

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

Факультет дистанционного обучения (ФДО)

Н. С. Легостаев

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ**

**Методические указания
по выполнению контрольной работы и организации
самостоятельной работы для обучающихся с применением
дистанционных образовательных технологий**

Томск 2021

Корректор: А. Н. Миронова

Легостаев Н. С.

Методы исследования электронных цепей : методические указания по выполнению контрольной работы и организации самостоятельной работы для обучающихся с применением дистанционных образовательных технологий / Н. С. Легостаев. – Томск : ФДО, ТУСУР, 2021. – 46 с.

Представлены общие методические указания по выполнению контрольной работы, определен порядок выполнения контрольной работы, приведены требования к содержанию и оформлению отчета. Изложены общие указания по организации самостоятельной работы для студентов высших учебных заведений, обучающихся по техническим направлениям подготовки и специальностям с применением дистанционных образовательных технологий.

© Легостаев Н. С., 2021

© Оформление.

ФДО, ТУСУР, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Теоретические основы исследования электронных цепей методом эквивалентных схем в матричной форме	5
1.1 Схемы замещения электронных цепей	5
1.2 Методы формирования узловых и контурных уравнений.....	9
1.3 Определение выражений схемных функций по укороченной матрице проводимостей.....	16
2 Контрольная работа «Определение выражений схемных функций методом эквивалентных схем в матричной форме в узловом базисе»	19
2.1 Содержание контрольной работы	19
2.2 Пример выполнения контрольной работы	20
2.3 Требования к оформлению отчета по контрольной работе.....	27
3 Методические указания по организации самостоятельной работы.....	28
Литература	39
Приложение А Варианты заданий на контрольную работу	40
Приложение Б Эквивалентные схемы активных электронных компонентов	45

ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения курса «Методы исследования электронных цепей» является формирование знаний и навыков теоретического исследования и проектирования устройств промышленной электроники на основе математических методов анализа, расчета и оптимизации электронных цепей с использованием средств электронно-вычислительной техники.

В задачи дисциплины входит:

- изучение
 - сущности и основных видов анализа, расчета и оптимизации электронных цепей, а также роли анализа в процессе схемотехнического проектирования устройств промышленной электроники;
 - принципов математического моделирования и правил формирования операторных математических моделей электронных цепей;
 - методов анализа и расчета электронных цепей, основанных на алгебраических и топологических моделях;
- приобретение практических навыков анализа и расчета электронных цепей на основе изученных методов с применением персональных компьютеров.

Данные методические указания включают рекомендации и примеры выполнения контрольных работ, а также общие указания по организации самостоятельной работы. В приложении содержится справочный материал, необходимый и достаточный для выполнения контрольной работы.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ В МАТРИЧНОЙ ФОРМЕ

1.1 Схемы замещения электронных цепей

Основным этапом исследования линейных электронных цепей на основе операторных математических моделей является определение выражений схемных функций, по которым далее производится расчет частотных и временных характеристик, определяются параметры последних, исследуется параметрическая чувствительность, устойчивость и т. д.

В зависимости от используемого языка математического описания выделяют три группы методов определения схемных функций:

- матричные методы;
- топологические методы;
- теоретико-множественные методы.

Алгебраический язык основан на представлении информации в виде матриц, является удобным для автоматизации анализа и служит теоретической базой для обоснования методов, основанных на других языках описания.

Топологический язык основан на представлении математических моделей в виде взвешенных графов и получении выражений для схемных функций непосредственно по виду графов путем применения к нему специальных операций.

В основе теоретико-множественного языка описания методов определения схемных функций лежит отображение матричных или топологических моделей электронных схем совокупностью множеств, содержащих коды их ненулевых элементов, с последующим преобразованием этих множеств на основе теоретико-множественных операций.

По форме представления различают следующие виды топологических моделей электронных цепей: *электрические схемы (схемы замещения), полюсные графы электронных цепей, топологические матрицы и уравнения*.

Схема замещения электронной цепи – это геометрическая абстракция цепи, отражающая ее структуру и характер входящих в нее компонентов с учетом режима работы, постановки задачи исследования и требуемой точности.

Для электронных цепей непрерывного действия принято задачу анализа разделять на две независимые задачи: *анализ цепи по постоянному току* и *анализ цепи по переменному току*, для решения каждой из которых применяют соответствующие схемы замещения.

Схему замещения электронной цепи по постоянному току получают из схемы электрической принципиальной, используя следующие правила: ветви с емкостными элементами размыкают; идеальные индуктивности закорачивают; ветви идеальных источников переменного тока размыкают; идеальные источники переменных ЭДС закорачивают; активные электронные компоненты представляют соответствующими условными графическими обозначениями либо замещают нелинейными эквивалентными схемами для постоянного тока; источники питания постоянного тока принято представлять источниками постоянных ЭДС или постоянных токов с внутренними сопротивлениями.

При анализе измерительных цепей иногда учитывают паразитные омические сопротивления реактивных компонентов с целью исследования погрешностей, вносимых реактивными компонентами.

Схему замещения электронной цепи по переменному току получают из схемы электрической принципиальной, используя следующие правила:

- ветви источников постоянного тока размыкают;
- источники постоянных напряжений закорачивают;

- активные электронные компоненты представляют соответствующими условными графическими обозначениями либо замещают линеаризованными эквивалентными схемами для переменных сигналов;
- реактивные элементы закорачивают, если в рассматриваемом диапазоне частот их сопротивления переменному току сравнительно малы, и размыкают, если их сопротивления переменному току велики.

Для упрощения анализа иногда целесообразно составлять отдельные схемы замещения по переменному току для областей низких, рабочих и верхних частот. *При формировании схем замещения по переменному току для полного диапазона частот все компоненты исходной электронной цепи в схеме замещения по переменному току присутствуют.*

Рассмотрим формирование схемы замещения по переменному току для однокаскадного усилителя низкой частоты с цепью низкочастотной коррекции, приведенного на рисунке 1.1.

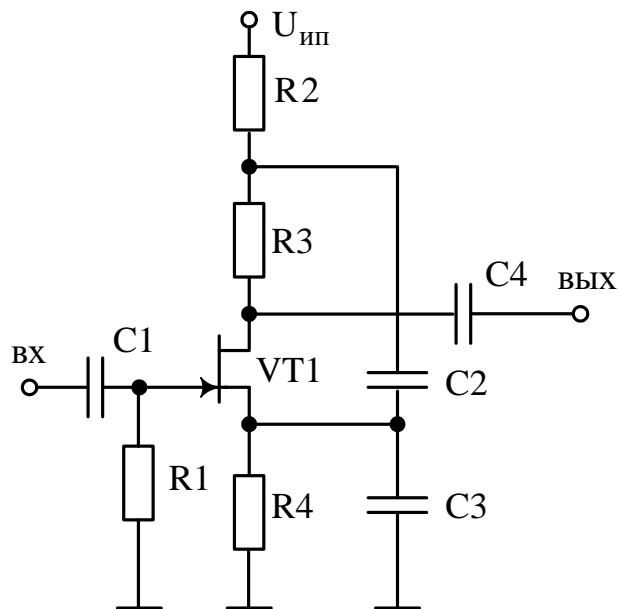


Рис. 1.1 – Однокаскадный усилитель низкой частоты
с цепью низкочастотной коррекции

При составлении схемы замещения по переменному току исключаем из принципиальной схемы источник питания $U_{\text{пп}}$ (так как это источник *постоянного* напряжения) путем закорачивания. Источник входного сигнала в схеме замещения по переменному току представлен идеальным источником переменного тока j_c с параллельной внутренней проводимостью g_c , а нагрузка – ветвью с сопротивлением R_h . В схеме замещения усилителя по переменному току для полного диапазона частот (рис. 1.2) учтены все реактивные элементы. Активный электронный компонент (транзистор VT1) представлен соответствующим условным графическим обозначением.

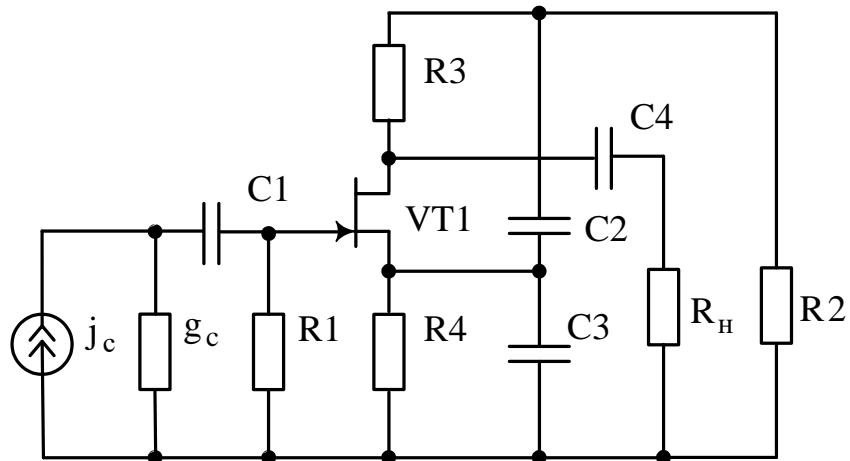


Рис. 1.2 – Схема замещения по переменному току
однокаскадного усилителя низкой частоты
с цепью низкочастотной коррекции для полного диапазона частот

На рисунке 1.3 представлена схема замещения по переменному току для полного диапазона частот однокаскадного усилителя низкой частоты, в которой полевой транзистор представлен линейной малосигнальной эквивалентной схемой.

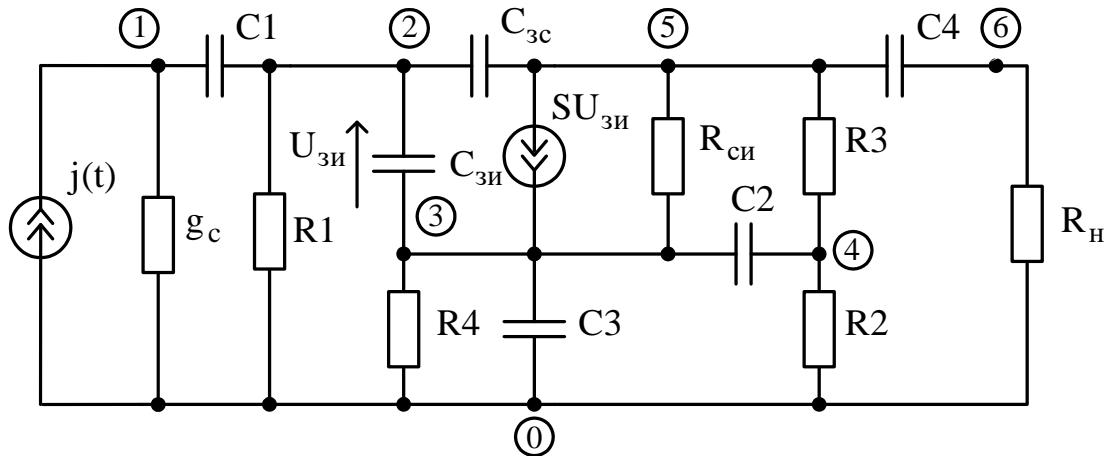


Рис. 1.3 – Схема замещения по переменному току однокаскадного усилителя низкой частоты для полного диапазона частот

1.2 Методы формирования узловых и контурных уравнений

Матрично-векторные параметры узловых и контурных уравнений могут быть сформированы непосредственно по схемам замещения электронных цепей, для этого используются два метода: *метод эквивалентных схем в матричной форме* и *обобщенный матричный метод*.

Метод эквивалентных схем в матричной форме предполагает формирование матрично-векторных параметров по схемам замещения, содержащим **только двухполюсные компоненты**. При этом в качестве моделей активных многополюсных компонентов используют линейные малосигнальные эквивалентные схемы (приложение Б, таблица Б.1). Обобщенный матричный метод основан на формировании матрично-векторных параметров по схеме замещения, содержащей активные многополюсные компоненты, в качестве моделей которых выступают неопределенные матрицы проводимостей или сопротивлений.

Формирование матрично-векторных параметров узловых и контурных уравнений методом эквивалентных схем включает следующие этапы:

1) составление схемы замещения электронной цепи по переменному току;

- 2) замещение активных многополюсных компонентов электронной цепи линейными малосигнальными эквивалентными схемами, содержащими пассивные двухполюсные компоненты и зависимые источники;
- 3) преобразование зависимых источников к требуемому типу;
- 4) выбор однородной системы координат (независимых сечений или контуров);
- 5) формирование матрицы эквивалентных параметров (проводимостей или сопротивлений);
- 6) формирование вектора эквивалентных воздействий (задающих токов сечений или контурных ЭДС).

Выбор типа координатного базиса определяется стремлением минимизировать количество координат, а следовательно и размерность матрично-векторных параметров. В случае если $v < \sigma$ (v – количество независимых сечений; σ – количество независимых контуров), целесообразно использовать узловой координатный базис, в противном случае – контурный. Другим фактором, влияющим на выбор типа координатного базиса, является планарность исследуемой схемы. Для непланарных схем выбор узлового базиса является предпочтительным. Кроме того, при выборе типа координатного базиса целесообразно учитывать характер активных электронных компонентов схемы. Так, например, физические эквивалентные схемы биполярных транзисторов являются более удобными для применения контурного координатного базиса. В то же время физические эквивалентные схемы полевых транзисторов предпочтительнее для применения узлового базиса.

В узловом координатном базисе желательно использовать эквивалентные схемы активных электронных компонентов, которые не содержат внутренних узлов, а в качестве зависимых источников содержат только зависимые источники тока, управляемые напряжением. В контурном координатном базисе целесообразно использовать эквивалентные схемы активных электронных компонентов, которые не содержат внутренних контуров,

а в качестве зависимых источников содержат только зависимые источники напряжения, управляемые током.

В узловом координатном базисе все компоненты схемы замещения должны быть представлены как u -компоненты: независимые источники – как источники тока, зависимые источники – как источники тока, управляемые напряжением (ИТУН), пассивные двухполюсные компоненты (резисторы, конденсаторы, индуктивности) – операторными проводимостями. В контурном координатном базисе все компоненты схемы замещения должны быть представлены как z -компоненты: независимые источники – как источники напряжения, зависимые источники – как источники напряжения, управляемые током (ИНУТ), пассивные двухполюсные компоненты – операторными сопротивлениями.

Для упрощения формирования матрично-векторных параметров рекомендуется выбирать канонические системы независимых сечений и контуров. При этом необходимо учитывать, что каноническая система сечений может быть выбрана для любой электронной схемы, а каноническая система контуров – только для планарных схем.

Матрица проводимостей электронной цепи является квадратной матрицей v -го порядка, строки и столбцы которой соответствуют независимым сечениям. Элементы y_{ii} главной диагонали матрицы проводимостей в канонической системе сечений представляют собой *собственные проводимости соответствующих узлов*. Собственная проводимость узла определяется как сумма проводимостей ветвей, инцидентных данному узлу. Недиагональные элементы матрицы проводимостей в канонической системе сечений представляют собой *взаимные проводимости узлов*, взятые со знаком «минус». Взаимная проводимость y_{ij} определяется как сумма проводимостей ветвей, включенных между узлами i и j . *Зависимый источник тока, управляемый напряжением, отображается в матрице проводимостей*

его управляющей проводимостью. Управляющая проводимость располагается на пересечении строк, определяемых номерами узлов, между которыми включен сам зависимый источник тока, и столбцов, определяемых номерами узлов, между которыми действует управляющее напряжение. При добавлении управляющей проводимости к элементу матрицы y_{ks} знак проводимости изменяется на противоположный, если направление зависимого источника относительно k -го узла и направление управляющей величины (напряжения) относительно s -го узла характеризуются одинаково. Если направление зависимого источника относительно k -го узла и направление управляющей величины (напряжения) относительно s -го узла характеризуются различно, то знак управляющей проводимости остается без изменений.

Рассмотрим применение метода эквивалентных схем для формирования матрично-векторных параметров узловых уравнений (матрицы проводимостей) на примере схемы активного фильтра на операционном усилителе, представленной на рисунке 1.4.

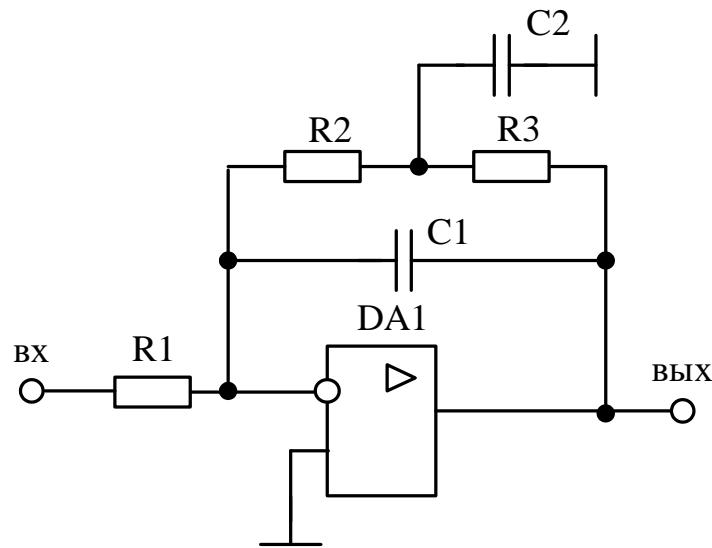


Рис. 1.4 – Схема активного фильтра

Схема замещения активного фильтра для полного диапазона частот представлена на рисунке 1.5.

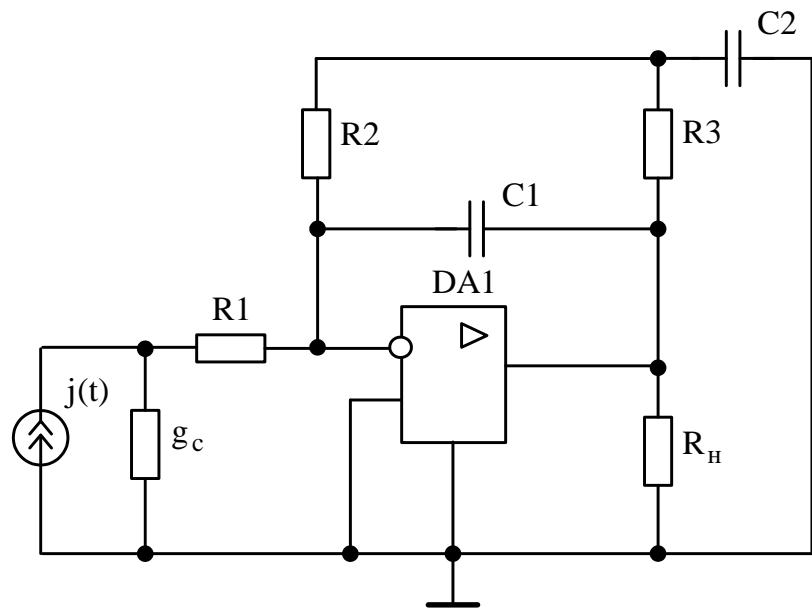


Рис. 1.5 – Схема активного фильтра для полного диапазона частот

Замещая в схеме (рис. 1.5) операционный усилитель его линейной малосигнальной эквивалентной схемой (рис. 1.6), получаем схему замещения по переменному току, содержащую только двухполюсные компоненты (рис. 1.7), которая предназначена для формирования матрично-векторных параметров в виде *укороченной матрицы проводимостей*.

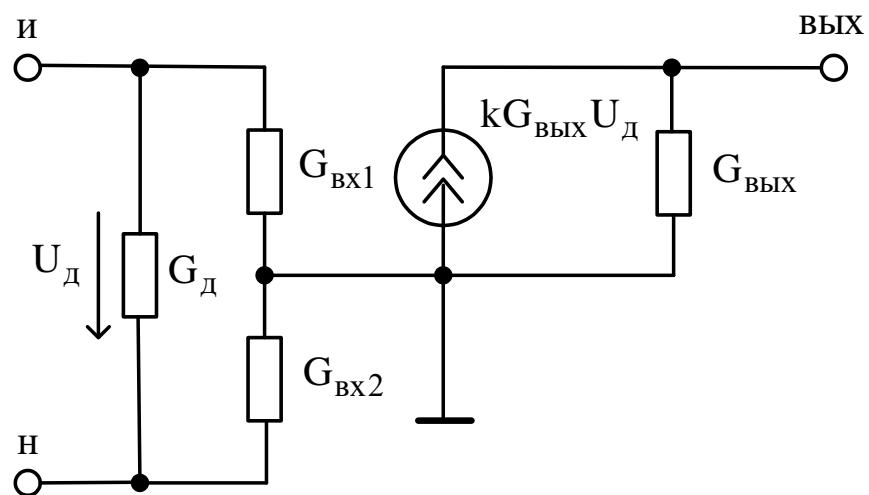


Рис. 1.6 – Эквивалентная схема операционного усилителя

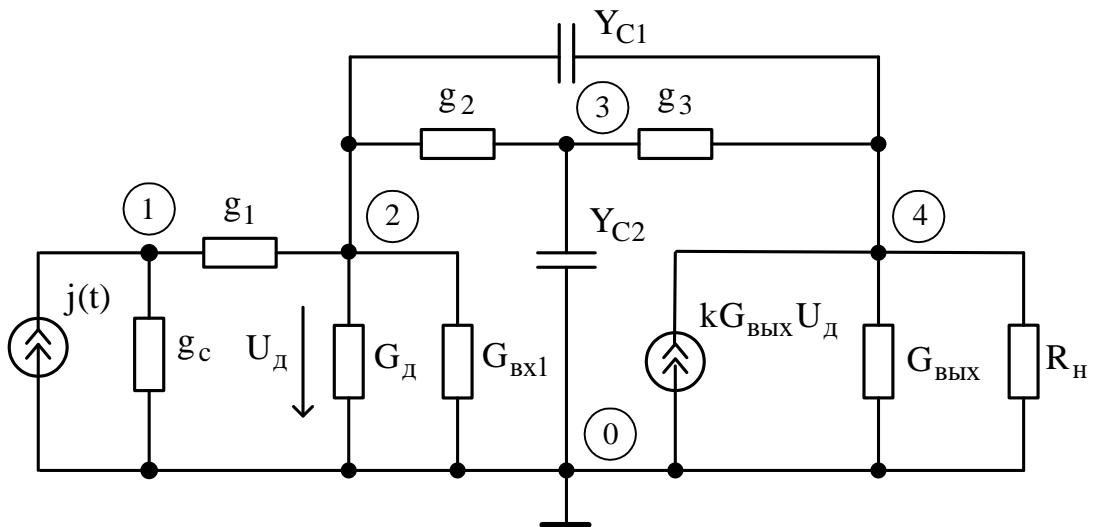


Рис. 1.7 – Схема активного фильтра для полного диапазона частот

В схеме замещения все двухполюсные компоненты представлены как u -компоненты: источник входного сигнала – ветвью, содержащей параллельно включенные идеальный источник переменного тока j_c и внутреннюю проводимость g_c , все пассивные двухполюсные компоненты – соответствующими проводимостями $g_1 = 1/R_1$, $g_2 = 1/R_2$, $g_3 = 1/R_3$, $Y_{C1} = pC_1$, $Y_{C2} = pC_2$, $g_h = 1/R_h$.

При математическом описании электронной цепи в узловом координатном базисе **необходимо** использовать эквивалентные схемы активных компонентов, все зависимые источники которых представляют собой **источники тока, управляемые напряжением**.

Схема замещения (рис. 1.7) содержит $v = 5$ узлов, поэтому система координат представляет собой совокупность $v = v - 1 = 5 - 1 = 4$ независимых сечений. **Выберем каноническую систему сечений, для чего достаточно пронумеровать узлы схемы и один из них выбрать в качестве базисного.**

Составим матрицу проводимостей *без учета внутренней проводимости источника сигнала и проводимости нагрузки*, называемую **укороченной матрицей**. Так как схема замещения (рис. 1.7) содержит 4 независимых сечения, порядок укороченной матрицы проводимостей равен 4.

Составление матрицы проводимостей целесообразно начинать с заполнения главной диагонали, элементы u_{ii} которой в канонической системе сечений представляют собой собственные проводимости соответствующих узлов. Недиагональные элементы матрицы проводимостей в канонической системе сечений представляют собой взаимные проводимости узлов, взятые со знаком «минус». Зависимый источник тока, управляемый напряжением, отображается в матрице проводимостей его управляющей проводимостью.

Схема замещения (рис. 1.7) содержит один зависимый источник тока $kG_{\text{вых}} U_d$, управляемый напряжением, где $kG_{\text{вых}}$ – управляющая проводимость; U_d – управляющее напряжение.

Зависимый источник тока $kG_{\text{вых}} U_d$ включен между базисным узлом и узлом 4, а его управляющее напряжение U_d представляет собой напряжение узла 2 относительно базисного узла, поэтому управляющая проводимость $kG_{\text{вых}}$ добавляется к элементу укороченной матрицы проводимостей, расположенному на пересечении 4-й строки и 2-го столбца. Зависимый источник $kG_{\text{вых}} U_d$ направлен к узлу 4, а управляющее напряжение U_d направлено от узла 2, следовательно, при добавлении к элементу u_{42} матрицы знак управляющей проводимости $kG_{\text{вых}}$ не изменяется.

Укороченная матрица проводимостей:

	1	2	3	4
1	g_1	$-g_1$	0	0
2	$-g_1$	$g_1 + g_2 + Y_{C1} + G_{\text{д}} + G_{\text{вх1}}$	$-g_2$	$-Y_{C1}$
3	0	$-g_2$	$g_2 + g_3 + Y_{C2}$	$-g_3$
4	0	$-Y_{C1} + kG_{\text{вых}}$	$-g_3$	$g_3 + Y_{C1} + G_{\text{вых}}$

1.3 Определение выражений схемных функций по укороченной матрице проводимостей

Определение схемных функций по укороченной матрице проводимостей предполагает применение выражений, содержащих алгебраические дополнения матрицы, тип которых зависит от номеров входных (a и c) и выходных (b и d) узлов (рис. 1.8).

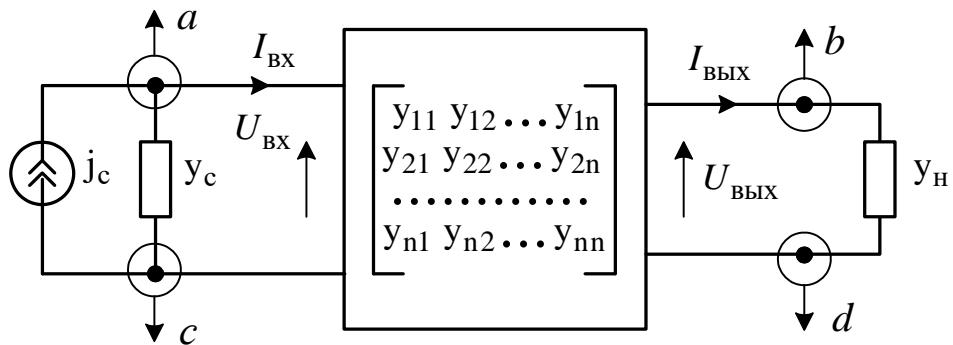


Рис. 1.8 – Входные и выходные координаты электронной цепи

В схеме замещения (рис. 1.7) источник сигнала подключен к узлу 1 относительно базисного узла, поэтому $a = 1$, $c = 0$. Ветвь нагрузки подключена между узлом 4 и базисным узлом, поэтому $b = 4$, $d = 0$.

Так как $c = d = 0$, то схемные функции определяются выражениями, представленными в приложении Б (таблица Б.2):

$$\text{коэффициент передачи напряжения } k_U = \frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{aa} + Y_h \Delta_{aa,bb}} = \frac{\Delta_{14}}{\Delta_{11} + g_h \Delta_{11,44}};$$

$$\text{коэффициент передачи тока } k_I = \frac{Y_h \Delta_{ab}}{\Delta + Y_h \Delta_{bb}} = \frac{g_h \Delta_{14}}{\Delta + g_h \Delta_{44}};$$

$$\text{проводимость передачи } Y_{\text{пер}} = \frac{Y_h \Delta_{ab}}{\Delta_{aa} + Y_h \Delta_{aa,bb}} = \frac{g_h \Delta_{14}}{\Delta_{11} + g_h \Delta_{11,44}};$$

$$\text{сопротивление передачи } Z_{\text{пер}} = \frac{\Delta_{ab}}{\Delta + Y_h \Delta_{bb}} = \frac{\Delta_{14}}{\Delta + g_h \Delta_{44}},$$

где Δ_{ab} – простое несимметричное алгебраическое дополнение укороченной матрицы проводимостей;

Δ_{aa} , Δ_{bb} – простые симметричные алгебраические дополнения укороченной матрицы проводимостей;

$\Delta_{aa,bb}$ – двойное симметричное алгебраическое дополнение укороченной матрицы проводимостей;

Δ – определитель укороченной матрицы проводимостей.

Для определения простого несимметричного алгебраического дополнения Δ_{14} необходимо вычислить определитель подматрицы, полученной после вычеркивания из укороченной матрицы Y^* строки с номером 1 и столбца с номером 4 и результат умножить на $(-1)^{1+4}$.

Для определения простого симметричного алгебраического дополнения Δ_{11} необходимо вычислить определитель подматрицы, полученной после вычеркивания из матрицы Y^* строки с номером 1 и столбца с номером 1.

Для определения простого симметричного алгебраического дополнения Δ_{44} необходимо вычислить определитель подматрицы, полученной после вычеркивания из матрицы Y^* строки с номером 4 и столбца с номером 4.

Для определения двойного симметричного алгебраического дополнения $\Delta_{11,44}$ необходимо вычислить определитель подматрицы, полученной после вычеркивания из матрицы Y^* строк с номерами 1 и 4 и столбцов с номерами 1 и 4.

2 КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫРАЖЕНИЙ СХЕМНЫХ ФУНКЦИЙ

МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ В МАТРИЧНОЙ ФОРМЕ

В УЗЛОВОМ БАЗИСЕ»

2.1 Содержание контрольной работы

Контрольная работа предполагает формирование для заданной электронной цепи, содержащей активные многополюсные компоненты, матричной математической модели и определение по ней трех-четырех схемных функций.

Выполнение задания контрольной работы включает следующие этапы:

- 1) формирование для электронной цепи схемы замещения по переменному току для полного диапазона частот;
- 2) формирование математической модели электронной цепи методом эквивалентных схем в матричной форме в узловом координатном базисе;
- 3) определение по сформированной математической модели выражений для заданных схемных функций.

Выбор варианта контрольной работы осуществляется по общим правилам с использованием следующей формулы:

$$V = (N \times K) \text{ div } 100,$$

где V – искомый номер варианта,

N – общее количество вариантов,

K – код варианта,

div – целочисленное деление.

При $V = 0$ выбирается максимальный вариант.

Варианты заданий представлены в приложении А.

По итогам выполнения контрольной работы оформляется отчет в формате PDF, правила его оформления описаны в п. 2.3.

2.2 Пример выполнения контрольной работы

Контрольная работа включает следующие этапы:

1. Формирование схемы замещения по переменному току для полного диапазона частот.
2. Формирование математической модели электронной цепи методом эквивалентных схем в матричной форме в узловом координатном базисе.
3. Определение по сформированной математической модели выражений для заданных схемных функций.

Исходная схема электронной цепи – схема резонансного усилителя (рис. 2.1).

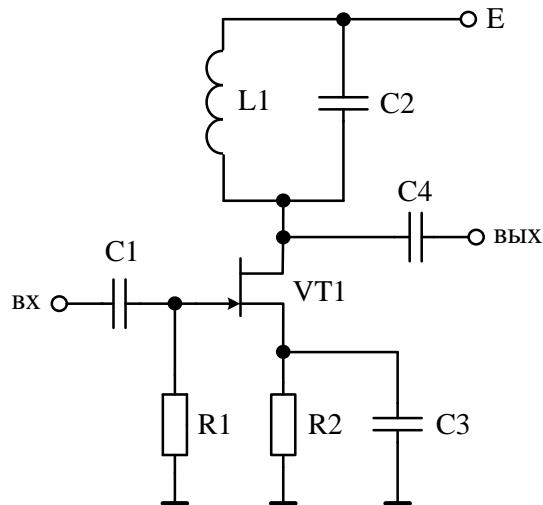


Рис. 2.1 – Схема резонансного усилителя

Схема замещения по переменному току для полного диапазона частот

Схема замещения резонансного усилителя по переменному току для полного диапазона частот, предназначенная для анализа методом эквивалентных схем в узловом координатном базисе, представлена на рисунке 2.2.

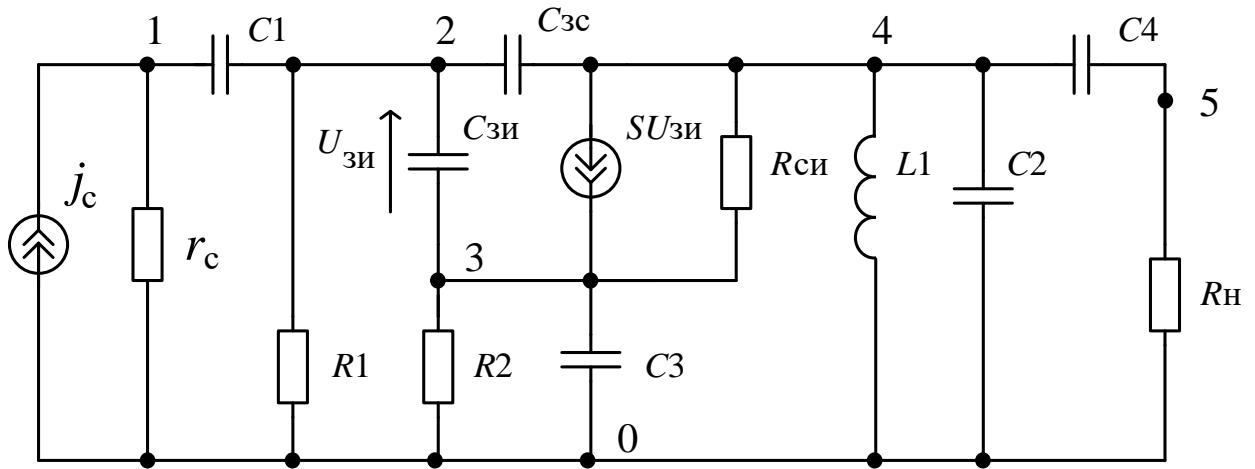


Рис. 2.2 – Схема замещения резонансного усилителя
для полного диапазона частот

**Математическая модель резонансного усилителя
в матричной форме в узловом координатном базисе**

Схема замещения (рис. 2.2) содержит $v = 6$ узлов, поэтому система координат представляет собой совокупность $v = v - 1 = 6 - 1 = 5$ независимых сечений. Выберем каноническую систему сечений, для чего достаточно пронумеровать узлы схемы и один из них выбрать в качестве базисного.

Составим матрицу проводимостей без учета внутренней проводимости источника сигнала и проводимости нагрузки, называемую укороченной матрицей. Так как схема замещения (рис. 2.2) содержит 5 независимых сечений, порядок укороченной матрицы проводимостей равен 5.

Составление матрицы проводимостей целесообразно начинать с заполнения главной диагонали, элементы y_{ii} которой в канонической системе сечений представляют собой собственные проводимости соответствующих узлов. Недиагональные элементы матрицы проводимостей в канонической системе сечений представляют собой взаимные проводимости узлов, взятые

со знаком «минус». Зависимый источник тока, управляемый напряжением, отображается в матрице проводимостей его управляемой проводимостью.

Схема замещения (рис. 2.2) содержит один зависимый источник тока SU_{3i} , управляемый напряжением, где S – управляемая проводимость (крутизна полевого транзистора); U_{3i} – управляемое напряжение.

Зависимый источник тока SU_{3i} включен между узлами 3 и 4, а его управляемое напряжение U_{3i} представляет собой напряжение узла 2 относительно узла 3, поэтому управляемая проводимость S добавляется к элементам укороченной матрицы проводимостей, расположенным на пересечении 3-й, 4-й строк и 2-го, 3-го столбцов, то есть управляемая проводимость S добавляется к элементам $y_{32}, y_{33}, y_{42}, y_{43}$ укороченной матрицы проводимостей либо со знаком «плюс», либо со знаком «минус».

Зависимый источник SU_{3i} направлен к узлу 3, а управляемое напряжение U_{3i} направлено к узлу 2, следовательно, при добавлении к элементу y_{32} матрицы знак управляемой проводимости S изменяется, то есть управляемая проводимость S к элементу y_{32} добавляется со знаком «минус» (рис. 2.3, *a*).

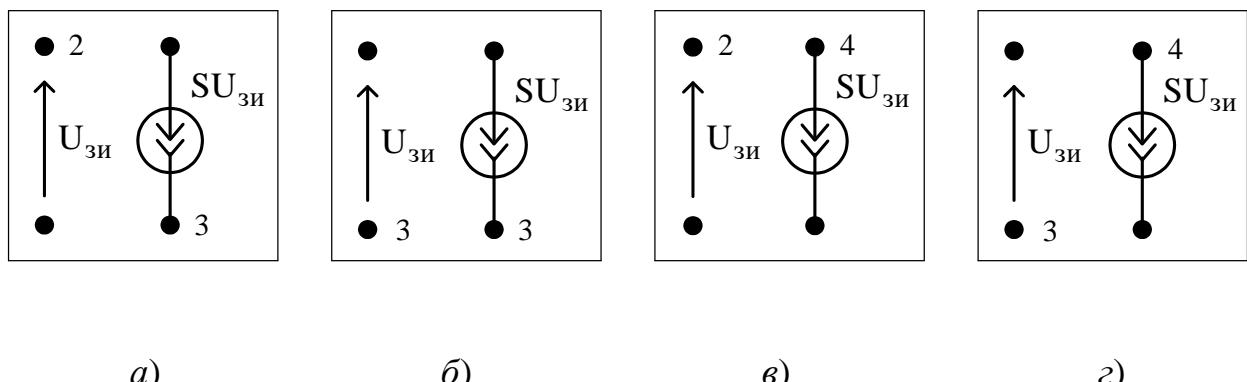


Рис. 2.3 – Определение знака управляемой проводимости зависимого источника тока, управляемого напряжением

Зависимый источник SU_{3i} направлен к узлу 3, а управляющее напряжение U_{3i} направлено от узла 3, следовательно, при добавлении к элементу y_{33} матрицы знак управляющей проводимости S не изменяется, то есть управляющая проводимость S к элементу y_{33} добавляется со знаком «плюс» (рис. 2.3, б).

Зависимый источник SU_{3i} направлен от узла 4, а управляющее напряжение U_{3i} направлено к узлу 2, следовательно, при добавлении к элементу y_{42} матрицы знак управляющей проводимости S не изменяется, то есть управляющая проводимость S к элементу y_{42} добавляется со знаком «плюс» (рис. 2.3, в).

Зависимый источник SU_{3i} направлен от узла 4, а управляющее напряжение U_{3i} направлено от узла 3, следовательно, при добавлении к элементу y_{43} матрицы знак управляющей проводимости S изменяется, то есть управляющая проводимость S к элементу y_{43} добавляется со знаком «минус» (рис. 2.3, г).

Укороченная матрица проводимостей резонансного усилителя:

	1	2	3	4	5
1	$pC1$	$-pC1$	0	0	0
2	$-pC1$	$pC1 + pC_{3c} +$ $+ pC_{3i} + \frac{1}{R1}$	$-pC_{3i}$	$-pC_{3c}$	0
$Y(p, L1, C2) = 3$	0	$-pC_{3i} - S$	$pC3 + pC_{3i} +$ $+ \frac{1}{R2} + \frac{1}{R_{ci}} + S$	$-\frac{1}{R_{ci}}$	0

4	0	$-pC_{3c} + S$	$-\frac{1}{R_{ci}} - S$	$pC2 + pC4 +$ $+ pC_{3c} + \frac{1}{pL1} +$ $+ \frac{1}{R_{ci}}$	$-pC4$
5	0	0	0	$-pC4$	$pC4$

Определение выражений основных схемных функций

Определение выражений для схемных функций по укороченной матрице проводимостей предполагает применение выражений, содержащих алгебраические дополнения матрицы, тип которых зависит от номеров входных (a и c) и выходных (b и d) узлов.

В схеме (рис. 2.2) источник сигнала подключен к узлу 1 относительно базисного узла, поэтому $a = 1, c = 0$. Ветвь нагрузки подключена между узлом 5 и базисным узлом, поэтому $b = 5, d = 0$.

Так как $c = d = 0$, то схемные функции определяются выражениями (таблица Б2):

$$\text{коэффициент передачи напряжения } k_u = \frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{aa} + y_h \Delta_{aa,bb}} = \frac{\Delta_{15}}{\Delta_{11} + \frac{1}{R_h} \Delta_{11,55}},$$

$$\text{коэффициент передачи тока } k_i = \frac{y_h \Delta_{ab}}{\Delta + y_h \Delta_{bb}} = \frac{\frac{1}{R_h} \Delta_{15}}{\Delta + \frac{1}{R_h} \Delta_{55}},$$

$$\text{выходная проводимость } y_{\text{вых}} = \frac{\Delta + y_c \Delta_{aa}}{\Delta_{bb} + y_c \Delta_{aa,bb}} = \frac{\Delta + \frac{1}{r_c} \Delta_{11}}{\Delta_{55} + \frac{1}{r_c} \Delta_{11,55}},$$

где Δ_{aa}, Δ_{bb} – простые симметричные алгебраические дополнения;

Δ_{ab} – простое несимметричное алгебраическое дополнение;

$\Delta_{aa,bb}$ – двойное алгебраическое дополнение;

Δ – определитель укороченной матрицы проводимостей $Y^*(p, L1, C2)$.

Подматрицы, необходимые для нахождения алгебраических дополнений:

	2	3	4	5
2	$pC1 + pC_{3c} +$ $+ pC_{3i} + \frac{1}{R1}$	$-pC_{3i}$	$-pC_{3c}$	0
3	$-pC_{3i} - S$	$pC3 + pC_{3i} +$ $+ \frac{1}{R2} + \frac{1}{R_{ci}} + S$	$-\frac{1}{R_{ci}}$	0
4	$-pC_{3c} + S$	$-\frac{1}{R_{ci}} - S$	$pC2 + pC4 +$ $+ pC_{3c} + \frac{1}{pL1} + \frac{1}{R_{ci}}$	$-pC4$
5	0	0	$-pC4$	$pC4$

	1	2	3	4
1	$pC1$	$-pC1$	0	0
2	$-pC1$	$pC1 + pC_{3c} +$ $+ pC_{3i} + \frac{1}{R1}$	$-pC_{3i}$	$-pC_{3c}$

$Y55(p, L1, C2) =$	3	0	$-pC_{3i} - S$	$pC3 + pC_{3i} +$ $+ \frac{1}{R2} + \frac{1}{R_{ci}} + S$	$-\frac{1}{R_{ci}}$
	4	0	$-pC_{3c} + S$	$-\frac{1}{R_{ci}} - S$	$pC2 + pC4 +$ $+ pC_{3c} + \frac{1}{pL1} + \frac{1}{R_{ci}}$

	1	2	3	4
$Y15(p, L1, C2) =$	2	$-pC1$	$pC1 + pC_{3c} +$ $+ pC_{3i} + \frac{1}{R1}$	$-pC_{3i}$
	3	0	$-pC_{3i} - S$	$pC3 + pC_{3i} +$ $+ \frac{1}{R2} + \frac{1}{R_{ci}} + S$
	4	0	$-pC_{3c} + S$	$pC2 + pC4 +$ $+ pC_{3c} + \frac{1}{pL1} + \frac{1}{R_{ci}}$
	5	0	0	$-pC4$

2	2	3	4
	$pC1 + pC_{3c} +$ $+ pC_{3i} + \frac{1}{R1}$	$-pC_{3i}$	$-pC_{3c}$

$Y1155(p, L1, C2) =$	3	$-pC_{3и} - S$	$pC3 + pC_{3и} +$ $+ \frac{1}{R2} + \frac{1}{R_{си}} + S$	$-\frac{1}{R_{си}}$
	4	$-pC_{3с} + S$	$-\frac{1}{R_{си}} - S$	$pC2 + pC4 +$ $+ pC_{3с} + \frac{1}{pL1} + \frac{1}{R_{си}}$

2.3 Требования к оформлению отчета по контрольной работе

При оформлении отчета по контрольной работе следует руководствоваться требованиями Образовательного стандарта вуза ОС ТУСУР 01–2013. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления (<https://regulations.tusur.ru/documents/70>).

При оформлении ссылок и литературы следует руководствоваться следующими ГОСТ: ГОСТ 7.1–2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание; ГОСТ 7.12–93. Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке; ГОСТ Р 7.0.5–2008. Библиографическая ссылка.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Самостоятельная работа – основной вид учебной деятельности студентов ФДО ТУСУР, который позволяет овладевать фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками в конкретных областях науки и (или) видах деятельности, на которые ориентирована программа бакалавриата; получать опыт творческой и исследовательской деятельности; развивать такие качества личности, как самостоятельность в принятии решений, ответственность, организованность; использовать творческий подход к решению проблем учебного и профессионального уровней.

Задачи самостоятельной работы студента:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений;
- углубление и расширение теоретической подготовки; формирование умения использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий, при написании курсовых и выпускной квалификационной работ, для эффективной подготовки к зачетам и экзаменам.

Основные черты самостоятельной деятельности в высшей школе:

- *целенаправленность*, т. е. такая активность, которая направлена на достижение сознательно поставленной цели;

- *продуманность*, т. е. анализ ситуации и выбор способов и средств достижения цели и последовательности будущих действий;
- *осознанность*, планирование и предвидение возможного результата, наличие логической схемы;
- *структурность*, специфический набор действий и последовательность их осуществления;
- *результативность*, когда деятельность находит свое завершение в результате.

Целью предлагаемых методических указаний является знакомство с порядком организации самостоятельной работы по изучению дисциплины с применением дистанционных образовательных технологий.

В рабочем учебном плане (<https://edu.tusur.ru/opops>) приведен перечень компетенций, формируемых в результате изучения дисциплины, а также указана совокупность тех знаний, умений и навыков, которые должны стать результатом освоения материалов курса.

Изучение дисциплины включает следующие виды деятельности:

- 1) знакомство с рабочей программой дисциплины;
- 2) составление плана обучения по дисциплине;
- 3) изучение теоретического материала;
- 4) прохождение промежуточной аттестации (контрольные работы);
- 5) прохождение итоговой аттестации (зачет, экзамен).

Необходимо отметить, что приведенный перечень не предполагает строгой последовательности действий. На любом этапе возможно внесение корректировок в план работы. Возвращение к теоретическому материалу необходимо при подготовке ко всем видам контрольных мероприятий, итоговой аттестации и т. д.

Все теоретические и вспомогательные материалы по дисциплине размещаются в соответствующем электронном курсе.

Рабочая программа и план обучения

Рабочая программа дисциплины – программа освоения учебного материала, соответствующая требованиям государственного образовательного стандарта высшего образования и учитывающая специфику подготовки студентов по выбранному направлению.

В рабочей программе дана общая информация по дисциплине: цели и задачи дисциплины, место в образовательной программе, требование к результатам освоения дисциплины (на формирование каких компетенций направлена), объем и виды учебной работы, формы аттестации, основная и дополнительная литература, примерные оценочные материалы.

Рабочая программа позволяет представить объем предстоящей работы по дисциплине и составить план самостоятельного обучения. План должен включать следующие важные составляющие: 1) изучение теоретического материала дисциплины, освоение терминологии, ознакомление с классификациями и др. (для этого необходимо оценить объем материалов электронного курса и дополнительной литературы); 2) подготовка и выполнение контрольных и/или лабораторных работ; 3) подготовка и прохождение итоговой аттестации по дисциплине.

Рабочая программа дисциплины доступна из рабочего учебного плана соответствующей основной профессиональной образовательной программы (<https://edu.tusur.ru/opops>).

Теоретический материал

Теоретический материал представлен:

- *тексто-графическими материалами;*
- *видеоматериалами;*
- *вебинарами;*
- *презентациями.*

Тексто-графические материалы

Учебное пособие (теоретический материал электронного курса) содержит основную теоретическую информацию по дисциплине. Деление на главы (темы) позволяет проследить логику изложения материала и равномерно распределить его в своем плане обучения. Составление конспектов по каждой теме поможет закрепить материал. Особое внимание следует обращать на блоки теоретического материала, выделенные пиктограммами. Данный материал обязателен для усвоения и запоминания. Рекомендуется уделить внимание содержанию таблиц и информации, представленной на рисунках, являющихся источниками важной наглядной и структурированной информации.

Самостоятельная работа предполагает обязательное изучение рекомендованной литературы, выполнение практических заданий и закрепление усвоенного материала. Для углубленного изучения тем рекомендуется использовать дополнительные литературные источники.

Для удобства обучающихся предоставляется доступ из личного кабинета в [электронную библиотеку ФДО](#), в которой представлены все разработанные на факультете учебные материалы.

Студенты ФДО имеют доступ к полным текстам изданий электронных библиотечных систем [«ЮРАЙТ»](#) и [«ЛАНЬ»](#).

Видеоматериалы

Электронный курс «Методы анализа и расчета электронных схем» снабжен вводной видеолекцией, где преподаватель знакомит студентов с дисциплиной, представляет структуру и особенности курса, обосновывают его практическую и теоретическую значимость, приводит наглядные примеры и т. д. Видеолекция сопровождается графическим материалом и наглядным представлением тезисов.

Вебинар

На факультете дистанционного обучения с целью организации помощи по изучению сложных вопросов дисциплины организовано проведение вебинаров по дисциплинам, формирующими направленность (профиль) программы бакалавриата. На вебинаре, как правило, более подробно рассматривается какая-то тема дисциплины, подробно разбирается решение задачи, демонстрируются особенности работы с программным обеспечением, разбираются сложные практические ситуации и т. п. Формат вебинара предполагает диалог студента с преподавателем, возможность задать вопросы по теме и получить на них ответы в режиме реального времени.

Записи вебинаров публикуются в электронном курсе.

Презентация

Некоторые темы электронного куса снабжены дополнительным материалом, представленным в виде презентаций. Этот вид методического обеспечения дисциплины позволяет наглядно представить обобщенную информацию по теме, практический разбор задач или ознакомить с новым материалом, требующим визуализации.

Для получения разностороннего представления о содержании дисциплины рекомендуется изучить все виды теоретического материала.

Рекомендации по работе с учебной и научной литературой

Самостоятельная работа по освоению теоретического материала учебного пособия и другой учебной и научной литературы (а также самостоятельное теоретическое исследование изучаемых проблем) – это важнейшее условие формирования научного способа познания. Таким образом, чтение научного текста является частью познавательной деятельности, главная цель которой – извлечение из текста необходимой информации. Осознание

читающим внутренней установки при обращении к печатному слову (выделение нужных сведений, усвоение информации полностью или частично, критический анализ материала и т. п.) определяет эффективность осуществляемого действия.

Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает *соблюдение ряда правил*, для овладения которыми необходимо учиться. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Главное правило при работе над книгой – не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление, стремление дойти до сути.

Изучение книги должно происходить в определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением (содержанием), предисловием, введением. Это позволяет получить общее представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге. Затем можно переходить непосредственно к чтению. Чтобы получить цельное представление о книге, первый раз стоит прочитать ее от начала до конца. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т. д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами; вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Рекомендуется использовать четыре основные установки в чтении научного текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);

- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т. п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

Научная методика работы с литературой предусматривает фиксирование прочитанной информации в систематизированных записях разного рода. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

- тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала;
- цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлеченений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора;
- конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного.

Методические рекомендации по составлению конспекта

Внимательно прочтайте текст. Уточните в глоссарии или справочной литературе непонятные слова. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта.

Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис – это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать.

Третий элемент конспекта – основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры.

Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли.

При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного.

Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнений и дополнений необходимо оставлять поля.

Овладение навыками конспектирования требует от студента целестремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном обращении к работе.

Консультации

В связи с тем, что не всегда возможно самостоятельно найти ответы на возникшие в ходе изучения дисциплины вопросы, на факультете существует возможность задать вопрос преподавателю, записавшись к нему на консультацию. Вопросы можно задавать как по теоретическому материалу, так и по подготовке, оформлению отчетов любого вида работ.

Предусмотрено несколько ресурсов, где можно задать вопрос:

- на учебном форуме, воспользовавшись формой отправки из учебного плана или почтового агента в личном кабинете;
- написав письмо с любого другого почтового сервера на адрес problems@fdo.tusur.ru.

Также существует возможность обсудить любой учебный вопрос на форуме с другими студентами, коллективно найти решение. Однако следует помнить, что мнения других студентов могут быть ошибочными, и критически относиться к высказанным идеям.

Контрольные мероприятия

Самоконтроль

Самоконтроль – один из важнейших факторов, обеспечивающих самостоятельную деятельность обучающихся. Самоконтроль необходим для проверки остаточных знаний по итогам изучения каждой темы. Курс «Методы анализа и расчета электронных схем» снабжен двумя уровнями самоконтроля. В текстовом материале после каждой главы представлен перечень вопросов и заданий, позволяющих проконтролировать усвоение ключевых вопросов темы. Если ответы на вопросы вызывают затруднение, следует еще раз перечитать материал.

Второй уровень самоконтроля – тестовые задания в электронном курсе. Тестирование является наиболее эффективной формой контроля и имеет ряд преимуществ перед другими формами контроля:

- затраты небольшого количества времени на выполнение тестовых заданий;
- возможность оперативного получения информации о степени усвоения знаний;
- возможность оперативной корректировки знаний и умений и др.

Формат электронных тестов максимально приближен к тем заданиям, которые необходимо будет выполнить на итоговой аттестации по дисциплине.

Контрольная работа

Цель выполнения контрольной работы – закрепить знания, полученные студентами при изучении теоретического материала, а также, в ряде случаев, отработать навыки решения практических задач. К выполнению контрольной работы следует серьезно подготовиться, повторив весь теоретический материал и потренировавшись в решении задач.

Дистанционное обучение ориентировано на повышенные требования к системе контроля, который при этом имеет свою специфику. На ФДО возможно выполнение двух видов контрольных работ:

- 1) текстовая;
- 2) компьютерная.

На протяжении изучения дисциплины «Методы анализа и расчета электронных схем» студентам необходимо выполнить одну компьютерную и одну текстовую контрольную работу.

Компьютерная контрольная работа представляет собой совокупность тестовых заданий. Здесь могут быть представлены как теоретические вопросы, так и практические задачи. Тестовые вопросы могут быть разных типов: как на выбор одного либо нескольких вариантов, так и на ввод ответа.

Задание на текстовую контрольную работу размещено в учебных материалах (методические указания по выполнению контрольной работы). Изучив текст задания, выберите свой вариант. Отчет по контрольной работе оформляется в строгом соответствии с Образовательным стандартом ТУСУР и требованиями методических указаний. По итогам проверки отчета преподаватель может задать несколько вопросов по выполненной работе.

Итоговая аттестация

Зачет

Для получения зачета достаточно успешно выполнить все оцениваемые работы по дисциплине (лабораторные и контрольные работы, курсовую работу (проект)).

Наиболее ответственным этапом в обучении студентов является *экзаменационная сессия*, во время нее студенты отчитываются о выполнении учебной программы, об уровне и объеме полученных знаний. Это государственная отчетность студентов за изучение учебной дисциплины, поэтому ответственность за успешную сдачу экзаменационной сессии велика. На сессии студенты сдают экзамены и дифференцированные зачеты.

Экзамен

Экзамен представляет собой итоговое электронное тестирование по всем темам курса. Тестовые вопросы могут быть разных типов: как на выбор одного либо нескольких вариантов, так и на ввод ответа. Все экзамены сдаются в период сессии. Результат оценивается по пятибалльной шкале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Легостаев, Н. С. Методы анализа и расчета электронных схем : учеб. пособие / Н. С. Легостаев, К. В. Четвергов. – Томск : Эль Контент, 2013. – 158 с.

*Дополнительные источники по организации
самостоятельного обучения*

1. Гид студента: электронный курс. – Режим доступа: <https://study.tusur.ru/tdo> (Меню студента – Гид студента).

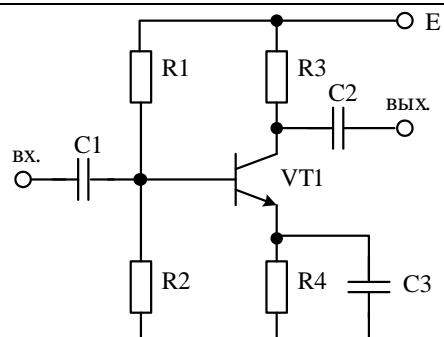
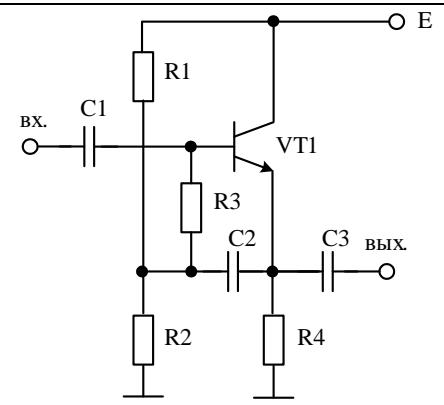
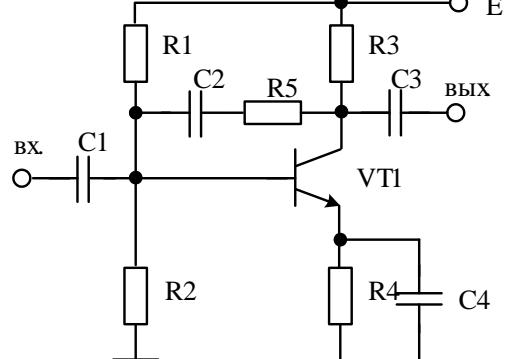
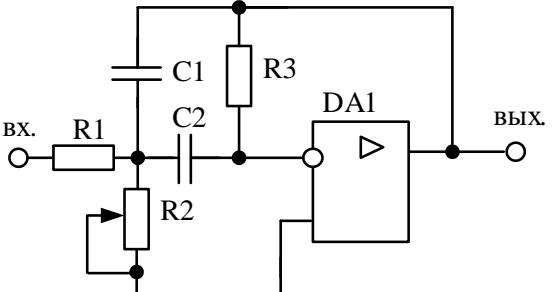
2. Современные образовательные технологии [Электронный ресурс] / под общ. ред. Л. Л. Рыбцовой. – М. : Юрайт, 2020. – 92 с. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/viewer/sovremennoye-obrazovatelnye-tehnologii-454848#page/1> (дата обращения: 08.05.2020).

3. Куклина, Е. Н. Организация самостоятельной работы студента [Электронный ресурс] / Е. Н. Куклина, М. А. Мазниченко, И. А. Мушкина. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2020. – 235 с. – Режим доступа: <https://biblio-online.ru/viewer/organizaciya-samostoyatelnoy-raboty-studenta-452858#page/1> (дата обращения: 08.05.2020).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Варианты заданий на контрольную работу

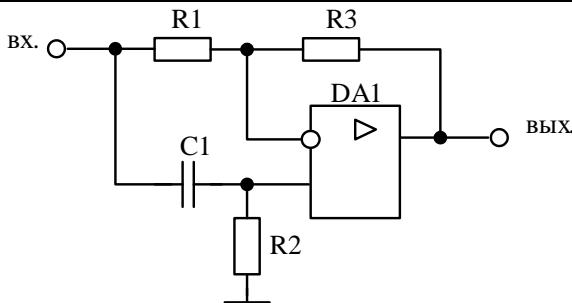
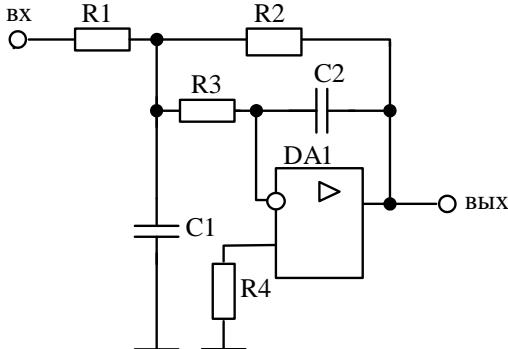
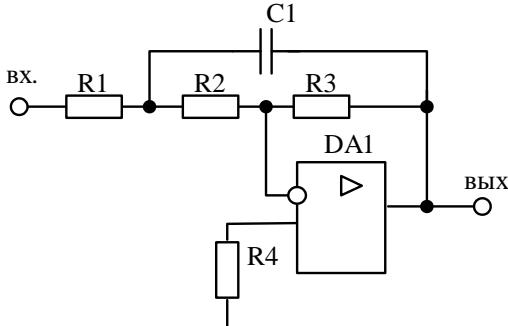
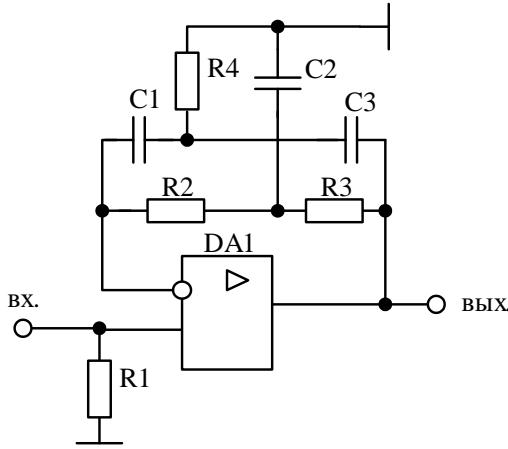
Таблица А.1 – Электронные цепи для контрольной работы

Вариант	Электронная цепь
1	
2	
3	
4	

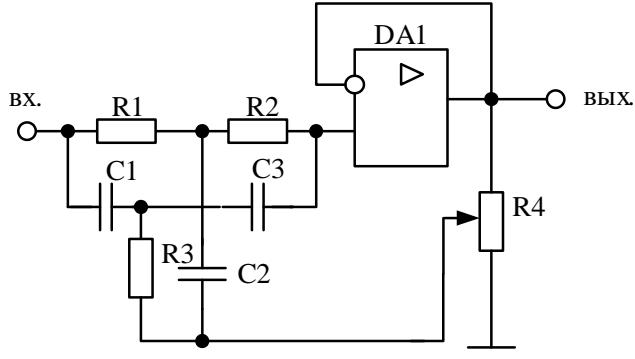
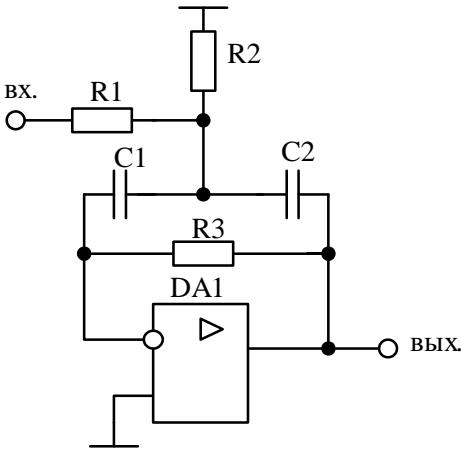
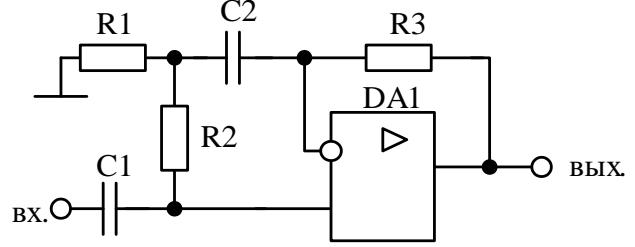
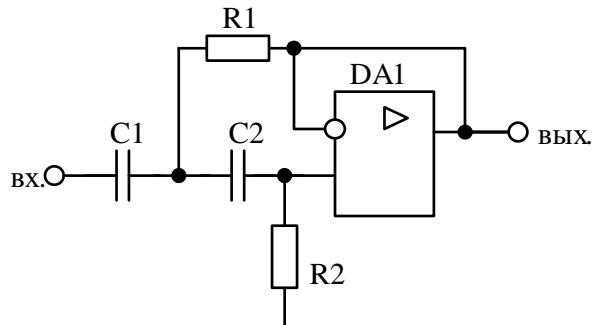
Продолжение таблицы А.1

Вариант	Электронная цепь
5	
6	
7	
8	

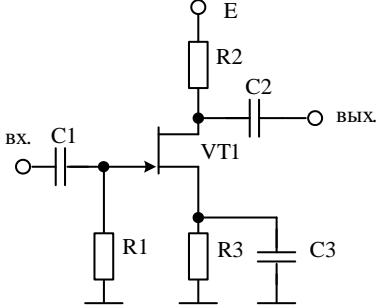
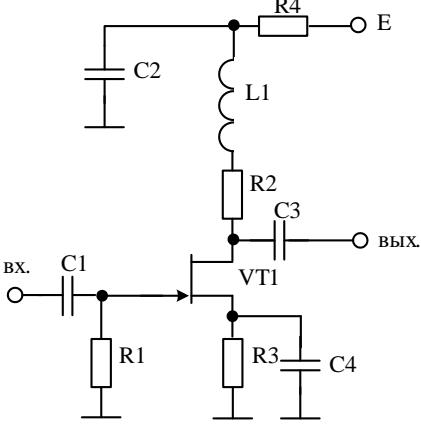
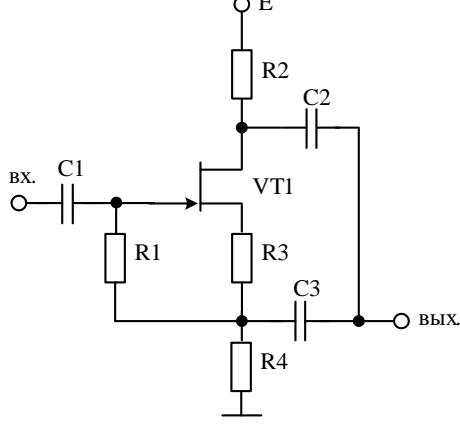
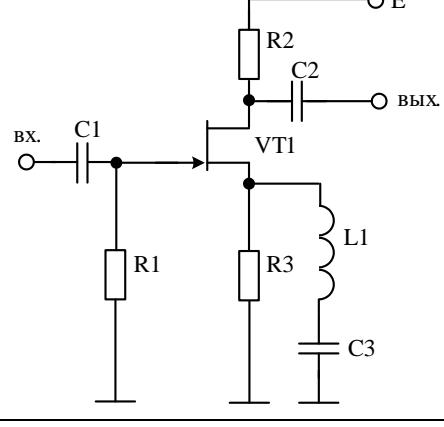
Продолжение таблицы А.1

Вариант	Электронная цепь
9	
10	
11	
12	

Продолжение таблицы А.1

Вариант	Электронная цепь
13	
14	
15	
16	

Окончание таблицы А.1

Вариант	Электронная цепь
17	
18	
19	
20	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Эквивалентные схемы активных электронных компонентов

Таблица Б.1 – Эквивалентные схемы активных электронных компонентов

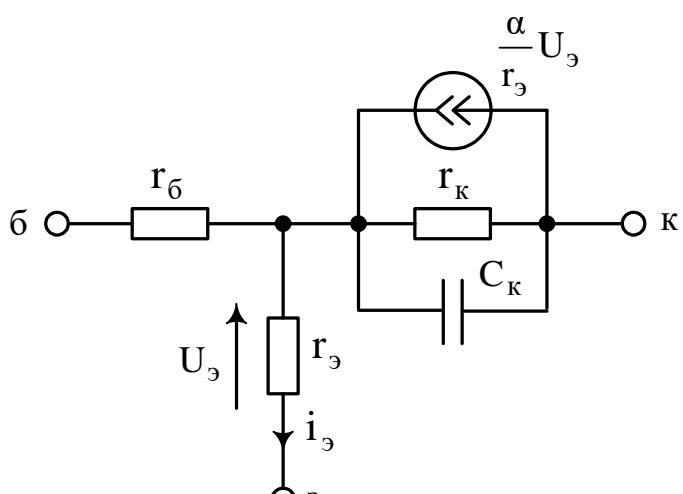
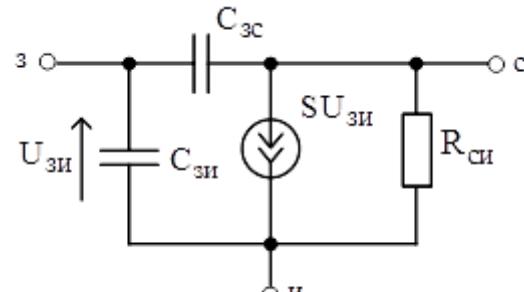
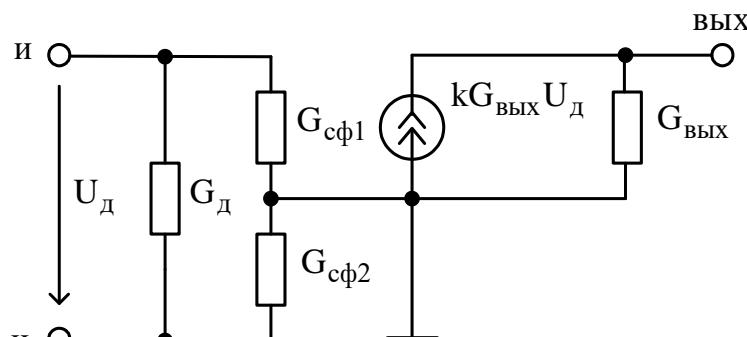
Название	Эквивалентная схема
Высокочастотная физическая Т-образная эквивалентная схема биполярного транзистора с ИТУН	
Высокочастотная эквивалентная схема полевого транзистора с ИТУН	
Низкочастотная эквивалентная схема операционного усилителя с ИТУН	

Таблица Б.2 – Связь схемных функций с укороченной матрицей проводимостей при инцидентности входной ветви одному входному сечению и выходной ветви одному выходному сечению

Название	Определение	Формула
Коэффициент передачи напряжения	$k_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$	$\frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{aa} + Y_{\text{h}} \Delta_{aa,bb}}$
Коэффициент передачи напряжения при холостом ходе	$k_U^{\text{хх}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \Big _{Y_{\text{h}}=0}$	$\frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{aa}}$
Коэффициент передачи тока	$k_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}$	$\frac{Y_{\text{h}} \Delta_{ab}}{\Delta + Y_{\text{h}} \Delta_{bb}}$
Коэффициент передачи тока при коротком замыкании	$k_I^{\text{кз}} = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \Big _{Y_{\text{h}} \rightarrow \infty}$	$\frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{bb}}$
Входная проводимость	$Y_{\text{вх}} = \frac{I_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}}$	$\frac{\Delta + Y_{\text{h}} \Delta_{bb}}{\Delta_{aa} + Y_{\text{h}} \Delta_{aa,bb}}$
Входная проводимость при холостом ходе	$Y_{\text{вх}}^{\text{хх}} = \frac{I_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} \Big _{Y_{\text{h}}=0}$	$\frac{\Delta}{\Delta_{aa}}$
Входная проводимость при коротком замыкании	$Y_{\text{вх}}^{\text{кз}} = \frac{I_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} \Big _{Y_{\text{h}} \rightarrow \infty}$	$\frac{\Delta_{bb}}{\Delta_{aa,bb}}$
Проводимость передачи	$Y_{\text{пер}} = \frac{I_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$	$\frac{Y_{\text{h}} \Delta_{ab}}{\Delta_{aa} + Y_{\text{h}} \Delta_{aa,bb}}$
Сопротивление передачи	$Z_{\text{пер}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}$	$\frac{\Delta_{ab}}{\Delta + Y_{\text{h}} \Delta_{bb}}$
Выходная проводимость	$Y_{\text{вых}} = -\frac{I_{\text{вых}}^{\text{кз}}}{U_{\text{вых}}^{\text{хх}}}$	$\frac{\Delta + Y_{\text{c}} \Delta_{aa}}{\Delta_{bb} + Y_{\text{c}} \Delta_{aa,bb}}$