



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Институт информационных и вычислительных технологий
Кафедра вычислительных машин, систем и сетей

Курсовая работа
По дисциплине «Электроника»
«Линейный однокаскадный усилитель сигнала звуковой частоты»

Выполнил студент: Михайловский М. Ю.

Группа: А-03-21

Проверил: Лазарев В. И.

Москва 2023

Содержание

1	Задание	3
1.1	Содержание работы	3
1.2	Исходные и справочные данные	5
2	Выполнение работы	6
2.1	Выбор схемы усилительного каскада	6
2.2	Входные и выходные характеристики транзистора	6
2.3	Выбор рабочей точки	8
2.4	Выбор сопротивлений для УК	10
2.4.1	Сопротивление выходной цепи	10
2.4.2	Выходные сопротивления	11
2.5	Аналитический расчёт	13
2.5.1	Рабочий режим	13
2.5.2	Основные параметры УК	15
2.6	Выбор ёмкостей конденсаторов	16
2.7	Расчёт верхней границы пропускания	17
3	Компьютерное моделирование работы УК	18
3.1	Графический расчёт рабочего режима	18
3.2	Численный расчёт рабочего режима	19
3.3	Расчёт основных характеристик УК	21
3.3.1	Проверка работоспособности УК	21
3.3.2	Получение амплитудно-частотной характеристики УК	22
3.3.3	Определение входного сопротивления каскада	23
3.3.4	Определение выходного сопротивления каскада	23
3.3.5	Получение амплитудной характеристики	24
3.3.6	Анализ нелинейных искажений	25
3.4	Сравнение результатов	26
4	Приложения	27
	Приложение 1	27
	Приложение 2	27
	Список литературы	28

1 Задание

на курсовую работу по курсу "Электроника"

для студентов ИВТИ

ЛИНЕЙНЫЙ ОДНОКАСКАДНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ СИГНАЛА ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ

Рассчитать элементы схемы однокаскадного усилителя, удовлетворяющего указанным техническим требованиям (вариантом индивидуального задания):

В соответствии с вариантом задано следующее.

1. Тип транзистора.
2. Максимальная амплитуда неискаженного выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$.
3. Минимальное значение коэффициента усиления напряжения $K_e = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{e_{\Gamma}}$ при заданном сопротивлении нагрузки $R_{\text{Н}}$ и внутреннем сопротивлении источника сигнала R_{Γ} .
4. Нижняя граница полосы пропускания $f_{\text{Н}}$.
5. Верхняя граница полосы пропускания $f_{\text{В}}$ при заданной емкости нагрузки $C_{\text{Н}}$.
6. Температурный диапазон для всех вариантов: $-40^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$.

1.1 Содержание работы

1. Для заданного типа транзистора выписать из справочника основные и предельно допустимые параметры.
2. По заданным техническим требованиям обосновать выбор и нарисовать схему усилительного каскада.
3. С помощью программы схемотехнического проектирования **DesignLab** снять входные и выходные характеристики транзистора для схемы включения ОЭ.
4. По максимальной амплитуде выходного сигнала и сопротивлению нагрузки определить рабочий режим транзистора и номинальное напря-

жение источника питания. Обосновать выбор рабочей точки и напряжения источника питания, привести графическое пояснение.

5. Рассчитать сопротивления резисторов выходной цепи каскада. По заданному типу транзистора и его предельным параметрам обосновать возможность применения транзистора в заданной схеме усилительного каскада.
6. Рассчитать сопротивления резисторов входной цепи схемы с учетом разброса коэффициента усиления транзистора и колебаний внешней температуры.
7. Для выбранных сопротивлений резисторов схемы аналитически рассчитать рабочий режим каскада и проверить, совпадает ли он с выбранным в п. 4.
8. Рассчитать возможный уход рабочего тока из-за колебаний температуры и из-за разброса коэффициента усиления. Проверить, лежит ли суммарное изменение в диапазоне, заданном в п. 4.
9. Рассчитать входное и выходное сопротивление усилителя. Рассчитать коэффициент усиления напряжения с учетом внутреннего сопротивления источника сигнала $K_e = \frac{U_{\text{вых}}}{e_{\Gamma}}$.
10. По заданной нижней границе полосы пропускания рассчитать емкости конденсаторов.
11. Определить верхнюю границу полосы пропускания, используя справочные данные на транзистор и заданную емкость нагрузки.
12. С помощью программы схемотехнического проектирования **DesignLab** снять входные и выходные характеристики транзистора для схемы включения ОЭ.
13. Используя ВАХ транзистора определить графически рабочий режим транзистора. Проверить совпадение с выбранным в п. 4 и с рассчитанным значением в п. 7. По характеристикам транзистора в рабочей точке определить малосигнальные параметры транзистора: коэффициент усиления h_{21} , и входное сопротивление транзистора h_{11} . Сравнить

полученное значение h_{21} , и используемое в предыдущих расчетах значение коэффициента усиления по току.

14. С помощью программы схемотехнического моделирования **DesignLab** проверить работоспособность схемы. С ее помощью рассчитать:

- режим схемы,
- амплитудно-частотную характеристику,
- входное сопротивление усилителя,
- выходное сопротивление усилителя,
- амплитудную характеристику,
- для максимального неискаженного выходного сигнала коэффициент нелинейных искажений.

15. Результаты моделирования сравнить с заданием и расчетами, сделав соответствующие сравнительные таблицы.

16. Оформить работу с учётом требований к оформлению отчетов по курсовым работам.

Замечания:

1. напряжение источника питания, сопротивления резисторов и емкости конденсаторов выбирать из номинальных рядов;
2. для каскада ОЭ введением ООС обеспечить коэффициент усиления напряжения, отличающийся от заданного не более, чем на 10%.

1.2 Исходные и справочные данные

Данные в полученном на выполнение варианте курсовой работы представлены в таблице 1.

Таблица 1: Исходные данные

Транзистор	$U_{\text{вых}}, \text{В}$ (не менее)	K_e	$R_{\text{н}}, \text{кОм}$	$R_{\text{г}}, \text{кОм}$	$C_{\text{н}}, \text{нФ}$	$f_{\text{н}}, \text{Гц}$	$f_{\text{в}}, \text{кГц}$
КТ342А	3,9	0,7	0,8	1,5	10	50	30

Цоколевка заданного транзистора¹ представлена на рис. 1.1. Также выписаны основные параметры этой детали.

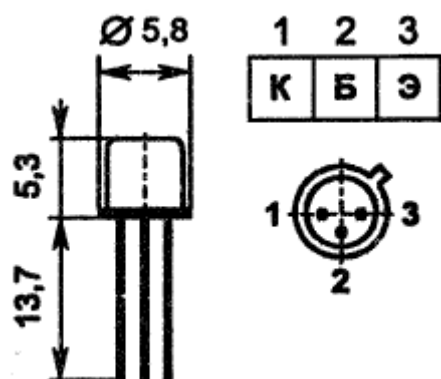


Рис. 1.1: Цоколевка транзистора КТ342А

- Структура n-p-n
- $U_{кэ_{max}} = 30 \text{ В}$
- $I_{к_{max}} = 50 \text{ мА}$
- $P_{к_{max}} = 0,25 \text{ Вт}$
- $\beta = 100 \dots 250$
- $f_{гр} = 250 \text{ МГц}$

2 Выполнение работы

2.1 Выбор схемы усилительного каскада

При выборе схемы усилительного каскада (УК), в первую очередь, следует обратить внимание на требуемый коэффициент усиления напряжения K_e . Как известно схемы УК с общей базой и общим эмиттером обеспечивают усиление по напряжению, а УК с общим коллектором усиления по напряжению не дает.

В нашем случае $K_e = 0,7$, поэтому следует использовать схему УК с общим коллектором (ОК), представленную на рис. 2.1.

2.2 Входные и выходные характеристики транзистора

Входную: $I_b(U_{бэ})|_{U_{кэ}=\text{const}}$ и выходную: $I_k(U_{кэ})|_{I_b=\text{const}}$ характеристики получим с помощью программы схемотехнического моделирования **DesignLab**. Для этого собираем схемы представленные на рис. 2.2, 2.3. Полученные характеристики транзистора представлены на рис. 2.4, 2.5.

¹Источник: Справочник радиолюбителя, транзистор КТ342А. URL: <https://www.radiolibrary.ru/reference/transistor/kt342a.html> (Дата обращения 01.04.2023)

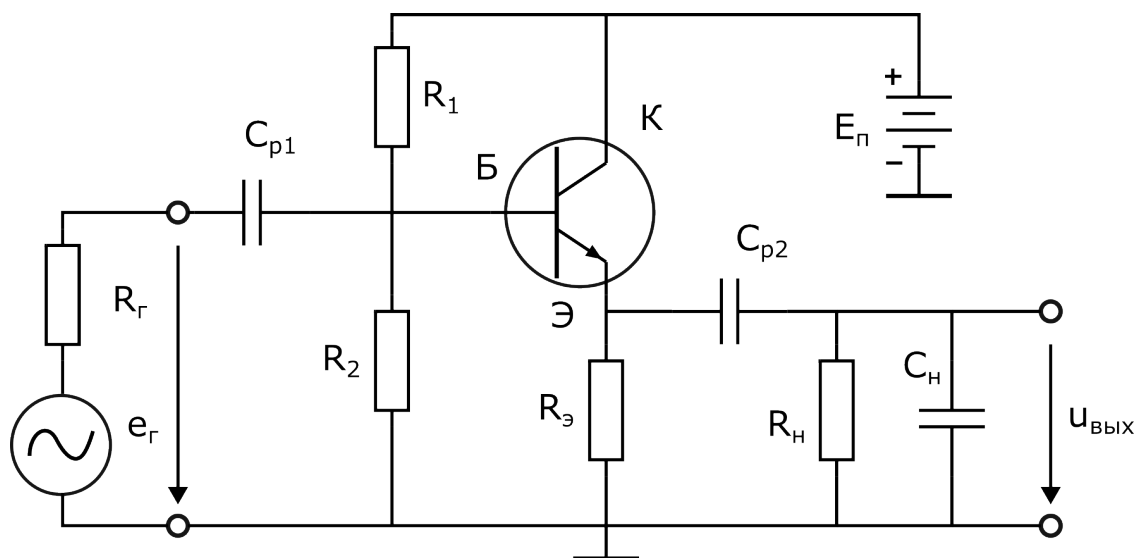


Рис. 2.1: Схема УК с общим коллектором

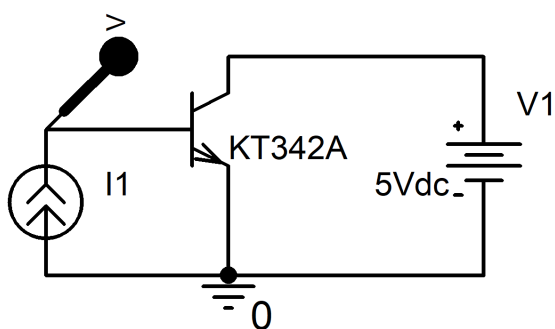


Рис. 2.2: Схема для получения входной ВАХ транзистора

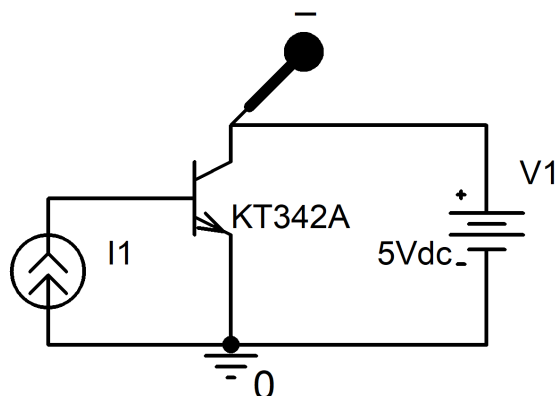


Рис. 2.3: Схема для получения выходной ВАХ транзистора

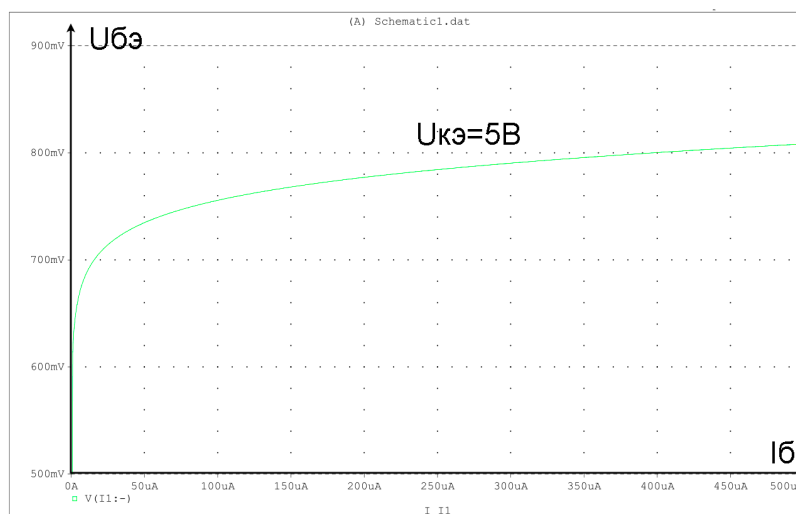


Рис. 2.4: входная ВАХ транзистора КТ342А

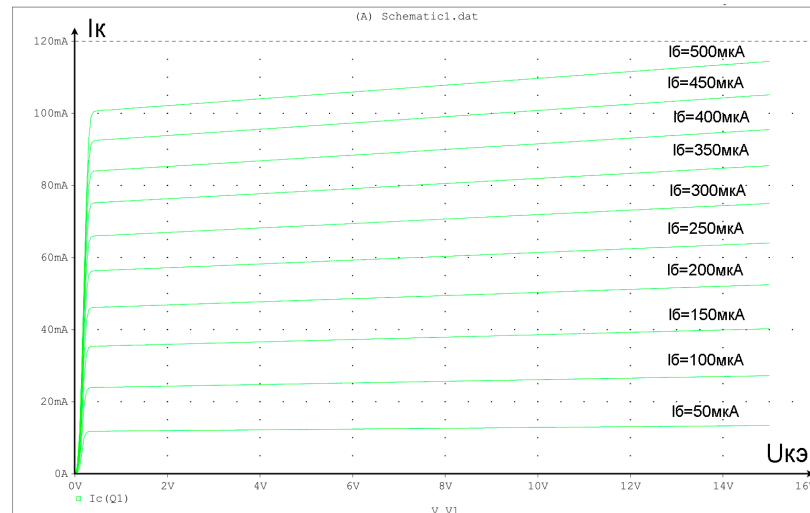


Рис. 2.5: выходные ВАХ транзистора КТ342А

2.3 Выбор рабочей точки

В используемой схеме для транзистора должен быть обеспечен активный рабочий режим, а также токи, протекающие через транзистор, не должны превышать максимально допустимых. В нашем случае необходимо, чтобы $I_K < 50 \text{ мА}$, $U_{КЭ} < 30 \text{ В}$, $P_K < 0,25 \text{ Вт}$. Также стоит учесть влияние на положение рабочей температуры.

Отметим на выходной характеристике критическую область, в которой рабочая точка не должна быть (рис. 2.6). Напряжение выбранной рабочей точки должно удовлетворять неравенству $U_{КЭ А} > \Delta U_H + \Delta U_T + U_{m \text{ Вых}}$. Так рабочая точка будет находиться в линейном участке выходной характеристики транзистора, что обеспечит линейное усиление сигнала в УК. ΔU_H – ширина нелинейного участка выходной ВАХ транзистора, ΔU_T – возможный сдвиг рабочей точки вследствие изменения температуры.

Последнее условие, которое мы потребуем, статическая и динамическая линии нагрузки не должны заходить в критическую

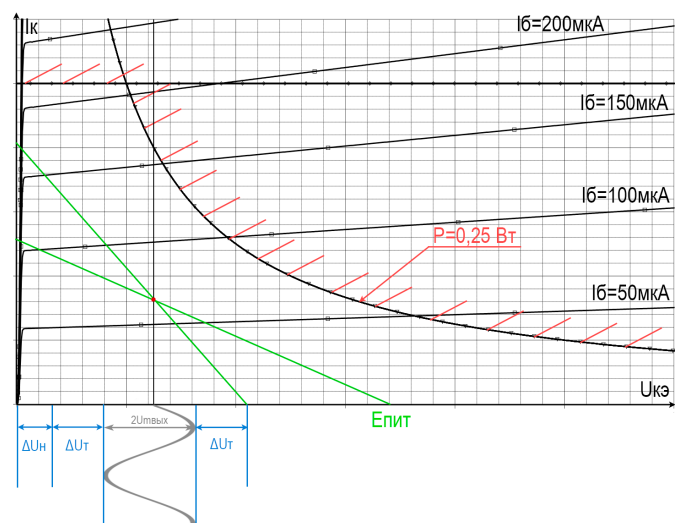


Рис. 2.6: Условия которым должна удовлетворять рабочая точка

область.

$$U_{KЭA} > \Delta U_H + \Delta U_T + U_{m_{\text{ВЫХ}}} = 2 + 2 + 3,9 = 7,9 \text{ В} \quad (1)$$

$$I_{K\sim} \geq \frac{U_{m_{\text{ВЫХ}}} + \Delta U_T}{R_{\sim}} = (2 \dots 5) \frac{U_{m_{\text{ВЫХ}}}}{R_H} \stackrel{\text{опр}}{=} 2,4 \cdot \frac{3,9}{800} = 11,7 \text{ мА} \quad (2)$$

$$I_{KA} = I_{K\sim} + I_{K0}, \text{ считаем } I_{K0} = 2 \text{ мА} \quad (3)$$

$$E_{\text{ПИТ}} \gtrsim U_{KЭ} + U_{m_{\text{ВЫХ}}} + \Delta U_T + k U_{m_{\text{ВЫХ}}} \stackrel{k=2}{=} 7,9 + 3,9 + 2 + 2 \cdot 3,9 = 21,6 \text{ В} \quad (4)$$

П2. Номинальный ряд напряжений (В) 6; 7.5; 9; 10; 12; 15; 18; 20; 24; 27; 30; 36; 48. Выбрав ближайшее напряжение из номинального ряда, получаем $E_{\text{ПИТ}} = 20 \text{ В}$. Проверка:

$$U_{KЭA} \approx (0,4 \dots 0,6) E_{\text{ПИТ}} = (8 \dots 12) \text{ В} > 7,9 \text{ В}$$

Итого имеем $E_{\text{ПИТ}} = 20 \text{ В} < U_{KЭ\text{max}} = 30 \text{ В}$. Выберем следующую рабочую точку: $U_{KЭA} = 8 \text{ В}$, $I_{KA} = 14 \text{ мА}$. Также выберем вспомогательную рабочую точку:

$$U_{KЭB} = U_{KЭA} + U_{m_{\text{ВЫХ}}} = 8 + 3,9 = 11,9 \text{ В}$$

В результате по выбранным значениям построили статическую и динамическую линии нагрузки, которые полностью находятся в допустимой области, при этом располагаются на некотором расстоянии от критической, что даёт некоторый запас по надёжно-

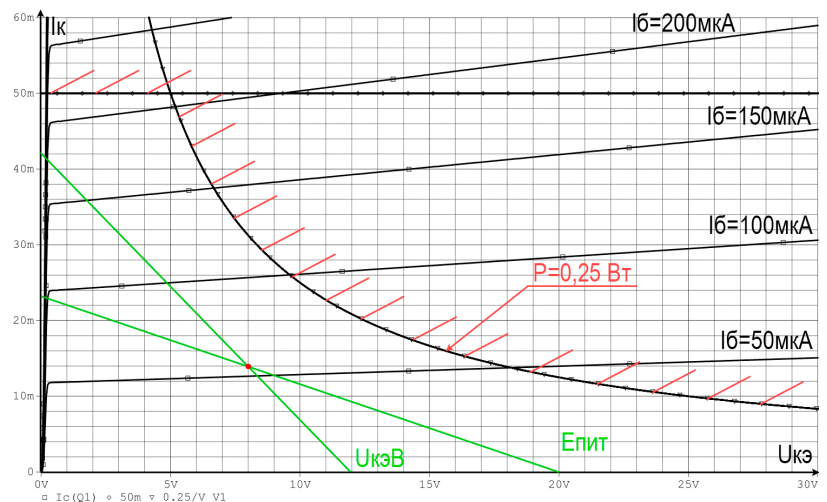


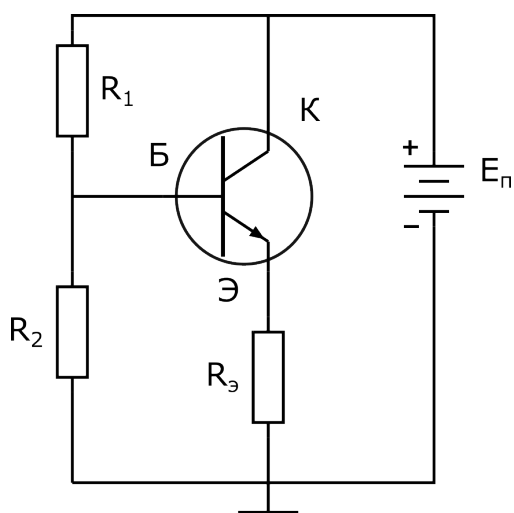
Рис. 2.7: Линии нагрузки для выбранной рабочей точки

СТИ.

Итог, выбрано: $E_{\text{пит}} = 20 \text{ В}$, $U_{\text{кэА}} = 8 \text{ В}$, $I_{\text{кА}} = 14 \text{ мА}$.

2.4 Выбор сопротивлений для УК

2.4.1 Сопротивление выходной цепи



Наклон линии статической нагрузки полностью задает сопротивление эмиттерной цепи. Чтобы это показать, рассмотрим рабочий режим транзистора (схема по постоянному току, рис. 2.8):

$$E_{\text{пит}} - U_{\text{кэ}} - I_{\text{э}} R_{\text{э}} = 0$$

$$\overset{I_{\text{э}} \approx I_{\text{к}}}{\Rightarrow} I_{\text{кА}} = \frac{E_{\text{пит}} - U_{\text{кэ}}}{R_{\text{э}}} \quad (5)$$

Для выбранной рабочей точки необходимо:

Рис. 2.8: Схема расчёта рабочего режима по постоянному току

$$R_{\text{э}} = \frac{E_{\text{пит}} - U_{\text{кэА}}}{I_{\text{кА}}} = \frac{20 - 8}{14 \cdot 10^{-3}} = 857 \text{ Ом}$$

Из номинального ряда можно выбрать $R'_{\text{э}} = 820 \text{ Ом}$ или $R''_{\text{э}} = 910 \text{ Ом}$. Из (5):

$$I'_{\text{кА}} = \frac{12}{820} = 14,63 \text{ мА}, \quad I''_{\text{кА}} = \frac{12}{910} = 13,19 \text{ мА}$$

Если снова посмотреть на рис. 2.7, то можно увидеть, что при увеличении тока коллектора в рабочей точке динамическая линия нагрузки очень быстро выходит за допустимую область. Использование $R'_{\text{э}}$ может привести к этой ситуации, поэтому рассмотрим использование $R''_{\text{э}}$. $I''_{\text{кА}} = 13,19 \text{ мА}$ удовлетворяет поставленному ранее требованию (2), с учётом (3), поэтому выбираем $R_{\text{э}} = 910 \text{ Ом}$.

Проверим, что с выбранными параметрами транзистор будет работать в допустимой области. Для этого рассчитаем тангенс наклона динамической линии нагрузки:

$$R_{\sim} = \frac{U_{кэВ} - U_{кэА}}{I_{кА}} = \frac{11,9 - 8}{13,19 \cdot 10^{-3}} = 296 \text{ Ом}$$

Тогда уравнения статической и динамической нагрузки соответственно:

$$I_{к} = \frac{E_{пит} - U_{кэ}}{R_{э}}, \quad I_{к} = \frac{U_{кэВ} - U_{кэ}}{R_{\sim}}$$

Построив их на выходной характеристике, видим, что линии нагрузки не выходят в критическую область, рис. 2.9.

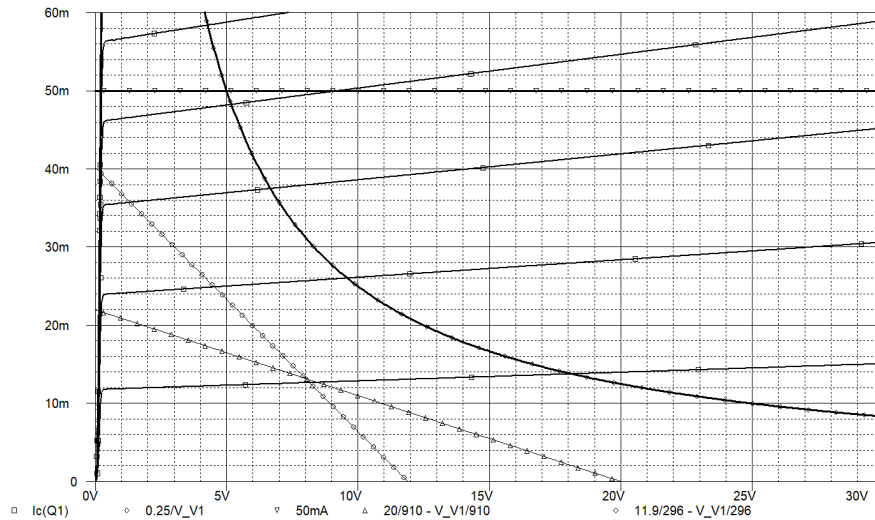


Рис. 2.9: Полученная рабочая точка и линии нагрузки

Таким образом, можно сделать вывод, что заданный тип транзистора, при учёте его предельных параметров, применим для требуемой схемы усилительного каскада.

2.4.2 Выходные сопротивления

Перейдём к упрощённой схеме с двумя источниками, рис. 2.10. Обеспечить термостабильность рабочей точки и технологического разброса параметров транзистора можно из следующего условия

$$\Delta I_{к} = S_T \left[\frac{\Delta I_{к0}}{\alpha} + \frac{|\Delta U_{бэ}|}{R_{э} + R_{б}} + \frac{I_{э} \Delta \beta}{(1 + \beta)^2} \right] \leq \Delta I_{к\text{доп}} \quad (6)$$

Где $S_T = \frac{\beta}{1 + \gamma_6 \beta}$ — коэффициент термонеустойчивости, $\gamma_6 = \frac{R_9}{R_9 + R_6}$ — коэффициент перераспределения тока коллектора через базу, $R_6 = R_1 || R_2$, $\Delta\beta = \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{2}$.

При этом для кремниевых приборов можно пренебречь слагаемым $\frac{\Delta I_{K0}}{\alpha}$. Второе слагаемое представляет собой модуль изменения тока, протекающего через базу, который зависит от изменения температуры, а третье слагаемое:

$$\frac{I_3 \Delta\beta}{(1 + \beta)^2} = I_6 \cdot \frac{\Delta\beta}{(1 + \beta)} \stackrel{\beta \gg 1}{\approx} I_6 \delta\beta$$

Таким образом эти два слагаемых учитывают изменение температуры и коэффициента усиления транзистора.

Итого, учтя то, что $\Delta I_{K_{\text{доп}}} = \left. \frac{\Delta U_T}{R_9} \right|_{R_9=R_3}$ получить следующее неравенство:

$$R_6 \leq \frac{\beta(\Delta I_{K_{\text{доп}}} R_9 - |\xi \Delta T|)}{I_6 \Delta\beta - \Delta I_{K_{\text{доп}}}} - R_9, \quad \xi = 1 \dots 2 \text{ мВ/град} \quad (7)$$

Возьмём среднее значение коэффициента усиления базового тока:

$$\beta = \beta_{\text{ср}} = \frac{\beta_{\min} + \beta_{\max}}{2} = \frac{100 + 250}{2} = 175;$$

$$\Delta I_{K_{\text{доп}}} = \frac{\Delta U_T}{R_9} = \frac{2}{910} = 2,2 \text{ мА};$$

$$\Delta T = \max\{|20 - (-40)|, |20 - 60|\} = 60;$$

$$I_6 = \frac{I_K}{\beta} = \frac{13,19 \cdot 10^{-3}}{175} = 75,37 \text{ мкА};$$

$$\Delta\beta = \frac{250 - 100}{2} = 75 \Rightarrow$$

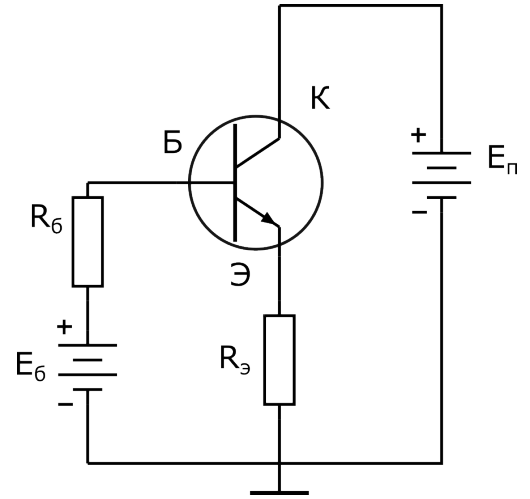


Рис. 2.10: Упрощенная схема расчёта по постоянному току и $\Delta U_{63} = -\xi \cdot \Delta T$, из (6) можно

$$\Rightarrow R_6 \leq \frac{175(2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 910 - |(1 \dots 2) \cdot 10^{-3} \cdot 60|)}{75,37 \cdot 10^{-6} \cdot 75 - 2,2 \cdot 10^{-3}} - 910 \stackrel{\xi=2 \text{ мВ}}{=} 94,48 \text{ кОм} \quad (8)$$

Пусть $R_6 = 6 \text{ кОм}$. Далее перейдём к схеме с R_1 — R_2 делителем:

$$\begin{cases} E_6 = E_{\text{пит}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ R_6 = R_1 || R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \end{cases} \Rightarrow R_1 = \frac{R_6(R_1 + R_2)}{R_2} = \frac{R_6 E_{\text{пит}}}{E_6} \quad (9)$$

Из рис. 2.10 по 2-ому закону Кирхгофа:

$$E_6 = I_3 R_3 + U_{63} + I_6 R_6 \stackrel{(9)}{\Rightarrow} R_1 = \frac{E_{\text{пит}}}{\frac{I_3 R_3 + U_{63}}{R_6} + I_6} \approx \frac{E_{\text{пит}}}{I_3 R_3} R_6 \stackrel{I_3 \approx I_k}{=} \stackrel{I_3 \approx I_k}{=} \frac{20}{13,19 \cdot 10^{-3} \cdot 910} 6 \cdot 10^3 = 10 \text{ кОм} \quad (10)$$

Тогда из определения сопротивления базы можем выразить R_2 :

$$R_2 = \frac{R_1 R_6}{R_1 - R_6} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^3} = 15 \text{ кОм} \quad (11)$$

Итого выбираем номинальные значения $R_1 = 10 \text{ кОм}$, $R_2 = 15 \text{ кОм}$.

2.5 Аналитический расчёт

2.5.1 Рабочий режим

$$\begin{aligned} E_{\text{пит}} &= 20 \text{ В}, \\ R_1 &= 10 \text{ кОм}, \\ R_2 &= 15 \text{ кОм}, \\ R_3 &= 910 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

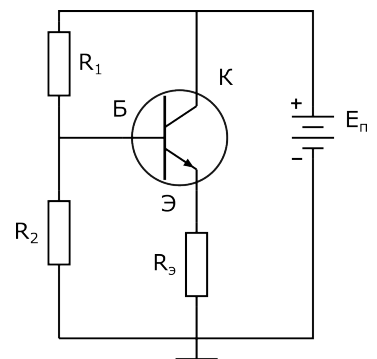


Рис. 2.11: Схема расчёта рабочего режима

От изначальной схемы (рис. 2.11) перейдём к упрощённой (рис. 2.12). В новой схеме имеем:

$$R_6 = R_1 || R_2 = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3} = 6 \text{ кОм};$$

$$E_6 = E_{\text{пит}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 20 \frac{15 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3} = 12 \text{ В.}$$

Для нормального режима работы транзистора $U_{6э} \approx 0,7 \text{ В}$. Также считаем коэффициент усиления $\beta = 175$. По 2 закону Кирхгофа:

$$E_6 = I_3 R_3 + U_{6э} + I_6 R_6; \quad (12)$$

$$E_{\text{пит}} = I_3 R_3 + U_{кэ}; \quad (13)$$

$$I_3 = I_к + I_6; \quad (14)$$

$$I_к = \beta I_6.$$

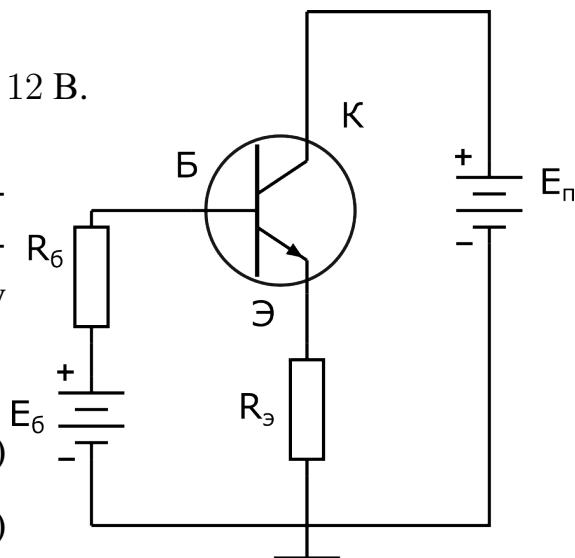


Рис. 2.12: Упрощённая схема расчёта

Из системы этих уравнений можем определить рабочий режим:

$$(12) \Rightarrow I_{6A} = \frac{E_6 - U_{6э}}{(1 + \beta)R_3 + R_6} = \frac{12 - 0,7}{(1 + 175)910 + 6000} = 68 \text{ мкА};$$

$$I_{кA} = 175 \cdot 68 \cdot 10^{-6} = 11,9 \text{ мА};$$

$$(13) \Rightarrow U_{кэA} = E_{\text{пит}} - (1 + \beta)I_6 R_3 = 20 - 176 \cdot 68 \cdot 10^{-6} \cdot 910 = 9,1 \text{ В};$$

$$(14) \Rightarrow I_{3A} = 68 \cdot 10^{-6} + 11,9 \cdot 10^{-3} = 12 \text{ мА}.$$

Полученные результаты занесём в таблицу 2 и сравним с рабочей точкой, которой мы изначально задавали

Таблица 2: Результаты аналитического расчёта

	$I_к, \text{ мА}$	$I_6, \text{ мкА}$	$U_{кэ}, \text{ В}$	$U_{6э}, \text{ В}$
Заданная рабочая точка	13,19	75,37	8	0,75
Аналитический расчёт	11,9	68	9,1	0,7

2.5.2 Основные параметры УК

Перейдём к малосигнальной схеме замещения (рис. 2.13). Для расчёта по ней необходимо знать $h_{11э}$, $h_{21э}$.

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6} \right|_{U_{кэ}=\text{const}} \approx \beta_{\text{ср}} = 175;$$

$$\begin{aligned} h_{11э} &= \left. \frac{\Delta U_{6э}}{\Delta I_6} \right|_{U_{кэ}=\text{const}} \approx \frac{dU_{6э}}{dI_6} = \beta \frac{dU_{6э}}{dI_K} = \frac{\beta}{\frac{d}{dU_{6э}}(I_{K0} e^{\frac{U_{6э}}{\varphi_T}})} = \\ &= \frac{\beta \varphi_T}{I_K} \stackrel{t=20^\circ}{=} \frac{175 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{11,9 \cdot 10^{-3}} = 367,65 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

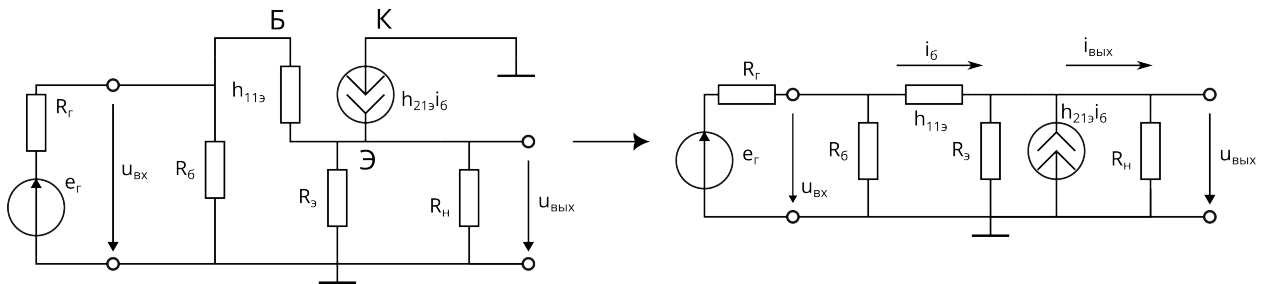


Рис. 2.13: Малосигнальная схема замещения

Из этой схемы можем найти значения входного, выходного сопротивлений, а также коэффициент усиления каскада:

$$\begin{aligned} R_{\text{ВХ}} &= \frac{u_{\text{ВХ}}}{i_{\text{ВХ}}} = R_6 \parallel [h_{11э} + (1 + \beta) \cdot (R_э \parallel R_H)] = (6 \cdot 10^3) \parallel [367,65 + (1 + 175) \cdot (910 \parallel 800)] = \\ &= (6 \parallel 75,30) \cdot 10^3 = 5,56 \text{ кОм} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{\text{ВЫХ}} &= \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВЫХ}}} = R_э \parallel \left[\frac{h_{11э} + R_r \parallel R_6}{1 + \beta} \right] = 910 \parallel \left[\frac{367,65 + (1,5 \parallel 6) \cdot 10^3}{1 + 175} \right] = \\ &= 910 \parallel 8,91 = 8,82 \text{ Ом} \end{aligned}$$

$$K_{uxx} = \frac{(1 + \beta) R_э}{h_{11э} + (1 + \beta) R_э} = \frac{176 \cdot 910}{367,65 + 176 \cdot 910} = 0,998$$

$$\xi_{\text{BX}} = \frac{R_{\text{BX}}}{R_{\Gamma} + R_{\text{BX}}} = \frac{5,56}{1,5 + 5,56} = 0,788$$

$$\xi_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{H}}}{R_{\text{H}} + R_{\text{ВЫХ}}} = \frac{800}{800 + 8,82} = 0,989$$

$$K_e = K_{\text{uXX}} \xi_{\text{BX}} \xi_{\text{ВЫХ}} = 0,988 \cdot 0,788 \cdot 0,989 = 0,77$$

Значение передачи по напряжению генератора оказалось достаточным, чтобы обеспечить требуемое по тз $K_{e \text{ тз}} = 0,7$.

2.6 Выбор ёмкостей конденсаторов

Усилительный каскад по техническому заданию должен иметь следующую нижнюю граничную частоту: $f_{\text{н тз}} = 50$ Гц. Рассмотрим диапазон низких частот. Здесь значительное реактивное сопротивление будут иметь разделительные конденсаторы. Будем считать, что каждый из них даёт примерно одинаковый вклад в постоянную времени.

$$\tau_{\text{H}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{H}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50} = 3,18 \text{ мс};$$

$$\tau_{\text{H1}} = \tau_{\text{H2}} = 0,5\tau_{\text{H}} = 2 \cdot 3,18 \cdot 10^{-3} = 6,36 \text{ мс}.$$

$$\tau_{\text{H1}} = C_{p1}(R_{\Gamma} + R_{\text{BX}}) \Rightarrow C_{p1} = \frac{\tau_{\text{H1}}}{R_{\Gamma} + R_{\text{BX}}} = \frac{6,36 \cdot 10^{-3}}{1500 + 5560} = 900,85 \text{ нФ}$$

$$\tau_{\text{H2}} = C_{p2}(R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{H}}) \Rightarrow C_{p2} = \frac{\tau_{\text{H2}}}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{H}}} = \frac{6,36 \cdot 10^{-3}}{8,82 + 800} = 7,86 \text{ мкФ}$$

Из номинального ряда **Е12** выбираем значения большие рассчитанных. Так усилительный каскад будет иметь нижнюю граничную частоту не больше заданных 50 Гц. Выбрано: $C_{p1} = 1 \text{ мкФ}, C_{p2} = 8,2 \text{ мкФ}$.

2.7 Расчёт верхней границы пропускания

Усилительный каскад по техническому заданию должен иметь следующую верхнюю граничную частоту: $f_{в\text{тз}} = 30$ кГц. На высоких частотах на коэффициент усиления влияют паразитные входная ёмкость, ёмкость нагрузки и зависимость от частоты коэффициента усиления транзистора.

Для подсчёта входной ёмкости нужно знать ёмкость коллекторного перехода² $C_K = 8$ пФ. Ёмкость эмиттерного перехода не указана, возьмём её равной ёмкости коллекторного перехода: $C_э = 8$ пФ.

$$C_{вх} = C_K \cdot K_u + C_э = C_K \cdot K_{ухх} \xi_{вых} + C_э = \\ = 8 \cdot 10^{-12} \cdot 0,998 \cdot 0,989 + 8 \cdot 10^{-12} = 15,90 \text{ пФ}$$

С учётом ёмкости коллекторного перехода найдём эквивалентную ёмкость нагрузки:

$$C_{н\text{экв}} = C_H + C_K \beta = 10 \cdot 10^{-9} + 8 \cdot 10^{-12} \cdot 175 = 11,4 \text{ нФ}$$

Постоянная времени для высокой частоты:

$$\tau_B = \sqrt{\tau_{B1}^2 + \tau_{B2}^2 + \tau_T^2} \quad (15)$$

$$\tau_{B1} = (R_{Г||} R_{вх}) C_{вх} = (1500 || 5560) \cdot 15,9 \cdot 10^{-12} = 18,78 \text{ нс};$$

$$\tau_{B2} = (R_{H||} R_{вых}) C_{н\text{экв}} = (800 || 8,82) \cdot 11,4 \cdot 10^{-12} = 99,45 \text{ пс}$$

$$\tau_T = \frac{\beta}{2\pi \beta f_{Гр} (1 + \beta \frac{R_э}{R_э + R_6})} = \frac{1}{2\pi \cdot 250 \cdot 10^6 (1 + 175 \frac{910}{910 + 6000})} = 26,47 \text{ пс}$$

²Источник: Справочник по отечественным транзисторам, КТ342 (кремниевый транзистор, n-p-n). URL: <https://www.5v.ru/ds/trnz/kt342.htm> (Дата обращения 21.05.2023)

$$(15) \rightarrow \tau_B = \sqrt{(18,78 \cdot 10^{-9})^2 + (99,45 \cdot 10^{-12})^2 + (26,47 \cdot 10^{-12})^2} = 18,78 \text{ нс}$$

Отсюда можем найти верхнюю граничную частоту:

$$f_B = \frac{1}{2\pi\tau_B} = \frac{1}{2\pi \cdot 18,78 \cdot 10^{-9}} = 8,475 \text{ МГц}$$

Значение верхней граничной частоты получилось на пару порядков больше, чем заданное в техническом задании. То есть мы получили более широкий диапазон средних частот, что хорошо для усилительного каскада.

3 Компьютерное моделирование работы УК

3.1 Графический расчёт рабочего режима

Откроем собранные ранее цепи (рис. 2.4, 2.5), использованные для получения входной и выходной характеристики транзистора. Уравнения линий нагрузок для входной и выходной характеристик имеют следующие виды соответственно:

$$U_{бэ} = E_{пит} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - I_б R_б - I_э R_э;$$

$$I_к = \frac{E_{пит} - U_{кэ}}{R_э}$$

Нанесём эти нагрузочные прямые на графики характеристик транзистора. Результаты представлены на рис. 3.1, 3.2.

Получили следующий рабочий режим:

$$I_к = 12,24 \text{ мА}, I_б = 85,51 \text{ мкА}, U_{кэ} = 8,86 \text{ В}, U_{бэ} = 0,734 \text{ В}.$$

Также по этим характеристикам можем найти малосигнальные параметры замещения $h_{11э}$, $h_{21э}$.

$$h_{11э} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} \right|_{U_{кэ}=const} = \frac{U_{бэВ} - U_{бэА}}{I_{бВ} - I_{бА}} = \frac{0,73875 - 0,73409}{(100,284 - 85,511) \cdot 10^{-6}} = 315,44 \text{ Ом}$$

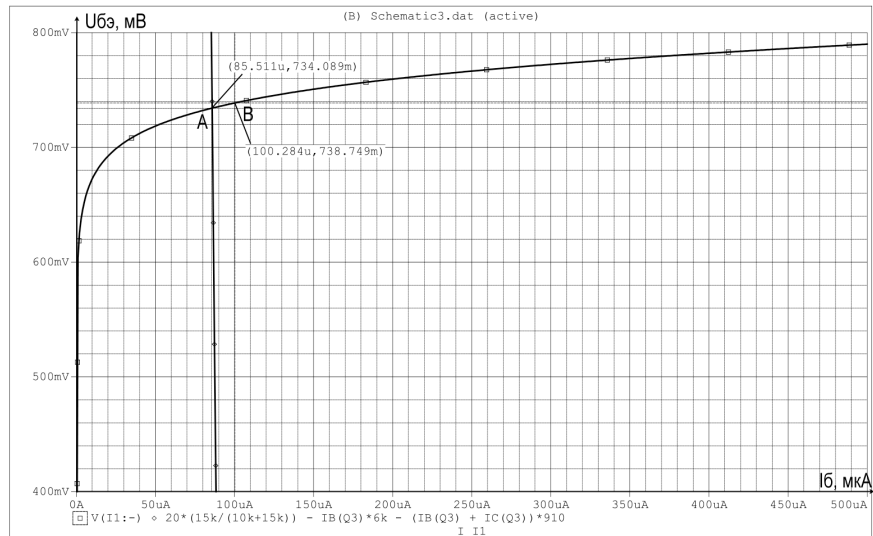


Рис. 3.1: Рабочая точка на входной характеристике

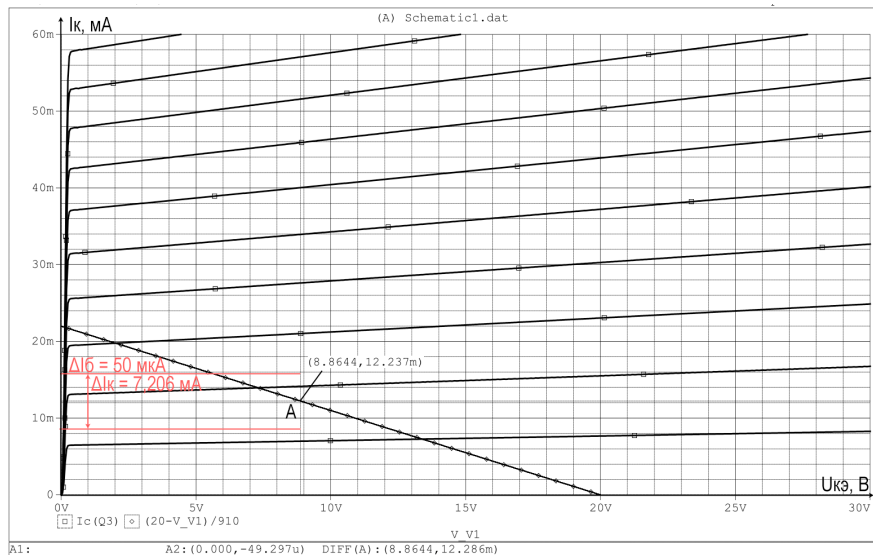
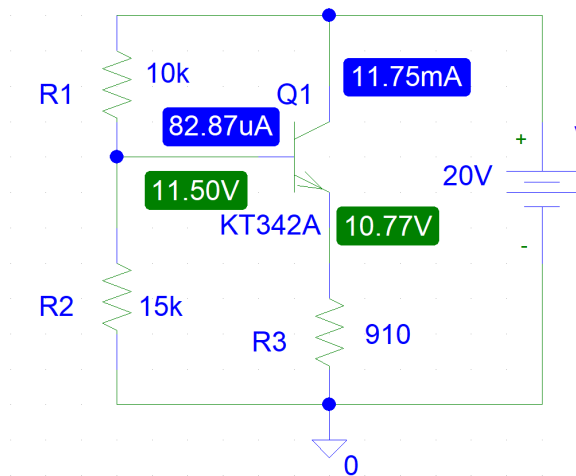


Рис. 3.2: Рабочая точка на выходной характеристике

$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6} \right|_{U_{кэ}=const} = \frac{7,206 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}} = 144,12$$

3.2 Численный расчёт рабочего режима

Для численного расчёта рабочего режима соберём схему усилительно-го каскада по постоянному току (рис. 3.3). В результате анализа **Bias point detail** получаем значения токов и напряжений, который показаны на этом же рисунке. Так же в выходном файле имеем более подробную информацию о результатах анализа схемы (рис. 3.4).



**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS

NAME	Q_Q1
MODEL	KT342A
IB	8.29E-05 - ток базы
IC	1.18E-02 - ток коллектора
VBE	7.33E-01 - напряжение база-эмиттер
VBC	-8.50E+00 - напряжение база-коллектор
VCE	9.23E+00 - напряжение коллектор-эмиттер
BETADC	1.42E+02
GM	4.30E-01
RPI	3.32E+02 - входное сопротивление транзистора
RX	1.90E+01
RO	9.81E+03 - выходное сопротивление транзистора
CBE	1.56E-10
CBC	3.92E-12
CJS	0.00E+00
BETAAC	1.43E+02 - коэффициент h21э
CBX/CBX2	0.00E+00
FT/FT2	4.28E+08

Рис. 3.3: Схема расчёта рабочего режима

Рис. 3.4: Результат численного расчёта

Получили следующий рабочий режим:

$$I_K = 11,8 \text{ мА}, I_Б = 82,9 \text{ мкА}, U_{КЭ} = 9,23 \text{ В}, U_{БЭ} = 0,733 \text{ В}.$$

Параметры малосигнальной схемы замещения транзистора:

$$h_{11э} = 332 \text{ Ом}, h_{21э} = 143.$$

Для сравнения результатов составим таблицу 3:

Таблица 3: Результаты различных расчётов рабочего режима

Способ определения р.т.	I_K , мА	$I_Б$, мкА	$U_{КЭ}$, В	$U_{БЭ}$, В
Заданная рабочая точка	13,19	75,37	8	0,75
Аналитический расчёт	11,9	68	9,1	0,7
Графический расчёт	12,24	85,51	8,86	0,734
Численный расчёт	11,8	82,9	9,23	0,733

Получили весьма схожие результаты. Значения токов и напряжений несколько больше чем те, что мы получили при аналитическом расчёте. Однако, поскольку рабочая точка выбрана с достаточно большим запасным расстоянием от критической области, усилительный каскад должен работать в нормальном режиме без превышения максимальных допустимых нагрузок на транзистор.

3.3 Расчёт основных характеристик УК

3.3.1 Проверка работоспособности УК

Соберём полученную схему усилительного каскада (рис. 3.5). Для проверки работоспособности схемы используем источник с амплитудой **5В** и частотой **10кГц**. В результате моделирования получаем графики представленные на рис. 3.6.

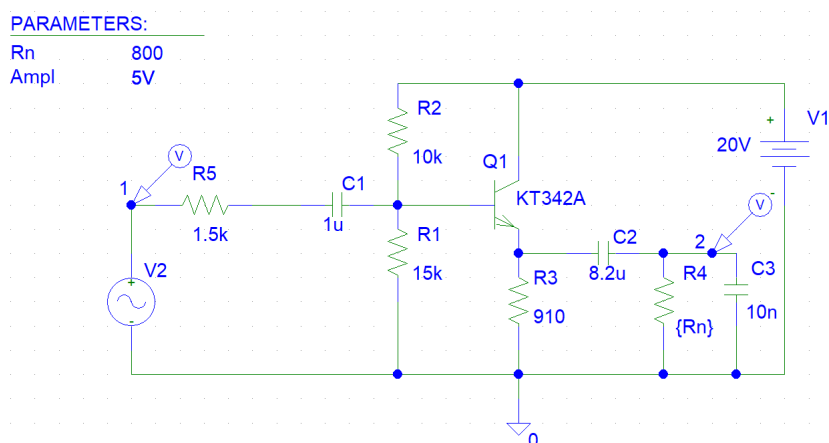


Рис. 3.5: Схема для моделирования каскада с ОК

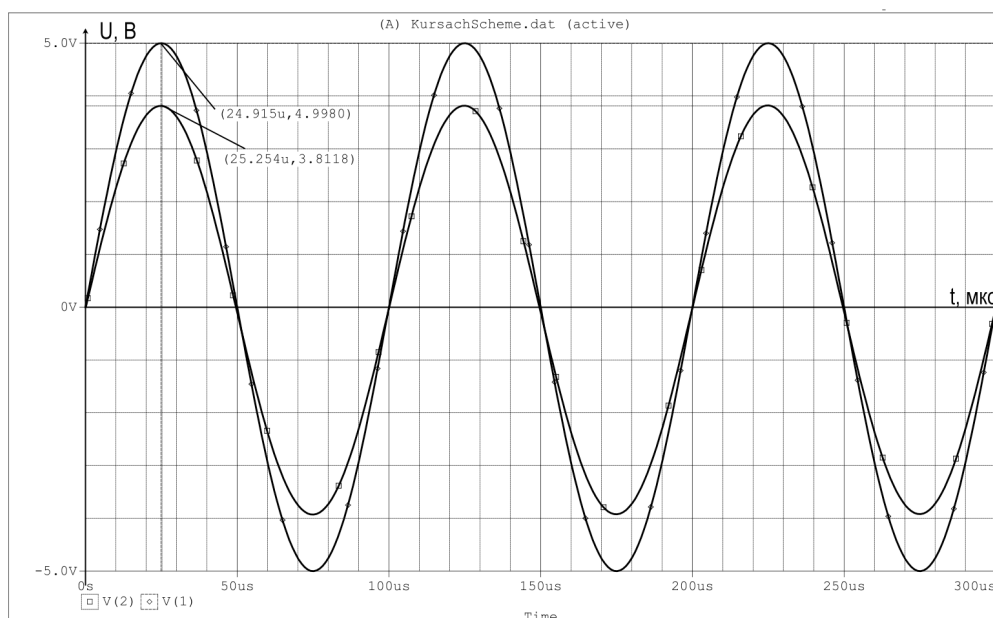


Рис. 3.6: Осциллограммы входного и выходного напряжений

Как мы видим усилительный каскад повторяет сигнал без сдвига фаз. Коэффициент передачи по напряжению генератора $K_e = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}} = \frac{3,8}{5} = 0,7$.

Значение K_e оказалось **больше**, чем заданное в техническом задании, что и требовалось.

3.3.2 Получение амплитудно-частотной характеристики УК

Поменяем схему моделирования для снятия АЧХ (рис. 3.7). Напряжение генератора установим равным **1В**. В результате **АС Sweep** анализа получаем следующую амплитудно-частотную характеристику (рис. 3.8):

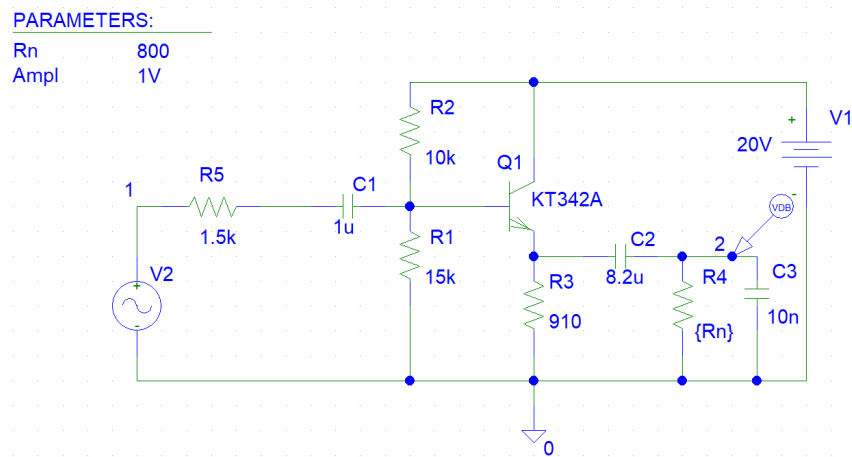


Рис. 3.7: Схема для получения АЧХ

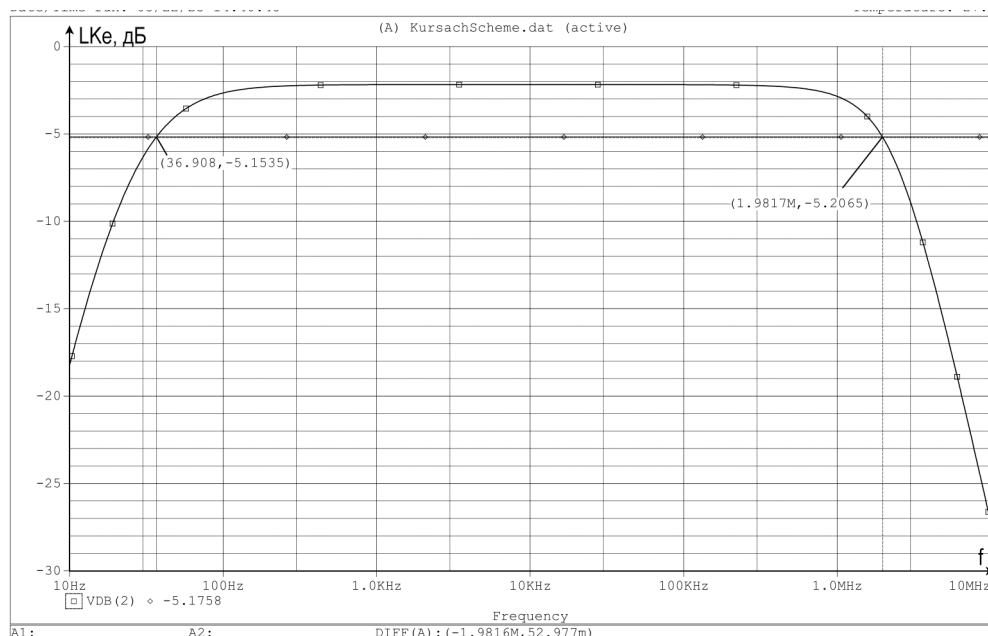


Рис. 3.8: Полученная АЧХ схемы

По уровню $LK_{e0} - 3$ дБ, где LK_{e0} - коэффициент усиления в децибелах в области средних частот. Получаем $f_n = 37$ Гц, $f_c = 1,98$ МГц.

3.3.3 Определение входного сопротивления каскада

Изменим формулу выводимого графика для предыдущего анализа. Поставим в качестве формулы отношение напряжения к току на входе. Тогда получим зависимость входного сопротивления от частоты (рис. 3.9):

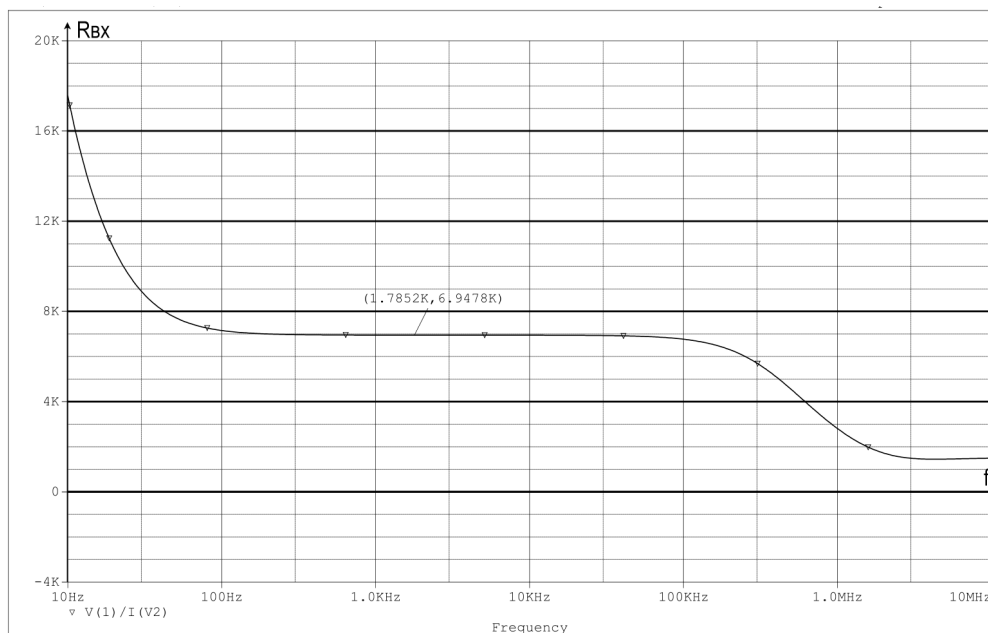


Рис. 3.9: Зависимость входного сопротивления УК от частоты

В области средних частот имеем $R_{вх} = 6,95$ кОм. Это значение больше, чем мы получили, при аналитическом расчёте. За счёт большего значения $R_{вх}$ мы имеем больший коэффициент усиления, поскольку напряжение с генератора лучше передаётся в усилитель через делитель $R_{Г} - R_{вх}$.

3.3.4 Определение выходного сопротивления каскада

Чтобы определить выходное напряжение построим нагрузочную характеристику усилителя. Для этого получим множество кривых АЧХ при разных значениях $R_{н}$, и в качестве точек нагрузочной прямой возьмём значения усиления каждой из области средних частот, в нашем случае для $f_{ср} = 10$ кГц. Получим следующие графики, представленные на рис. 3.10.

При очень больших $R_{н}$ практически всё напряжение выхода в делителе $R_{вых} - R_{н}$ приходится на сопротивление нагрузки. Это напряжение задаёт $K_{e\,xx}$. Если сопротивления в этом делителе совпадают, то напряжение делится на них пополам, поэтому тогда коэффициент $K_e = 0,5K_{e\,xx}$. Значит сопротив-

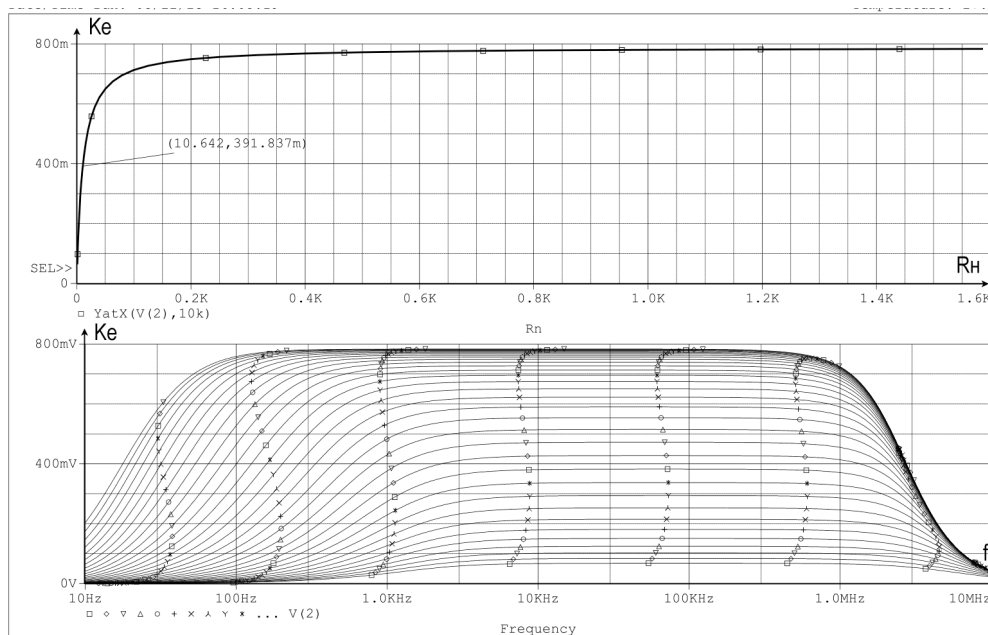


Рис. 3.10: Нагрузочная характеристика усилителя

ление, на котором коэффициент усиления уменьшится вдвое, равно сопротивлению выхода. Из графика его находим: $R_{\text{вых}} = 10,64 \text{ Ом}$.

3.3.5 Получение амплитудной характеристики

Получим семейство кривых выходного напряжения в зависимости от времени при разных амплитудах напряжения генератора. В качестве временного диапазона возьмём один период. По этому множеству кривых построим амплитудную характеристику (рис. 3.11).

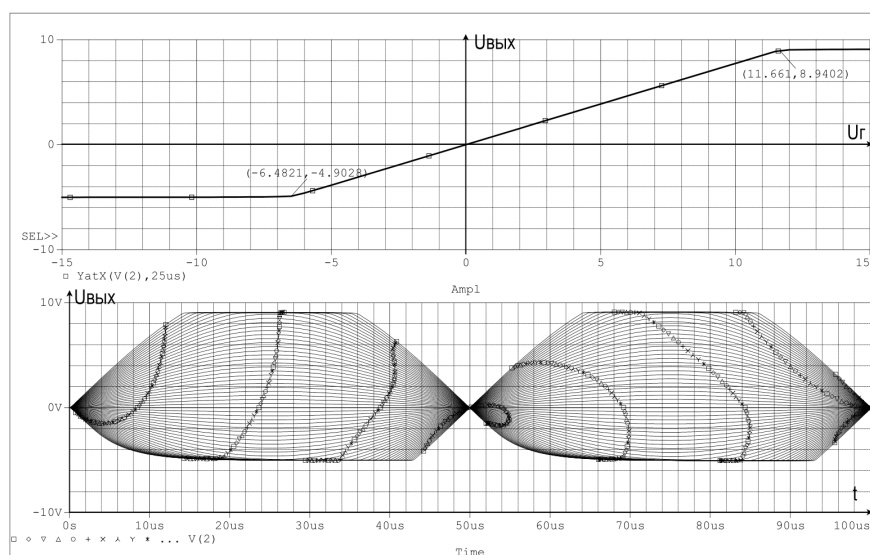


Рис. 3.11: Амплитудная характеристика УК

Из этой зависимости можем найти динамический диапазон входного, выходного напряжений: $U_{\text{вх max}} = 6,48 \text{ В}$, $U_{\text{вых max}} = 4,9 \text{ В}$.

Также можно найти коэффициент усиления по напряжению K_e , как отношение напряжения на выходе к напряжению на входе: $K_e = \frac{4,9}{6,48} = 0,756$. При аналитическом расчёте мы получили значение $K_{e \text{ ан.}} = 0,77$, что очень близко.

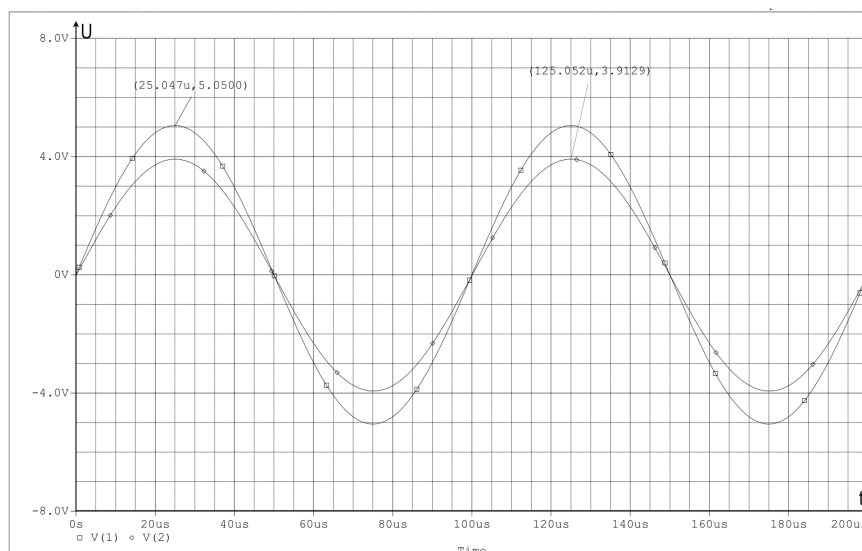


Рис. 3.12: Работа УК при требуемом максимальном выходном напряжении

3.3.6 Анализ нелинейных искажений

Зададим напряжение генератора, при котором выходное напряжение будет равно $U_{\text{вых maxтз}} = 3,9 \text{ В}$, а именно $e_{\Gamma m} = 5,05 \text{ В}$. Проведём временной анализ, с включенным параметром Фурье анализа по 5 гармоникам. Основной будем считать $f_{\text{ср}} = 10 \text{ кГц}$. Получим следующую осциллограмму (рис. 3.12).

Результаты Фурье анализа получим из выходного файла (рис. 3.13). Коэффициент нелинейных искажений рассчитывается как отношение корня из суммы квадратов амплитуд высших гармоник к амплитуде основной гармоники:

$$K_{\text{ни}} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2}}{U_1}$$

Этот коэффициент уже подсчитан во время моделирования и выведен в конце файла с результатами Фурье анализа как **total harmonic distortion**. Поэтому имеем $K_{\text{ни}} = 0,126\%$.

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(2)

DC COMPONENT = -1.452915E-02

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	1.000E+04	3.925E+00	1.000E+00	-1.517E-01	0.000E+00
2	2.000E+04	4.218E-03	1.075E-03	-5.718E+01	-5.688E+01
3	3.000E+04	2.406E-03	6.130E-04	4.309E+01	4.354E+01
4	4.000E+04	8.734E-04	2.225E-04	1.473E+02	1.479E+02
5	5.000E+04	3.531E-04	8.995E-05	-1.119E+02	-1.112E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.260260E-01 PERCENT

Рис. 3.13: Результаты Фурье анализа

3.4 Сравнение результатов

Для сравнения составим таблицу 4. Как мы видим параметры полученные на практике близки к тем, которые рассчитывались теоретически.

Таблица 4: Сравнение параметров УК, полученных теоретически и практически

	I_K , мА	I_6 , мкА	U_{K3} , В	U_{63} , В	R_{BX} , кОм	$R_{ВЫХ}$, Ом	K_e	f_H , Гц	f_B , МГц
Ан. р.	11,9	68	9,1	0,7	5,56	8,82	0,77	50	8,475
Ч. мод.	11,8	82,9	9,23	0,733	6,95	10,64	0,756	37	1,98

4 Приложения

Приложение 1

Ряд	Номиналы											
Е6 20%	10				15				22			
	33				47				68			
Е12 10%	10		12		15		18		22		27	
	33		39		47		56		68		82	
Е24 5%	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30
	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91

Приложение 2

Номинальный ряд источников питания:

$$E_{\Pi} = 6, 7, 5, 9, 10, 12, 15, 18, 20, 24, 27, 30, 36, 48$$

Список литературы

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для ВУЗов. / 2-ое изд. -М.: Лаборатория Базовых Знаний. 2001. -488с.
2. Ткаченко Ф.А. Техническая электроника. – М.: Дизайн ПРО, 2002. – 368с. (УДК 621.38; Т484)
3. Электротехника и электроника. Учебник для вузов.- В 3-х кн. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники/ Г.П.Гаев, В.Г.Герасимов, О.М.Князьков и др.; Под ред. проф. В.Г.Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. (УДК 621.3; Э45)
4. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов /Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000. –768с.: ил. (О-60 УДК 621.396.6)
5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. / Том I: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с
6. Электроника: методические рекомендации / М.П. Жохова, А.Т. Кобяк, А.П. Батенина, С.В. Лагутина. – М.: Издательство МЭИ, 2021. – 48 с.
7. Электроника. Сборник задач по аналоговой схемотехнике: В 2 ч. Ч. 1/ М.П. Жохова, А.Т. Кобяк, А.П. Батенина, С.В. Лагутина. – М.: Издательство МЭИ, 2022. – 60 с.
8. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: справочник. / под ред. Б.Л. Перельмана. -М.: Радио и связь. 1981.
9. Кобяк А.Т., Новикова Н.Р., Паротькин В.И., Титов А.А. Применение системы Design Lab 8.0 в курсах ТОЭ и электроники: Метод. пособие. –М.: Издательство МЭИ, 2001. –128с. (УДК 621.3 П–764).
10. Кобяк А.Т., Батенина А.П., Лагутина С.В. Применение программы схемотехнического моделирования Design Lab 8.0 в курсе электроники: Метод. Пособие.–М.: Издательство МЭИ, 2014.–36с. (УДК 621.3).