

5 Расчет однокаскадного импульсного усилителя

5.1 Условие задачи

В усилителе (рисунок 5.1, в) транзистор работает в ключевом режиме. Форма входного сигнала приведена на рисунке 5.1, а.

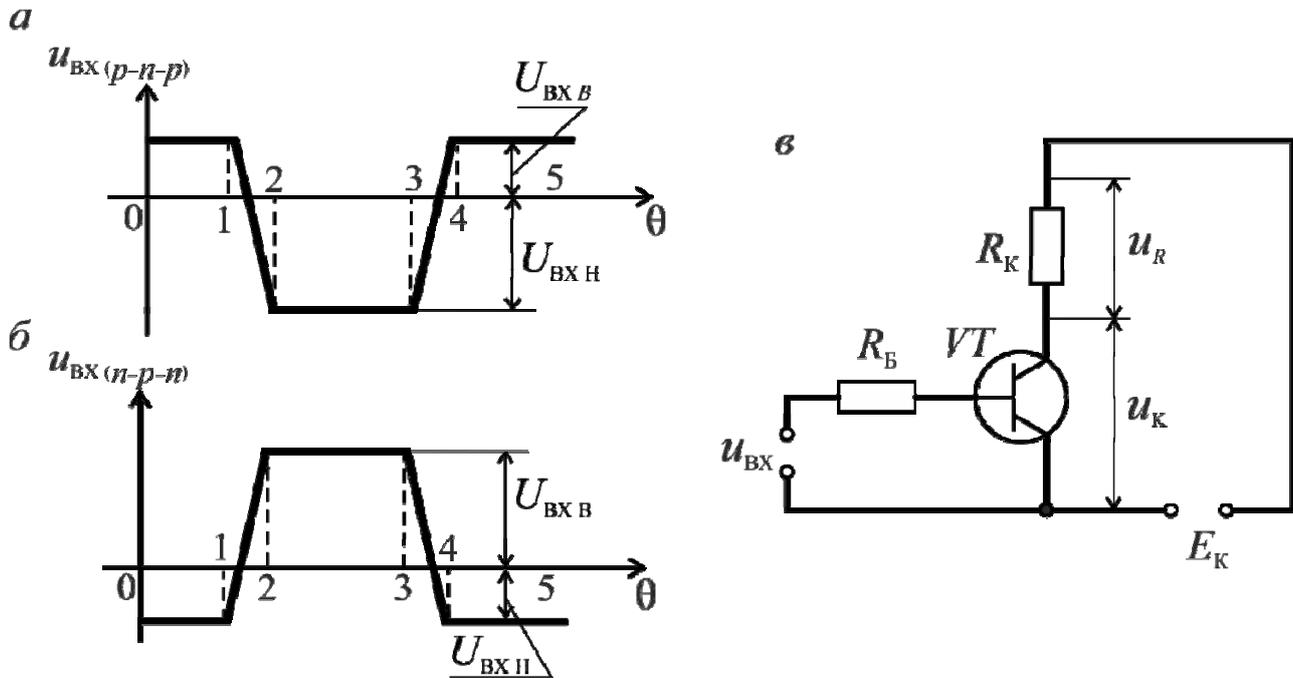


Рисунок 5.1 — Входные импульсы (а, б) и схема (в) однокаскадного импульсного усилителя

Параметры входного импульса и схемы приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 — Исходные данные для решения задачи

$U_{ВХ В (p-n-p)}$ ($U_{ВХ Н (n-p-n)}$), В	$U_{ВХ Н (p-n-p)}$ ($U_{ВХ В (n-p-n)}$), В	E_K , В	R_K , кОм	f_{MAX} , МГц	t_{MAX} , с°
$2,7-0,02 \cdot N \cdot G$	$3+0,1 \cdot N/G$	$2,2 \cdot (N+5 \cdot G)$	$0,1 \cdot N \cdot G$	$0,3 \cdot N/G$	$100 - N/G$

В таблице 5.1 обозначено: G – номер группы студента, N – номер студента по журналу деканата.

Необходимо:

- нарисовать схему импульсного усилителя (тип транзистора: $p-n-p$ — для нечетных N , $n-p-n$ — для четных N);
- выбрать тип транзистора;

- 3) рассчитать величину сопротивления резистора R_B по условию надежного открытия транзистора;
- 4) рассчитать величину сопротивления резистора R_B по условию надежного закрытия транзистора;
- 5) построить временные диаграммы следующих величин импульсного усилителя:
 - входного напряжения $u_{ВХ}$;
 - областей работы транзистора;
 - напряжения на R_K u_R ;
 - напряжения на коллекторе транзистора u_K ;
- 6) определить коэффициенты усиления k_I, k_U, k_P .

5.2 Пример решения задачи

5.2.1 Расчет исходных данных и схема импульсного усилителя

Решим задачу для варианта $G=2, N=34$.

Рассчитаем исходные данные для выбранного варианта и сведем их в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 — Исходные данные для решения задачи

$U_{ВХН} (n-p-n),$ В	$U_{ВХВ} (n-p-n),$ В	$E_K,$ В	$R_K,$ кОм	$f_{MAX},$ МГц	$t_{MAX},$ С°
$2,7 - 0,02 \cdot 34 \cdot 2 =$ $= 1,34$	$3 + 0,1 \cdot 34 / 2 =$ $= 4,7$	$2,2 \cdot (34 + 5 \cdot 2) =$ $= 96,8$	$0,1 \cdot 34 \cdot 2 =$ $= 6,8$	$0,3 \cdot 34 / 2 =$ $= 5,1$	$90 - 34 / 2 =$ $= 73$

Изобразим схему импульсного усилителя для транзистора $n-p-n$.

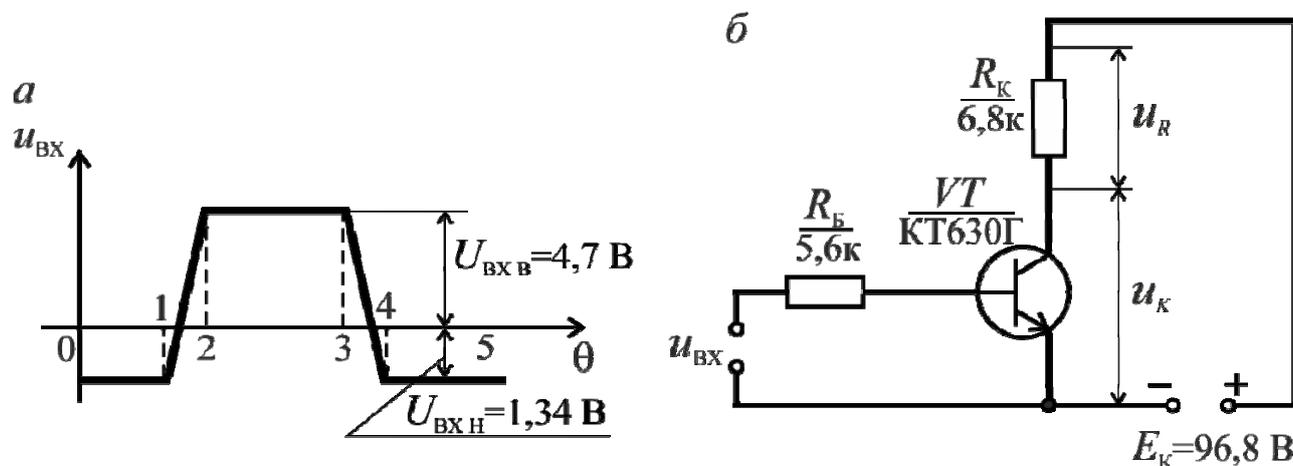


Рисунок 5.2 — Входной импульс (а) и схема (б) импульсного усилителя для выбранного варианта

На схеме (рисунок 5.2, б) уже указан тип транзистора и величина сопротивления резистора R_B , которые будут выбраны в дальнейшем.

5.2.2 Выбор типа транзистора

Выбор типа транзистора производится по:

- 1) максимальному току $I_{K MAX}$, который может протекать по коллектору в данной схеме —

$$I_{K MAX} \leq [I_{K MAX}], \quad (5.1)$$

где $[I_{K MAX}]$ — максимально допустимый ток коллектора выбранного транзистора;

- 2) максимальному напряжению $U_{K MAX}$, которое может прикладываться к коллектору в данной схеме —

$$U_{K MAX} \leq [U_{K MAX}], \quad (5.2)$$

где $[U_{K MAX}]$ — максимально допустимое напряжение коллектора выбранного транзистора;

- 3) максимальной частоте входного сигнала f_{MAX} , которая может подаваться на вход в данной схеме —

$$f_{MAX} \leq [f_{MAX}], \quad (5.3)$$

где $[f_{MAX}]$ — максимально допустимая частота работы выбранного транзистора;

- 4) максимальной температуре t°_{MAX} , до которой может разогреться транзистор в данной схеме —

$$t^{\circ}_{MAX} \leq [t^{\circ}_{MAX}], \quad (5.4)$$

где $[t^{\circ}_{MAX}]$ — максимально допустимая температура выбранного транзистора.

Максимально допустимые величины $[I_{K MAX}]$, $[U_{K MAX}]$, $[f_{MAX}]$, $[t^{\circ}_{MAX}]$ находятся по справочникам. В таблице 5.3 приведены параметры некоторых транзисторов, которые можно использовать при решении этой задачи. Если параметры транзисторов, приведенных в таблице 5.3, не удовлетворяют условиям задачи, то необходимо воспользоваться справочной литературой, например, [4, 5] или найти необходимые полупроводниковые приборы в сети Интернет.

Таблица 5.3 — Основные параметры некоторых транзисторов

Марка транзистора	$[I_{K MAX}]$, мА	$[U_{KЭ MAX}]$, В	$[f_{MAX}]$, МГц	$[t^{\circ}_{MAX}]$, °С	$h_{21Э MIN} = \beta_{MIN}$	$I_{КО}$, мкА ($t_{CP} = 25^{\circ}C$)	Тип
КТ201А	30	20	10	150	20	0,5	<i>n-p-n</i>
КТ201Г	30	10	10	150	70	0,5	<i>n-p-n</i>
КТ202А	20	15	5	150	15	1	<i>p-n-p</i>
КТ202Г	20	30	5	150	40	1	<i>p-n-p</i>
КТ203А	10	60	5	150	9	1,5	<i>p-n-p</i>
КТ203Д	10	15	5	150	40	1,5	<i>p-n-p</i>
КТ215А	50	80	5	115	20	100	<i>n-p-n</i>
КТ215Г	50	40	5	115	40	100	<i>n-p-n</i>
ГТ305А	40	15	3	115	25	6	<i>p-n-p</i>
ГТ305Б	40	15	3	115	60	6	<i>p-n-p</i>
КТ306А	20	10	300	150	9	0,5	<i>n-p-n</i>
КТ306Г	40	10	300	150	40	0,5	<i>n-p-n</i>
КТ312А	30	30	80	115	10	1	<i>n-p-n</i>
КТ312Б	30	35	80	115	25	1	<i>n-p-n</i>
КТ315А	100	25	10	120	20	1	<i>n-p-n</i>
КТ315И	50	60	10	120	30	100	<i>n-p-n</i>
ГТ309А	10	10	120	70	20	5	<i>p-n-p</i>
ГТ309Е	10	10	40	70	60	5	<i>p-n-p</i>
ГТ320А	150	12	80	90	20	5	<i>p-n-p</i>
ГТ320Б	150	11	120	90	50	5	<i>p-n-p</i>
КТ345А	200	20	350	150	20	1	<i>p-n-p</i>
КТ345В	200	20	350	150	70	1	<i>p-n-p</i>
КТ503А	150	40	5	125	40	1	<i>n-p-n</i>
КТ503Е	150	100	5	125	40	1	<i>n-p-n</i>
КТ602А	75	100	2	150	20	70	<i>n-p-n</i>
КТ602Б	75	100	2	150	50	70	<i>n-p-n</i>
КТ626А	500	45	75	125	40	10	<i>p-n-p</i>
КТ626В	500	80	45	125	15	10	<i>p-n-p</i>
КТ630А	1000	120	270	125	40	1	<i>n-p-n</i>
КТ630Г	1000	100	270	125	40	1	<i>n-p-n</i>
ГТ703А	3500	20	3	85	30	500	<i>p-n-p</i>
ГТ703Д	3500	40	3	85	20	500	<i>p-n-p</i>
КТ855В	5000	150	5	150	20	1000	<i>p-n-p</i>

Найдем левые части неравенств (5.1)–(5.4).

Максимальный ток по коллектору $I_{K MAX}$ будет протекать тогда, когда транзистор работает в области насыщения, т. е. когда он открыт и его сопротивление «эмиттер-коллектор» близко к нулю. Поэтому схему выходной цепи импульсного усилителя для данного случая можно представить в виде рисунка 5.3, а.

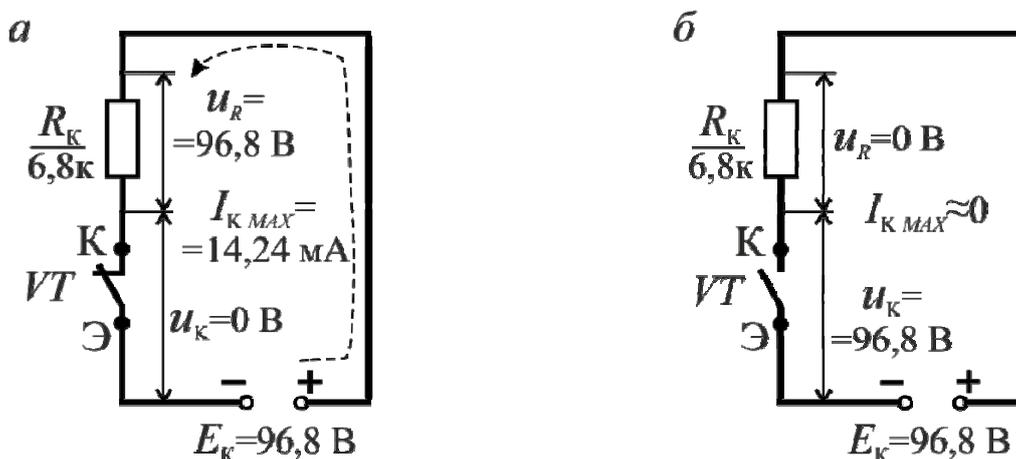


Рисунок 5.3 — Схемы выходной цепи импульсного усилителя при открытом (а) и закрытом (б) состояниях транзистора

Из рисунка 5.3, а следует, что

$$I_{K MAX} = \frac{E_K}{R_K} = \frac{96,8}{6,8} = 14,24 \text{ мА.} \quad (5.5)$$

Максимальное напряжение между коллектором и эмиттером будет возникать тогда, когда транзистор работает в области отсечки, т.е. когда он закрыт и его сопротивление «эмиттер-коллектор» близко к бесконечности. Выходная цепь импульсного усилителя для данного случая изображена на рисунке 5.3, б. Из этого рисунка следует, что

$$U_{K MAX} = E_K = 96,8 \text{ В.}$$

Максимальные частоту и температуру берем из исходных данных (таблица 5.2) — $f_{MAX} = 5,1 \text{ МГц}$ и $t^{\circ}_{MAX} = 73^{\circ}\text{C}$.

На основании полученных данных выбираем транзистор КТ630Г (таблица 5.3), для которого составляем таблицу 5.4.

Таблица 5.4 — Сравнение требуемых параметров схемы с максимально допустимыми значениями транзистора

$\frac{I_{K MAX}}{[I_{K MAX}]}$, мА	$\frac{U_{K MAX}}{[U_{K MAX}]}$, В	$\frac{f_{MAX}}{[f_{MAX}]}$, МГц	$\frac{t_{MAX}^{\circ}}{[t_{MAX}^{\circ}]}$, °С
$\frac{14,24}{1000}$	$\frac{96,8}{100}$	$\frac{5,1}{270}$	$\frac{73}{125}$

Так как для таблицы 5.4 условия (5.1)–(5.4) выполняются, то для дальнейших расчетов принимаем транзистор КТ630Г.

5.2.3 Расчет величины сопротивления резистора R_B по условию открытия транзистора

Расчет величины сопротивления резистора R_B по условию открытия производится при условии, что транзистор должен быть надежно открыт входным сигналом $U_{ВХ В}$.

Для этого необходимо вначале определить ток I_B , который протекает по этому резистору. Из выражения

$$h_{21Э} = \frac{I_K}{I_B}$$

найдем, что

$$I_B = \frac{I_{K MAX}}{h_{21Э MIN}} = \frac{14,23}{40} = 0,3559 \text{ мА}, \quad (5.6)$$

где $h_{21Э MIN}$ — минимальный статический коэффициент усиления по току транзистора КТ630Г (таблица 5.3).

Обычно $I_{B НАС}$, т. е. ток базы при котором транзистор надежно перейдет в область насыщения, принимается несколько больше тока рассчитанного по (5.6):

$$I_{B НАС} = (1,5 \dots 2) \cdot I_B = 0,5338 \dots 0,7118 = 0,6 \text{ мА}. \quad (5.7)$$

Очевидно, что транзистор будет находиться в открытом состоянии тогда, когда при входном напряжении усилителя равном $U_{ВХ В}$ по входной цепи будет протекать ток $I_{B НАС}$. Входная цепь транзистора для этого случая показана на рисунке 5.4.

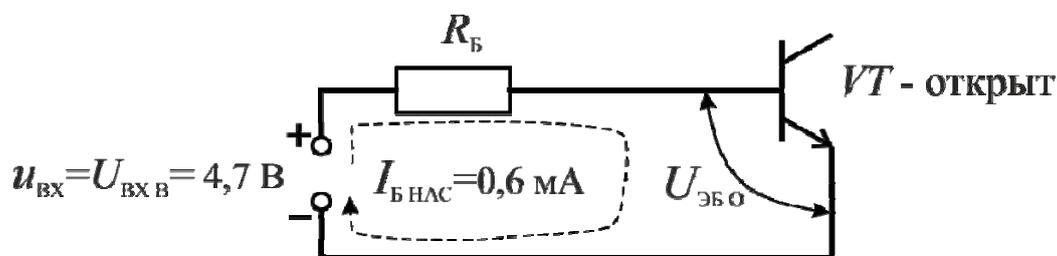


Рисунок 5.4 — Схема входной цепи для открытого состояния транзистора

При помощи рисунка 5.4 составим уравнение по II закону Кирхгофа для входной цепи усилителя

$$U_{ВХ В} \geq U_{RБ} + U_{ЭБ О} = I_{Б НАС} \cdot R_{БО} + U_{ЭБ О}, \quad (5.8)$$

где $U_{RБ}$ — падение напряжения на резисторе R_B ;

$U_{ЭБ О}$ — падение напряжения между эмиттером и базой открытого транзистора, можно принять 1 В;

$R_{БО}$ — величина сопротивления резистора R_B , найденная по условию открытия транзистора.

Из уравнения (5.8) выразим $R_{БО}$

$$R_{БО} \leq \frac{(U_{ВХ В} - U_{ЭБ О})}{I_{Б НАС}} = \frac{(4,7 - 1)}{0,6} = 6,167 \text{ кОм}. \quad (5.9)$$

5.2.4 Расчет величины сопротивления резистора R_B по условию закрытия транзистора

Расчет величины сопротивления резистора R_B по условию закрытия производится при условии, что транзистор должен быть надежно закрыт входным сигналом $U_{ВХ Н}$. Изобразим на рисунке 5.5 входную цепь усилителя при закрытом транзисторе.

В этом случае в схеме усилителя по цепи (рисунок 5.5): «+» E_K , коллектор, база, R_B , источник входного сигнала, «—» E_K потечет обратный ток коллектора $I'_{КО}$. Последний, протекая по R_B , создает на нем падение напряжения, которое, в свою очередь, уменьшает напряжение, подаваемое на переход «эмиттер-база» транзистора.

Следовательно, сопротивление резистора R_B должно быть меньше некоторой величины, при которой транзистор сможет надежно закрыться. Это произойдет тогда, когда между базой и эмиттером подается хотя бы минимальное обратное напряжение.

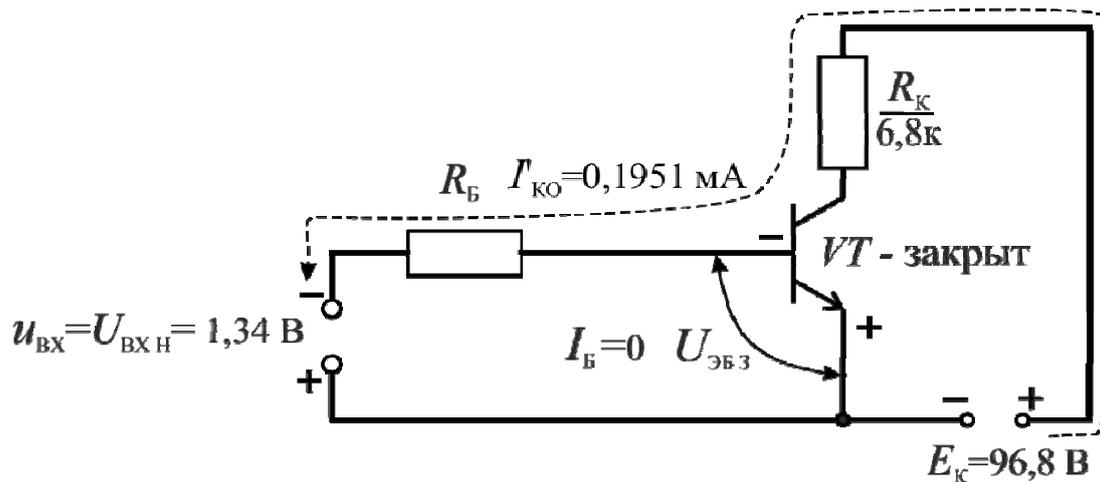


Рисунок 5.5 — Схема входной цепи для закрытого состояния транзистора

На основании рисунка 5.5 составим уравнение по II закону Кирхгофа для входной цепи усилителя

$$U_{ВХ Н} = U_{RБ} + U_{ЭБЗ} = I'_{КО} \cdot R_{БЗ} + U_{ЭБЗ},$$

где $U_{ЭБЗ}$ — напряжение, прикладываемое между базой и эмиттером, которое необходимо, чтобы закрыть транзистор;

$I'_{КО}$ — обратный ток коллектора при закрытом транзисторе;

$R_{БЗ}$ — величина сопротивления резистора $R_{Б}$, найденная по условию закрытия транзистора.

Из последнего уравнения выразим $U_{ЭБЗ}$

$$U_{ЭБЗ} = U_{ВХ Н} - I'_{КО} \cdot R_{БЗ}.$$

Очевидно, что для закрытия транзистора должно выполняться условие

$$U_{ЭБЗ} = U_{ВХ Н} - I'_{КО} \cdot R_{БЗ} > 0.$$

Отсюда нетрудно получить, что

$$R_{БЗ} < \frac{U_{ВХ Н}}{I'_{КО}}. \quad (5.10)$$

Обратный ток коллектора очень сильно зависит от температуры. Его можно определить по следующей формуле:

$$I'_{\text{КО}} = I_{\text{КО}}(t=25^{\circ}\text{C}) \cdot A^{(t_{\text{MAX}} - t_{\text{CP}})/10}. \quad (5.11)$$

где $I_{\text{КО}}(t=25^{\circ}\text{C})$ — паспортное значение обратного тока коллектора при $t_{\text{CP}} = 25^{\circ}\text{C}$ (таблица 5.1);

A — коэффициент равный 2 для германиевых транзисторов и 3 для кремниевых.

Подставим численные значения в (5.11) и (5.10) и получим

$$I'_{\text{КО}} = 0,001 \cdot 3^{(73-25)/10} = 0,1951 \text{ мА.}$$

$$R_{\text{БЗ}} < \frac{1,34}{0,1951} = 6,869 \text{ Ом.} \quad (5.12)$$

Таким образом, величина сопротивления резистора $R_{\text{Б}}$, по выражению (5.9) должна быть меньше 6,167 кОм, а по (5.12) — не превышать 6,869 кОм. Поэтому из таблицы 2.3 выбираем резистор со стандартной величиной сопротивления $R_{\text{Б}} = 5,6 \text{ кОм}$.

Определим по (5.8), с учетом окончательно выбранного резистора $R_{\text{Б}}$, входное напряжение усилителя при котором тиристор полностью откроется

$$u_{\text{ВХ}} = U'_{\text{ВХВ}} = I_{\text{Б НАС}} \cdot R_{\text{Б}} + U_{\text{ЭБ О}} = 0,6 \cdot 5,6 + 1 = 4,36 \text{ В.}$$

Результаты расчета сведем в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 — Результаты расчетов по выбору величины сопротивления резистора $R_{\text{Б}}$

$I_{\text{Б}}$, мА	$I_{\text{Б НАС}}$, мА	$R_{\text{БО}}$, кОм	$I'_{\text{КО}}$, мА	$R_{\text{БЗ}}$, кОм	$R_{\text{Б}}$, кОм	$U'_{\text{ВХВ}}$, В
0,3559	0,6	6,167	0,1951	6,869	5,6	4,36

5.2.4 Построение временных диаграмм напряжений импульсного усилителя

Для построения диаграмм напряжений примем, что транзистор представляет собой идеальный ключ, то есть в открытом состоянии сопротивление транзистора в направлении «эмиттер-коллектор» равно нулю, а в закрытом — бесконечности.

Первой изобразим диаграмму $u_{\text{ВХ}}$ (рисунок 5,6, а).

До т. 1 $u_{ВХ}$ было постоянным и равнялось $U_{ВХН} = -1,34$ В. В т.1 $u_{ВХ}$ начинает увеличиваться и в т. 2 достигает значения $U_{ВХВ} = 4,7$ В. Это напряжение останется на входе транзистора до т. 3, после чего начнет уменьшаться и в т. 4 опять станет равным $U_{ВХН} = -1,34$ В.

Построим **диаграмму «Области работы транзистора»** (рисунок 5,6, б).

До т. 1' (точки перехода через ноль $u_{ВХ}$ из отрицательной области в положительную) $u_{ВХ}$ остается отрицательным, и, следовательно, переход «эмиттер-база» смещен в обратном направлении. Транзистор работает в области отсечки, а его сопротивление в направлении «эмиттер-коллектор» равно бесконечности.

После т. 1' $u_{ВХ}$ становится положительным. Транзистор начинает работать в активной области, а сопротивление его в направлении «эмиттер-коллектор» — уменьшается. Так происходит до т. 2', в которой $u_{ВХ} = U'_{ВХВ} = 4,36$ В и $I_B = I_{БНАС} = 0,6$ мА, а транзистор переходит в область насыщения.

В этой области транзистор будет работать до т. 3', в которой опять $u_{ВХ} = U'_{ВХВ} = 4,36$ В и $I_B = I_{БНАС} = 0,6$ мА. Транзистор возвращается в активную область и работает в ней до т. 4' (точки перехода через ноль $u_{ВХ}$ из положительной области в отрицательную), в которой напряжение на переходе «эмиттер-база» становится отрицательным. После того как в т. 4' на переход «эмиттер-база» подается обратное смещение, транзистор вновь начинает работать в области отсечки.

Пользуясь диаграммой «Области работы транзистора», построим **диаграмму u_R** (рисунок 5,6, в).

На интервалах 0-1' и 4'-5 транзистор работает в области отсечки. Сопротивление его в направлении «эмиттер-коллектор» практически равно бесконечности. Этим интервалам соответствует схема выходной цепи на рисунке 5.3, б. Ток в выходной цепи равен нулю, поэтому

$$u_R = I_K \cdot R_K = 0 \cdot 3,9 = 0 \text{ В.}$$

На интервале 2'-3' транзистор работает в области насыщения. Сопротивление его в направлении «эмиттер-коллектор» практически равно нулю. Этому интервалу соответствует схема выходной цепи на рисунке 5.3, а. Ток в выходной цепи равен $I_{КМАХ} = 14,24$ мА, поэтому

$$u_R = E_K - I_{КМАХ} \cdot 0 = E_K = 96,8 \text{ В.}$$

На интервале 1'-2' транзистор работает в активной области. Его сопротивление в направлении «эмиттер-коллектор» меняется от бесконечности до нуля. Напряжение на R_K увеличивается от нуля до $E_K = 96,8$ В. На интервале 3'-4' все процессы происходят наоборот.

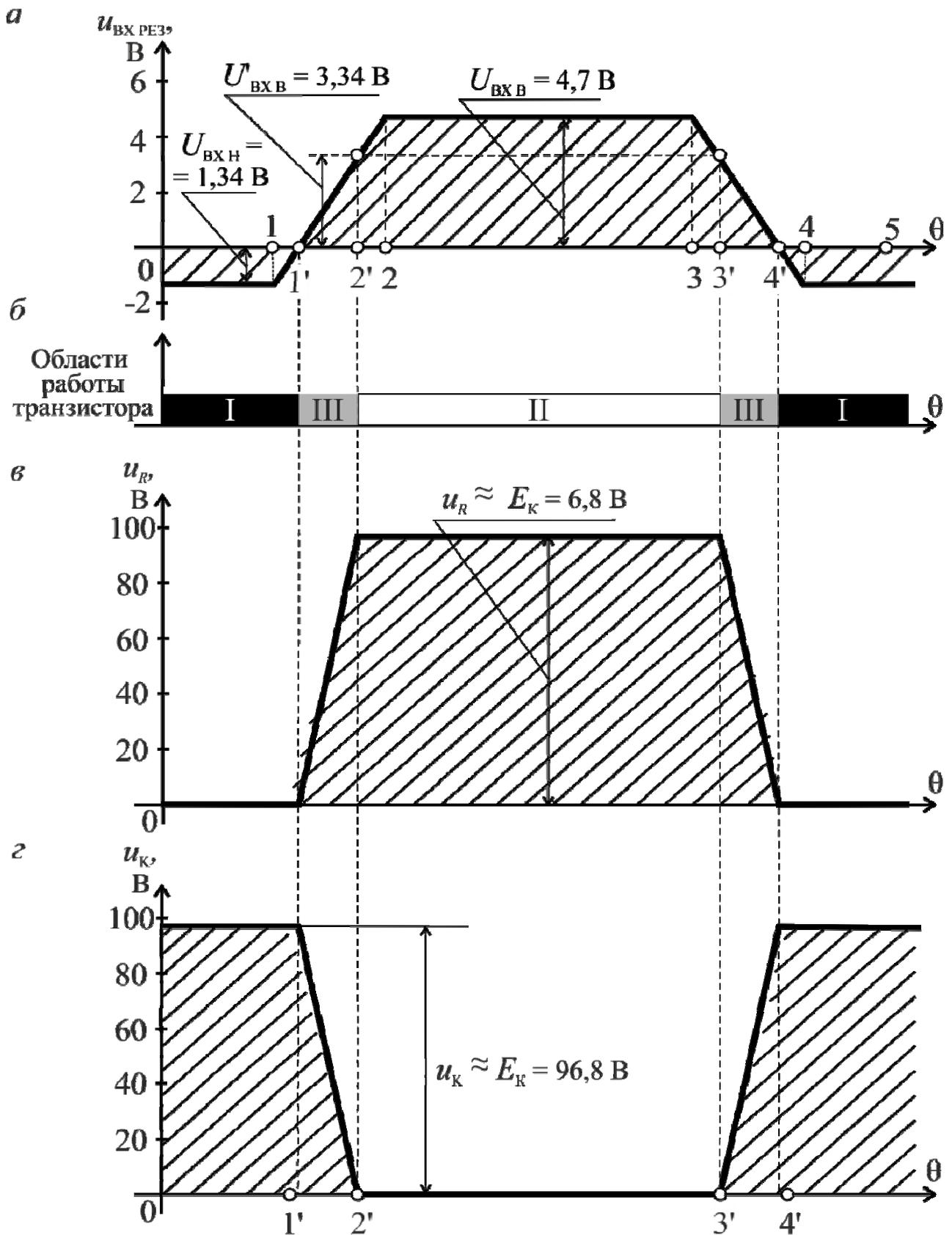


Рисунок 5.6 — Временные диаграммы напряжений импульсного усилителя

Пользуясь диаграммой «Области работы транзистора», построим диаграмму u_K (рисунок 5,6, з).

На интервалах 0-1' и 4'-5 транзистор работает в области отсечки. Сопротивление его в направлении «эмиттер-коллектор» практически равно бесконечности. Этим интервалам соответствует схема выходной цепи на рисунке 5.3, б. Ток в выходной цепи равен нулю, поэтому

$$u_K = E_K - 0 \cdot R_K = E_K = 96,8 \text{ В.}$$

На интервале 2'-3' транзистор работает в области насыщения. Сопротивление его в направлении «эмиттер-коллектор» практически равно нулю. Этому интервалу соответствует схема выходной цепи на рисунке 5.3, а. Ток в выходной цепи равен $I_{K \text{ MAX}} = 14,24 \text{ мА}$. Поэтому

$$u_K = I_{K \text{ MAX}} \cdot 0 = 0 \text{ В.}$$

На интервале 1'-2' транзистор работает в активной области. Его сопротивление в направлении «эмиттер-коллектор» меняется от бесконечности до нуля. Напряжение на транзисторе увеличивается от $E_K = 96,8 \text{ В}$ до нуля. На интервале 3'-4' все процессы происходят наоборот.

5.2.5 Определение коэффициентов усиления импульсного усилителя

Для определения коэффициента усиления по току воспользуемся результатами, полученными в (5.6) и (5.7), а для определения коэффициента усиления по напряжению — диаграммами на рисунке 5.6. Результаты расчета сведем в таблицу 5.6.

Таблица 5.6 — Результаты расчетов коэффициентов усиления импульсного усилителя

$I_{K \text{ MAX}}, \text{ мА}$	$I_{B \text{ НАС}}, \text{ мА}$	$k_I = \frac{I_{K \text{ MAX}}}{I_{B \text{ НАС}}}$	$E_K, \text{ В}$	$U_{BХВ}, \text{ В}$	$k_U = \frac{E_K}{U_{BХВ}}$	$k_P = k_I \cdot k_U$
14,24	0,6	23,73	96,8	4,7	20,60	488,6

5.3 Оформление результатов расчетов

Отчет по решению данной задачи минимально должен состоять из следующих разделов, которые необходимо располагать на отдельных страницах.

1. Титульный лист.
2. Исходные данные: таблица 1 — Исходные данные для решения задачи (аналогичная таблице 5.2) и рисунок 1 — Входной импульс (a) и схема (b) импульсного усилителя для выбранного варианта (аналогичный рисунку 5.2).
3. Выбор типа транзистора: рисунок 2 — Схемы выходной цепи импульсного усилителя при открытом (a) и закрытом (b) состояниях транзистора (аналогичный рисунку 5.3), таблица 2 — Основные параметры выбранного транзистора (аналогичная таблице 5.3) и таблица 3 — Сравнение требуемых параметров схемы с максимально допустимыми значениями транзистора (аналогичная таблице 5.4).
4. Определение величины сопротивления резистора R_B : рисунок 3 — Схема входной цепи для открытого состояния транзистора (аналогичный рисунку 5.4), рисунок 4 — Схема входной цепи для закрытого состояния транзистора (аналогичный рисунку 5.5) и таблица 4 — Результаты расчетов по выбору величины сопротивления резистора R_B (аналогичная таблице 5.5).
5. Построение временных диаграмм напряжений импульсного усилителя: Рисунок 5 — Временные диаграммы напряжений импульсного усилителя (аналогичный рисунку 5.6) и описание работы схемы (аналогичное п. 5.2.4).
6. Определение коэффициентов усиления импульсного усилителя: таблица 5 (аналогичная таблице 5.6).
7. Выводы и предложения.

Библиографический список

1. Бурков А. Т. Электроника и преобразовательная техника : учеб. пособие в 2 т. / А. Т. Бурков. — М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. Т. 1: Электроника. — 480 с.
2. Низов А. С. Электроника : курс лекций / А. С. Низов, А. Н. Штин, К. Г. Шумаков. — Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. — 135 с.
3. Чебовский О. Г. Силовые полупроводниковые приборы : справочник / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 400 с.
4. Транзисторы : справочник / О. П. Григорьев [и др.]. — М. : Радио и связь, 1989, — 272 с.
5. Полупроводниковые приборы. Транзисторы : справочник / под общей редакцией Н. Н. Горюнова. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 904 с.