

Государственный комитет Российской Федерации  
по высшему образованию

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королева

# АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

*Методические указания к лабораторной работе*

САМАРА 1994

Составитель А.Н.М у р а в ь е в

УДК 621.375:621.382:681.3

Анализ линейных радиоэлектронных схем: Метод. указания к лаб. работе /Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. А.Н.М у р а в ь е в. Самара, 1994, 8 с.

В методических указаниях изложены принципы анализа радиоэлектронных схем в линейном режиме по постоянному току с использованием матрицы проводимостей.

Методические указания предназначены для студентов специальностей 23.01 и 19.05 при изучении САПР РЭА. Подготовлены на кафедре радиотехники.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева

Рецензент: доц. В.И.К а т о л и к о в

Ц е л ь р а б о т ы - формирование математической модели радиоэлектронной схемы с использованием матрицы проводимости для анализа по постоянному току в линейном режиме.

Сформированная математическая модель схемы в виде системы линейных уравнений решается при помощи стандартной подпрограммы. Результатом анализа является расчет напряжения и токов во всех ветвях схемы.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЦЕПИ И ЕЕ КОМПОНЕНТОВ

Линейные электронные цепи содержат двухполюсные и многополюсные активные и пассивные компоненты. В линейной цепи напряжения  $U_k$  и токи  $I_k$  внешних полюсов связаны системой линейных уравнений

$$Y \cdot U = I \quad (1)$$

В системе уравнений (1) матрица  $I$  - это вектор токов внешних полюсов

$$I = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_k \\ \vdots \\ I_l \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix}$$

Матрица  $U$  - это вектор напряжений внешних полюсов  $U =$

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_k \\ \vdots \\ U_l \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix}$$

Матрица  $Y$  — это матрица проводимости

$$Y = \begin{matrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1k} & \dots & Y_{1\ell} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2k} & \dots & Y_{2\ell} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & \dots & Y_{kk} & \dots & Y_{k\ell} & \dots & Y_{kn} \\ \dots & \dots \\ Y_{\ell 1} & Y_{\ell 2} & \dots & Y_{\ell k} & \dots & Y_{\ell\ell} & \dots & Y_{\ell n} \\ \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nk} & \dots & Y_{n\ell} & \dots & Y_{nn} \end{matrix}$$

Для формирования математической модели линейной схемы в форме (I) необходимо, чтобы все компоненты были представлены как проводимости и источники тока. Правило формирования матрицы проводимости следующее:

диагональные элементы матрицы проводимостей  $Y_{\ell\ell}$  есть сумма проводимостей, подключенных к узлу  $\ell$  ;

остальные элементы матрицы проводимости  $Y_{\ell k}$  содержат отрицательную сумму тех проводимостей, которые расположены между узлами  $\ell$  и  $k$  .

Матрица внешних токов  $I$  формируется по правилу: ток источника  $I_k$  получает отрицательный знак для того узла, из которого он выходит, и положительный для узла, в который он входит.

Ветви, содержащие идеальные источники напряжения, а также ветви зависимых источников требуют дополнительных преобразований, как это показано на примере формирования математической модели радиоэлектронной схемы.

Рассмотрим эквивалентные схемы операционного усилителя, биполярного и полевого транзисторов. Эквивалентная схема операционного усилителя (рис. 1) содержит:

входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  ;

выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  ;

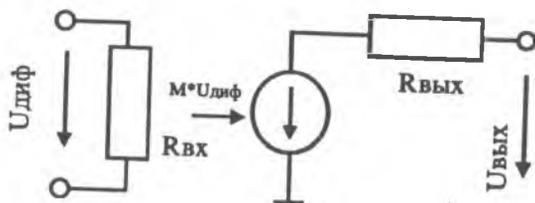
управляемый источник напряжения, характеризующий способность операционного усилителя усиливать входное дифференциальное напряжение  $U_{\text{вх. диф}}$  в  $M$  раз.

Эквивалентная схема замещения биполярного транзистора в линейном режиме (рис. 2) содержит:

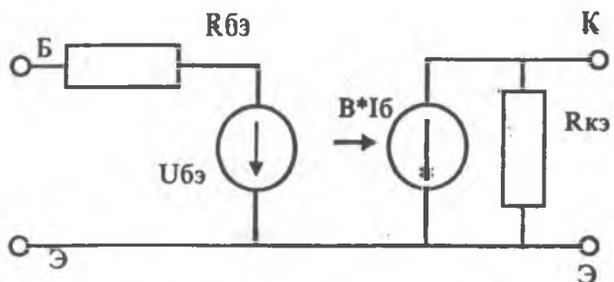
входную цепь, представленную источником напряжения  $U_{\sigma_2}$  и сопротивлением перехода база-эмиттер  $R_{\sigma_2}$  ;

выходную цепь, представленную зависимым источником тока, управ-

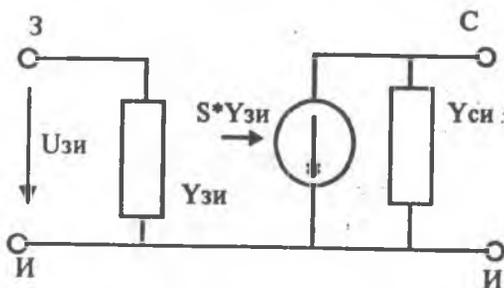
ляемым током входной цепи, т.е. током базы  $I_b$ , усиленным в  $V$  раз, и выходным сопротивлением коллектор-эмиттер  $R_{кэ}$ .



Р и с. 1. Схема замещения операционного усилителя



Р и с. 2. Схема замещения биполярного транзистора



Р и с. 3. Схема замещения полевого транзистора

Эквивалентная схема замещения полевого транзистора в линейном режиме (рис. 3) содержит:

входную цепь, представленную проводимостью затвор-исток  $Y_{ji}$  ;  
выходную цепь, представленную зависимым источником тока, управляемым входным напряжением, т.е. напряжением  $U_{ji}$  , усиленным в  $S$  раз и выходной проводимостью  $Y_{ci}$  .

## 2. ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ

Формирование математической модели радиоэлектронной схемы рекомендуется производить в следующем порядке:

заменить многополюсные компоненты исходной схемы (операционные усилители, транзисторы) их эквивалентными схемами, содержащими только двухполюсные элементы;

произвести эквивалентные преобразования ветвей, содержащие идеальные источники напряжения и сопротивления, так чтобы в схеме присутствовали только источники тока и проводимости;

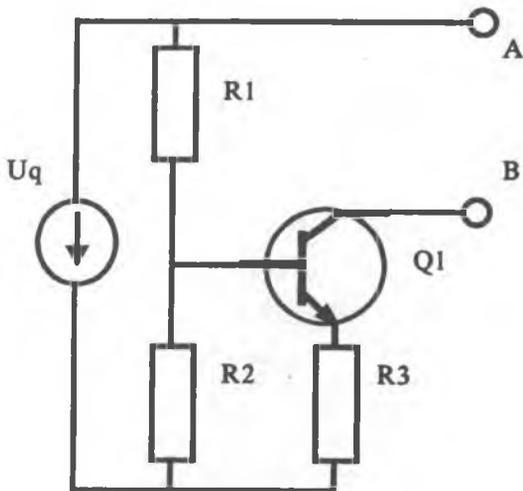
составить матрицу проводимости схемы  $Y$  и матрицу-столбец источников тока  $I$  ;

преобразовать правую часть системы (1), содержащую неизвестные величины управляемых источников тока, используя узловые напряжения.

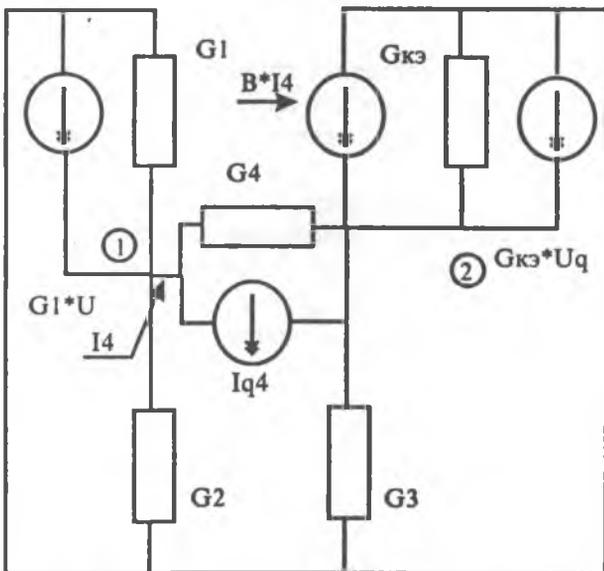
Рассмотрим пример формирования математической модели радиоэлектронной схемы для анализа по постоянному току в линейном режиме в виде системы уравнений (1). На рис. 4 приведены схемы источника постоянного тока при  $I_k = 5$  мА и его замещения. Составим систему уравнений расчета этой схемы для случая, когда клеммы А и В замкнуты накоротко. Транзистор на рис. 4 замещается линейной схемой согласно рис. 2. Линейный источник напряжения  $U_{\delta_3} - R_{\delta_3}$  преобразуем в линейный источник тока с параметрами

$$I_{q4} = -U_{\delta_3}/R_{\delta_3} ; Y_4 = 1/R_{\delta_3} .$$

Идеальный источник напряжения  $U_q$  перенесем в нагрузочные ветви, которые соединены с зависимыми узлами. Преобразуем ветви, содержащие источники напряжения, в источники тока. После указанных преобразований схема будет иметь вид, показанный на рис. 5.



Р и с. 4. Схема стабилизированного источника тока



Р и с. 5. Линейная схема замещения источника тока с короткозамкнутыми узлами А и В

Система уравнений для схемы рис. 5 будет иметь вид

$$\begin{array}{|c|c|} \hline Y_1 + Y_2 + Y_4 & -Y_4 \\ \hline -Y_4 & Y_3 + Y_4 + Y_{кз} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline U_1 \\ \hline U_2 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline Y_1 U_q - I_{q4} \\ \hline I_{q4} + B I_q + Y_{кз} U_q \\ \hline \end{array}$$

Теперь заменим ток ветви  $I$  с помощью узлового напряжения и получим

$$B I_q = B Y_4 (U_1 - U_2) + B I_q.$$

Обозначим  $B_1 = I + B$ , после подстановки и преобразований получим окончательную форму математической модели схемы

$$\begin{array}{|c|c|} \hline Y_1 + Y_2 + Y_4 & -Y_4 \\ \hline -B_1 Y_4 & Y_3 + B_1 Y_4 + Y_{кз} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline U_1 \\ \hline U_2 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline Y_1 U_q - I_{q4} \\ \hline B_1 I_{q4} + Y_{кз} U_q \\ \hline \end{array}$$

После задания численных значений элементов схемы можно найти решение системы, т.е. определить узловые напряжения. Затем по закону Ома можно определить токи ветвей.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить у преподавателя схему.
2. Составить математическую модель схемы в аналитическом виде.
3. Подставить числовые значения и сформировать окончательный вариант модели.
4. Решить систему уравнений, используя подпрограммы решения систем линейных уравнений с использованием языков программирования Турбо-Паскаль, QBASIC или электронные таблицы.
5. Рассчитать токи ветвей схемы.
6. Показать результаты преподавателю.

### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Титульный лист.
2. Задание.
3. Эквивалентная схема.
4. Эквивалентная схема после преобразования.
5. Математическая модель схемы в аналитическом виде.
6. Результаты расчета.

На отчетном занятии студент должен знать вопросы теории в объеме лекций по данной теме.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение полной математической модели схемы.

2. Какие существуют формы представления моделей?

3. Какие виды зависимых источников Вы знаете?

4. Нарисуйте линейную схему замещения биполярного транзистора.

Поясните физический смысл элементов схемы замещения биполярного транзистора.

5. Нарисуйте линейную схему замещения полевого транзистора. Поясните физический смысл элементов схемы замещения полевого транзистора.

6. Нарисуйте линейную схему замещения операционного усилителя. Поясните физический смысл элементов схемы замещения операционного усилителя.

7. Как сформировать матрицу проводимости схемы, содержащей зависимые источники напряжения и тока?

8. Каким образом с помощью матрицы проводимости можно определить функциональные зависимости радиоэлектронной схемы (входное и выходное сопротивления, коэффициент передачи по напряжению и т.д.)?

9. Какие существуют численные методы решения систем линейных алгебраических уравнений?

## РЕКОМЕНДУЕМЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Л у р ь е О.Б. Интегральные микросхемы в усилительных устройствах. Анализ и расчет. М.: Радио и связь, 1988. 176 с.

Н е р р е т е р В. Расчет электрических цепей на персональной ЭВМ: /Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1991. 220 с.

Н о р е н к о в И.П., М а н и ч е в В.Б. Системы автоматизированного проектирования электронной и вычислительной аппаратуры: Учебн. пособие для вузов. М.: Выш. школа, 1983. 272 с.

## АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Составитель М у р а в ь е в Александр Николаевич

Редактор Т.И.К у з н е ц о в а  
Техн. редактор Г.А.У с а ч е в а  
Корректор Н.С.К у п р и я н о в а

Подписано в печать 8.12.94.      Формат 60x84<sup>I</sup>/I6  
Бумага офсетная.      Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 0,5.      Усл.кр.-отт. 0,6.      Уч.-изд.л. 0,5.  
Тираж 100 экз.      Заказ 515.      Арт. С-80мр/94.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева.  
443086      Самара, Московское шоссе, 34.

---

ИПО Самарского государственного аэрокосмического  
университета имени академика С.П.Королева.  
443001      Самара, ул. Ульяновская, 18.