010

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
Кафедра управления и информатики
в технических и экономических системах

СИЛОВЫЕ БИПОЛЯРНЫЕ ТРИОДЫ (БПТ)

ЧАСТЬ I

Учебный материал
для курсового проектирования
по дисциплине «Электроника»

Составители:
А.С. ГРИБАКИН
В.С. ГРИБАКИН
О.М. КОЧУРОВ

Владимир 2010

УДК 621.311.6(075.32)
ББК

Рецензент
Кандидат технических наук
доцент кафедры электротехники и электроэнергетики
Г.П. Колесник

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Силовые биполярные триоды (БПТ). Часть I. Учебный материал для курсового проектирования по дисциплине «Электроника» /Владим.гос.ун-т;сост.:А.С.Грибакин, В.С. Грибакин, О.М. Кочуров.– Владимир: Изд-во Владим. гос.ун-та 2010.– 70 с.

Учебный материал для курсового проектирования по дисциплине «Электроника» содержит вводные теоретические сведения, примеры, методики расчета и выбора силовых триодов транзисторных преобразователей.

Учебный материал подготовлен для студентов 2 – 3-го курсов очной формы обучения специальностей 220201 – управление и информатика в технических системах и 220200 – бакалавры техники и технологии по направлению автоматизация и управление. Может быть использован студентами других специальностей при выполнении курсовых проектов.

Табл.5 Илл. 22 Библиогр.7.назв.

УДК 621.311.6(075.32)
ББК

Введение

Мощные силовые биполярные триоды (БПТ) давно используются в импульсных высокочастотных преобразователях. По многим параметрам БПТ проигрывают мощным полевым триодам, например по быстродействию, потерям. Однако, совершенствование технологий производства БПТ и выпуск их продолжается и они имеют свою нишу технических применений, в т. ч. и в преобразователях.

Настоящая методическая работа содержит учебный материал для курсового проектирования, в котором достаточно подробно рассмотрен режим ключа (D) биполярных триодов. Материал работы разбит по параграфам следующим образом.

В первом параграфе дан анализ работы БПТ в статическом режиме, когда смена состояний триода происходит под действием знакопеременного сигнала, частота которого намного меньше предельной для триода, и его можно считать безынерционным прибором. Во втором параграфе вводятся понятия потерь и показателей режима D.

Третий параграф посвящен потерям в БПТ триоде, работающем на различные типы нагрузок при высокой частоте переключения. Типы нагрузок: активная, активная с противо-э.д.с., активно-индуктивная, активно-индуктивная с обратным диодом, якорная обмотка электрического двигателя; рассмотрены режимы разрывного и неразрывного тока нагрузки. Даны примеры расчета потерь.

Для увеличения нагрузочной способности преобразователя прибегают к параллельному включению группы триодов. В 4-м параграфе приведены соотношения по расчету элементов, выравнивающих потери в БПТ, работающих в группе параллельно на одну общую нагрузку; в 5-ом – сведения о предельно допустимых параметрах БПТ, типах пробоя, которые могут возникнуть в ходе работы преобразователя и, наконец, о выборе БПТ.

В 6-ом и 7-ом параграфах даны понятия теплового потенциала, потока, тепловой цепи, краткое изложение теплового расчета. Дана методика и примеры теплового расчета радиатора и БПТ работающего в режиме ключа (D).

1 .Анализ работы биполярного триода (БПТ). Статический режим

Рассмотрим работу простейшего каскада на БП триоде с активной резисторной нагрузкой $R_k = R_n$. Триод включен по схеме с общим эмиттером (ОЭ). E_1 – э.д.с. источника питания коллекторной цепи каскада. Диаграмма напряжений и токов и схема представлены на рис.1.

Входной сигнал $U_{вх}(t)$ – периодический, знакопеременный. Амплитудные значения $\pm U_{вх}$ обеспечивают триоду режим насыщения, в положительном полупериоде и отсечки в отрицательном. Скорость изменения сигнала в интервалах времени $t_1 \dots t_4$ и $t_5 \dots t_8$ настолько мала, что переходные процессы можно не учитывать и считать триод безынерционным прибором (рис.1, а, б). Резисторы R_k и $R_б$ (рис.1, е) ограничивают соответственно токи коллектора I_k и базы $I_б$ при $U_{вх} > 0$.

На семействе коллекторных вольтамперных характеристик (ВАХ) триода (рис.1, д) выделены три области: насыщения (ОН), активная (АО) и отсечки (ОО); построена нагрузочная прямая, которая, по существу, является ВАХ нагрузочного резистора R_k . Изменения токов I_k , $I_б$ и напряжения $U_{кэ}$ отражены движением рабочей точки (РТ) по нагрузочной прямой.

Область отсечки. Состояние отсечки

В интервалах времени $0 \dots t_1$, $t_1 \dots t_2$, пока напряжение $U_{вх} < 0$, эмиттерный переход триода смещен обратно, токи базы и коллектора равны: $I_б = -I_{к0}$, $I_k = I_{к0}$. Для цепей базы и коллектора, с учетом пренебрежимо малой величины $I_{к0}$, справедливы соотношения

$$\begin{aligned} -U_{вх} &= -U_{бэ} - I_{к0} \cdot R_б \approx -U_{бэ}; \\ E_1 &= U_{кэ} + I_{к0} \cdot R_k; U_{кэ.отс} = E_1 - I_{к0} \cdot R_k \approx E_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Напряжение $U_{кэ}$ в этой области называют напряжением отсечки, $U_{кэ.отс}$.

РТ на нагрузочной ВАХ (рис.1, д) находится в положении 1 и начинает движение по ВАХ лишь в конце интервала $t_1 \dots t_2$, когда $U_{вх} = U_{бэ} \rightarrow 0$, ток базы $I_б \rightarrow 0$, а ток коллектора возрастает до уровня $I_{к0}^* = I_{к0} \cdot (1 + \beta)$, оставаясь все еще незначительным (рис.1, в).

Активная область. Режим линейного усиления

В интервале времени $t_2 \dots t_3$ напряжения $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{бэ}}$ становятся положительными, появляется и растет ток базы $I_{\text{б}}$, а вместе с ним ток коллектора $I_{\text{к}}$. РТ смещается вверх по нагрузочной прямой из положения 2 к положению 3 (активная область). В идеале связь между токами $I_{\text{к}}$ и $I_{\text{б}}$ в этой области устанавливается формулой $\Delta I_{\text{к}} = h_{21} \cdot \Delta I_{\text{б}}$, или приближенно $I_{\text{к}} \approx h_{21} \cdot I_{\text{б}}$, где h_{21} – коэффициент усиления триода по току. По традиции в технической литературе часто вместо h_{21} используется греческая буква β , тогда

$$\Delta I_{\text{к}} = \beta \cdot \Delta I_{\text{б}}, \quad \text{или} \quad I_{\text{к}} \approx \beta \cdot I_{\text{б}}. \quad (2)$$

Как следует из (2), зависимость между током выходной цепи $I_{\text{к}}$ и входной $I_{\text{б}}$ линейная, отсюда название: режим линейного усиления. Значения β у мощных силовых триодов от нескольких десятков до нескольких тысяч. Например, у пары согласованных БПТ с разным типом проводимости КТ825 и КТ827 β имеет значения от 750 до 18000 [1, 2].

Для цепей базы и коллектора в АО справедливы выражения

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}} + I_{\text{б}} \cdot R_{\text{б}}; \quad U_{\text{бэ}} = U_{\text{вх}} - I_{\text{б}} \cdot R_{\text{б}}; \quad (3)$$

$$E_1 = U_{\text{кэ}} + I_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}}; \quad U_{\text{кэ}} = E_1 - I_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}}. \quad (4)$$

В отличие от $U_{\text{вх}}$, изменяющегося линейно (рис.1, а), рост $U_{\text{бэ}}$ в интервале времени $t_2 \dots t_3$ замедляется и лишь немного превышает напряжение пятки ВАХ эмиттерного перехода БП триода. Большая же часть $U_{\text{вх}}$ падает на сопротивлении $R_{\text{б}}$.

С ростом $I_{\text{к}}$ и падения напряжения на нагрузке $I_{\text{к}} \cdot R_{\text{к}}$ напряжение $U_{\text{кэ}}$ уменьшается (рис.1, д). Напряжение $U_{\text{кэ}}$ складывается из двух составляющих $U_{\text{бэ}}$ и $U_{\text{кб}}$: $U_{\text{кэ}} = U_{\text{бэ}} + U_{\text{кб}}$. Поскольку $U_{\text{бэ}}$ в интервале времени $t_2 \dots t_3$ увеличивается (на доли вольт), то, очевидно, уменьшение $U_{\text{кэ}}$ происходит за счет $U_{\text{кб}}$.

Область насыщения. Состояние насыщения

К моменту времени t_3 РТ переходит в положение 3 на границе между областями активной и насыщения, при этом $U_{кб} = 0$, а $U_{кэ} = U_{бэ}$. Общей границей между АО и ОН является график проходной характеристики $I_{к} = f(U_{бэ})$ (рис.1, д). Последняя практически совпадает с эмиттерной ВАХ триода для схемы включения с общей базой $I_{э} = f(U_{эб})$ при $U_{кб} = 0$.

Ток базы, при котором РТ занимает положение 3, называют минимальным током базы насыщения и обозначают $I_{б.мин}$; соответствующий ему ток коллектора $I_{к3} = I_{кн}$, называют током коллектора насыщенного триода. Из теории известно, что

$$I_{кн} = \beta \cdot I_{б.мин}. \quad (5)$$

В интервале времени $t_3 \dots t_4$ под действием $U_{вх}$ продолжается рост $U_{бэ}$, $I_{б}$ и $I_{к}$. Если в момент времени t_3 $U_{кб} = 0$, то при $t > t_3$ база триода становится более положительной, чем коллектор. Коллекторный переход смещается прямо и начинает инжектировать встречный поток подвижных носителей зарядов в базу (в данном случае электроны), который частично компенсирует поток носителей из эмиттера через базу в коллектор. К моменту времени t_4 , несмотря на увеличение $I_{б}$, ток коллектора $I_{к}$ и напряжение $U_{кэ}$ изменятся незначительно. Ток коллектора возрастет, $I_{к} = I_{к4}$, напряжение $U_{кэ}$ несколько уменьшится, $U_{кэ} = U_{кэ4} = U_{кэ.н}$ (рис.1, д).

В интервале времени $t_4 \dots t_5$ $U_{вх} = c o t$, триод находится в состоянии насыщения. Параметры состояния насыщения:

$U_{кэ4} = U_{кэ.н}$ – напряжение насыщения на участке коллектор-эмиттер;

$U_{бэ}(t_4) = U_{бэ.н}$ – напряжение насыщения на эмиттерном переходе;

$I_{к4}$ – несущественно отличается от $I_{кн}$, поэтому приближенно принимают $I_{к4} \approx I_{кн}$;

$I_{б4} = I_{бн}$ – ток базы насыщения; $I_{бн} = s \cdot I_{б.мин}$, где s – степень насыщения, коэффициент, показывающий во сколько раз реальный ток базы превышает $I_{б.мин}$; у мощных силовых БП триодов s выбирается равным 1,2.....1,5.

В состоянии насыщения для цепей базы и коллектора справедливы выражения

$$U_{вх} = +U_{вх} = U_{бэ.н} + I_{бн} \cdot R_{б}; \quad U_{бэ.н} = +U_{вх} - I_{бн} \cdot R_{б}; \quad (6)$$

$$E_1 = U_{кэ.н} + I_{кн} \cdot R_{к}; \quad I_{кн} = (E_1 - U_{кэ.н}) / R_{к}. \quad (7)$$

Так как $U_{кэ.н}$ на практике составляет доли, или единицы вольт и во много раз меньше E_1 , то приближенно можно считать, что ток коллектора триода в состоянии насыщения определяется величиной напряжения источника питания каскада E_1 и сопротивлением нагрузки R_k

$$I_{кн} = I_{н} \approx \frac{E_1}{R_k} = \frac{E_1}{R_{н}}. \quad (8)$$

В следующих интервалах времени процессы смены состояний триода повторяются в обратном порядке.

Потери в БП триодах в состояниях отсечки, активном и насыщения

Состояние отсечки. В этом состоянии триод закрыт. Состояние характеризуется незначительной мощностью, рассеиваемой триодом (мощность потерь). Действительно, пока триод закрыт, напряжение на коллекторе $U_{кэ} = U_{кэ.отс} \approx E_1$ велико, практически равно E_1 , но ток коллектора $I_{к} = I_{к0}$ очень мал.

У мощных силовых триодов значения максимально допустимых напряжений $U_{кэ.макс}$ находятся в пределах: десятки вольт...сотни вольт; у некоторых типов триодов, например КТ838А, КТ839А, КТ846А, $U_{кэ.макс} = 1500$ В. Значения токов коллектора в состоянии отсечки $I_{к0}$: доли мА.....единицы мА.

Максимально допустимые значения обратного напряжения на эмиттерном переходе $U_{бэ.макс}$ (в справочной литературе обозначается, как $U_{бэ.макс}$, или $U_{бэ.доп}$) обычно не более 5 – 7 вольт; обратный ток эмиттерного перехода $I_{б} = -I_{к0}$.

Мощности потерь на коллекторе $P_{к.отс}$ и в базе $P_{б.отс}$ рассчитываются по формулам

$$P_{к.отс} = I_{к0} \cdot U_{кэ.отс} \approx I_{к0} \cdot E_1; \quad P_{б.отс} = I_{к0} \cdot U_{бэ.макс}, \quad (9)$$

Мощность, выделяемая на нагрузке при $I_{н} = I_{к0}$:

$$P_{н} = I_{к}^2 \cdot R_{н} = I_{к0}^2 \cdot R_{к} = I_{к0}^2 \cdot R_{н} \quad (10)$$

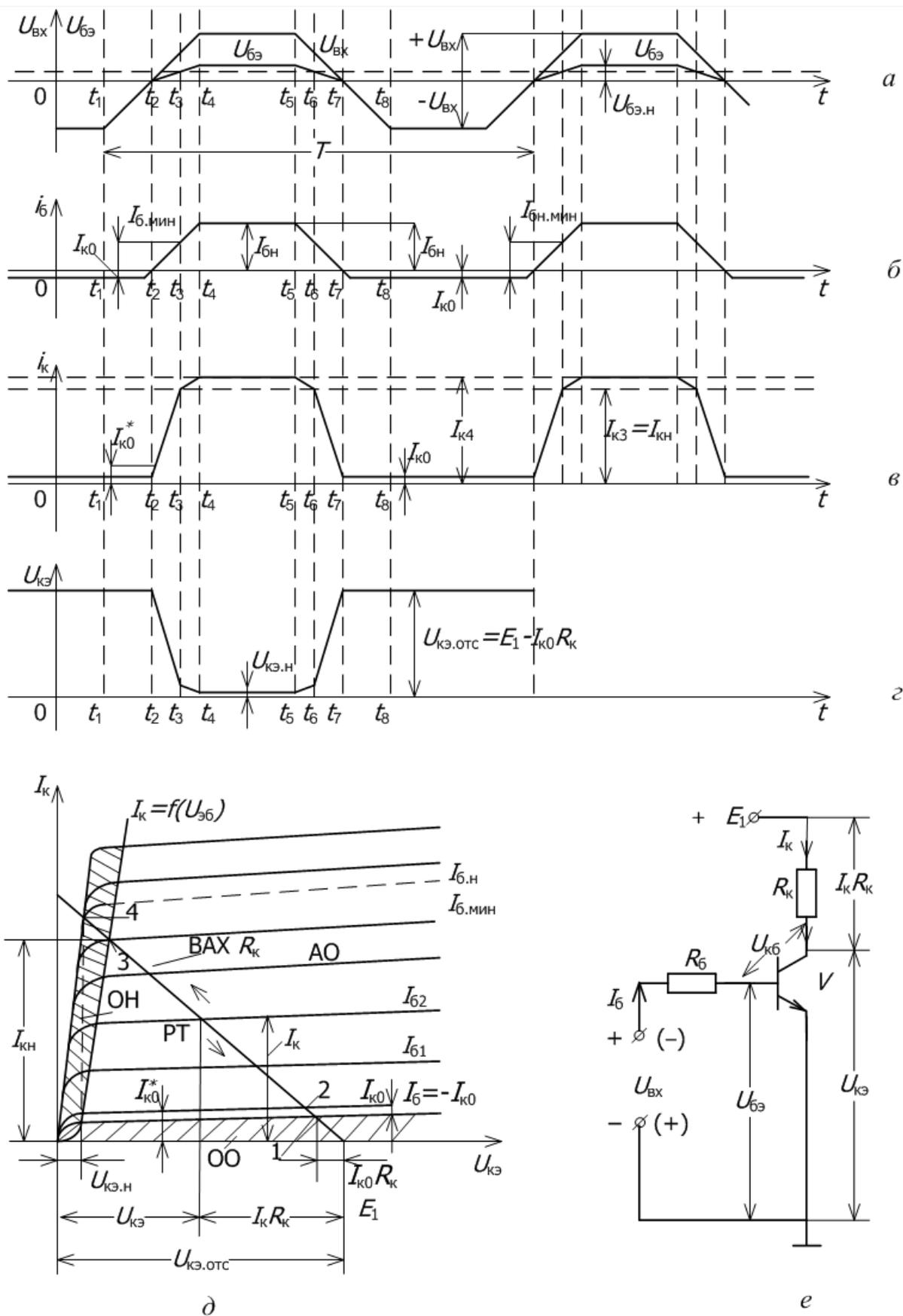


Рис.1

Состояние насыщения. В этом состоянии триод открыт полностью, падение напряжения на участке коллектор – эмиттер насыщенного триода $U_{кэ.н}$ мало, ток коллектора $I_{кн}$ практически ограничивается лишь сопротивлением нагрузки $R_k = R_n$, т.е. $I_{кн} \approx E_1/R_k$. Мощность, рассеиваемая на коллекторе, определяется формулой

$$P_{кн} = I_{кн} \cdot U_{кэ.н}. \quad (11)$$

Мощность потерь в базе

$$P_{б} = U_{бэ.н} \cdot sI_{б.мин} = U_{бэ.н} \cdot I_{б.н}. \quad (12)$$

У мощных триодов значения напряжений $U_{кэ.н}$ находятся в пределах: доли вольт...единицы вольт; значения максимальных токов коллектора: единицы...десятки ампер.

Активное состояние. В этом состоянии РТ перемещается по нагрузочной прямой в активной области. Ток I_k и напряжение $U_{кэ}$ могут быть одновременно достаточно большими, поэтому мощность, рассеиваемая на коллекторе достигает максимума.

Обратимся к первому уравнению (4). Домножив обе части его на I_k , получим формулу, которая устанавливает связь между значениями мощностей: потребляемой от источника питания P_1 , выделяемой в нагрузке P_n и рассеиваемой на коллекторе, при одном и том же токе I_k .

$$E_1 \cdot I_k = U_{кэ} \cdot I_k + I_k^2 \cdot R_k, \quad \text{или} \quad P_1 = P_k + P_n. \quad (13)$$

Несложный анализ позволяет определить условия, при которых $P_k = P_{к.макс}$ (исследование функции на экстремум):

$$P_k = E_1 \cdot I_k - I_k^2 \cdot R_k; \quad \frac{dP_k}{dI_k} = E_1 - 2I_k R_k = 0; \quad I_k = \frac{E_1}{2R_k} \approx \frac{I_{кн}}{2}$$

Подставив последнее выражение I_k в исходное для P_k , получим

$$P_{к.макс} = \frac{E_1^2}{2R_k} - \frac{E_1^2}{4R_k} = \frac{E_1^2}{4R_k} \approx \frac{I_{кн}}{2} \cdot \frac{E_1}{2}. \quad (14)$$

Из (14) следует, что $P_k = P_{к.макс}$ при $I_k \approx 0,5 I_{кн}$, $U_{кэ} \approx 0,5 E_1$, т.е. РТ находится на середине нагрузочной прямой.

Мощность потерь в базе $P_б$ невелика, поскольку эмиттерный переход смещен небольшим прямым напряжением $U_{бэ}$ (около одного вольта), ток базы обычно несколько десятков мА

$$P_б = I_б \cdot U_{бэ} \quad (15)$$

ПРИМЕР

Рассматривается пример построений и расчетов напряжений, токов и мощностей потерь в каскаде на БП триодах КТ864А, или КТ865А. Выбрана согласованная пара триодов с разными типами проводимости и весьма близкими параметрами (КТ864А, $n-p-n$; КТ865А, $p-n-p$) [2].

Справочные данные:

$P_{к.т.макс}$ – максимально допустимая мощность рассеяния на коллекторе триода с теплоотводом.....	100Вт
$U_{кэ.макс}$ – максимально допустимое напряжение на коллекторе в схеме с ОЭ.....	200В
$I_{к.макс}$ – максимально допустимый ток коллектора.....	10А
$I_{к0}^*$ – максимальное значение тока коллектора в схеме с ОЭ.....	100мкА
$U_{бэ.н}$ – напряжение насыщения на эмиттерном переходе.....	1,5В
$U_{бэ.макс}$ – максимально допустимое обратное напряжение на эмиттерном переходе.....	6В
$r_{кэ.н}$ – сопротивление коллектор–эмиттер насыщенного триода...0,2Ом	
$h_{21}(\beta)$ – коэффициент усиления триода по току базы в схеме с общим эмиттером.....	40...200

Предполагается, что входной сигнал низкочастотный, поэтому временные и частотные параметры триода не приводятся.

Исходные данные:

$E_1=100В$; $\beta =100$; $R_к = R_н =20$ Ом. Входное напряжение $u_{вх}(t)$ имеет форму указанную на рис.1, а. Амплитудные значения входного сигнала: $\pm U_{вх} = \pm 5В$. Степень насыщения =1,4.

Задача:

Построить нагрузочные прямые сопротивлений $R_к$ и $R_б$ в координатах характеристик БП триода. Рассчитать напряжения токи и мощности потерь для трех состояний триода: отсечки, насыщения и активного.

Построения и расчеты

Семейства коллекторных и эмиттерной ВАХ триода представлены на рис.2, а, б. Как строятся нагрузочные прямые сопротивлений R_k и R_b ?

1. Нагрузочная прямая сопротивления $R_k = R_H$ на семействе коллекторных ВАХ.

Для коллекторной цепи составляют уравнение

$$E_1 = I_k R_k + U_{кэ}.$$

Чтобы построить прямую, надо задать два формальных условия работы триода:

а) положить в уравнении коллекторной цепи ток $I_k = 0$, тогда напряжение $U_{кэ} = E_1$; таким образом получают точку с координатами $I_k = 0$, $U_{кэ} = E_1$, расположенную на оси напряжений $U_{кэ}$;

б) положить в том же уравнении $U_{кэ} = 0$, тогда $I_k = E_1 / R_k$; вторая точка с координатами $U_{кэ} = 0$, $I_k = E_1 / R_k$ расположена на оси токов I_k .

Координаты точек, согласно исходным данным: $I_k = 0$ А, $E_1 = 100$ В; $U_{кэ} = 0$ В, $I_k = 100 / 20 = 5$ А. Соединив точки, получают нагрузочную прямую, или ВАХ R_k на семействе коллекторных характеристик триода (рис. 2, а).

2. Область отсечки. В состоянии отсечки $I_k = I_{k0} = 100$ мкА. Напряжение на коллекторе (1)

$$U_{кэ,отс} = E_1 - I_{k0} \cdot R_k = 100 - 100 \cdot 10^{-6} \cdot 20 = 100 - 0,002 \approx 100 \text{ В.}$$

Мощность потерь (9)

$$P_{к,отс} = I_{k0} \cdot U_{кэ,отс} = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 0,01 \text{ Вт,}$$

$$P_{б,отс} = I_{k0} \cdot U_{бэ,отс} = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 0,005 \text{ Вт.}$$

Суммарная мощность потерь в состоянии отсечки

$$P_{отс} = P_{к,отс} + P_{б,отс} = 0,01 + 0,005 = 0,015 \text{ Вт.}$$

3. Область насыщения. В состоянии насыщения ток коллектора допустимо принять равным $I_k \approx I_{кн} = 5$ А; $\beta = 100$.

Минимальный ток базы насыщения, согласно (5)

$$I_{кн} = \beta \cdot I_{б,мин}; \quad I_{б,мин} = 5 / 100 = 0,05 \text{ А} = 50 \text{ мА.}$$

Ток базы насыщения при $s = 1,4$

$$I_{бн} = s \cdot I_{б,мин} = 1,4 \cdot 0,05 = 0,07 \text{ А} = 70 \text{ мА.}$$

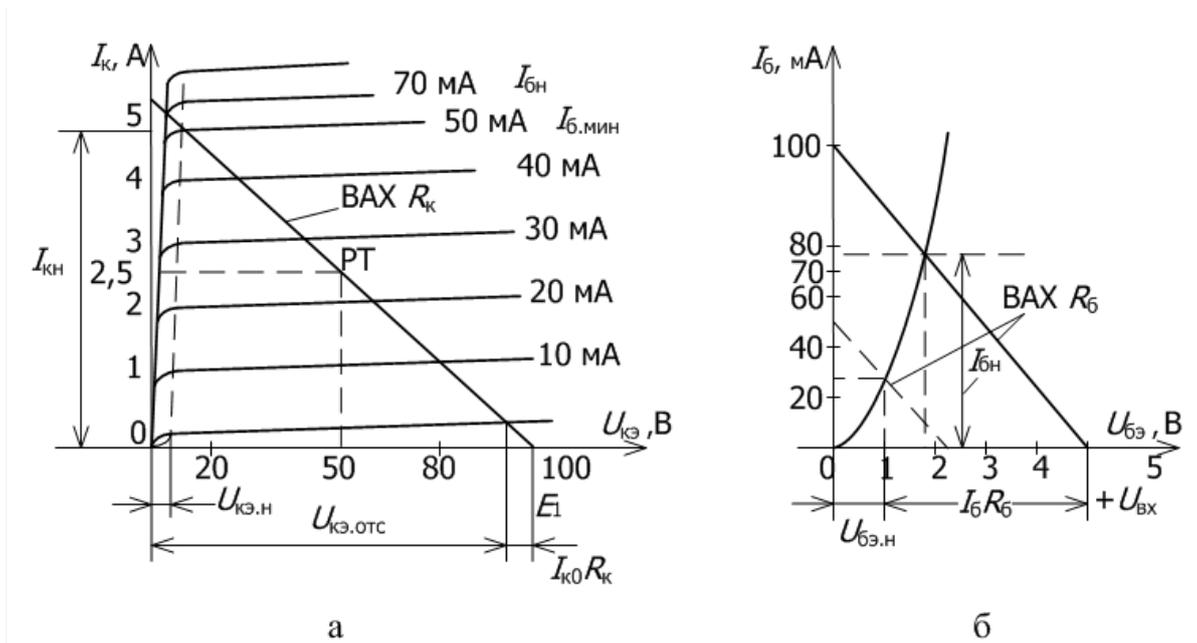


Рис. 2

Теперь, зная, что $I_{бн} = 70\text{мА}$, $U_{бэ.н} = 1,5\text{В}$, $U_{вх} = +5\text{В}$, можно вычислить $R_б$ с помощью уравнения (6)

$$U_{вх} = U_{бэ.н} + I_{бн} \cdot R_б; \quad 5 = 1,5 + 0,07 \cdot R_б; \quad R_б = \frac{5 - 1,5}{0,07} = 50 \text{ Ом.}$$

Нагрузочную прямую сопротивления $R_б$ строят по аналогии с п.1, а, б. Координаты точек для построения прямой (рис.2, б)

$$I_б = 0\text{А}; \quad U_{бэ} = 5\text{В}; \quad I_б = 100\text{мА}; \quad U_{бэ} = 0\text{В.}$$

Мощность потерь (11, 12)

$$P_{кн} = I_{кн} \cdot U_{кэ.н} = I_{кн}^2 \cdot r_{кэ.н} = 25 \cdot 0,2 = 5\text{Вт},$$

$$P_{бн} = I_{бн} \cdot U_{бэ.н} = 0,07 \cdot 1,5 = 0,105\text{Вт.}$$

Суммарная мощность потерь в состоянии насыщения

$$P_{нас} = P_{кн} + P_{бн} = 5 + 0,105 = 5,105\text{Вт.}$$

Для сравнения целесообразно рассчитать мощность, которая выделяется в режиме насыщения на нагрузке

$$P_{нагр} = I_{кн}^2 \cdot R_к = I_{н}^2 \cdot R_н = 25 \cdot 20 = 500\text{Вт.}$$

4. Активная область. В активной области ток коллектора (ток нагрузки) изменяется от $I_{к0} \approx 0$ до $I_{кн} \approx 5\text{А}$. Задаваясь значениями $I_к$ проведем расчеты и построения графиков зависимостей $P_1 = f(I_к)$; $P_{нагр} = f(I_к)$, $P_к = f(I_к)$. По условию $R_к = 20\text{Ом}$, $E_1 = 100\text{В}$; для упрощения расчетов положим $U_{кэ.н} \approx 0\text{В}$. Результаты расчетов и графики приведены в таблице и на рис.3. Здесь: $P_1 = I_к \cdot E_1$ — мощность, потребляемая от источника питания E_1 ;

$P_{\text{нагр}} = I_{\text{к}}^2 \cdot R_{\text{к}} = I_{\text{н}}^2 \cdot R_{\text{к}}$ – мощность, рассеиваемая на нагрузке;
 $P_{\text{к}} = P_1 - P_{\text{нагр}}$ – мощность, рассеиваемая на коллекторе триода.

Таблица

$I_{\text{к}}, \text{A}$	0	1	2	2,5	3	4	5
$P_1, \text{Вт}$	0	100	200	250	300	400	500
$P_{\text{нагр}}, \text{Вт}$	0	20	80	125	180	320	500
$P_{\text{к}}, \text{Вт}$	0	80	120	125	120	80	0

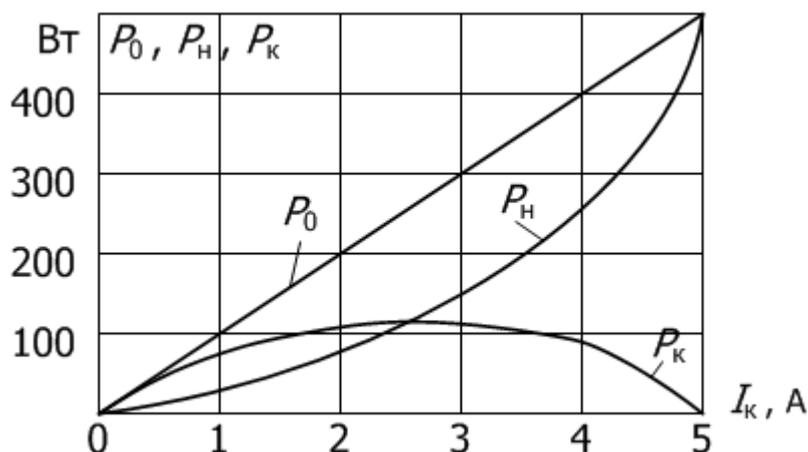


Рис.3

Максимальная мощность потерь на коллекторе триода $P_{\text{к.макс}}$ имеет место при $I_{\text{к}} = 0,5 \cdot I_{\text{кн}}$ и $U_{\text{кз}} = 0,5E_1$: $P_{\text{к.макс}} = 125 \text{Вт}$. Характер зависимостей (рис.3) типичен для активного режима работы любого триода.

Мощность потерь в базе. При уменьшении $U_{\text{вх}}$ нагрузочная прямая $R_{\text{б}}$ смещается влево (рис.2, б), не меняя наклона, так как сопротивление $R_{\text{б}}$ остается постоянным. Положению РТ на середине ВАХ $R_{\text{к}}$ (рис.2, а) соответствуют примерно следующие значения тока базы и напряжения на эмиттерном переходе: $I_{\text{б}} \approx 25 \text{мА}$, $U_{\text{бэ}} \approx 1,1 \text{В}$, тогда мощность потерь в базе триода

$$P_{\text{б}} = I_{\text{б}} \cdot U_{\text{бэ}} = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 = 0,0275 \text{Вт}.$$

$P_{\text{б}}$ – пренебрежимо мала, по сравнению с $P_{\text{к.макс}}$, поэтому учитывать ее на графиках рис.3 не имеет смысла.

Выводы:

В области отсечки триод практически закрыт (выключен),
 $I_k = I_{k0} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ А} \approx 0$; $P_{\text{отс}} = 0,015 \text{ Вт}$; $P_{\text{нагр}} \approx 0$.

В области насыщения триод полностью открыт (включен),
 $I_k = I_{\text{кн}} = 5 \text{ А}$; $P_{\text{нас}} = 5,105 \text{ Вт}$; $P_{\text{нагр}} = 500 \text{ Вт}$.

В активной области током коллектора можно управлять с помощью тока базы, при этом значения мощностей P_k и $P_{\text{нагр}}$ меняются в широких пределах:

$$0 \text{ Вт} \leq P_{\text{нагр}} \leq 500 \text{ Вт}; \quad 5 \text{ Вт} \leq P_k \leq 125 \text{ Вт}.$$

Согласно справочным данным $P_{\text{к.т.макс}}$ – максимально допустимая мощность рассеяния на коллекторе с теплоотводом для триодов КТ864А или КТ865А не должна превышать 100Вт. Следовательно, применение триодов данного типа в активном режиме с нагрузкой, указанной в исходных данных, недопустимо.

Большая мощность P_k , рассеиваемая на коллекторном переходе, приводит к разогреву последнего. Если при этом температура перехода начинает нарастать, то неизбежен тепловой пробой и разрушение триода.

ВНИМАНИЕ!

В перечне параметров, который представляет предприятие – изготовитель, в качестве справочных данных, дается выписка из технических условий (ТУ) на эксплуатацию прибора, например: Максимальная рассеиваемая мощность в триоде без радиатора $P_{\text{к.макс}} = 5 \text{ Вт}$, с радиатором (теплоотводом) $P_{\text{к.т.макс}} = 100 \text{ Вт}$, **если температура коллекторного перехода $t_{\text{кп}}$ не превышает 25° С** . В некоторых справочниках выписки из ТУ, содержащие эту важную информацию, отсутствуют.

В действительности значительно меньшая, чем $P_{\text{к.т.макс}}$, рассеиваемая мощность, может привести к выходу из строя триода и схемы, собранной на его основе. Чтобы обеспечить работоспособность прибора прибегают к различным средствам, как то:

- а) увеличивают охлаждающую поверхность радиатора;
- б) применяют искусственное охлаждение – воздушное (вентилятор), водяное, элементы Пельтье;
- в) включают параллельно группу однотипных триодов, работающих на одну нагрузку.

На практике для управления мощной нагрузкой триоды используют в режиме ключа.

2. Работа БП триода в режиме ключа (режим D).

Показатели режима

На рис.4 изображены схема устройства, в состав которого входят: широтно-импульсный модулятор (ШИМ), каскад на БП триоде, включенном с ОЭ, и диаграмма напряжений и токов, поясняющая работу триода в режиме ключа. Устройство принято называть усилителем среднего значения тока, напряжения, мощности.

ШИМ представляет собой преобразователь напряжения сигнала U_c , формирующий на выходе знакопеременное напряжение строго прямоугольной формы $u_{\text{упр}}(t)$, которое для каскада на БП триоде является входным. Параметры $u_{\text{упр}}(t)$: $T = \text{const}$ – период; $T_{\text{и}}$ и $T_{\text{п}}$ интервалы времени, соответствующие положительному и отрицательному значениям $u_{\text{упр}}(t)$.

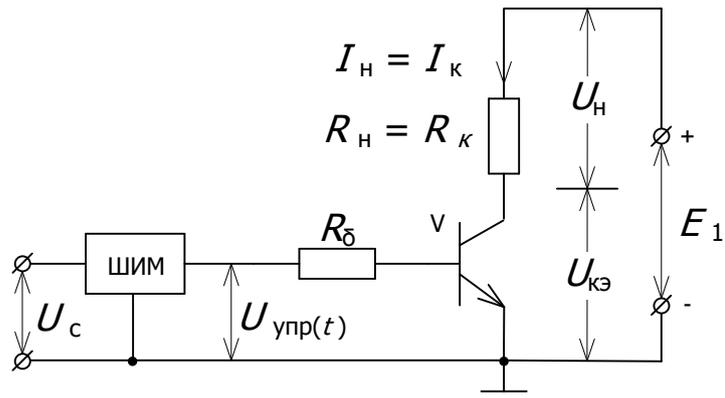
В интервале времени $T_{\text{и}}$ под действием $u_{\text{упр}}(t) = +U_{\text{упр}}$ триод открыт и насыщен: $I_{\text{к}} = I_{\text{кн}}$, $U_{\text{кэ}} = U_{\text{кэ.н}}$; $T_{\text{и}}$ – интервал импульса тока коллектора (рис. 4, г, д).

В интервале времени $T_{\text{п}}$ под действием $u_{\text{упр}}(t) = -U_{\text{упр}}$ триод закрыт, находится в состоянии отсечки: $I_{\text{к}} = I_{\text{к0}} \approx 0$, $U_{\text{кэ}} = U_{\text{кэ.отс}} \approx E_1$; $T_{\text{п}}$ – интервал паузы.

Смена знаков $u_{\text{упр}}(t)$ происходит мгновенно, поэтому и переход триода из одного состояния в другое и обратно происходит также мгновенно. Время, в течение которого РТ «пробегает» активную область, где мощность потерь наибольшая, в идеале равно нулю, таким образом, потери в триоде за период T определяется, как сумма только двух небольших по значению составляющих: потерь в состоянии насыщения $P_{\text{к.нас}}$ и в состоянии отсечки $P_{\text{к.отс}}$. Более того, мощность потерь в состоянии отсечки, как и мощность, выделяющаяся при этом в нагрузке $P_{\text{нагр.отс}}$, настолько малы, что ими обычно пренебрегают.

Описанные условия работы справедливы лишь в том случае если частота переключения БПТ невелика и, помимо $P_{\text{к.отс}}$, можно пренебречь и потерями на переключение, или динамическими потерями $P_{\text{д}}$. Расчет значений $P_{\text{д}}$ рассматривается отдельно.

Длительность импульса $T_{\text{и}}$ зависит от уровня напряжения U_c на входе ШИМ (рис.4, б, г). Изменяя U_c , а значит $T_{\text{и}}$, можно управлять значительными по величине током, напряжением и мощностью в нагрузке с небольшими потерями в триоде, что является главным достоинством режима ключа (режима D)



а

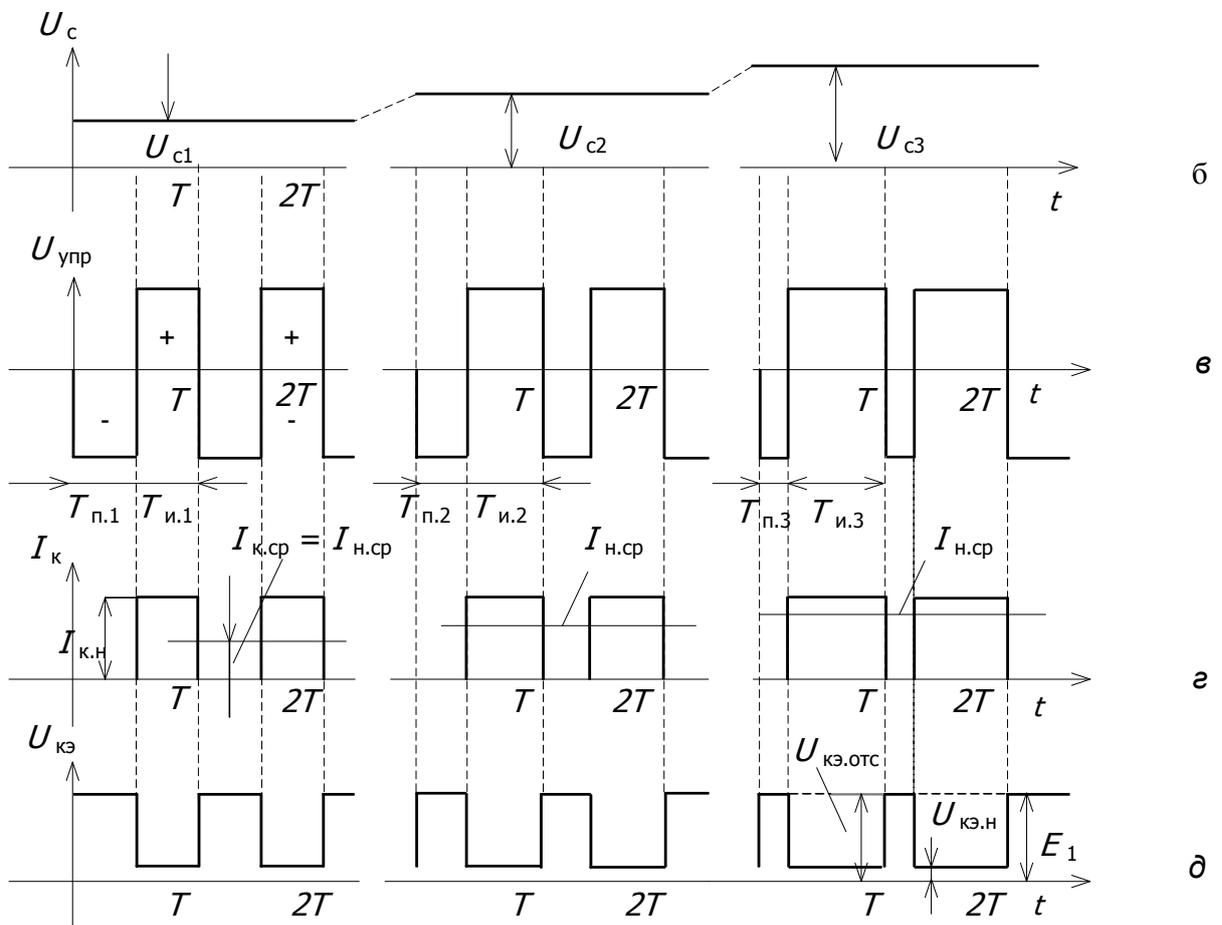


Рис.4

Показатели режима ключа

Отношение длительности импульса $T_{и}$ к периоду T называют коэффициентом заполнения и обозначают $K_3 = T_{и}/T$. Коэффициент заполнения может изменяться в пределах: $0 \dots 1$.

Среднее за период значение тока нагрузки (коллектора)

$$I_{н.ср} = I_{к.ср} = \frac{1}{T} \int_0^{T_{и}} I_{кн} dt = \frac{T_{и}}{T} I_{кн} = K_3 I_{кн}. \quad (16)$$

Так как $I_{кн} = (E_1 - U_{кэ.н})/R_{н}$, то после подстановки в (16) получим

$$I_{н.ср} \cdot R_{н} = U_{н.ср} = K_3 \cdot (E_1 - U_{кэ.н}). \quad (17)$$

Средняя за период мощность, потребляемая от источника питания E_1

$$P_1 = I_{н.ср} \cdot E_1 = K_3 I_{кн} \cdot E_1. \quad (18)$$

Напряжение на нагрузке в состоянии насыщения $U_{нагр.н}$ меньше E_1 на величину $U_{кэ.н}$: $U_{нагр.н} = E_1 - U_{кэ.н}$, поэтому средняя мощность, выделяемая в нагрузке (полезная мощность)

$$P_{нагр.ср} = I_{н.ср} \cdot (E_1 - U_{кэ.н}) = K_3 \cdot I_{кн} \cdot (E_1 - U_{кэ.н}). \quad (19)$$

Коэффициент полезного действия (к.п.д.) режима ключа

$$\eta = \frac{P_{нагр.ср}}{P_1} = 1 - \frac{U_{кэ.н}}{E_1}. \quad (20)$$

Средняя за период мощность, рассеиваемая триодом без учета потерь в базе, определяется выражением

$$P_{потерь} = P_{к.нас} = I_{н.ср} \cdot U_{кэ.н} = K_3 \cdot I_{кн} \cdot U_{кэ.н}. \quad (21)$$

Коэффициент использования триода по мощности в режиме ключа

$$K_{исп.тр} = \frac{P_{нагр.ср}}{P_{к.нас}} = \frac{K_3 I_{кн} (E_1 - U_{кэ.н})}{K_3 I_{кн} U_{кэ.н}} \approx \frac{E_1}{U_{кэ.н}}. \quad (22)$$

ПРИМЕР

Рассматривается пример расчета показателей режима ключа в усилителе среднего значения тока, напряжения, мощности (рис.4, а), собранном на БП триоде КТ834В [2].

Справочные данные:

$P_{к.т.макс}$	100Вт.
$U_{кэ.макс}$	400В.
$I_{к.макс}$	10А.
$I_{к0}$	3мА.
$r_{к.эН}$	0,13 Ом.

Исходные данные:

$E_1 = 61В$; $R_к = R_н = 10 Ом$; напряжение $u_{упр}(t)$ – знакопеременное, прямоугольной формы (рис.4, в).

Задача:

Рассчитать показатели режима ключа, согласно выражениям (16...22). Для упрощения расчетов потери в триоде на переключение и в состоянии отсечки принимаются равными нулю.

Расчеты

Для расчета $I_{кн}$, в соответствии с (16), необходимо знать величину $U_{кэ.н}$. В справочных данных имеются сведения о сопротивлении участка коллектор – эмиттер насыщенного триода, поэтому первое уравнение (7) переписывается в виде

$$E_1 = I_{кн} \cdot r_{кэ.н} + I_{кн} \cdot R_н,$$

отсюда

$$I_{кн} = \frac{E_1}{R_н + r_{кэ.н}} = \frac{61}{10 + 0,13} = 6,02А; U_{кэ.н} = I_{кн} \cdot r_{кэ.н} = 0,783В.$$

Среднее за период значение тока нагрузки (16)

$$I_{н.ср} = K_3 \cdot I_{кн} = K_3 \cdot 6,02А.$$

Среднее за период напряжение на нагрузке (17)

$$U_{н.ср} = K_3 \cdot (E_1 - U_{кэ.н}) = K_3 \cdot (61 - 0,783) = K_3 \cdot 60,2В.$$

Средняя за период мощность, потребляемая питания (18)

$$P_1 = K_3 \cdot I_{кн} \cdot E_1 = K_3 \cdot 6,02 \cdot 61 = K_3 \cdot 367,2Вт.$$

Средняя мощность, выделяемая в нагрузке (19)

$$P_{нагр} = K_3 \cdot I_{кн} (E_1 - U_{кэ.н}) = K_3 \cdot 6,02 \cdot 60,2 = K_3 \cdot 362,4Вт.$$

Средняя за период мощность, рассеиваемая в триоде (21)

$$P_{\text{потерь}} \approx P_{\text{к.нас}} = K_3 \cdot I_{\text{кн}} \cdot U_{\text{кэ.н}} = K_3 \cdot 6,02 \cdot 0,783 = K_3 \cdot 4,714 \text{ Вт.}$$

Коэффициент использования триода по мощности (22)

$$K_{\text{исп.тр}} \approx \frac{E_1 - U_{\text{кэ.н}}}{U_{\text{кэ.н}}} = \frac{61 - 0,783}{0,783} \approx 77.$$

Высокий коэффициент использования триодов по мощности является отличительной особенностью усилителей, работающих в режиме D . В усилителях гармонического сигнала $K_{\text{исп.тр}}$ в большинстве случаев меньше или сравним с 1.

Приведенные и рассчитанные в примере показатели дают возможность в целом оценить энергетические характеристики режима ключа, когда триод допустимо считать безынерционным прибором (предполагаются низкие частоты переключения).

В современных схемах усиления среднего значения тока, напряжения, мощности, в схемах всевозможных преобразователей (конверторах, инверторах) мощные силовые приборы, в том числе, БП триоды, полевые триоды – $MOSFET$ работают в режиме D , причем на очень высоких частотах: десятки и сотни кГц. Высокая частота переключения позволяет значительно уменьшить уровни пульсаций преобразуемых напряжения и тока при малых габаритах и весе сглаживающих фильтров.

В то же самое время при высокой частоте переключения триод уже нельзя рассматривать как безынерционный прибор. Приходится учитывать время, а значит и мощность потерь на переключение (переход из состояния отсечки в состояние насыщения и обратно через активную область). На высоких частотах длительность переходных процессов в триоде становится соизмеримой с периодом работы T .

3. Потери на переключение в БП триоде, работающем на различные виды нагрузок в режиме D

Расчет мощности, рассеиваемой в триоде в состояниях отсечки и насыщения, известен из предыдущего параграфа. Далее предлагается рассмотреть потери на переключение, которые становятся заметными на высоких частотах; их называют динамическими P_d .

Расчет мощности динамических потерь начинают с определения энергии динамических потерь за один цикл переключения W_d . Энергия W_d

зависит от траектории перемещения РТ по активной области, а траектория, в свою очередь, определяется характером нагрузки в цепи коллектора.

Активная нагрузка

Диаграмма напряжений, тока I_k , энергии W_d , схема каскада, семейство коллекторных ВАХ с нагрузочной прямой приведены на рис.5. Графики $i_k(t)$, $u_{кэ}(t)$ изображены с учетом временных интервалов переключения триода: $t_{вкл}$ и $t_{рас} + t_c$.

На практике активной нагрузкой может быть тепло-электронагревательный элемент (ТЭН) сушильной печи, паяльника и т.д.

Переключение триода обеспечивается действием переменного напряжения прямоугольной формы $u_{упр}(t)$ (рис.5 ,а). До момента времени, условно принятого за $t = 0$, триод находится в состоянии отсечки, РТ – в положении 1

$$u_{упр}(t) = -U_{упр}; I_k = I_{к0}; U_{кэ} = U_{кэ.отс} \approx E_1; I_k = -I_{к0}.$$

В момент времени $t = 0$ напряжение $u_{упр}(t)$ скачком меняет знак $u_{упр}(t) = +U_{упр}$, триод включается и РТ перемещается по нагрузочной прямой через АО из положения 1 в положение 2. При этом включение (отпирание) триода происходит не мгновенно, а за короткий, но конечный промежуток времени, называемый временем включения (на графике $t_{вкл} = t_+$). Согласно теории в этом интервале включения ток I_k нарастает, а напряжение $u_{кэ}$ спадает по закону экспоненты

$$i_k(t) = I_{кн} \cdot [1 - \exp(-t/\tau_\beta)]; u_{кэ}(t) \approx E_1 \cdot \exp(-t/\tau_\beta), \quad (23)$$

где τ_β – постоянная времени коэффициента усиления β в схеме включения триода с ОЭ (обычно τ_β – доли мкс); $I_{кн} = I_n$ – ток коллектора и нагрузки насыщенного триода.

По истечении времени $t = t_{вкл} = t_+$ РТ переходит в положение 2, что соответствует состоянию насыщения

$$I_k = I_{кн} = I_n; U_{кэ} = U_{кэ.н}; I_\delta = I_{\delta н} = s \cdot I_{\delta.мин}; U_n = E_1 - U_{кэ.н} \approx E_1.$$

В момент времени $t = t_1$ напряжение $u_{упр}(t)$ вновь меняет знак $u_{упр}(t) = -U_{упр}$, эмиттерный переход смещается обратно, начинается процесс выключения триода. Интервал выключения $t_{выкл} = t_{рас} + t_c = t_-$. Здесь $t_{рас}$ – время рассасывания неосновных носителей в базе; на этом этапе триод

остается насыщенным ($I_K = I_{KH}$; $U_{KЭ} = U_{KЭ.Н}$), пока из базы, под действием $-U_{упр}$, не будут выведены избыточные неосновные носители зарядов. На следующем этапе, время спада t_c , триод закрывается, при этом ток коллектора i_K спадает, а напряжение $U_{KЭ}$ нарастает по закону экспоненты. РТ перемещается по нагрузочной прямой из положения 2 в положение 1

$$i_K(t) = I_{KH} \cdot \exp(-t/\tau_\beta), \quad u_{KЭ}(t) = E_1 \cdot [1 - \exp(-t/\tau_\beta)]. \quad (24)$$

Как показывает практика, если степень насыщения триода $s = 1,2..1,5$, то в первом приближении допустимо считать законы изменения $i_K(t)$ и $u_{KЭ}(t)$ в интервалах t_+ и t_- линейными, тогда уравнения (23) и (24) можно представить в виде соответственно

$$i_K(t) = I_{KH} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_+}\right), \quad u_{KЭ}(t) \approx E_1 \cdot \frac{t}{t_+}; \quad (25)$$

$$i_K(t) = I_{KH} \cdot \frac{t}{t_-}, \quad u_{KЭ}(t) = E_1 \cdot \left(1 - \frac{t}{t_-}\right). \quad (26)$$

Значения времени включения и выключения силовых триодов, предназначенных для управления мощными нагрузками, как правило, даются в справочной литературе. Если этих сведений нет, то следует ориентироваться на значения постоянной времени τ_β . Экспоненциальный процесс нарастания или спада i_K , $u_{KЭ}$ считается законченным по истечении времени $t \approx 3\tau_\beta$. Следовательно, можно принять $t_+ \approx 3\tau_\beta$, а $t_- \approx 3\tau_\beta + t_{рас}$.

Энергия динамических потерь за один цикл переключения определяется суммой $W_d = W_{д.вкл} + W_{д.выкл}$

$$W_d = \int_0^{t_+} i_K(t) u_{KЭ}(t) dt + \int_0^{t_-} i_K(t) u_{KЭ}(t) dt \quad (27)$$

Подставляя (25) и (26) в (27), получим

$$W_d \approx E_1 \cdot I_{KH} \left[\int_0^{t_+} \left(1 - \frac{t}{t_+}\right) \frac{t}{t_+} dt + \int_0^{t_-} \frac{t}{t_-} \left(1 - \frac{t}{t_-}\right) dt \right],$$

после интегрирования

$$W_d \approx E_1 I_{KH} \cdot \frac{t_+ + t_-}{6}. \quad (28)$$

Мощность потерь на переключение

$$P_{\text{д}} = \frac{W_{\text{д}}}{T} = W_{\text{д}} \cdot f = E_1 I_{\text{кн}} \cdot \frac{t_+ + t_-}{6T} = E_1 I_{\text{кн}} \cdot \frac{t_+ + t_-}{6} \cdot f,$$

где $f = 1/T$ — частота переключения.

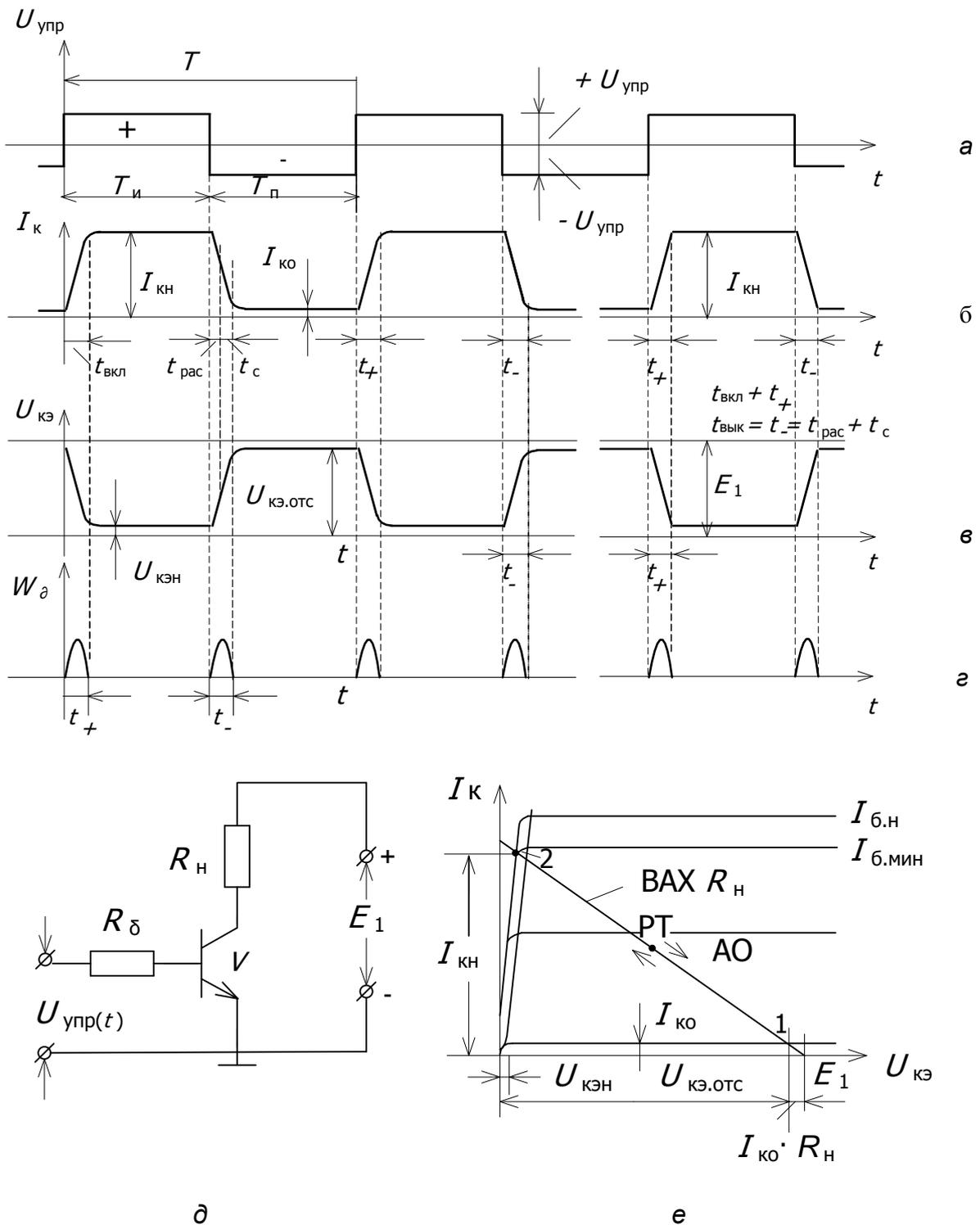


Рис.5

Если интервалы включения и выключения близки или соизмеримы $t_+ \approx t_-$, то их обозначают общим термином – время коммутации t_s . С учетом принятых обозначений, мощность динамических потерь в БП триоде, работающем в режиме D на активную нагрузку, определяется выражением

$$P_d = E_1 I_{\text{кн}} \cdot \frac{t_s}{3T} = E_1 I_{\text{кн}} \frac{t_s}{3} f = \frac{E_1^2}{R_n} \cdot \frac{t_s}{3} \cdot f. \quad (29)$$

ПРИМЕР

Триод серии КТ827А работает в режиме D ; частота переключения $f = 10$ кГц, $T = 10^{-4}$ с; $I_{\text{кн}} = 3$ А; $I_{\text{бн}} = 40$ мА. Напряжение источника питания $E_1 = 30$ В.

Рассчитать полную мощность потерь в триоде, том числе P_d , мощность потерь на переключение.

Типовые значения параметров КТ827А, для расчета [1, 2].

Время включения..... $t_{\text{вкл}} = 0,5$ мкс.

Время выключения..... $t_{\text{выкл}} = 4$ мкс.

Время рассасывания неосновных носителей в базе..... $t_{\text{рас}} = 3$ мкс.

Напряжение насыщения $U_{\text{кэ.н}}$ при $I_{\text{к}} = 10$ А.....1,45 В.

Напряжение насыщения на эмиттерном переходе $U_{\text{бэ.н}}$3 В.

Обратный ток коллектора в схеме с ОЭ $I_{\text{ко}}^*$3 мА.

Внимание. Перечень параметров не содержит сведений о значении τ_{β} , но даны величины $t_{\text{вкл}}$, $t_{\text{рас}}$ и $t_{\text{выкл}}$ (t_c), по которым определяются t_+ и t_-

$$t_+ = t_{\text{вкл}} = 0,5 \text{ мкс}; \quad t_- = t_{\text{выкл}} + t_{\text{рас}} = 4 + 3 = 7 \text{ мкс}.$$

Существенная разница между значениями $t_{\text{вкл}}$ и $t_{\text{выкл}}$ объясняется тем, что триоды серий КТ827, КТ825 являются составными, т.е. построены по схеме Дарлингтона.

Период работы триода в режиме ключа, согласно условию, $T = 100$ мкс. Общее время на переключение за период $t_+ + t_- = 7,5$ мкс,

Отсюда следует, что максимальная длительность импульса $T_{\text{и.макс}} = T - (t_+ + t_-) = 92,5$ мкс; максимальное значение коэффициента заполнения $K_3 = T_{\text{и.макс}} / T \approx 0,93 = K_{3.\text{макс}}$.

Расчеты

Потери в состоянии насыщения

1) Мощность потерь на коллекторном переходе при $K_{3.\text{макс}} = 0,92$

$$P_{\text{кн}} = K_{3.\text{макс}} \cdot I_{\text{кн}} \cdot U_{\text{кэ.н}} = 0,92 \cdot 3 \cdot 1,45 = 4 \text{ Вт}.$$

2) Мощность потерь в цепи базы

$$P_{\text{бн}} = K_{\text{з.макс}} \cdot U_{\text{бэ.н}} \cdot I_{\text{бн}} = 0,92 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 0,11 \text{ Вт} .$$

Потери в состоянии отсечки

Максимальная мощность потерь на коллекторе в этом состоянии имеет место при $T_{\text{и}} = 0$ ($K_{\text{з}} = 0$, триод закрыт в течение всего периода).

$$P_{\text{к.отс}} = I_{\text{к0}}^* \cdot E_1 = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 0,09 \text{ Вт} .$$

При $K_{\text{з.макс}}$

$$P_{\text{к.отс}} = (1 - K_{\text{з.макс}}) \cdot P_{\text{к.отс}} = (1 - 0,92) \cdot 0,09 = 0,0072 \text{ Вт}.$$

Мощность потерь в цепи базы, в состоянии отсечки, меньше $P_{\text{к.отс}}$, поэтому не рассчитывается ввиду незначительности.

Потери на переключение $P_{\text{д}}$ не зависят от коэффициента заполнения (28)

$$P_{\text{д}} = E \cdot I_{\text{кн}} \frac{t_+ + t_-}{6} f = 30 \cdot 3 \frac{(0,5+7)10^{-6}}{6} \cdot 10^4 = 1,125 \text{ Вт}.$$

Полная мощность потерь в триоде

$$P_{\text{пот}} = P_{\text{кн}} + P_{\text{бн}} + P_{\text{к.отс}} + P_{\text{д}} = 4 + 0,11 + 0,0072 + 1,125 = 5,25 \text{ Вт}.$$

Большая часть потерь рассеивается коллекторным переходом

$$P_{\text{пот}} \approx P_{\text{кн}} + P_{\text{д}} = 4 + 1,125 = 5,125 \text{ Вт}.$$

Активная нагрузка с против-э.д.с.

Схема каскада и семейство коллекторных ВАХ с нагрузочной прямой изображены на рис.6 а, б.

Примером такой нагрузки может быть аккумуляторная батарея (АБ) с сопротивлением $R_{\text{к}} = R_{\text{н}}$, ограничивающим ток коллектора. В этом случае каскад является частью, например, электронного зарядного устройства АБ.

Действие против-э.д.с. $E_{\text{АБ}}$ равносильно уменьшению E_1 на величину $E_{\text{АБ}}$, поэтому динамические потери при наличии против-э.д.с. формально уменьшаются (если сравнивать с работой триодного ключа на чисто активную нагрузку). Траектория РТ в процессе переключения, как и в

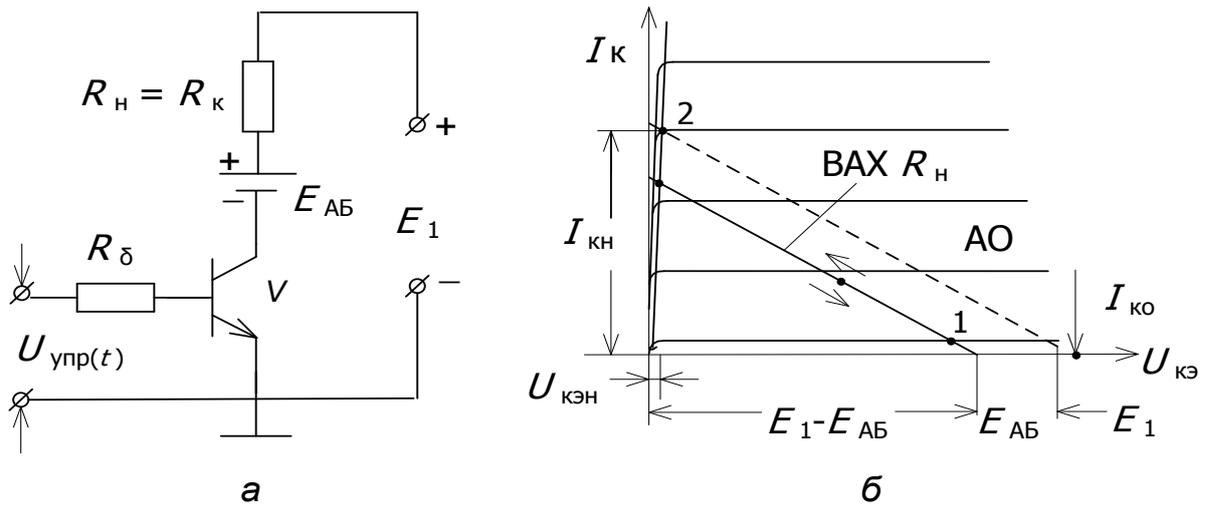


Рис.6

предыдущем случае, совпадает с нагрузочной прямой. Энергия и мощность динамических потерь определяются выражениями

$$W_{\text{д}} = (E_1 - E_{\text{АБ}}) \cdot I_{\text{кн}} \cdot \frac{t_+ + t_-}{6} ; \quad P_{\text{д}} = (E_1 - E_{\text{АБ}}) \cdot I_{\text{кн}} \cdot \frac{t_+ + t_-}{6} \cdot f ,$$

или при $t_+ \approx t_- = t_s$

$$P_{\text{д}} = (E_1 - E_{\text{АБ}}) \cdot I_{\text{кн}} \cdot \frac{t_s}{3} f \quad , \quad P_{\text{д}} = \frac{(E_1 - E_{\text{АБ}})^2}{R_{\text{к}}} \cdot \frac{t_s}{3} \cdot f .$$

Активно – индуктивная нагрузка

При активной нагрузке РТ перемещается по нагрузочной прямой (рис. 5, е). Ею и ограничивается траектория рабочей точки. При активно-индуктивной (RL) нагрузке процессы переключения сложнее.

На рис. 7 изображены диаграмма напряжений, тока и энергии потерь, схема каскада и семейство коллекторных ВАХ с нагрузочной прямой и траекторией РТ. В наиболее простом случае RL -нагрузка – это, например, обмотка сглаживающего дросселя с индуктивностью L , включенного последовательно с сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$.

На практике активно – индуктивной нагрузкой может быть не только сглаживающий L – фильтр, но и более сложный, начинающийся с индуктивности, LC – фильтр (при условии, что индуктивная реакция электрической цепи больше емкостной); обмотки электрического двигателя или генератора, контактора или магнитного пускателя; первичная обмотка импульсного трансформатора или накопительного дросселя высокочастотных транзисторных преобразователей.

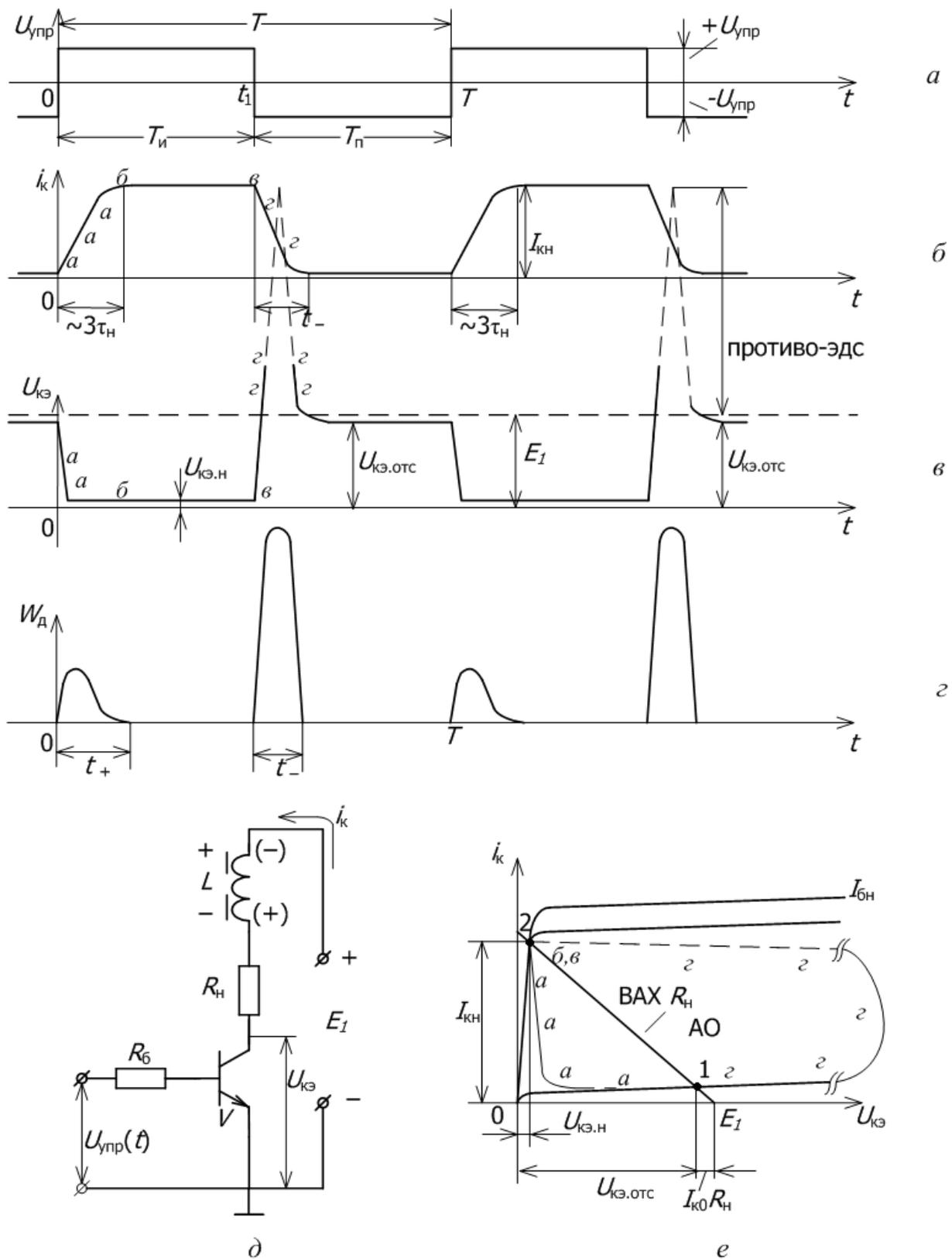


Рис.7

Рассмотрим процессы в схеме (рис.7. д). До момента времени, условно принятого за $t = 0$, триод находится в состоянии отсечки, РТ в положении 1

$$u_{упр}(t) = -U_{упр}; \quad I_{б} = -I_{к0}; \quad I_{к} = I_{к0}; \quad u_{кэ} = U_{кэ.отс} \approx E_1.$$

В момент времени $t = 0$ напряжение $u_{\text{упр}}(t)$ скачком меняет знак $u_{\text{упр}}(t) = +U_{\text{упр}}$, триод включается. В чем отличия процесса включения от случая работы на чисто активную нагрузку?

Время включения триода определяется параметром τ_{β} , характеризующим его быстродействие, и равно примерно $3\tau_{\beta}$, что составляет на практике: доли мкс единицы мкс. Значит по истечении времени $t_{\text{вкл}} \approx 3\tau_{\beta}$ напряжение $u_{\text{кэ}}(t)$ снизится до уровня $U_{\text{кэ.н}}$ (рис.7, в) и практически все напряжение источника питания E_1 будет приложено к RL -нагрузке. На концах обмотки дросселя появится противо-э.д.с. самоиндукции, которая, согласно закону Джоуля – Ленца, препятствует причине, ее вызывающей, т.е. росту тока $i_{\text{к}} = i_{\text{н}}$, (знаки противо-э.д.с. без скобок на рис.7, д). Рост тока запаздывает, отстает от изменений напряжения на коллекторе.

Из курса электротехники известно, что ток в RL -цепи может нарастать по закону экспоненты с постоянной времени $\tau_{\text{н}} = L/R_{\text{н}}$. Обычно $\tau_{\text{н}}$

на несколько порядков больше τ_{β} , поэтому ток коллектора $i_{\text{к}}$ установится на уровне $I_{\text{кн}}$ намного позже, чем при активной нагрузке, а именно за время $\approx 3\tau_{\text{н}}$. Появление противо-э.д.с. самоиндукции, препятствующей росту тока указывает на то, что в цепи нагрузки, точнее в магнитном поле сердечника дросселя, накапливается энергия.

Обратимся к графикам $i_{\text{к}}(t)$ $u_{\text{кэ}}(t)$ и семейству коллекторных ВАХ с траекторией РТ (рис.7, б, в, г). Процессы изменения $i_{\text{к}}(t)$ и $u_{\text{кэ}}(t)$ отмечены одноименными точками «а», «б», «в», «г».

Итак, после включения триода напряжение $u_{\text{кэ}}$ быстро спадает до уровня $U_{\text{кэ.н}}$ при замедленном росте тока $i_{\text{к}} = i_{\text{н}}$ (точки «а» на рис.7, б, в, е). По истечении времени $\approx 3\tau_{\text{н}}$ РТ займет положение 2. На графике, изображающем траекторию РТ, с положением 2 совмещены точки «б» и «в». Далее, вплоть до момента времени $t = t_1$ ток коллектора $i_{\text{к}}$ и напряжение $u_{\text{кэ}}$ останутся постоянными и равными $I_{\text{кн}}$ и $U_{\text{кэ.н}}$ соответственно. Отметим, что траектория РТ на семействе коллекторных ВАХ не совпадает с нагрузочной прямой.

В момент времени $t = t_1$ напряжение $u_{\text{упр}}(t)$ вновь меняет знак $u_{\text{упр}}(t) = -U_{\text{упр}}$, начинается процесс выключения триода. Закрывающийся триод равносителен быстродействующему ключу, который разрывает электрическую цепь с запасенной в ней электрической энергией $LI^2/2$.

Процессы, происходящие в коллекторной цепи на интервале выключения описываются следующим образом. Триод после смены знака

$u_{\text{упр}}(t)$ быстро закрывается, $t_{\text{выкл}} \approx 3\tau_{\beta} + t_{\text{рас}}$; ток $i_{\text{к}} = i_{\text{н}}$ резко падает, что приводит к появлению на концах обмотки дросселя противо-э.д.с.

самоиндукции, которая препятствует причине, ее вызывающей, т.е. стремится поддержать уменьшающийся ток i_k за счет накопленной в магнитном поле сердечника дросселя энергии. Теперь противо-э.д.с. действует согласно с э.д.с. источника питания E_1 (знаки в скобках на рис.7,д). Чем быстрее закрывается триод, тем больше противо-э.д.с. Таким образом, при большом еще токе i_k напряжение на коллекторе сильно возрастает. Если сумма E_1 и противо-э.д.с. превысит предельно допустимое напряжение на коллекторе $U_{кэ.доп}$, то произойдет пробой коллекторного перехода и разрушение триода.

Интервал выключения на графиках $i_k(t)$, $u_{кэ}(t)$ и траектории РТ (рис.7,е) отмечен точками «г». Очевидно, в виде, изображенном на рис.7, д, схема неработоспособна. Необходима защита триода от пробоя. Одним из традиционных приемов такой защиты является использование обратного диода, включенного встречно по отношению к источнику питания E_1 и параллельно RL -нагрузке.

Активно-индуктивная нагрузка с обратным диодом

Схема может работать в двух режимах: а) режим разрывных токов нагрузки; б) режим неразрывных токов I_H .

Режим разрывных токов I_H (рис.8)

До момента, условно принятого за $t = 0$, триод находится в состоянии отсечки, РТ – в положении 1, (рис.8)

$$u_{упр}(t) = -U_{упр}; \quad I_{\sigma} = -I_{к0}; \quad I_k = I_{к0}; \quad u_{кэ} = U_{кэ.отс} \approx E_1.$$

В момент времени $t = 0$ напряжение $u_{упр}(t)$ скачком меняет знак, $u_{упр}(t) = +U_{упр}$, триод включается, напряжение $u_{кэ}$ быстро падает до уровня $U_{кэ.н}$ ($t_{вкл} \approx 3\tau_{\beta}$); ток $i_k = i_H$ нарастает по закону экспоненты с постоянной времени $\tau_H = L / R_H$ и в конце интервала $\approx 3\tau_H$ достигает уровня $I_{кн}$, а РТ выходит в положение 2.

Быстрому росту $i_k = i_H$ препятствует противо-э.д.с., которая наводится на концах обмотки дросселя и действует встречно с э.д.с. источника питания коллекторной цепи E_1 . Пока действует противо-э.д.с., в магнитном поле обмотки дросселя (точнее в магнитном поле сердечника, на котором

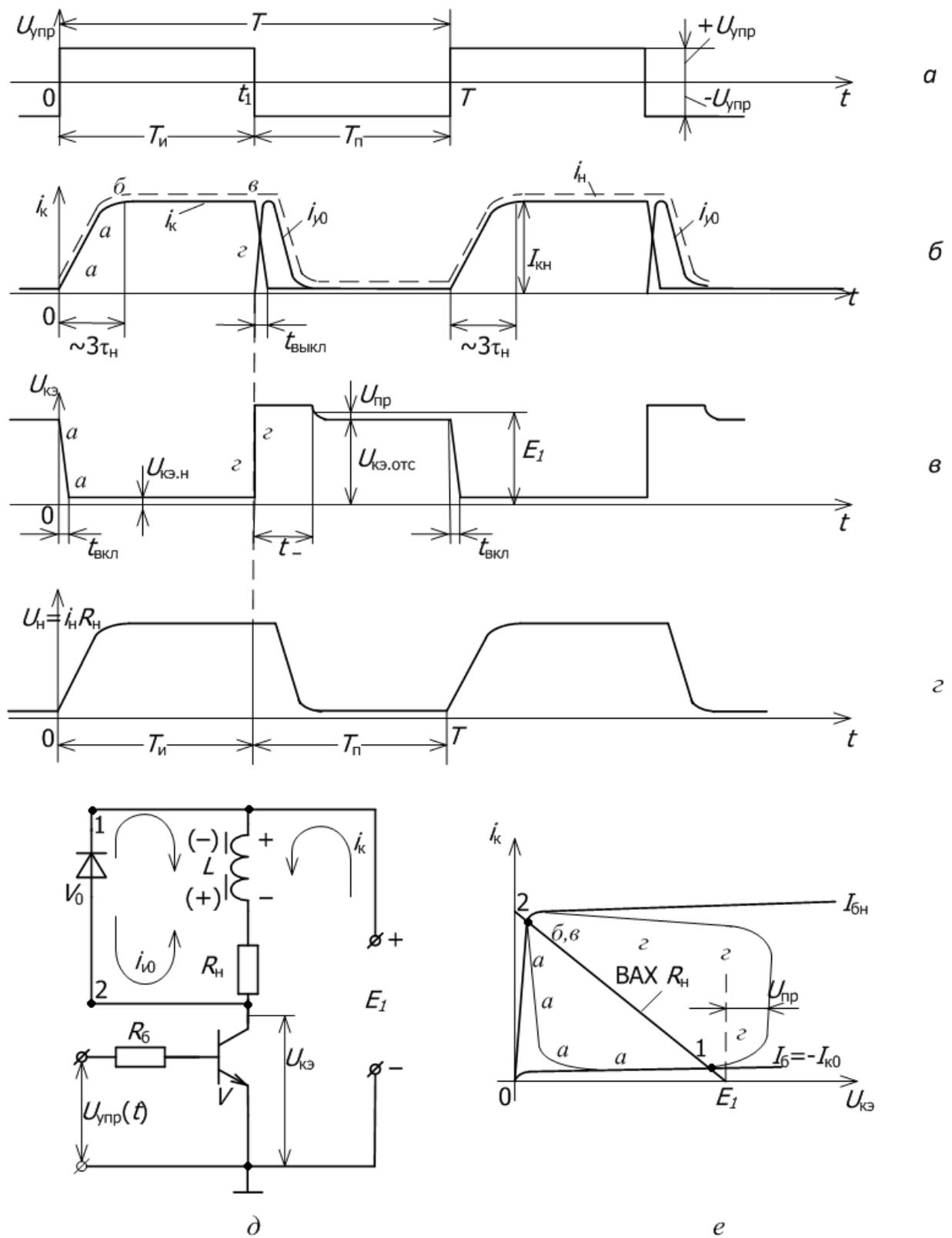


Рис.8

размещена обмотка) накапливается энергия. К моменту времени $\approx 3\tau_n$ накопленная энергия $W=LI_{кн}^2/2$.

Далее, в интервале $3\tau_n < t < t_1$, ток $i_k = i_n$ остается постоянным и равным $I_{кн} = const$, а противо-э.д.с. $e = L \cdot di_k / dt = 0$. Процессы изменения $i_k(t)$, $u_{кэ}(t)$ в схеме и форма траектории РТ на семействе коллекторных ВАХ до момента t_1 выглядит также, как и в предыдущем случае.

При $t = t_1$ напряжение $u_{упр}(t)$ меняет знак, $u_{упр}(t) = -U_{упр}$, триод выключается, ток i_k резко падает. Уменьшение тока приводит к появлению на концах обмотки дросселя противо-э.д.с. самоиндукции, которая препятствует причине, ее вызывающей, т.е. уменьшению тока. Напряжение $u_{кэ}$ скачком возрастает (рис.8, д, е).

Под действием противо-э.д.с. диод V_0 смещается прямо и начинает проводить ток i_{v0} . По мере уменьшения i_k увеличивается i_{v0} . В технической литературе принята формулировка: при выключении триода V ток нагрузки переходит из цепи коллектора в цепь диода V_0 , сохраняя свое значение на интервале $t_{выкл}$ и направление (на рис.8, б ток i_n показан пунктирной линией).

Энергия, накопленная ранее в магнитном поле сердечника дросселя будет некоторое время ($\approx 3\tau_n$) поддерживать протекание постепенно спадающего тока $i_n = i_{v0}$ в контуре $(+)L - R_n - V_0 - (-)L$. Если $i_n = i_{v0}$ спадет до нуля в интервале паузы T_n , то такой режим работы схемы называют режимом разрывных токов нагрузки (рис.8, г).

Каким образом обратный диод V_0 защищает триод от пробоя? В момент времени t_1 скачком появляется противо-э.д.с., которая смещает V_0 в прямом направлении. Пока V_0 находится в открытом состоянии (интервал t_-) напряжение между точками схемы 1 и 2 равно $U_{пр} \approx 1В$, поэтому напряжение на коллекторе триода V в интервале t_- не превышает значения $U_{кэ} = E_1 + U_{пр}$ (рис.8, в, е).

Режим неразрывных токов I_n (рис.9)

Такой режим возможен, когда достаточно велики или постоянная времени нагрузки $\tau_n = L / R_n$, или частота напряжения $u_{упр}(t)$. При этом ток обратного диода V_0 , который в интервале паузы T_n является током нагрузки $i_{v0} = i_n$, не успевает снизиться до нуля. Рассмотрим работу схемы с обратным диодом в режиме неразрывных токов.

Итак, к моменту времени, принятому за $t = 0$, триод находится в состоянии отсечки, а РТ в положении «а»

$$I_k = I_{к0}; \quad u_{кэ} = U_{кэ.а} = E_1 + U_{пр}; \quad I_{v0} \approx I_{к0},$$

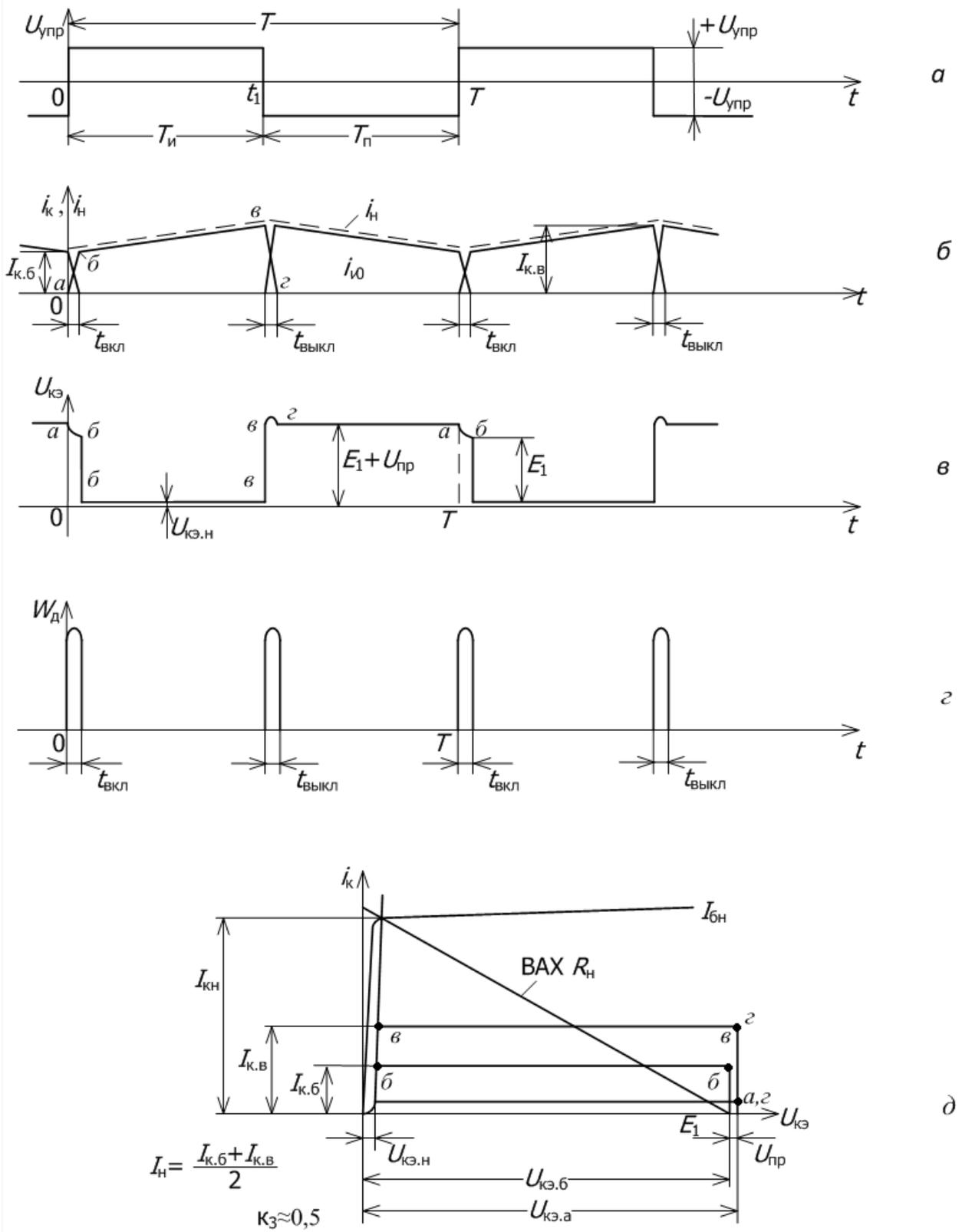


Рис.9

ток нагрузки $i_n = i_{v0}$ поддерживается за счет энергии, накопленной в магнитном поле сердечника дросселя; i_n замыкается по контуру $(+)L - R_n - V_0 - (-)L$.

В момент времени $t = 0$ напряжение $u_{упр}(t)$ меняет знак $u_{упр}(t) = +U_{упр}$, триод открывается в интервале $t_{вкл} \approx 3\tau_\beta$, появляется и растет ток коллектора. Рост i_k приводит к смене знака противо-э.д.с. на концах обмотки дросселя (на рис.8, д знаки без скобок), диод V_0 закрывается, происходит «переход» тока i_n из обратного диода в коллектор открывающегося триода, при этом i_n остается неразрывным, как и должно быть в цепи с индуктивностью.

Включение триода V , как и выключение диода V_0 , в зависимости от быстродействия выбранных приборов, происходит весьма быстро: доли мкс...единицы мкс. Далее, в интервале импульса, триод находится в состоянии насыщения, $u_{кэ} = U_{кэ.н}$, ток коллектора $i_k = i_n$ растет с постоянной времени $\tau_n = L/R_n$ от уровня $I_{к.б}$ до уровня $I_{к.в}$.

При $t = t_1$ напряжение $u_{упр}(t)$ вновь меняет знак $u_{упр}(t) = -U_{упр}$. Триод закрывается, ток i_k падает, противо-э.д.с. на концах обмотки дросселя меняет знак (на рис.8, д знаки в скобках), открывается обратный диод V_0 , ток нагрузки «переходит» из коллектора V в цепь обратного диода V_0 , оставаясь неразрывным; $i_n = i_{v0}$ поддерживается за счет энергии, накопленной в магнитном поле сердечника дросселя и спадает от уровня $I_{к.в}$ до $I_{к.б}$. Процессы в схеме повторяются. Как видно из описания работы схемы, среднее за период значение тока нагрузки $I_{н.ср} = 0,5 \cdot (I_{к.б} + I_{к.в})$ при выбранном коэффициенте заполнения меньше максимально возможного $I_{н.ср} = I_{кн}$.

Траектория РТ триода на семействе коллекторных ВАХ не выходит за пределы уровней $I_{к.б} \dots I_{к.в}$ по току и $U_{кэ.н} \dots (E_1 + U_{пр})$ по напряжению (рис.9, д). Отметим следующее. В интервалах включения $t_{вкл}$ и выключения $t_{выкл}$ триода и диода изменения i_k и i_{v0} происходят при постоянных значениях $U_{кэ} \approx E_1$, т.к. противо-э.д.с. самоиндукции, в процессе переключений возникает и меняет знаки практически мгновенно.

Найдем энергию динамических потерь за один цикл переключения и мощность динамических потерь для режима неразрывного тока.

В интервале включения $t_{вкл} = t_+ : i_k = I_{кб} \cdot \frac{t}{t_+}, U_{кэ} = E_1$.

В интервале выключения $t_{выкл} = t_- : i_k = I_{кв} \cdot (1 - \frac{t}{t_-}), U_{кэ} = E_1 + U_{пр} \approx E_1$.

Энергия динамических потерь за цикл переключения

$$W_{\text{д}} = \int_0^{t_+} I_{\text{КБ}} \cdot E_1 \frac{t}{t_+} dt + \int_0^{t_-} I_{\text{КБ}} \cdot E_1 \left(1 - \frac{t}{t_-}\right) dt.$$

После интегрирования получим

$$W_{\text{д}} = I_{\text{КБ}} \cdot E_1 \cdot \frac{t_+}{2} + I_{\text{КВ}} \cdot E_1 \cdot \frac{t_-}{2}. \quad (30)$$

Если пренебречь разницей между уровнями тока $I_{\text{КБ}}$ и $I_{\text{КВ}}$, или провести замену этих уровней некоторым средним значением $I_{\text{н.ср}} = I_{\text{н}} = 0,5(I_{\text{КБ}} + I_{\text{КВ}})$, то выражение (30) и мощность $P_{\text{д}}$ принимают вид

$$W_{\text{д}} = I_{\text{н}} \cdot E_1 \cdot \frac{t_+ + t_-}{2}, \quad P_{\text{д}} = I_{\text{н}} \cdot E_1 \cdot \frac{t_+ + t_-}{2T} = I_{\text{н}} \cdot E_1 \cdot \frac{t_+ + t_-}{2} f. \quad (31)$$

Положим $t_+ \approx t_- = t_s$, где t_s – интервал коммутации, тогда энергия и мощность динамических потерь

$$W_{\text{д}} = I_{\text{н}} \cdot E_1 \cdot t_s; \quad P_{\text{д}} = I_{\text{н}} \cdot E_1 \cdot \frac{t_s}{T} = I_{\text{н}} \cdot E_1 \cdot t_s \cdot f. \quad (32)$$

ПРИМЕР

Триод серии КТ834В работает в режиме D ; частота переключения $f = 20$ кГц, период $T = 50$ мкс, $I_{\text{кн}} = 4$ А, $I_{\text{бн}} = 20$ мА; напряжение источника питания $E_1 = 60$ В.

Рассчитать полную мощность потерь в триоде, в том числе мощность потерь на переключение $P_{\text{д}}$.

Типовые значения параметров КТ834В, необходимые для расчета [2].

Время включения $t_{\text{вкл}}$ и выключения $t_{\text{выкл}}$ 1,2 мкс.

Время рассасывания неосновных носителей $t_{\text{рас}}$ 1 мкс.

Сопротивление участка коллектор – эмиттер насыщенного триода $r_{\text{кэ.н}}$

..... 0,13 Ом.

Напряжение насыщения на эмиттерном переходе $U_{\text{бэ.н}}$ 1,5 В.

Обратный ток коллектора в схеме с ОЭ $I_{\text{ко}}^*$ 3 мА.

Обратный ток эмиттерного перехода $I_{\text{эо}}$ 2 мА.

Внимание. Для расчета динамических потерь t_+ принимается равным $t_{\text{вкл}} = 1,2$ мкс, $t_- = t_{\text{выкл}} + t_{\text{рас}} = 1,2 + 1 + 2,2$ мкс.

Период работы триода, согласно условию, $T = 50$ мкс, общее время переключения в течение периода $t_+ + t_- = 1,2 + 2,2 = 3,4$ мкс. Отсюда следует, что максимальная длительность импульса не должна превышать $T_{\text{макс}} = T - (t_+ + t_-) = 46,6$ мкс; максимальное значение коэффициента заполнения $K_{з.макс} = T_{\text{и.макс}} / T = 46,6 / 50 \approx 0,93$.

Расчеты

Потери в состоянии насыщения

1) Мощность потерь на коллекторном переходе рассчитывается при $K_s = 0,93$

$$P_{\text{кн}} = K_3 \cdot I_{\text{кн}}^2 \cdot r_{\text{кэ.н}} = 0,93 \cdot 16 \cdot 0,13 = 1,934 \text{ Вт.}$$

2) Мощность потерь в цепи базы

$$P_{\text{бн}} = K_3 \cdot U_{\text{бэ.н}} \cdot I_{\text{бн}} = 0,93 \cdot 1,5 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,028 \text{ Вт.}$$

Потери в состоянии отсечки

Мощность потерь на коллекторном переходе $P_{\text{к.отс}}$ становится наибольшей при $T_{\text{и}} = 0$, когда триод в течение всего периода закрыт

$$P_{\text{к.отс}} = I_{\text{к0}}^* \cdot E_1 = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,18 = 0,018 \text{ Вт.}$$

При $K_3 = K_{з.макс}$

$$P_{\text{к.отс}} = (1 - K_{з.макс}) \cdot P_{\text{к.отс}} = (1 - 0,93) \cdot 0,18 = 0,0126 \text{ Вт.}$$

Мощность потерь в цепи базы в состоянии отсечки много меньше, чем $P_{\text{к.отс}}$, поэтому не рассчитывается.

Потери на переключение (31)

$$P_{\text{д}} = E_1 \cdot I_{\text{к.макс}} \frac{t_+ + t_-}{2} f = 60 \cdot 4 \frac{(1,2 + 2,2) \cdot 10^{-6}}{2} 20 \cdot 10^3 = 8,16 \text{ Вт.}$$

Полная мощность потерь в триоде

$$P_{\text{пот}} = P_{\text{кн}} + P_{\text{бн}} + P_{\text{к.отс}} + P_{\text{д}} = 1,934 + 0,028 + 0,0126 + 8,16 = 10,137 \text{ Вт.}$$

Большая часть потерь рассеивается коллекторным переходом

$$P_{\text{пот}} = P_{\text{кн}} + P_{\text{д}} = 1,934 + 8,16 = 10,094 \text{ Вт.}$$

При активно-индуктивной нагрузке с обратным диодом следует также провести расчет потерь на этом диоде. Очевидно максимум потерь на V_0 имеет место при $K_3 \approx 0,5$, когда ток нагрузки распределяется примерно поровну между триодом и обратным диодом (рис.9, а).

По условию $I_{н.макс} = 4$ А, при $K_3 = 0,5$, $I_n = 2$ А, следовательно среднее значение тока обратного диода $I_{v0} = 1$ А. Динамические потери рассчитываются по формуле (31), при этом используются временные параметры диода.

Для примера выбран диод серии КД213Б типовые значения параметров диода, необходимые для расчета [2].

Постоянное прямое напряжение при токе $I_{пр} = 10$ А.....1,2 В.

Постоянное и импульсное обратные напряжения $U_{обр.макс}$200 В.

Постоянный обратный ток при $U_{обр.макс}$0,2 мА.

Время восстановления обратного сопротивления.....0,17 мкс.

Частота без снижения режимов в меандре с $\tau_\phi = 0,2$ мкс при работе на активную нагрузку.....100 кГц.

Емкость диода при $U_{обр} = 100$ В.....500 пФ,

при $U_{обр} = 5$ В.....1600 пФ.

Внимание. Для расчета динамических потерь интервалы включения и выключения принимаются равными t_+ и t_- триода, т.к. процессы переключения определяются динамическими свойствами триода (ведущего прибора). Диод должен быть высокочастотным, иметь запасы по напряжению $U_{обр.макс}$ и току $I_{пр.доп}$. Согласно справочным данным [2] частота переключения диода серии Д213Б $f = 100$ кГц, что превышает принятую по условию частоту $f = 20$ кГц; напряжение источника питания $E_1 = 60$ В является обратным для диода и меньше $U_{обр.макс} = 200$ В, что обеспечивает коэффициент запаса по напряжению $K_{зап.и} = U_{обр.макс} / E_1 = 200 / 60 = 3,33$. Прямой допустимый ток при максимальной длительности импульса $T_{макс} = 50$ мкс равен 6А; коэффициент запаса по току $K_{зап.и} = I_{пр.доп} / I_{н.макс} = 6 / 4 = 1,5$.

Расчеты

Потери при прямом смещении обратного диода

$$P_{пр} = K_3 \cdot I_{пр} \cdot U_{пр} = 0,5 \cdot 2 \cdot 1,2 = 1,2 \text{ Вт.}$$

Потери при обратном смещении диода

$$P_{обр} = K_3 \cdot I_{обр} \cdot E_1 = 0,5 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 60 = 0,006 \text{ Вт.}$$

Потери на переключение (31)

$$P_{д.в0} = E_1 \cdot I_{н.макс} \cdot K_3 \frac{t_+ + t_-}{2} f = 60 \cdot 4 \cdot 0,5 \frac{(1,2 + 2,2) \cdot 10^{-6}}{2} 20 \cdot 10^3 = 4,08 \text{ Вт.}$$

Полная мощность потерь в диоде

$$P_{пот.в0} = P_{пр} + P_{обр} + P_{д.в0} = 1,2 = 0,006 + 4,08 = 5,286 \text{ Вт.}$$

Нагрузка – якорная обмотка электрического двигателя

Якорная обмотка двигателя характеризуется активным сопротивлением $R_я$, индуктивностью $L_я$, а при вращении якоря, на концах обмотки появляется э.д.с. вращения $E_в$, которая направлена встречно э.д.с. источника питания E_1 и частично компенсирует действие последней на коллекторную цепь схемы. В статическом режиме, когда частота вращения якоря и нагрузка на валу двигателя постоянные, э.д.с. вращения $E_в = const$.

На рис.10 и 11, размещенных параллельно, изображены графики напряжений, тока, энергии динамических потерь, семейства коллекторных характеристик с траекторией РТ, соответствующие режимам разрывных и неразрывных токов. На рис. 12 изображена схема каскада, в которой электрический двигатель представлен электрической цепью: $L_я, R_я, E_в$.

Режим разрывных токов $I_н$ (рис.10, 12)

До момента времени, принятого за $t = 0$, триод находится в состоянии отсечки, РТ – в положении 1.

$$u_{упр}(t) = -U_{упр}; \quad I_б = -I_{к0}; \quad I_к = I_{к0}; \quad U_{кэ} \approx E_1 - E_в.$$

В момент времени $t = 0$ напряжение $u_{упр}(t)$ скачком меняет знак, $u_{упр}(t) = +U_{упр}$, триод включается, напряжение $u_{кэ}$ быстро падает до уровня $U_{кэ.н}$ (интервал $t_{вкл} \approx 3\tau_б$); ток $i_к = i_н$ нарастает по закону экспоненты с постоянной времени $\tau_н = L_я / R_я$. Быстрому росту тока $i_к$ препятствует противо-э.д.с., которая появляется на концах якорной обмотки (помимо $E_в$). По истечении времени $\approx 3\tau_н$ процесс нарастания тока практически заканчивается, а РТ на семействе коллекторных ВАХ выходит в положение 2.

Для коллекторной цепи в интервале времени $3\tau_н < t < t_1$ справедливо уравнение

$$E_1 = E_в + I_к \cdot R_я + U_{кэ.н},$$

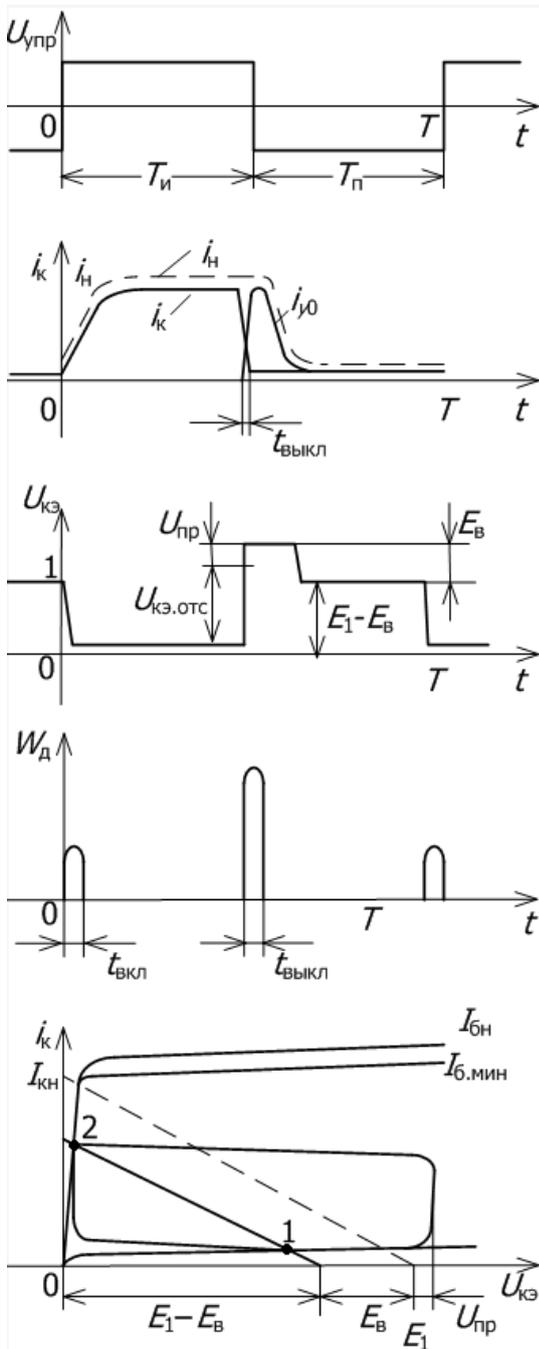


Рис. 10

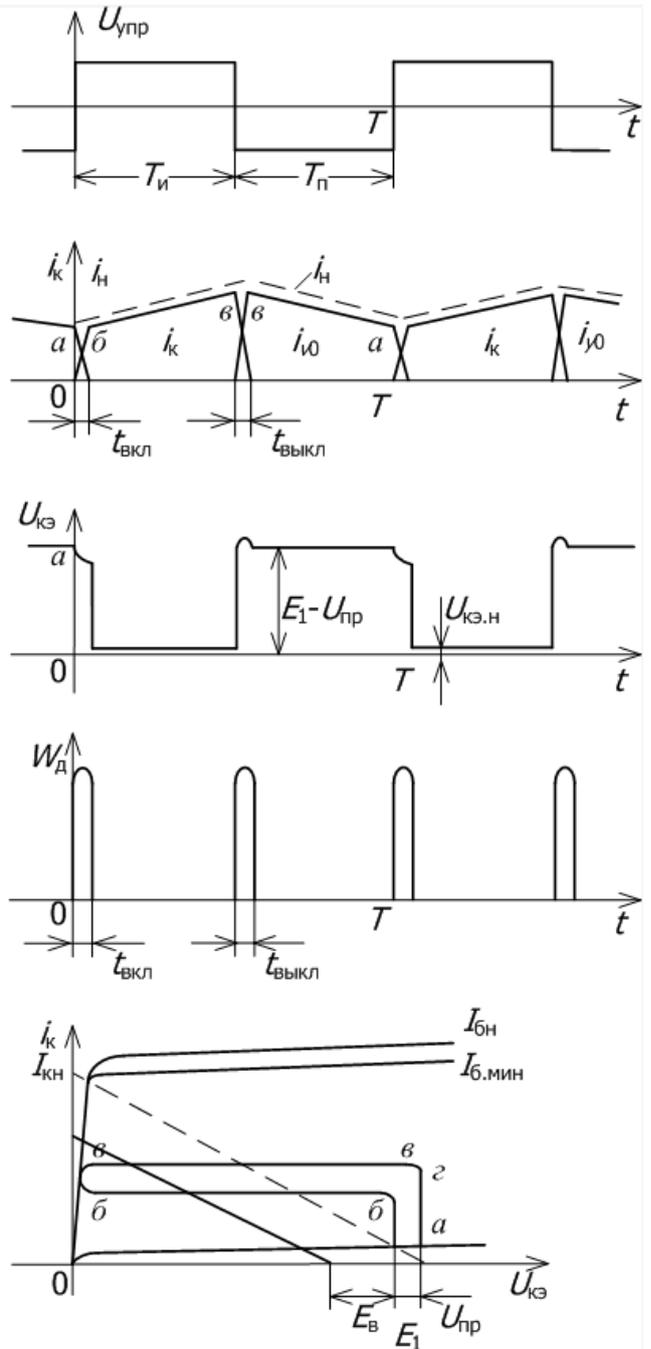


Рис. 11

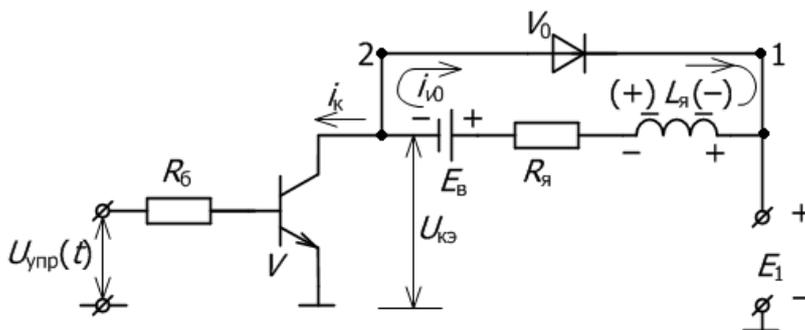


Рис.12

отсюда ток коллектора, соответствующий положению 2

$$I_K = \frac{E_1 - E_B - U_{кэ.н}}{R_я} \approx \frac{E_1 - E_B}{R_я} \quad (33)$$

Примечание. Ток коллектора, определяемый выражением (33), меньше тока насыщения $I_{кн} \approx E_1 / R_я$. Но режим работы электрического двигателя, например режим торможения, когда E_B близка к нулю, на практике возможен. Поэтому ток базы включенного триода должен быть равным $I_{бн} = s \cdot I_{б.мин}$.

При $t = t_1$ напряжение $u_{упр}(t)$ вновь меняет знак $u_{упр}(t) = -U_{упр}$, триод закрывается, ток i_k падает, противо-э.д.с. на концах обмотки якоря меняет знак (на рис.12 знаки в скобках), открывается обратный диод V_0 , ток нагрузки «переходит» из цепи коллектора триода V в цепь обратного диода V_0 , оставаясь неразрывным в интервале $t_{выкл} \approx 3\tau_\beta$. Ток $i_{v0} = i_n$ поддерживается за счет энергии, накопленной в магнитном поле магнитопровода электродвигателя, и спадает по закону экспоненты с постоянной времени $\tau_n = L_я / R_я$.

Пока обратный диод открыт, напряжение между точками схемы 1 и 2 равно $U_{пр} \approx 1В$, поэтому $u_{кэ} = E_1 + U_{пр} \approx E_1$; траектория РТ на семействе коллекторных ВАХ (рис.10, д) ограничена по значениям тока $i_k : I_k = (E_1 - E_B) / R_я$, а по напряжению на коллекторе $U_{кэ} \approx E_1 + U_{пр}$.

Найдем энергию и мощность динамических потерь. В интервале включения энергия потерь невелика, так как ток i_k не успевает существенно измениться за время $t_{вкл}$. Поэтому в первом приближении $W_{д.вкл} \approx 0$. В интервале выключения $t_{выкл} = t_-$

$$i_k = I_{к2} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_-}\right) = \frac{E_1 - E_B}{R_я} \left(1 - \frac{t}{t_-}\right); \quad u_{кэ} = E_1 + U_{пр} \approx E_1.$$

Энергия и мощность динамических потерь соответственно

$$W_{д.выкл} \approx W_d = \int_0^{t_-} \frac{E_1 - E_B}{R_я} \cdot E_1 \left(1 - \frac{t}{t_-}\right) dt = \frac{E_1 - E_B}{R_я} \cdot E_1 \frac{t_-}{2},$$

$$P_d \approx \frac{E_1 - E_B}{R_я} \cdot E_1 \frac{t_-}{2T} = \frac{E_1 - E_B}{2R_я} \cdot E_1 \cdot t_- \cdot f.$$

Режим неразрывных токов I_n (рис.11, 12)

Такой режим возможен при достаточно высокой частоте переключения триода и большой постоянной времени $\tau_n = L_я / R_я$. При этом

ток обратного диода V_0 , который является током нагрузки $i_{v0} = i_H$, не успевает снизиться до нуля в интервале паузы $T_{\text{п}}$.

Работа схемы. К моменту времени, принятому за $t = 0$, триод V находится в состоянии отсечки, РТ в положении «а» (рис.11, б, в, д)

$$I_{\text{к}} = I_{\text{к0}}; \quad u_{\text{кэ}} \approx E_1 + U_{\text{упр}}; \quad I_{v0} \approx I_{\text{к.б.}}$$

Ток нагрузки $i_H = i_{v0}$ поддерживается за счет энергии, накопленной ранее в магнитном поле магнитопровода электродвигателя; i_H замыкается по контуру $(+)L_{\text{я}} - R_{\text{я}} - E_{\text{в}} - V_0 - (-)L_{\text{я}}$.

В момент времени $t = 0$ напряжение $u_{\text{упр}}(t)$ меняет знак $u_{\text{упр}}(t) = +U_{\text{упр}}$, триод открывается (интервал времени $t_{\text{вкл}} \approx 3\tau_{\beta}$) появляется и растет ток коллектора. Рост $i_{\text{к}}$ приводит к смене знака против-э.д.с. индукции на концах якорной обмотки (на рис.12 знаки без скобок), диод V_0 закрывается, ток i_H «переходит» из обратного диода в коллектор открывающегося триода. При $t = t_{\text{вкл}}$ $i_{\text{к}}$ принимает значение $I_{\text{к.б.}}$.

Далее в интервале импульса $T_{\text{и}}$ триод находится в состоянии насыщения, $u_{\text{кэ}} = U_{\text{кэ.н.}}$, ток растет с постоянной времени $\tau_{\text{н}} = L_{\text{я}}/R_{\text{я}}$ от уровня $I_{\text{кб}}$ до уровня $I_{\text{кв.}}$.

При $t = t_1$ напряжение $u_{\text{упр}}(t)$ вновь меняет знак $u_{\text{упр}}(t) = -U_{\text{упр}}$. Триод закрывается, ток $i_{\text{к}}$ падает, против-э.д.с. на концах обмотки якоря меняет знак (на рис.12 знаки в скобках), открывается обратный диод V_0 , ток нагрузки «переходит» из коллектора V в цепь обратного диода V_0 , оставаясь неразрывным; $i_H = i_{v0}$ поддерживается за счет энергии, запасенной в магнитном поле магнитопровода электродвигателя и спадает от уровня $I_{\text{к.в}}$ до $I_{\text{к.б.}}$. Процессы в схеме повторяются.

Как следует из описания работы схемы, среднее за период значение тока нагрузки при выбранном значении коэффициента заполнения примерно равно $I_{\text{н}} \approx 0,5 \cdot (I_{\text{к.б.}} + I_{\text{к.в.}})$.

Энергия и мощность динамических потерь. Введем, как и ранее, обозначения: $t_{\text{вкл}} = t_+$; $t_{\text{выкл}} = t_-$; $t_+ = t_- = t_s$. Формулы, определяющие $W_{\text{д}}$ и $P_{\text{д}}$

$$W_{\text{д}} = I_{\text{н}} \cdot E_1 \cdot \frac{t_+ + t_-}{2} \approx I_{\text{н}} \cdot E_1 \cdot t, \quad (34)$$

$$P_{\text{д}} \approx I_{\text{н}} \cdot E_1 \cdot \frac{t_s}{T} = E_1 \cdot t_s \cdot f. \quad (35)$$

4. Параллельное соединение триодов, работающих на общую нагрузку (рис.13)

Для увеличения нагрузочной способности усилителя мощности или преобразователя приходится соединять параллельно несколько триодов (рис.13, в). В идеале предполагается, что ток нагрузки в равных долях между триодами соединения. На практике происходит следующее.

БПТ – это приборы с нелинейными ВАХ, поэтому небольшая разница между характеристиками триодов, работающих параллельно на одну нагрузку, может привести к значительным различиям токов коллектора, что недопустимо. Рассмотрим пример.

На рис.13, а, б приведены эмиттерные ВАХ $I_6 = f(U_{6э})$, $I_3 = f(U_{6э})$ для схемы, состоящей из трех триодов $V1, V2, V3$, включенных параллельно. Напряжение $U_{6э}$ для всех триодов одно и то же, но поскольку они имеют разную крутизну эмиттерных характеристик (разные входные сопротивления $R_{вх}$), то I_{61}, I_{62}, I_{63} будут неодинаковыми, именно $I_{61} > I_{62} > I_{63}$ и соответственно $I_{э1} > I_{э2} > I_{э3}$; $I_{к1} > I_{к2} > I_{к3}$.

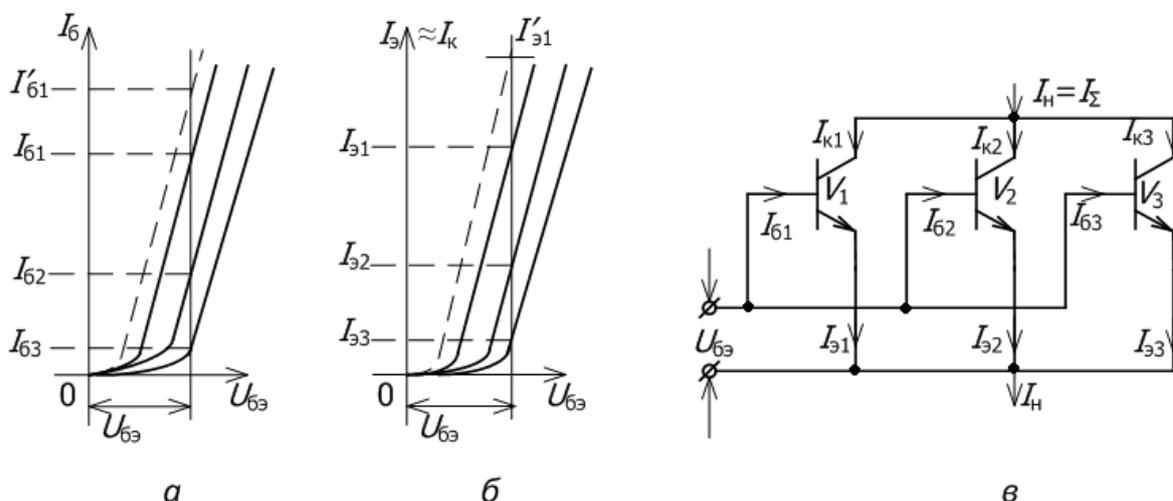


Рис.13

Триод $V1$ больше других «загружен» током нагрузки $I_н = I_э$; мощность, рассеиваемая на его коллекторе, будет больше, а температура корпуса $T_{к1}$ выше $T_{к2}, T_{к3}$. Как известно, эмиттерные ВАХ имеют отрицательный температурный коэффициент напряжения (ТКН) и с ростом температуры начнут смещаться к оси токов. На рис.13, а, б пунктиром проведена смещенная температурой эмиттерная ВАХ триода $V1$. При сохранившем прежнее значение напряжения $U_{6э}$ ток I_{61} возрастет до уровня

$I'_{\beta 1}$ ($I_{\beta 1}$ до $I'_{\beta 2}$), $I_{\kappa 1}$ увеличится и триод $V1$ «возьмет на себя» еще большую часть тока нагрузки. За счет этого разгрузятся другие триоды. Температура корпуса $T_{\kappa 1}$ еще больше возрастет; токи $I_{\beta 1}$, $I_{\kappa 1}$ получат новое приращение и т.д. Процесс закончится разрушением триода $V1$.

Ток I_H рассчитан на три триода, поэтому следующим выйдет из строя триод $V2$, у которого крутизна входной характеристики больше, чем у $V3$. Последним разрушится триод с минимальной крутизной $V3$.

Из этих рассуждений формулируется задача: обеспечить равномерное распределение тока нагрузки между параллельно включенными триодами. С этой целью в цепи эмиттеров включают сопротивления $R_{\beta, i}$, с помощью которых входные сопротивления триодов приводятся к одному, максимальному, значению или к нескольким близким значениям. В схемотехнике сопротивления $R_{\beta, i}$ называют выравнивающими, или симметрирующими. Существуют два способа выбора (расчета) $R_{\beta, i}$.

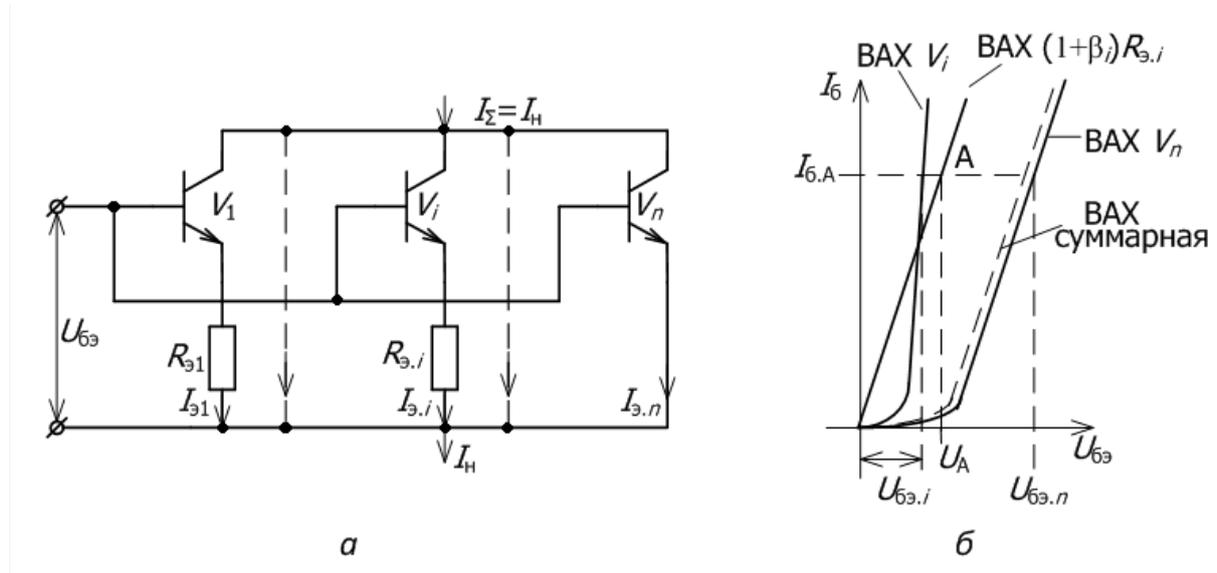


Рис.14

Первый способ (рис.14 а, б). В группе имеющих триодов находят один с максимальным входным сопротивлением (минимальной крутизной) $R_{\text{вх.макс}} = r_{\beta} + r_{\beta}(1+\beta)$. Для каждого из остальных триодов индивидуально подбирают резисторы $R_{\beta, i}$. На рис.14, б в качестве примера изображены входные ВАХ триода V_n с максимальным входным сопротивлением $R_{\text{вх.макс}} = R_{\text{вх.}n}$ и триода V_i с $R_{\text{вх.}i} = r_{\beta, i} + r_{\beta, i}(1+\beta)$, для которого следует подобрать $R_{\beta, i}$. После включения $R_{\beta, i}$ последовательно с эмиттером V_i суммарное сопротивление входной цепи того триода $R_{\text{вх.}\Sigma}$ возрастает и в идеале должно стать равным $R_{\text{вх.}n}$

$$R_{\text{вх.}\Sigma} = r_{\beta, i} + r_{\beta, i}(1+\beta) + R_{\beta, i}(1+\beta) = R_{\text{вх.}n}.$$

Чтобы рассчитать $R_{э,i}$ необходимо иметь экспериментально снятые входные ВАХ триодов (рис.14, б). На уровне минимального тока базы насыщения $I_{б,мин}$ проводят горизонталь, которая пересекает обе характеристики. На горизонтали находят разницу $U_{бэ,n} - U_{бэ,i} = U_A$. U_A – падение напряжения на сопротивлении $R_{э,i}$, создаваемое током эмиттера. Прямая, проведенная из центра координат через точку А на горизонтали, является ВАХ сопротивления $(1 + \beta)R_{э,i}$, тогда

$$R_{э,i} = \frac{U_A}{I_э} = \frac{U_A}{I_{б,мин} \cdot (1 + \beta_i)}$$

Аналогично подбираются симметрирующие сопротивления в цепи эмиттеров других триодов.

Сопротивления $R_{э,i}$ можно рассчитать также и следующим образом. Одним из параметров силовых триодов является крутизна прямой передачи $S_{пр}$. Поэтому параметру, наряду с коэффициентом β , оценивают усилительные свойства. Определяют $S_{пр}$ по проходной ВАХ триода $I_k = f(U_{бэ})$

$$S_{пр} = \frac{I_k}{U_{бэ}} = \frac{\beta \cdot I_B}{I_B [r_B + r_э (1 + \beta)]} = \frac{\beta}{r_B + r_э (1 + \beta)}$$

У триодов средней большой мощности величина сопротивления $r_б$ – единицы и доли Ом т.е. $r_б \ll r_э(1 + \beta)$ отсюда следует, что

$$S_{пр} \approx \frac{\beta}{r_э(1 + \beta)} = \frac{\alpha}{r_э} \approx \frac{1}{r_э}$$

Очевидно, что триоды с наибольшим сопротивлением $r_{э,макс}$ имеют минимальную крутизну проходной характеристики $S_{пр,мин} = 1/r_{э,макс}$.

После включения $R_{э,I}$ новое значение крутизны характеристики должно быть равно $S_{пр,мин}$

$$S_{пр,мин} = \frac{1}{r_{э,I} + R_{э,I}} = \frac{1}{\frac{1}{S_{пр,I}} + R_{э,I}}$$

тогда формула для расчета $R_{э,I}$

$$R_{э,I} = \frac{1}{S_{пр,мин}} - \frac{1}{S_{пр,I}} = r_{э,макс} - r_{э,I} \quad (36)$$

Второй способ расчета $R_{э}$. Для всех триодов, работающих параллельно, рассчитывается одно сопротивление $R_э$, которое обеспечивает допустимый разброс токов коллектора. Из группы триодов, предназначенных

для работы, выбираются: с минимальной и максимальной величинами крутизны

$$S_{ПР.МАКС} = \frac{I_{К.МАКС}}{U_{БЭ}}; \quad S_{ПР.МИН} = \frac{I_{К.МИН}}{U_{БЭ}}.$$

Находят отношение величин крутизны, характеризующее максимальный разброс в данной группе триодов

$$\frac{S_{ПР.МАКС}}{S_{ПР.МИН}} = \frac{I_{К.МАКС}}{I_{К.МИН}} = \delta I_K.$$

Такая величина разброса недопустима, поэтому в цепь эмиттера каждого триода включают сопротивление одного номинала, которое уменьшает разброс токов I_K до приемлемого значения ΔI_K . После включения R_3 для пары триодов с $S_{ПР.МАКС}$ и $S_{ПР.МИН}$ получаем новые значения крутизны

$$S'_{ПР.МАКС} = \frac{1}{R_3 + r_{Э.МИН}} = \frac{1}{R_3 + 1/S_{ПР.МАКС}}, \quad S'_{ПР.МИН} = \frac{1}{R_3 + r_{Э.МАКС}} = \frac{1}{R_3 + 1/S_{ПР.МИН}}.$$

Приемлемый разброс определяется как отношение

$$\frac{S'_{ПР.МАКС}}{S'_{ПР.МИН}} = \Delta I_K = \frac{R_3 + 1/S_{ПР.МАКС}}{R_3 + 1/S_{ПР.МИН}},$$

отсюда находят расчетную формулу

$$R_3 = \frac{1}{S_{ПР.МАКС}} \cdot \frac{\delta I_K - \Delta I_K}{\Delta I_K - 1}. \quad (37)$$

Оба способа расчета сопротивлений в цепи эмиттера приближенные, требуют, как минимум, сведений о входных характеристиках и значениях β (h_{21}). Но наибольшую информацию для быстрого расчета R_3 дает проходная характеристика БПТ $I_K = f(U_{БЭ})$, или близкая к ней входная ВАХ схемы включения триода с общей базой $I_3 = f(U_{БЭ})$.

ПРИМЕР 1

Первый способ расчета симметрирующих сопротивлений. Силовой элемент (регулирующий) транзисторного преобразователя собран на трех мощных триодах серии КТ819Г, включенных параллельно и работающих на одну общую нагрузку.

Проходные ВАХ триодов изображены на рис.15, а. Минимальную крутизну имеет триод V3. Сначала рассчитываются числовые значения всех триодов. Для этого на линейных участках ВАХ каждого строят характеристический треугольник. В качестве примера треугольник построен на ВАХ триода V3

$$S_{пр.3} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{БЭ}} = \frac{2,5-1}{1-0,8} = 7,5 \text{ A/B} , \quad r_{э3} = 0,1333 \text{ Ом.}$$

$S_{пр.2}$ и $S_{пр.1}$ рассчитываются аналогично.

$$S_{пр.2} = 18,75 \text{ A/B} , \quad r_{э,2} = 0,0533 \text{ Ом}; \quad S_{пр.1} = 50 \text{ A/B}, \quad r_{э,1} = 0,02 \text{ Ом.}$$

Согласно (36) сопротивления $R_{э,1}$ и $R_{э,2}$

$$R_{э,1} = r_{э,3} - r_{э,1} = 0,1333 - 0,02 \approx 0,113 \text{ Ом,}$$

$$R_{э,2} = r_{э,3} - r_{э,2} = 0,1333 - 0,0533 \approx 0,08 \text{ Ом.}$$

Сопротивления $R_{э,1}$ и $R_{э,2}$, включенные в цепи эмиттеров соответствующих триодов, уменьшают крутизну их проходных характеристик до значения $S_{пр.3} = S_{пр.мин}$ (рис.15, а).

ПРИМЕР 2

Второй способ расчета симметрирующего сопротивления. Для группы триодов с ВАХ, указанными на рис.15, б (V1, V2, V3), рассчитывают сопротивление $R_э$ одного номинала. После включения $R_э$ в цепи эмиттеров разброс токов коллекторов уменьшается до некоторого допустимого значения.

При напряжении $U_{БЭ} = 0,7\text{В}$ максимальный разброс токов I_K (триоды V1 и V3) $\delta I_K = 2,5 / 0,45 = 5,55$; $S_{пр.макс} = S_{пр1} = 50$, $1 / S_{пр.макс} = 0,02$. Зададимся значением допустимого разброса $\Delta I_K = 1,5$, тогда согласно (37)

$$R_э = 0,02 \cdot \frac{5,55-1,5}{1,5-1} = 0,163 \text{ Ом.}$$

На рис.15, б построены исходные проходные ВАХ группы триодов (V1, V2, V3 сплошной линией), рассчитанного резистора $R_э$ и суммарные ВАХ (пунктиром). Как следует из построений при наличии $R_э$ происходит линеаризация проходных характеристик, что и является причиной снижения разброса токов.

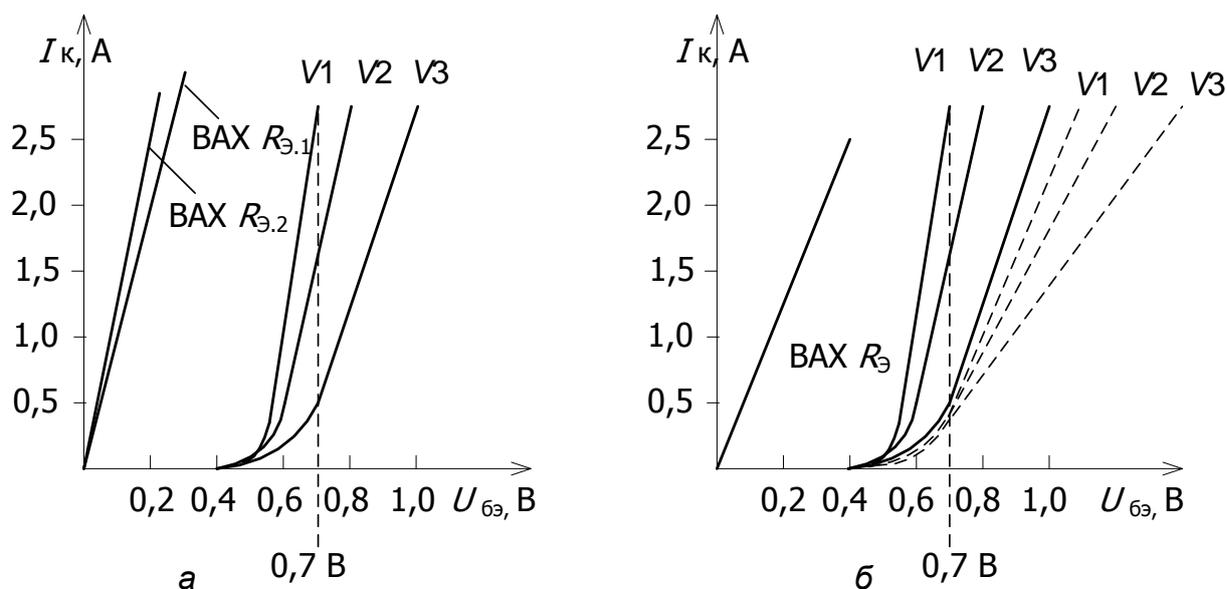


Рис.15

5. Предельно допустимые параметры БПТ. Выбор [3, 4]

При выборе триодов, которые предназначены для работы в схемах усиления мощности, следует ориентироваться на предельно допустимые параметры. В справочной литературе приводятся следующие.

$U_{кэ.макс}$ – максимально допустимое постоянное напряжение коллектор–эмиттер.

$U_{кэ.и.макс}$ – максимально допустимое импульсное напряжение коллектор – эмиттер.

$I_{к.макс}$, $I_{к.и.макс}$ – максимально допустимые значения постоянного и импульсного токов коллектора.

$I_{б.макс}$, $I_{б.и.макс}$ – максимально допустимые значения постоянного и импульсного токов базы.

$U_{бэ.макс}$ – максимально допустимое обратное напряжение на эмиттерном переходе.

$P_{к.макс}$, $P_{к.т.макс}$ – максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора без теплоотвода и с теплоотводом.

$P_{к.и.макс}$ – максимально допустимая импульсная рассеиваемая мощность коллектора.

$T_{п.макс}$, $T_{к.макс}$ – максимально температура перехода и корпуса триода.

Перечисленные параметры по существу являются граничными, отделяющими условия нормальной работы прибора от условий, в которых развивается один из видов пробоя: лавинный – по напряжению $U_{кэ.макс}$

($U_{кб.макс}$); тепловой – по мощности, рассеиваемой на коллекторном переходе $P_{к.макс}$ ($T_{п.макс}$, $T_{к.макс}$); по уровню тока коллектора, превышающего $I_{к.макс}$.

По последствиям для триода пробой делят на обратимые (первичные) и необратимые (вторичные). После первичного пробоя, независимо от его природы, триод восстанавливает свою работоспособность. При вторичном пробое происходит разрушение структуры прибора, например, проплавление части объема коллекторного перехода. Триод выходит из строя.

Первичные виды пробоя

Лавинный пробой возникает, когда обратное напряжение на коллекторном переходе достаточно велико. Причем, в наиболее распространенной схеме включения с ОЭ напряжение пробоя оказывается меньше, чем в схеме с ОБ. Объяснение этому дается на рис.16, а.

Положим, что в процессе работы схемы ключ S с высокой частотой замыкает и размыкает цепь базы. Сначала рассматривается не самый лучший вариант управления триодом. Если ключ S разомкнут, ток $I_б = 0$, БПТ – закрыт. При этом под действием напряжения источника питания E_1 эмиттерный переход (ЭП) остается смещенным прямо, коллекторный (КП) – обратно.

Смещение $U_{бэ}$ невелико и практически все напряжение E_1 приложено к коллекторному переходу $U_{кэ} \approx E_1$. ЭП, смещенный прямо, инжектирует электроны в базу. Часть из них рекомбинирует с дырками базы, другая же часть достигает коллекторного перехода и под действием сильного электрического поля, разгоняясь, приобретает энергию, достаточную для ионизации нейтральных атомов. Появляются вторичные электроны, которые тоже ускоряются и т.д. (явление вторичной эмиссии). Увеличение количества подвижных зарядов в КП приобретает характер лавины, переход теряет сопротивление, ток $I_к$ резко возрастает, развивается лавинный пробой.

Чтобы увеличить напряжение лавинного пробоя в большинстве применений, особенно это касается мощных триодов, рекомендуется между базой и эмиттером включать небольшое сопротивление $R_б$ (рис.16, б), которое шунтирует ЭП, уменьшая таким образом $U_{бэ}$, а значит инжекцию электронов в базу и вероятность возникновения лавинного пробоя.

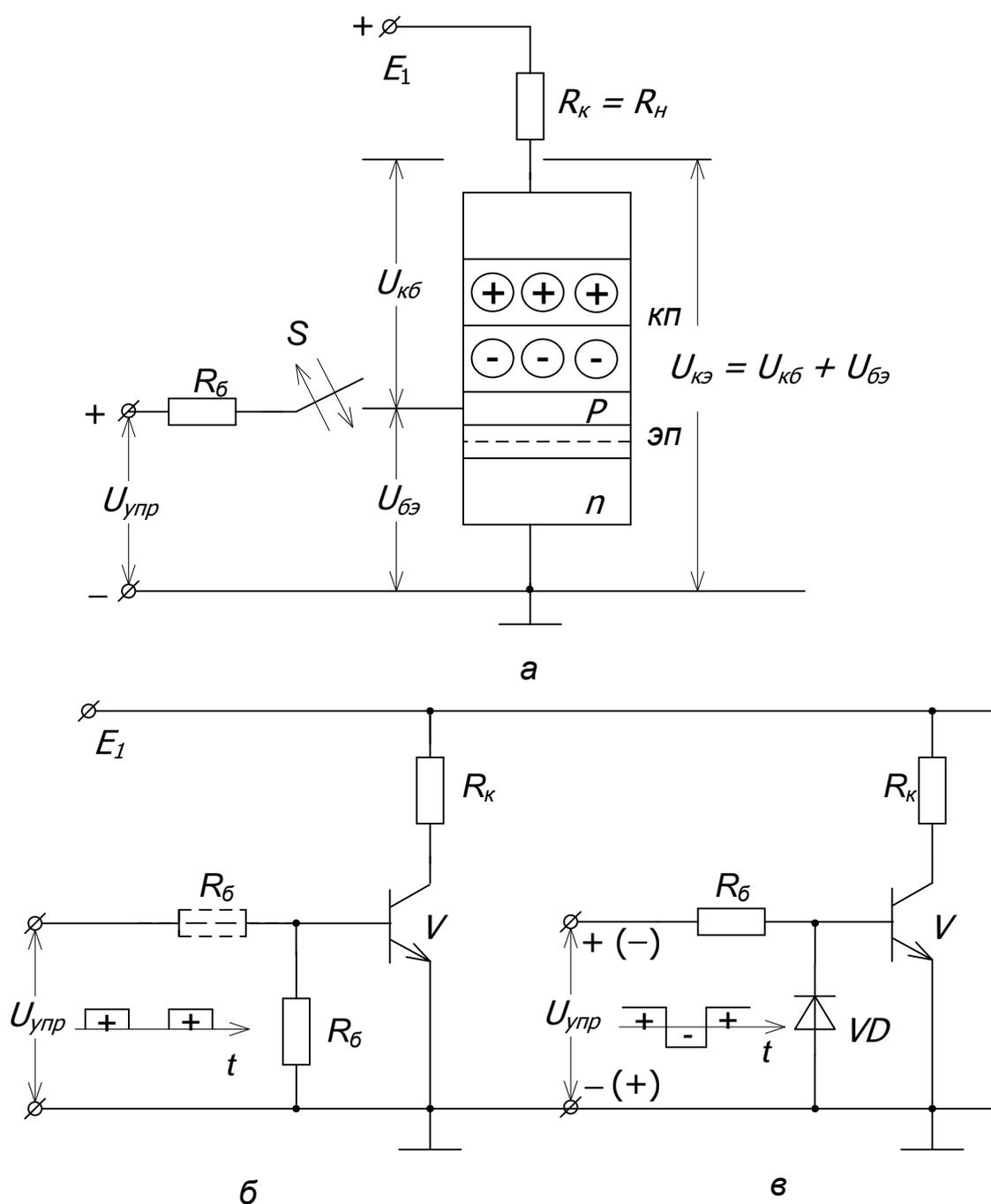


Рис.16

Если управляющий сигнал $u_{упр}(t)$ знакопеременный (рис.16, в), то напряжение лавинного пробоя приближается к максимальному значению, указанному в паспорте на триод $U_{кэ.макс}$. В схеме, представленной на рис.16 в, реализуется, так называемое, активное выключение БПТ, когда в закрытом состоянии триода напряжение на эмиттерном переходе отрицательное и инжекция электронов в базу исключена. При этом должно выполняться условие $|-U_{упр}| < |-U_{бэ.макс}|$ или предусмотрена защита эмиттерного перехода

от пробоя с помощью, например, обратного диода VD .

Тепловой пробой. Напряжение $U_{кэ}$ ($U_{кб}$) в схеме (рис.16, а) велико, но недостаточно для возникновения лавинного пробоя. Как и в предыдущем случае при отключенной базе (или при большом сопротивлении R_b) = эмиттерный переход инжектирует электроны. Часть из них рекомбинирует с дырками базы, другая часть достигает коллекторного перехода и перебрасывается его полем в коллектор, увеличивая обратный ток КП до уровня $I_{к0}^* = I_{к0} \cdot (1 + \beta)$. Увеличенный по сравнению с $I_{к0}$ ток $I_k = I_{к0}^*$ (его называют также сквозным, или током насыщения в схеме с ОЭ), неизбежно приводит к росту мощности потерь, рассеиваемой на КП, и температуры перехода $T_{п}$. С ростом температуры, свою очередь, увеличиваются $I_{к0}^*$, β , P_k и т.д. Если процесс взаимного увеличения тока коллектора, мощности потерь и температуры принимает характер лавины, то развивается тепловой пробой.

Вообще, триод рассеивает мощность на коллекторном переходе в любом режиме работы: и линейном, и ключа. Важно, чтобы мощность потерь P_k и температура перехода $T_{п}$ или корпуса T_k не превысили допустимых значений. Для оценки теплового режима работы вводится понятие теплового сопротивления, под которым понимают сопротивление элементов конструкции триода распространению теплового потока от коллектора к корпусу или от коллектора в окружающую среду.

Тепловое сопротивление между переходом и корпусом $R_{п.к}$ определяется как отношение разности температуры перехода $T_{п}$ и корпуса T_k к мощности, рассеиваемой триодом P_k (имеется в виду мощность потерь на коллекторе)

$$R_{п.к} = \frac{T_{п} - T_k}{P_k} \left[\frac{^{\circ}C}{Вт} \right]. \quad (38)$$

Аналогично. тепловое сопротивление определяется между переходом и окружающей средой $R_{п.с}$ равно отношению разности температур $T_{п}$ и окружающей среды T_c к мощности, рассеиваемой триодом P_k

$$R_{п.с} = \frac{T_{п} - T_c}{P_k} \left[\frac{^{\circ}C}{Вт} \right]. \quad (39)$$

Таким образом, тепловое сопротивление определяется как перепад температур на единицу греющей мощности.

Если проводить аналогию с понятиями электротехники, то $T_{п}$ и T_c (или T_k) – это тепловые потенциалы; разность $T_{п} - T_c$ (или $T_{п} - T_k$) – тепловое напряжение; греющая мощность P_k – это тепловой ток.

При наличии сведений о максимально допустимой температуре $T_{п.макс}$ рассчитывают максимально допустимую мощность потерь в триоде $P_{к.макс} \approx U_{кэ} \cdot I_k$. Из (39) следует

$$P_{к.макс} = \frac{T_{п.макс} - T_c}{R_{п.с}} = U_{кэ} \cdot I_k . \quad (40)$$

Для кремниевых триодов $T_{п.макс} = 120 \dots 150^\circ\text{C}$, для германиевых $T_{п.макс} = 70 \dots 80^\circ\text{C}$. Нормальным условиям работы соответствует температура окружающей среды $T_c \approx 25^\circ\text{C}$.

Положив постоянным значение $P_{к.макс} = const$, задаваясь значениями $U_{кэ}$ и вычисляя I_k , можно построить в координатах семейства коллекторных характеристик гиперболу рассеяния. Эта гипербола является границей развития теплового пробоя (рис.17, а).

Токовый пробой возникает при достижении током коллектора максимально допустимого значения $I_{к.макс}$, которое приводится в справочных данных триода.

Теоретическое значение максимального тока коллектора определяется по формуле [4]

$$I_{к.макс} = C_k E_{пр} V_s,$$

где C_k – емкость коллекторного перехода, пропорциональная его площади; $E_{пр} \approx 10^5$ В / см – напряженность поля пробоя коллекторного перехода; $V_s = 6 \cdot 10^6$ см/с – скорость насыщения дрейфа носителей заряда.

На практике это значение тока никогда не достигается. Если токовый пробой не связан с перегоранием соединительных проводников, то он является обратимым.

Вторичный пробой

Вторичный пробой возникает после развития одного из видов первичного пробоя или непосредственно, минуя первичный пробой. Не посредственно вторичный пробой может произойти при относительно высоком напряжении на коллекторе и достаточно большом токе I_k . При этом коллекторный ток концентрируется в очень малой области коллекторного перехода, который быстро разогревается, проплавляется и замыкает коллектор с базой. Это явление называют «токовым шнуром», или «шнурованием тока». Если триод работает в режиме линейного усиления сигнала (классы А, В или АВ с низким к.п.д.), то возникновение вторичного

пробоя и токового шнура связано с потерей тепловой устойчивости: повышение температуры приводит к росту I_k , рост тока к новому повышению температуры. Этот процесс взаимного влияния ΔI_k и ΔT_k нарастает лавинообразно и заканчивается проплавлением структуры коллекторного перехода. Каковы бы ни были причины вторичного пробоя результатом его является шнурование тока I_k локальный перегрев и разрушение перехода.

Для развития вторичного пробоя требуется определенное время, которое может составлять: единицы.....сотни мкс – это время задержки вторичного пробоя $t_{зад.пр}$. Если триод находится в опасном состоянии меньше, чем $t_{зад.пр}$, то вторичный пробой не возникает.

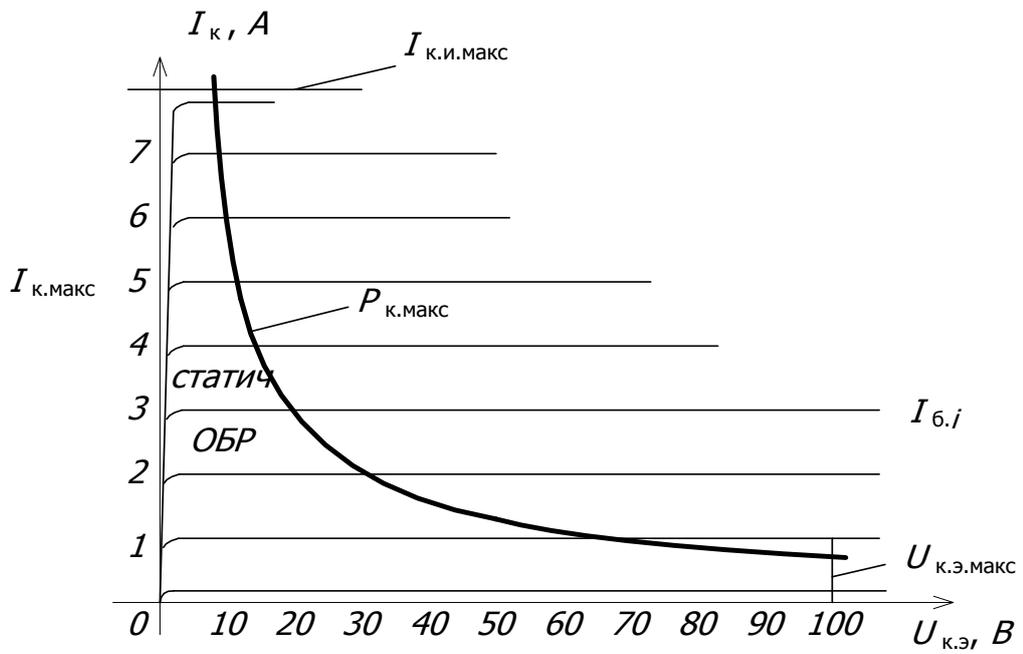
Вторичный пробой не наблюдается у полевых триодов. Объяснение следующее: повышение температуры структуры ПТ приводит к снижению тока I_c , то есть между приращениями ΔI_c и ΔT_c нет положительной тепловой обратной связи и, следовательно, не происходит саморазогрева триода.

Область безопасной работы (ОБР) триода

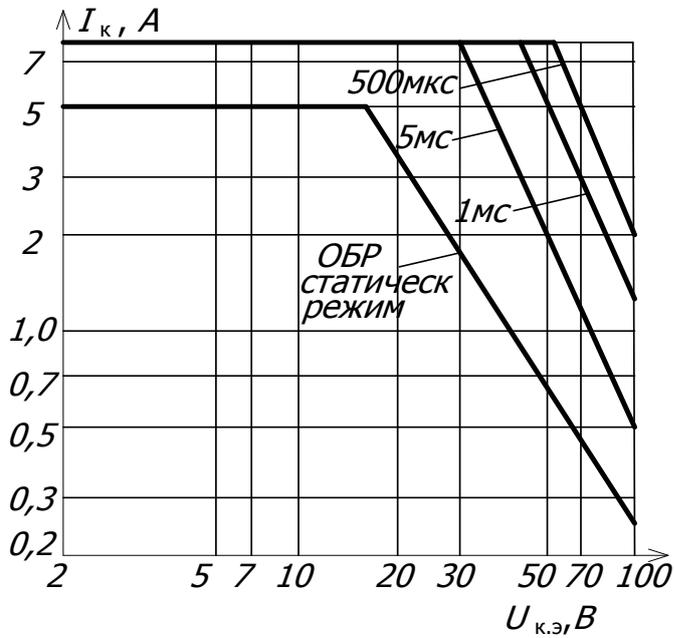
ОБР – область на семействе коллекторных характеристик БПТ, которая имеет своими границами $I_{к.макс}$ по уровню тока, $U_{кэ.макс}$, по уровню напряжения и гиперболу рассеяния $P_{к.макс}$. В качестве примера на рис.17, а изображено семейство коллекторных ВАХ триода серии КТ8115А (аналогично выглядит семейство ВАХ триода КТ8116А) с обозначенной областью безопасной работы.

В настоящее время в справочной литературе вместо изображения семейства коллекторных ВАХ даются графики ОБР триода в координатах I_k , $U_{кэ}$, причем значения тока и напряжения по осям откладываются в логарифмическом масштабе. На рис.17, б изображены статическая и импульсные ОБР КТ8115А с временем нахождения в опасном состоянии: 5мс, 1мс, 0,5мс при $T_k = 25^0C$ и скважности импульсов тока коллектора $g = T/T_{и} = 10$.

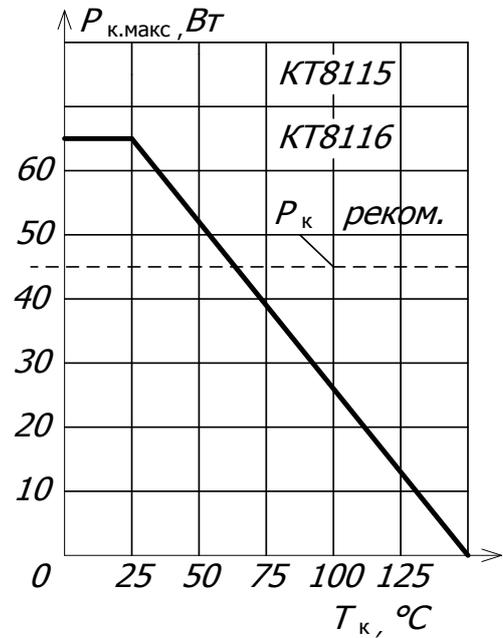
На рис.17, в ломаной линией обозначена зависимость максимально допустимой мощности рассеяния на коллекторе $P_{к.макс}$ с теплоотводом (точнее $P_{к.т.макс}$) от температуры корпуса триода T_k . График показывает, что при повышении температуры сверх нормы $T_k = 25^0C$ мощность $P_{к.макс}$ следует уменьшать.



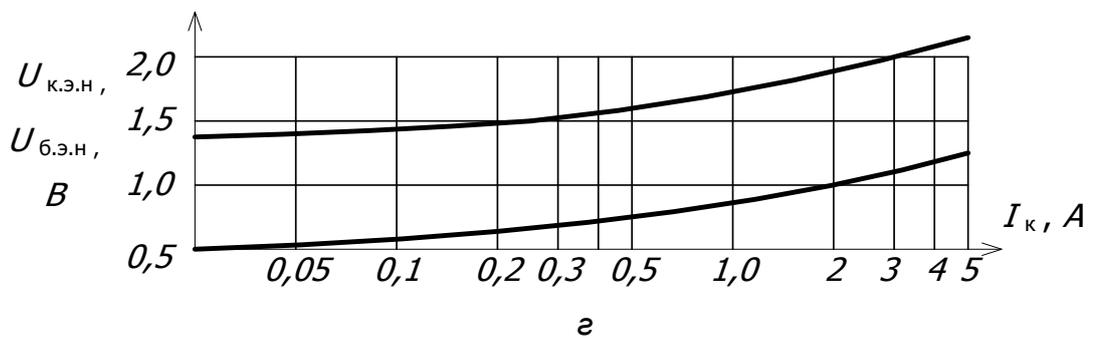
а



б



в



г

Рис.17

В настоящее время в справочной литературе вместо изображения семейства коллекторных ВАХ даются графики ОБР триода в координатах I_k , $U_{кэ}$, причем значения тока и напряжения по осям откладываются в логарифмическом масштабе.

На рис.17, б изображены статическая и импульсные ОБР КТ8115А с временем нахождения в опасном состоянии: 5мс, 1мс, 0,5мс при $T_k = 25^{\circ}\text{C}$ и скважности импульсов тока коллектора $g = T/T_n = 10$.

На рис.17, в ломаной линией обозначена зависимость максимально допустимой мощности рассеяния на коллекторе $P_{к.макс}$ с теплоотводом (точнее $P_{к.т.макс}$) от температуры корпуса триода T_k . График показывает, что при повышении температуры сверх нормы $T_k = 25^{\circ}\text{C}$ мощность $P_{к.макс}$ следует уменьшать.

На рис.17, г даны зависимости $U_{кэ.н}$, $U_{бэ.н} = f(I_k)$, которые могут быть использованы для расчета потерь в триоде, работающем в режиме ключа.

Фирма изготовитель триодов КТ8115, КТ8116 рекомендует для повышения надежности эксплуатировать приборы при значениях параметров не более 70% от предельно допустимых [5]. Эта рекомендация определяет величину коэффициентов запаса по напряжению и току $K_{зап} = 0,7$. Значит наибольшие рабочие напряжение и ток данного БПТ не должны превышать соответственно

$$U_{кэ.раб} = 0,7U_{кэ.макс} = 70\text{В}; \quad I_{к.раб} = 0,7I_{к.макс} = 3,5\text{А}.$$

Выбирая мощные триоды для работы в силовых устройствах, следует задаваться значениями коэффициентов запаса по напряжению и току $K_{зап} = 0,5 \dots 0,7$. Однако выбор мощного триода можно считать законченным только после оценки теплового режима работы, то есть необходим тепловой расчет.

6. Тепловой расчет [6]

Тепловая цепь. Параметры

Определяющим параметром теплового режима является максимально допустимая температура коллекторного перехода $T_{п.макс}$. Для уменьшения $T_{п}$ используют теплоотводы, или радиаторы, (рис.18): пластинчатые (а), ребристые (б), штыревые (в). Площадь поверхности ребристых и штыревых радиаторов значительно больше, чем пластинчатых при равных габаритах.

Примечание. На радиаторах дано изображение триодов в корпусах разного исполнения: (а) корпус *TO220*; (б) корпус *TO3*.

На рис.19, а представлен фрагмент конструкции, состоящей из радиатора и установленного на нем триода. Триод условно показан в виде корпуса и кристалла. Большая часть объема кристалла приходится на коллектор и коллекторный переход. Будем считать, что коллекторный переход является сосредоточенным источником тепла, от которого тепловой поток через элементы конструкции триода и радиатора распространяется в окружающую среду. Тепловой поток обусловлен мощностью потерь P_k , или греющей мощностью.

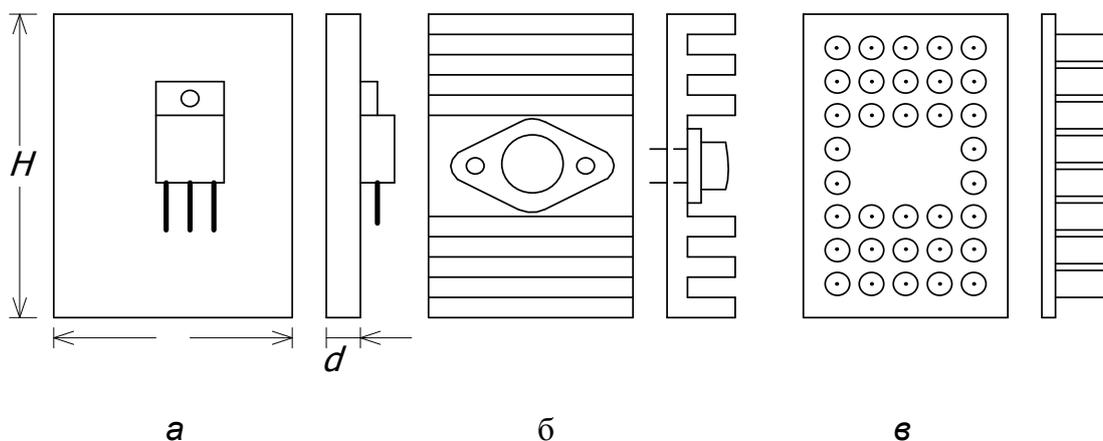


Рис.18

Вся цепь распространения теплового потока от источника до окружающей среды на рис.19, б представлена тепловыми сопротивлениями: $R_{п.к}$ – тепловое сопротивление между коллектором, (КП) и корпусом; $R_{к.р}$ – тепловое сопротивление между корпусом и радиатором; $R_{р.с}$ – тепловое сопротивление между радиатором и окружающей средой. Дадим краткую характеристику каждого из сопротивлений.

Коллектор размещается на подложке (основе), которая конструктивно совмещена с металлическим корпусом прибора. Чем больше площадь коллектора и корпуса, тем меньше тепловое сопротивление $R_{п.к}$.

Тепловое сопротивление $R_{к.р}$. Металлическая поверхность корпуса триода и поверхность радиатора, на которой устанавливается триод должны быть гладкими и чистыми. В этом случае тепловое сопротивление $R_{к.р}$ будет небольшим. Для снижения $R_{к.р}$ поверхность радиатора в месте посадки триода покрывают специальным теплопроводным составом, например: пастой КПТ–8; клеем–герметиком «Эластосил» и т.д. Механизм переноса

тепла путем непосредственного контакта через элементы конструкции, в частности, от перехода к корпусу триода, от корпуса к радиатору называют кондукцией.

Если поверхность корпуса триода и, тем более, радиатора велики, то необходимо учитывать перенос тепла в окружающую среду излучением.

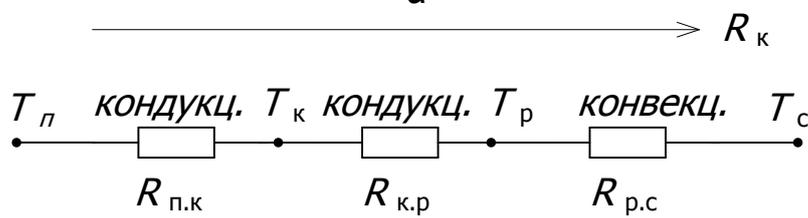
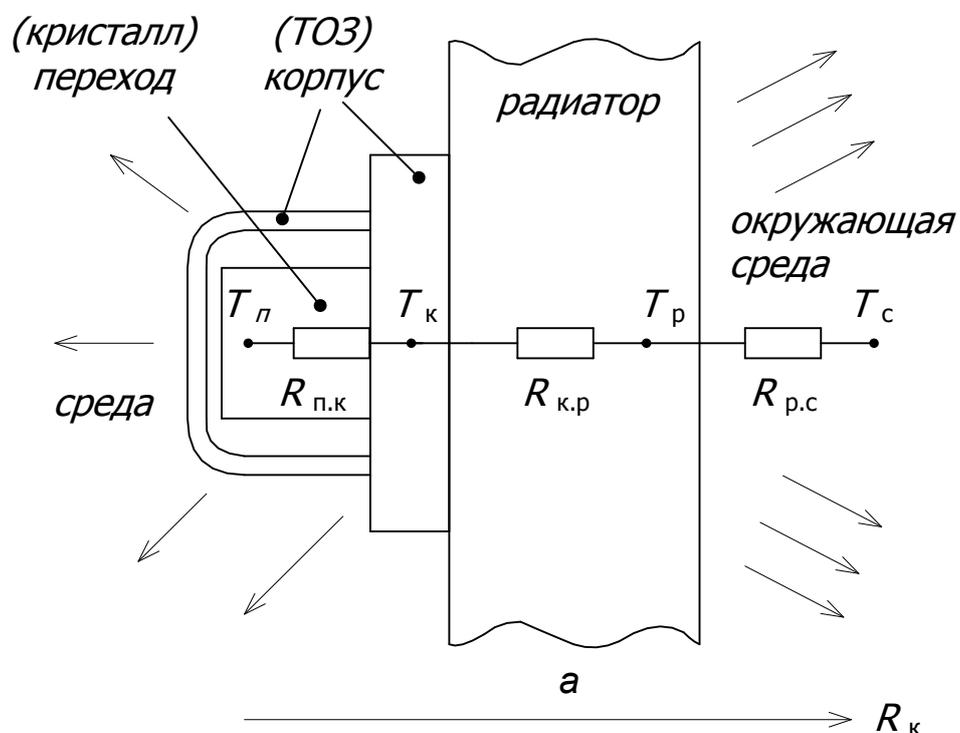


Рис.19

Тепловое сопротивление $R_{р.с}$. В процессе работы триод и радиатор могут сильно прогреться. Радиатор служит для искусственного увеличения охлаждающей поверхности корпуса триода, способствуя более интенсивному рассеянию тепла в окружающую среду и снижению температуры корпуса $T_к$. Механизмы переноса тепла от корпуса и радиатора в окружающую среду – конвекция и излучение.

Естественная конвекция предполагает движение и смену нагретых слоев воздуха более холодным. Чтобы снизить тепловое сопротивление $R_{п.с}$ применяют принудительную вентиляцию. Если принудительная вентиляция

нежелательна или недопустима, то приходится применять габаритный радиатор с большой площадью охлаждающей поверхности. В этом случае ребристые и штыревые радиаторы имеют преимущество перед простыми пластинчатыми.

Тепловая энергия рассеивается в окружающую среду также и излучением. Чтобы излучение было более активным поверхность радиатора рекомендуется окрашивать в темные цвета.

Уравнения тепловой цепи

Уравнение составляют по принятой схеме (модели) тепловой цепи. На рис.19, б изображена схема, состоящая из трех последовательно соединенных тепловых сопротивлений: $R_{п.к}$, $R_{к.р}$, $R_{р.с}$. Напомним, что эквивалентом теплового тока является поток греющей мощности P_k , единый для последовательной цепи.

Температура окружающей среды T_c является одним из условий задания на расчет устройства. Максимальная температура перехода $T_{п.макс}$ и тепловое сопротивление переход – корпус $R_{п.к}$ берутся из справочной литературы. Значения температур перехода $T_п$, корпуса $T_к$, радиатора $T_р$ рассчитываются, если известны тепловые сопротивления $R_{п.к}$, $R_{к.р}$, $R_{р.с}$.

Тепловые падения напряжений на сопротивлениях, или приращения температур, равны соответственно

$$T_п - T_к = P_k \cdot R_{п.к} ; T_к - T_р = P_k \cdot R_{к.р} ; T_р - T_c = P_k \cdot R_{р.с} . \quad (41, а, б, в)$$

Из уравнения (41, б) следует, что

$$T_п = P_k \cdot R_{п.с} + T_c , \quad (42)$$

где $R_{п.с} = R_{п.к} + R_{к.р} + R_{р.с}$ – полное сопротивление тепловое цепи.

После подстановки $R_{п.с}$ в (42) получим

$$T_п = (P_k \cdot R_{п.к} + P_k \cdot R_{к.р} + P_k \cdot R_{р.с}) + T_c . \quad (43)$$

Схема тепловой цепи может отличаться от исходной (рис.19, б). Если радиатор имеет достаточно большую площадь охлаждающей поверхности, то рассеяние тепла в окружающую среду происходит и конвекцией, и излучением. Этому случаю соответствует тепловая цепь, представленная на рис.20, а.

Более точно реальные условия работы триода отражает тепловая цепь, изображенная на рис.20, б. Здесь $R_{к.с}$, или $R'_{п.с}$ – тепловое сопротивление корпус – окружающая среда, или переход – окружающая среда. Обычно $R_{к.с}$

и $R'_{п.с}$ на 1..2 порядка больше $R_{п.к}$. Суммарное сопротивление $R_{п.с} = R_{п.к} + R_{к.р} + R_{р.с}$ должно быть меньше $R_{к.с}$ или $R'_{п.с}$, что достигается с помощью радиатора. Необходимость применения последнего подтверждается следующими рассуждениями.

Положим, что мощный триод работает в схеме силового импульсного преобразователя без радиатора. Тогда тепловая цепь упростится и будет содержать либо одно сопротивление $R'_{п.с}$, либо два, последовательно соединенных $R_{п.к}$ и $R_{к.с}$ (рис.20, в). Соответственно выражение (42) преобразуется к виду

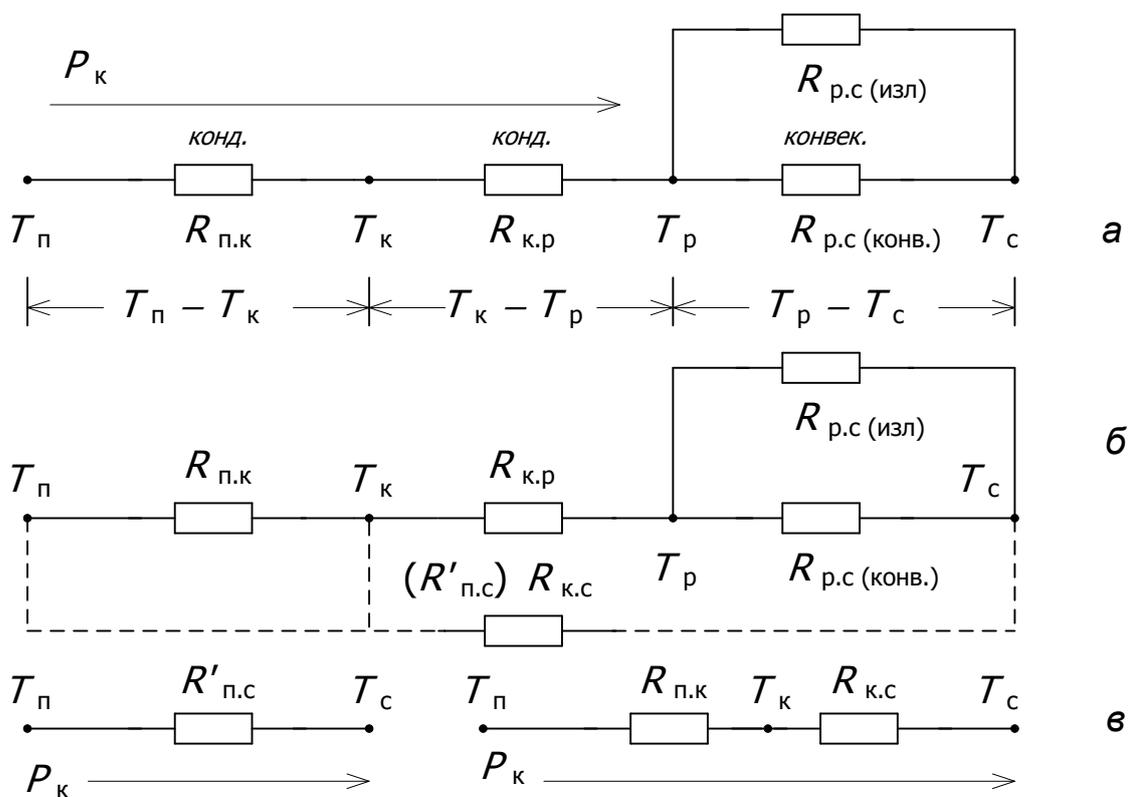


Рис.20

$$T_{п} = P_{к} \cdot R'_{п.с} + T_{с} \quad , \quad \text{или} \quad T_{п} = P_{к} \cdot (R_{п.к} + R_{к.с}) + T_{с}. \quad (44, \text{а, б})$$

По полученным формулам нетрудно рассчитать температуру перехода мощного триода.

Пример. Триод серии КТ827 работает в схеме импульсного преобразователя. Тепловое сопротивление $R'_{п.с} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$; допустимая температура коллекторного перехода $T_{п.макс} = 200^{\circ}\text{C}$.

Условия работы: максимальная мощность, рассеиваемая коллекторным переходом $P_{к.макс} = 7\text{Вт}$; температура окружающей среды $T_c = 25^{\circ}\text{C}$.

Рассчитать температуру коллекторного перехода триода без радиатора.

Тепловая цепь содержит только одно сопротивление $R'_{п.с}$, поэтому расчет $T_{п}$ проводится по (44, а)

$$T_{п} = R'_{п.с} \cdot P_{к.макс} + T_c = 7 \cdot 35 + 25 = 270^{\circ}\text{C}.$$

Рассчитанное значение $T_{п}$ больше $T_{п.макс}$, следовательно, триод КТ827 при заданной мощности $P_{к.макс}$ применять без радиатора недопустимо.

Если справочные данные содержат сведения о величинах $R_{п.к}$ и $R_{к.с}$, то температура перехода рассчитывается по формуле (44, б).

Триоды средней и большой мощности выпускаются в разнообразных корпусах, но наиболее распространенные среди них: а) *ТО218*, *ТО220*, *ТО247*, *ТО3Р* – модификации пластмассовых корпусов прямоугольной формы с металлической основой, б) корпус *ТО3* – полностью металлический по объему и площади поверхности значительно бóльший, чем пластмассовые корпуса.

Нередко возникает необходимость электрически изолировать корпус триода от радиатора. В этом случае приходится использовать изолирующие (диэлектрические) прокладки и тепловое сопротивление $R_{к.р}$ определять суммой

$$R_{к.р\Sigma} = R_{к.р} + R_{пр},$$

где $R_{к.р}$ – тепловое сопротивление корпус – радиатор, взятое из справочника; $R_{пр}$ – тепловое сопротивление прокладки.

Определение тепловых сопротивлений

Сопротивления $R_{п.к}$ и $R_{к.р}$. Величины сопротивлений $R_{п.к}$ и $R_{к.р}$ содержатся в справочных данных на триоды. Сопротивление $R_{п.к}$ существенно зависит от типа корпуса. Для триодов, выполненных в корпусах *ТО3* характерны меньшие значения $R_{п.к}$, чем в пластмассовых корпусах *ТО218*, *ТО220* и т.д. Величину сопротивления корпус – радиатор $R_{к.р}$ при использовании теплопроводных составов (КПТ – 8, Эластосил) выбирают в пределах $\approx 0,36 \dots 0,76^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Если триод изолирован от радиатора диэлектрической прокладкой, то $R_{к,р}$ рассчитывают по формуле (43). В таблице 1, в качестве примера, даны значения суммарных тепловых сопротивлений $R_{к,р}$ для двух типов корпусов и двух типов диэлектрических прокладок [6].

Таблица 1

Тип корпуса	Тепловое сопротивление $R_{к,р\Sigma}$ $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	
	Термопленка 0,051 мм	Слюда 0,076 мм
ТО220	2,25	1,75
ТО3	0,52	0,36

Сопротивление $R_{р,с}$: Радиатор рассеивает тепловую энергию в окружающую среду конвекцией и излучением, то есть необходимо рассчитывать конвекционную составляющую сопротивления $R_{р,с(к)}$ и составляющую, обусловленную излучением $R_{р,с(из)}$.

Закон передачи тепловой энергии от радиатора в окружающую среду за счет конвекции и излучения описывается формулой (41, в), из которой следует

$$P_K = \frac{T_p - T_c}{R_{P,C}}, \quad (45)$$

чем меньше $R_{р,с}$, тем большую тепловую мощность рассеивает радиатор.

1. Тепловое сопротивление $R_{р,с(к)}$

$$R_{P,C(K)} = \frac{1}{\alpha_K \cdot S_K}, \quad (46)$$

где α_K – коэффициент конвекционного теплообмена между радиатором и окружающей средой;

S_p – площадь поверхности радиатора.

Формула расчета коэффициента теплообмена для типичных случаев расположения радиаторов выбирается из таблицы 2, значение коэффициента A_2 для воздушной среды из таблицы 3. Среднее значение температуры $T_{cp} = 0,5 \cdot (T_p + T_c)$.

Таблица 2

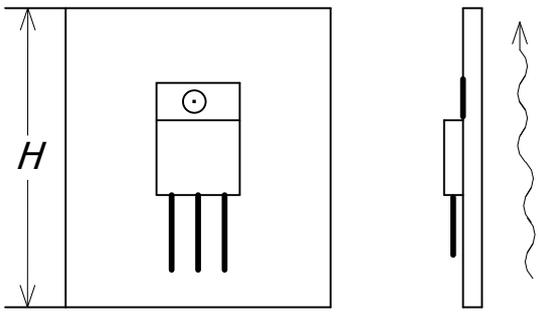
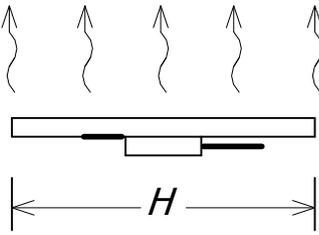
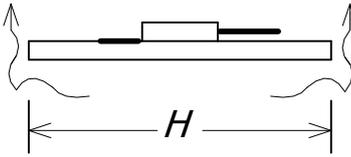
	<p>Плоская поверхность радиатора, ориентированная вертикально</p> $\alpha_K = A_2 \sqrt{\frac{T_{p,доп} - T_c}{H}}$
	<p>Поверхность, ориентированная горизонтально, нагретой стороной вверх</p> $\alpha_K = 1,3 \cdot A_2 \sqrt{\frac{T_{p,доп} - T_c}{H}}$
	<p>Поверхность, ориентированная горизонтально, нагретой стороной вниз</p> $\alpha_K = 0,7 \cdot A_2 \sqrt{\frac{T_{p,доп} - T_c}{H}}$

Таблица 3

$T_{ср}, ^\circ C$	0	10	20	30	40	60	80	100	120	140	150
A_2	1,42	1,4	1,38	1,36	1,34	1,31	1,29	1,27	1,26	1,25	1,245

2. Тепловое сопротивление $R_{p,c(из)}$

$$R_{p,c(из)} = \frac{1}{\alpha_{из} \cdot S_p}, \quad (47)$$

где $\alpha_{из}$ – коэффициент теплообмена между радиатором и окружающей средой излучением; S_p – площадь поверхности радиатора.

Чтобы определить тепловое сопротивление $R_{p,c(из)}$, необходимо вычислить коэффициент теплообмена излучением

$$\alpha_{из} = \varepsilon_p \cdot \varphi_{p,c} \cdot f(T_p, T_c) \quad (48)$$

Поясним физический смысл сомножителей последней формулы.

ε_p – приведенная степень черноты излучающей поверхности. Значения степени черноты различных материалов, которые используются для изготовления радиаторов, даны в таблице 4; $\varphi_{p,c}$ – этот параметр показывает, какая часть тепловой энергии, излученной радиатором попадает в окружающую среду. У плоских (пластинчатых) радиаторов $\varphi_{p,c} \approx 1$, у ребристых и штыревых меньше 1; $f(T_p, T_c)$ – переходная температурная функция, определяемая разностью температур радиатора и окружающей среды. Значения функции даны в таблице 5.

Таблица 4

Материалы	ε_p
Алюминий с полированной поверхностью	0,04.....0,06
Оксисленный алюминий	0,2.....0,31
Силуминовое литье	0,31.....0,33
Черненный анодированный сплав	0,85.....0,9
Латунь окисленная	0,22
Краска матовая темных цветов	0,92.....0,96

Радиатор, на котором установлен работающий мощный триод, прогревается неравномерно. В месте крепления прибора температура радиатора максимальная $T_{p,макс}$. на отдаленных участках – ниже. Размеры радиатора влияют на поверхностное распределение температуры. Свойство неравномерности распределения температуры учитывается коэффициентом неравномерности прогрева g_n

$$g_n = \frac{T_{p,доп} - T_c}{T_{p,макс} - T_c} = \frac{\Delta T_{p,доп}}{\Delta T_{p,макс}}, \text{ отсюда } \Delta T_{p,доп} = g_n \cdot \Delta T_{p,макс} \quad (49)$$

Здесь: $T_{p,макс}$ – максимальная температура радиатора в месте крепления триода, $\Delta T_{p,макс}$ – максимальное превышение температуры радиатора над температурой окружающей среды (максимальный перегрев);

$T_{p,доп}$ – средняя допустимая (по расчету) температура радиатора, $\Delta T_{p,доп}$ – среднее расчетное превышение температуры радиатора над температурой окружающей среды.

Для плоского (пластинчатого) радиатора без принудительного охлаждения численное значение g_n определяется из графика, изображенного на рис.21 [6].

Значения функции $f(T_c, T_p)$

Таблица 5

T_p , °C	Температура окружающей среды T_c , °C						
		10	15	20	25	30	35
10	5,03						
20	5,31	5,45	5,59				
25	5,45	5,59	5,76	5,90			
30	5,59	5,76	5,90	6,05	6,20		
35	5,76	5,90	6,05	6,20	6,35	6,51	
40	5,90	6,06	6,20	6,35	6,51	6,60	6,82
45	6,05	6,20	6,35	6,51	6,66	6,83	7,00
50	6,20	6,35	6,51	6,67	6,83	7,00	7,17
60	6,65	6,70	6,87	7,04	7,19	7,35	7,51
70	6,90	7,06	7,21	7,39	7,55	7,72	7,86
80	7,27	7,44	7,59	7,75	7,80	8,07	8,26
90	7,63	7,82	7,98	8,13	8,31	8,49	8,67
100	8,03	8,19	8,37	8,53	8,72	8,91	9,09
110	8,43	8,60	8,79	8,97	9,15	9,33	9,51
120	8,85	9,02	9,20	9,40	9,56	9,77	9,98
130	9,30	9,49	9,65	9,88	10,01	10,22	10,41
140	9,75	9,95	10,12	10,30	10,50	10,72	10,90
150	10,2	10,39	10,57	10,77	10,96	11,16	11,37

Окончание таблицы 5

T_p , °C	Температура окружающей среды T_c , °C							
	40	45	50	60	70	80	90	100
45	7,14							
50	7,35	7,50						
60	7,69	7,87	8,05					
70	8,05	8,24	8,42	8,80				
80	8,45	8,65	8,83	9,20	9,62			
90	8,86	9,04	9,25	9,65	10,03	10,46		
100	9,28	9,46	9,66	10,08	10,49	11,91	11,36	
110	9,71	9,90	10,10	10,51	10,93	11,38	11,82	12,30
120	10,17	10,35	10,56	11,01	11,42	11,87	12,31	12,80
130	10,62	10,81	11,02	11,42	11,90	12,37	12,82	13,32
140	11,10	11,31	11,51	11,94	12,40	12,89	13,40	13,85
150	11,57	11,79	12,00	12,44	12,90	13,38	13,87	14,38

7. Методика теплового расчета режима работы БПТ

Тепловой расчет предполагает проверку теплового режима работы триода без радиатора и расчет радиатора. Если в справочных данных имеется информация о величинах теплового сопротивления переход – окружающая среда $R'_{п.с}$ или корпус – окружающая среда $R_{к.с}$, то следует провести проверочный расчет по определению реального значения температуры коллекторного перехода $T_{п}$ при заданном значении $P_{к.макс}$. Расчет проводится по схемам тепловой цепи (рис. 20, в) и формулам (44, а, б). Если рассчитанное значение $T_{п} > T_{п.макс}$, то необходимо переходить к определению размеров радиатор.

Если информация о величинах $R'_{п.с}$ и $R_{к.с}$ отсутствует, то следует сразу приступить к расчету радиатора в соответствии со схемой тепловой цепи, представленной на рис.20, а. Оговорим для всех случаев тип и характеристики радиатора: – пластинчатый (плоский); материал – алюминий и его сплавы; радиатор окрашен в темные цвета; вентиляция естественная, давление нормальное.

1. Изобразить схему тепловой цепи с обозначением тепловых сопротивлений, температур (тепловых потенциалов) $T_{п}$, $T_{к}$, $T_{р}$, $T_{с}$, потока греющей мощности (теплового тока) $P_{к.макс}$ (рис.20, а).

2. Задаться высотой радиатора H (один из размеров пластины) и по графику (рис. 21) определить значение коэффициента неравномерности $g_{н}$.

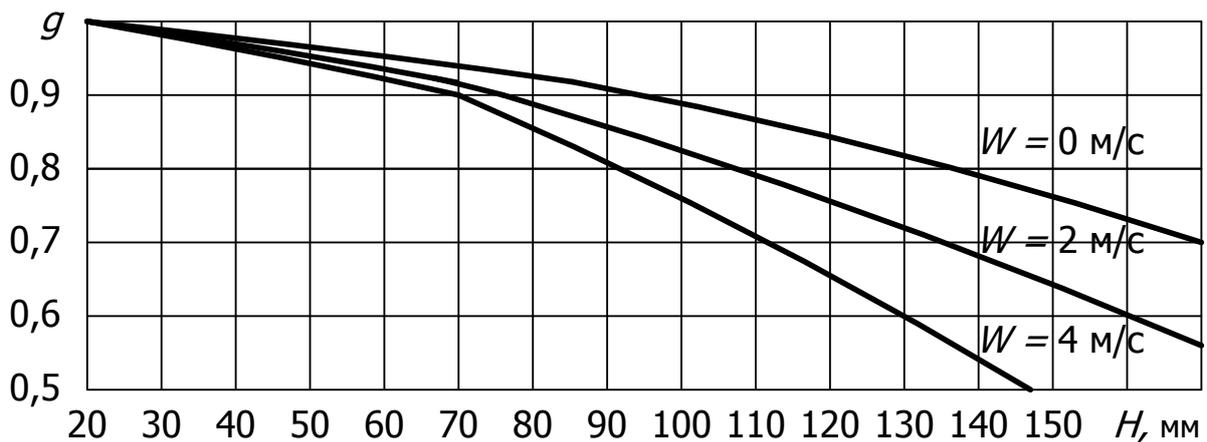


Рис.21

3. Рассчитать среднюю допустимую температуру поверхности радиатора $T_{р.доп}$ с учетом коэффициента неравномерности $g_{н}$. Из уравнения (43) находим

$$R_{p.c} \cdot P_{k.макс} = T_{п.макс} - (R_{п.к} + R_{к.р}) \cdot P_{к.макс} - T_c ,$$

или с учетом (41, в)

$$T_{p.макс} - T_c = T_{п.макс} - (R_{п.к} + R_{к.р}) \cdot P_{к.макс} - T_c . \quad (50)$$

Согласно (49) средняя допустимая температура поверхности радиатора и допустимый перегрев соответственно

$$T_{p.доп} = g_n \cdot [T_{п.макс} - (R_{п.к} + R_{к.р}) \cdot P_{к.макс}], \quad \Delta T_{p.доп} = T_{p.доп} - T_c. \quad (51, а, б)$$

4. Рассчитать коэффициент конвекционного теплообмена α_k . Расчет проводится по одной из формул таблиц 2. Коэффициент A_2 выбирают по вычисленному среднему арифметическому значению температуры $T_{cp} = 0,5 \cdot (T_{p.доп} + T_c)$ из таблицы 3.

5. Рассчитать коэффициент теплообмена излучением $\alpha_{из}$ по формуле (47). У плоских радиаторов $\varphi_{p.c} \approx 1$; степень черноты ε_p и значение функции $f(T_{p.доп}, T_c)$ находят по таблицам 4,5.

6. Рассчитать общее тепловое сопротивление участка цепи радиатор – среда $R_{p.c\Sigma}$. Тепловые сопротивления $R_{p.c(к)}$ и $R_{p.c(из)}$ соединены параллельно; форма выражений, определяющих величины обоих сопротивлений одинаковы (47 и 47)

$$R_{p.c(к)} = \frac{1}{\alpha_k \cdot S_p}, \quad R_{p.c(из)} = \frac{1}{\alpha_{из} \cdot S_p},$$

следовательно, общее тепловое сопротивление участка радиатор – среда

$$R_{p.c\Sigma} = R_{p.c(к)} \parallel R_{p.c(из)} = \left(\frac{1}{\alpha_k \cdot S_p} \right) \parallel \left(\frac{1}{\alpha_{из} \cdot S_p} \right) = \frac{1}{\alpha_k + \alpha_{из} \cdot S_p}. \quad (52)$$

7. Рассчитать площадь поверхности радиатора, исходя из полученных значений допустимого перегрева радиатора $\Delta T_{p.доп}$ и общего сопротивления $R_{p.c\Sigma}$

$$\Delta T_{p.доп} = R_{p.c\Sigma} = \frac{P_{к.макс}}{\alpha_k + \alpha_{из} \cdot S_p},$$

отсюда

$$S_p = \frac{P_{к.макс}}{\alpha_k + \alpha_{из} \cdot \Delta T_{p.доп}}, \quad [M^2]. \quad (53)$$

8. Рассчитать ширину плоского радиатора В

$$B = \frac{S_p - 2H \cdot d}{2 \cdot H + d}, [\text{м}] \quad (54)$$

где d – толщина пластины, выбирается равной $3 \dots 4 \text{ мм} = 0,003 \dots 0,004 \text{ м}$.

Примечание 1. После расчета радиатора его высота и ширина могут быть изменены при сохранении площади поверхности S_p . Обычно H и B выбирают соизмеримыми.

2. B [6] H назван, как меньший из размеров двух сторон радиатора H и B , поэтому после расчета следует поменять обозначения и в соответствии с обозначениями располагать радиатор.

ПРИМЕР 1

Триод серии КТ8115Б работает в схеме транзисторного преобразователя (режим D). Согласно справочным данным: максимальная температура перехода $T_{п.макс} = 150^\circ\text{C}$; тепловое сопротивление переход – корпус $R_{п.к} = 1,92^\circ\text{C}/\text{Вт}$; триод выполнен в пластмассовом корпусе $TO220$.

Условия работы: максимальная мощность, рассеиваемая на коллекторном переходе $P_{к.макс} = 5\text{Вт}$; температура окружающей среды $T_c = 30^\circ\text{C}$; радиатор плоский, выполнен из алюминия, покрытого темной краской, степень черноты $\varepsilon_p = 0,9$; используется теплопроводная паста КПТ–8, сопротивление $R_{к,р}$ выбрано равным $\approx 0,75^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Задание. Рассчитать площадь поверхности плоского радиатора, выбрать размеры.

1. Изобразить схему тепловой цепи с обозначением температур, тепловых сопротивлений и их величин, согласно справочным данным и условиям работы

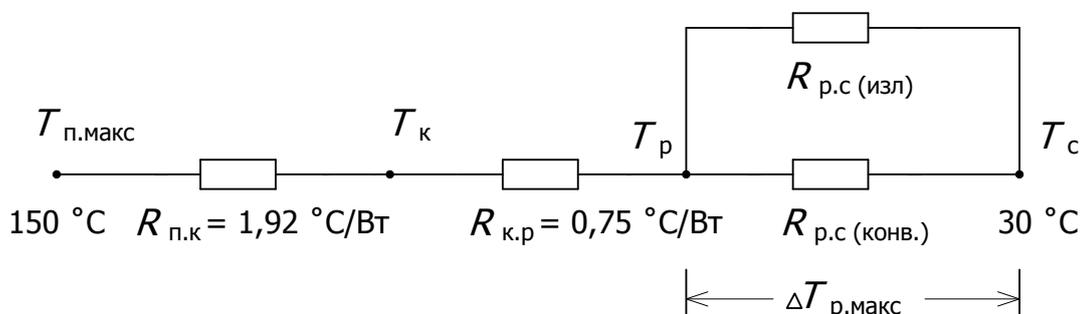


Рис.22

2. Задаться высотой радиатора H и выбрать коэффициент

неравномерности распределения температуры по графику рис. 21

$$H = 0,06 \text{ м}, \quad g_n = 0,97.$$

3. Рассчитать среднюю допустимую температуру поверхности радиатора $T_{р.доп}$.

Согласно (50) максимальная температура радиатора $T_{р.макс}$ в месте посадки триода

$$T_{р.макс} = T_{п.макс} - (R_{п.к} + R_{к.р}) \cdot P_{к.макс} = 150 - (1,92 + 0,75) \cdot 5 = 136,65 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Средняя допустимая температура (51, а)

$$T_{р.доп} = g_n \cdot [T_{п.макс} - (R_{п.к} + R_{к.р}) \cdot P_{к.макс}] = 132,55 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перегрев поверхности радиатора (51, б)

$$\Delta T_{р.доп} = T_{р.доп} - T_c = 132,55 - 30 = 102,55 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4. Рассчитать коэффициент конвекционного теплообмена α_k .

Среднее арифметическое значение температуры

$$T_{ср} = 0,5 \cdot (T_{р.доп} + T_c) = 0,5 \cdot (132,55 + 30) = 81,27 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

По таблице 3 и известному значению $T_{ср}$ выбирается коэффициент $A_2 = 1,29$. Коэффициент конвекционного теплообмена для вертикально ориентированного радиатора

$$\alpha_k = A_2 \cdot \sqrt[4]{\frac{T_{р.доп} - T_c}{H}} = 1,29 \cdot \sqrt[4]{\frac{132,55 - 30}{0,06}} = 8,29.$$

5. Рассчитать коэффициент теплообмена излучением α_k по формуле (48). Для плоских радиаторов $\varphi_{р.с} \approx 1$; степень черноты $\varepsilon_p = 0,9$; значение функции $f(T_{р.доп}, T_c) = f(132,55; 30) = 10,22$ выбрано по таблице

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,9 \cdot 10,22 \approx 9,2.$$

6. Рассчитать общее тепловое сопротивление участка тепловой цепи радиатор – окружающая среда $R_{р.с\Sigma}$ (52)

$$R_{р.с\Sigma} = \frac{1}{\alpha_k + \alpha_{из} \cdot S_p} = \frac{1}{8,29 + 9,2 \cdot S_p} = \frac{0,0572}{S_p}.$$

7. Рассчитать площадь поверхности радиатора (53)

$$S_p = \frac{P_{к.макс}}{\alpha_k + \alpha_{из} \cdot \Delta T_{р.доп}} = \frac{5 \cdot 0,0572}{102,55} = 0,00279 \text{ м}^2.$$

8. Рассчитать ширину B плоского радиатора; (54)

$$B = \frac{S_p - 2H \cdot d}{2H + d} = \frac{0,00279 - 2 \cdot 0,06 \cdot 0,004}{2 \cdot 0,06 + 0,004} = 0,018 \text{ м} = 1,8 \text{ см.}$$

Если задаться $H = 4$ см, то после перерасчета получим ширину радиатора $B = 2,8$ см при $d = 0,4$ см.

ПРИМЕР 2

Триод серии КТ819ГМ работает в схеме транзисторного преобразователя (режим D). Согласно справочным данным: максимальная температура коллекторного перехода $T_{п.макс} = 100$ °С; тепловое сопротивление переход – корпус $R_{п.к} = 1$ °С / Вт; тепловое сопротивление переход – окружающая среда $R'_{п.с} = 50$ °С / Вт; триод выполнен в металлическом корпусе $ТОЗ$.

Условия работы: максимальная мощность, рассеиваемая на коллекторном переходе $P_{к.макс} = 2,5$ Вт; температура окружающей среды $T_c = 25$ °С; радиатор выполнен из анодированного алюминиевого сплава, толщина пластины $d = 3$ мм; степень черноты $\epsilon_p = 0,85$; используется теплопроводящая паста КПП– 8, тепловое сопротивление корпус – радиатор $R_{к.р} = 0,5$ °С / Вт.

Проверочный расчет. Определим температуру коллекторного перехода $T_{п}$ триода КТ819ГМ, работающего без радиатора при $P_{к.макс} = 2,5$ Вт. Согласно (44, а)

$$T_{п} = R'_{п.с} \cdot P_{к.макс} + T_c = 50 \cdot 2,5 + 2,5 = 150$$
 °С.

Так как $T_{п} > T_{п.макс}$, то необходимо применить радиатор.

Задание. Рассчитать площадь поверхности радиатора, выбрать размеры.

1. Изобразить схему тепловой цепи с указанием температур, тепловых сопротивлений и их величин согласно справочным данным и условиям работы, (рис.23).

2. Задаться высотой радиатора H и по графику (рис.21) выбрать коэффициент неравномерности g_H

$$H = 0,05 \text{ м. } g_H = 0,98.$$

3. Рассчитать среднюю допустимую температуру поверхности радиатора $T_{р.доп}$.

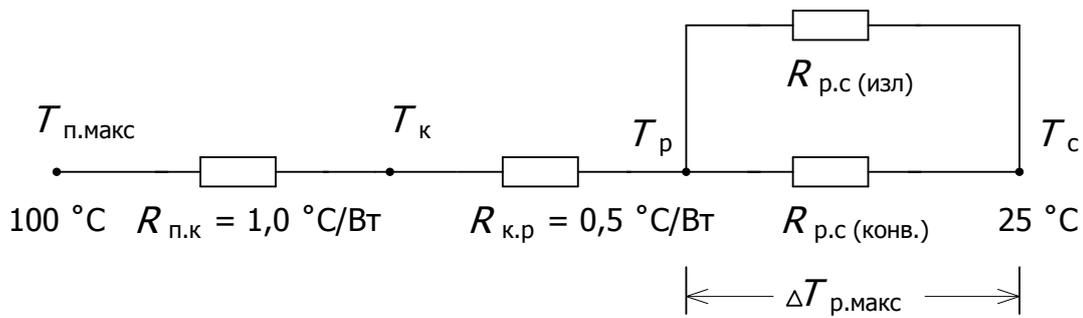


Рис.23

Согласно (50) максимальная температура радиатора $T_{р.макс}$ в месте посадки триода

$$T_{р.макс} = T_{п.макс} - (R_{п.к} + R_{к.р}) \cdot P_{к.макс} = 100 - (1 + 0,5) \cdot 2,5 = 96,25 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Средняя допустимая температура поверхности радиатора

$$T_{р.доп} = g_n \cdot [T_{п.макс} - (R_{п.к} + R_{к.р}) \cdot P_{к.макс}] = 94,32 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Перегрев поверхности радиатора (51, б)

$$\Delta T_{р.доп} = T_{р.доп} - T_c = 94,32 - 25 = 69,32 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

4. Рассчитать коэффициент конвекционного теплообмена α_k .

Среднее арифметическое значение температуры

$$T_{ср} = 0,5(T_{р.доп} + T_c) = 0,5(94,32 + 25) = 59,66 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

По таблице 3 выбирается значение коэффициента $A_2 = 1,31$. Коэффициент α_k для радиатора, ориентированного горизонтально; поверхность, обращенная нагретой стороной вниз (таблица 2)

$$\alpha_k = 0,7 \cdot A_2 \cdot \sqrt[4]{\frac{T_{р.доп} - T_c}{H}} = 0,7 \cdot 1,31 \cdot \sqrt[4]{\frac{94,32 - 25}{0,05}} = 5,595 .$$

5. Рассчитать коэффициент теплообмена излучением $\alpha_{из}$ по формуле (48); $\varphi_{р.с} = 1$; степень черноты $\epsilon_p = 0,85$; значение функции $f(T_{р.доп}; T_c) = f(94,32; 25) \approx 8,35$ выбрано по таблице 5. Коэффициент теплообмена излучением

$$\alpha_{из} \approx 1 \cdot 0,85 \cdot 8,35 = 7,098 .$$

6. Рассчитать общее тепловое сопротивление участка тепловой цепи радиатор – среда $R_{р.с\Sigma}$ (52)

$$R_{р.с\Sigma} = \frac{1}{\alpha_k + \alpha_{из} \cdot S_p} = \frac{1}{5,595 + 7,098 \cdot S_p} = \frac{0,0788}{S_p} .$$

7. Рассчитать площадь поверхности радиатора (53)

$$S_p = \frac{P_{к.МАКС}}{\alpha_K + \alpha_{ИЗ} \cdot \Delta T_{p,доп}} = \frac{2,5 \cdot 0,0788}{69,32} = 0,00284 \text{ м}^2.$$

8. Рассчитать ширину плоского радиатора (54)

$$B = \frac{S_p - 2H \cdot d}{2 H + d} = \frac{0,00284 - 2 \cdot 0,05 \cdot 0,003}{2 \cdot 0,05 + 0,003} \approx 0,024 \text{ м}.$$

Библиографический список

1. Полупроводниковые приборы: транзисторы. Справочник. Под редакцией Н.Н. Горюнова.– М.: Энергоиздат, 1982г, 904с.
2. Аксенов А.И, Нефедов А.В, Юшин А.М. Элементы схем бытовой радиоаппаратуры. Диоды. Транзисторы.– М.: Радио и Связь, 1992г, 224с.
3. Прянишников В.А. Электроника. Курс лекций.С – Пб.: «Корона – принт», 1998г, 400с.
4. Семенов Б.Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов / Б.Ю. Семенов. – М.: СОЛОН – Р, 2001г, 321с. – ISSN5-93455-089-6.
5. Киселев В. Комплементарные мощные транзисторы серий КТ8115 и 8116. Радио – 2002г.- №9 – С.47 – 48.
6. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г.С. Найвельт, К.Б. Мазель и др; Под ред. Г.С. Найвельта. – М.: Радио и Связь, 1985г, 576с.
7. Грибакин А.С., Грибакин В.С., Кочуров О.М. Импульсные высокочастотные транзисторные преобразователи: Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Электроника»

Оглавление

Введение	3
1. Анализ работы биполярного триода (БПТ)	
. Статический режим	4
2. Работа БП триода в режиме ключа (режим D) .	
Показатели режима	15
3. Потери на переключение в БП триоде ,	
работающем на различные виды нагрузок в режиме D	19

4. Параллельное соединение триодов , работающих на общую нагрузку (рис.13).....	40
5. Предельно допустимые параметры БПТ . Выбор [3 , 4].....	45
6. Тепловой расчет.....	52
7. Методика теплового расчета режима работы БПТ.....	62
Библиографический список.....	68