



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная электроника,»

## **АНАЛИЗ АКТИВНЫХ ЦЕПЕЙ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
по курсу «Математическое моделирование  
узлов промышленной электроники»  
для студентов специальности 1-36 04 02  
«Промышленная электроника»  
дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2007

УДК 621.38.001.57(075.8)  
ББК 32.859В6я73  
А64

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
факультета автоматизированных и информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 1 от 12.09.2006 г.)*

Авторы-составители: *В. В. Щуплов, Ю. Е. Котова*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Автоматизированный электропривод» ГГТУ им. П. О. Сухого  
*В. В. Логвин*

**А64** **Анализ** активных цепей : лаб. практикум по курсу «Математическое моделирование узлов промышленной электроники» для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» днев. формы обучения / авт.-сост.: В. В. Щуплов, Ю. Е. Котова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 16 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-584-7.

Лабораторный практикум является продолжением цикла лабораторных работ по изучению методов расчета и анализа электронных схем на ПЭВМ с использованием математических моделей активных элементов.

Для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» дневной формы обучения.

УДК 621.38.001.57(075.8)  
ББК 32.859В6я73

ISBN 978-985-420-584-7

© Щуплов В. В., Котова Ю. Е., составление, 2007  
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2007

## Лабораторная работа № 8

### Расчет цепей модифицированным узловым методом с проверкой

**Цель работы:** изучить практическое применение метода для расчета конкретных электрических схем.

#### 8.1. Краткие теоретические сведения

Модифицированный метод узловых потенциалов позволил исключить все напряжения на элементах и токи в тех ветвях, которые можно описать с помощью проводимости. Но при этом не исключаются лишние переменные, которые заранее известны (например, входной ток, равный нулю, для источника тока, управляемого напряжением (ИТУН) и т. д.).

Модифицированный узловый метод с проверкой позволяет исключить лишние переменные и при этом не требует определения матрицы инциденций. Исключение лишних переменных становится возможным, если ввести отдельные графы для напряжений и токов.

Определим сначала все элементы, которые можно описать с помощью проводимости. Составим матрицу узловых проводимостей  $Y_{n1}$  для элементов 1-й группы. Размер ее –  $n \times n$ , где  $n$  – число независимых узлов (табл. 8.1).

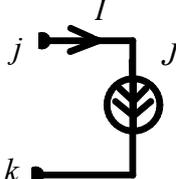
Таблица 8.1

**Представление элементов 1-й группы в модифицированном  
методе с проверкой**

Элемент	Изображение	Компонентные уравнения	Матрица
ИТУН		$I_j = 0$ $I_{j'} = 0$ $I_k = g \cdot (U_j - U_{j'})$ $I_{k'} = -g \cdot (U_j - U_{j'})$	$  \begin{array}{c} U_j \quad U_{j'} \\ k \quad \left  \begin{array}{cc} g & -g \\ -g & g \end{array} \right  \\ k' \end{array}  $
Проводимость		$I_j = y \cdot (U_j - U_k)$ $I_k = -y \cdot (U_j - U_k)$	$  \begin{array}{c} U_j \quad U_k \\ j \quad \left  \begin{array}{cc} y & -y \\ -y & y \end{array} \right  \\ k \end{array}  $

Независимый источник тока вносится только в вектор независимых источников (табл. 8.2).

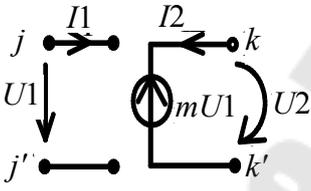
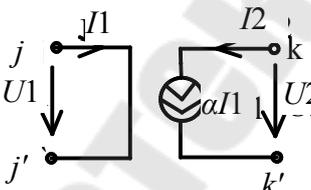
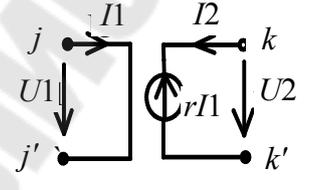
Таблица 8.2

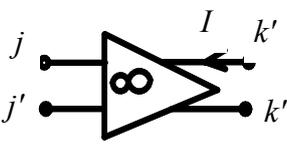
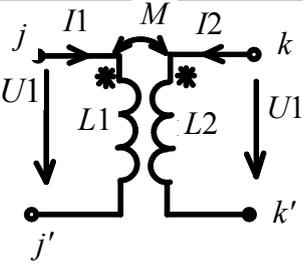
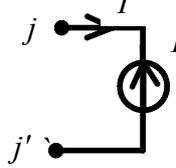
Элемент	Изображение	Компонентные уравнения	Матрица
Источник тока		$I_j = J$ $I_k = -J$	Вектор источников $\begin{array}{c cc } & I & \\ j & J & \\ k & -J & \end{array}$

Будем увеличивать размер основной матрицы  $Y_{n1}$  при введении элементов 2-й группы: источника напряжения, управляемого напряжением, источника тока, управляемого током, источника напряжения, управляемого током, следующим образом: компонентное уравнение этого элемента добавляется к системе в виде следующей  $(n + 1)$  строки, а ток, втекающий через этот элемент, вводится в виде следующего столбца в основной матрице  $Y_{n1}$  (табл. 8.3).

Таблица 8.3

**Представление элементов 2-й группы в модифицированном методе с проверкой**

Элемент	Изображение	Компонентные уравнения	Матрица $Y_{нд}$
ИНУН		$U_k - U_{k'} -$ $-mU_j +$ $+mU_{j'} = 0$ $I_k = I_1$ $I_{k'} = -I_2$	$\begin{array}{c cccc c} & U_j & U_{j'} & U_k & U_{k'} & I \\ j & & & & & 0 \\ j' & & & & & 0 \\ k & & Y_{n1} & & & 1 \\ k' & & & & & -1 \\ \hline n+1 & -m & m & 1 & -1 & 0 \end{array}$
ИТУТ		$U_j - U_{j'} = 0$ $I_j = -I_{j'} = I_1$ $I_k = -I_{k'} =$ $= \alpha I_1$	$\begin{array}{c cccc c} & U_j & U_{j'} & U_k & U_{k'} & I \\ j & & & & & 1 \\ j' & & & & & -1 \\ k & & Y_{n1} & & & \alpha \\ k' & & & & & -\alpha \\ \hline n+1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{array}$
ИНУТ		$U_j - U_{j'} = 0$ $I_j = -I_{j'} = I_1$ $U_k - U_{k'} -$ $-rI_1 = 0$ $I_k = -I_{k'} = I_2$	$\begin{array}{c cccc cc} & U_j & U_{j'} & U_k & U_{k'} & I_1 & I_2 \\ j & & & & & 1 & 0 \\ j' & & & & & -1 & 0 \\ k & & Y_{n1} & & & 0 & 1 \\ k' & & & & & 0 & -1 \\ \hline n+1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline n+2 & 0 & 0 & 1 & -1 & -r & 0 \end{array}$

Элемент	Изображение	Компонентные уравнения	Матрица $Y_{нд}$
Операционный усилитель		$U_j - U_{j'} = 0$ $I_k = -I_{k'} = I$	$\begin{array}{c cccc c} & U_j & U_{j'} & U_k & U_{k'} & I \\ \hline j & & & & & 0 \\ j' & & & & & 0 \\ k & & & Y_{n1} & & 1 \\ k' & & & & & -1 \\ \hline n+1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{array}$
Трансформатор		$U_j - U_{j'} - pL1 I_1 - \pm pM I_2 = 0$ $\pm pM I_2 = 0$ $U_k - U_{k'} \pm \pm pM I_1 - -pL2 I_2 = 0$ $I_j = -I_{j'} = I_1$ $I_k = -I_{k'} = I_2$	$\begin{array}{c cccc cc} & U_j & U_{j'} & U_k & U_{k'} & I_1 & I_2 \\ \hline j & & & & & 1 & 0 \\ j' & & & & & -1 & 0 \\ k & & & Y_{n1} & & 0 & 1 \\ k' & & & & & 0 & -1 \\ \hline n+1 & 1 & -1 & 0 & 0 & -pL1 & \pm pM \\ n+2 & 0 & 0 & 1 & -1 & \pm pM & -pL2 \end{array}$
Источник напряжения		$U_j - U_{j'} = 0$ $I_j = I$ $I_{j'} = -I$	<p>Вектор источников</p> $\begin{array}{c cc cc} & U_j & U_{j'} & & \\ \hline j & & & & \\ j' & & & Y_{n1} & \\ \hline n+1 & 1 & -1 & & E \end{array}$

Запишем матрицы, необходимые для расчета схемы, изображенной на рис. 8.1, модифицированным методом с проверкой.

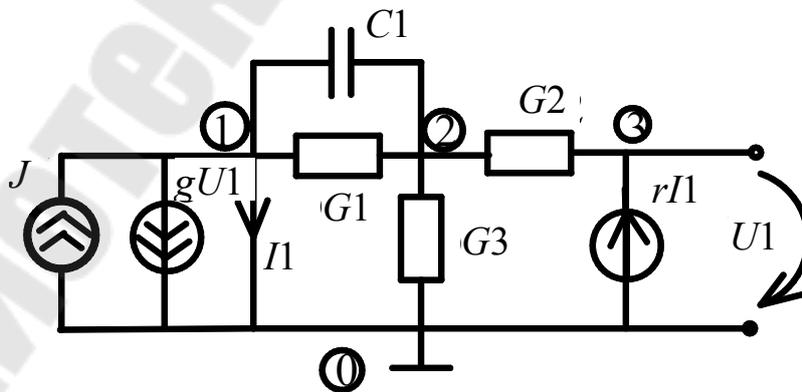


Рис. 8.1. Цепь с двумя зависимыми источниками

Решение (узловые потенциалы с добавленными токами) будем искать в виде

$$U_{нд} = Y_{нд}^{-1} \cdot W,$$

где  $Y_{нд}$  – дополненная матрица узловых проводимостей для расчета

$U_{нд}$  – вектор узловых потенциалов с добавленными токами элементов второй группы;

$W$  – вектор независимых источников.

$$\begin{array}{c|ccc|cc|c}
 & & & \Pi & I_{\text{инут}} & \\
 \hline
 & G1+pC & -G1-pC & g & 1 & 0 \\
 & -G1-pC & G1+G2+G3+pC & -G2 & 0 & 0 \\
 & 0 & -G2 & G2 & 0 & 0 \\
 \hline
 n+1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \hline
 n+2 & 0 & 0 & 1 & -r & 0 \\
 \hline
 \end{array} \cdot \begin{array}{c} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \Pi \\ I_{\text{инут}} \end{array} = \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{Y_{нд}} \quad \underbrace{\hspace{2em}}_{U_{нд}} \quad W$

## 8.2. Порядок выполнения работы

1. Составить необходимые матрицы для расчета данной схемы на ЭВМ модифицированным методом с проверкой.
2. Найти узловые потенциалы, напряжения и токи в ветвях.
3. Сделать проверку по первому закону Кирхгофа.

## 8.3. Содержание отчета

Отчет должен содержать исходные данные, рисунок схемы, порядок расчетов, необходимые матрицы для расчета, а также результаты проверки по первому закону Кирхгофа.

## 8.4. Контрольные вопросы

1. Какие элементы относятся к элементам 1-й группы.
2. Какие элементы относятся к элементам 2-й группы.
3. Принцип дополнения матрицы проводимостей элементов 1-й группы.
4. Отличие данного метода от модифицированного метода.

## Лабораторная работа № 9

### Узловой анализ активных цепей

**Цель работы:** изучить практическое применение метода для расчета конкретных электрических схем с активными элементами.

#### 9.1. Краткие теоретические сведения

Активные цепи в большинстве случаев реализуются с помощью управляемых напряжением источников напряжения или с помощью операционных усилителей. Обычно они возбуждаются источником напряжения. Выходным сигналом также является напряжение. Для таких схем можно значительно сократить размер матриц, если выполнить несколько предварительных шагов.

Будем предполагать, что один из выводов независимого (и зависимого) источника напряжения заземлен. В этом случае потенциал другого вывода известен.

Выходное напряжение управляемого источника зависит от напряжения на каком-либо узле, и, если этот потенциал известен, то известно выходное напряжение управляемого источника.

Через идеальный источник ЭДС может протекать произвольный ток, следовательно, не нужно записывать уравнение Кирхгофа для токов для этого узла.

Все вышесказанное можно объединить в следующий набор правил составления уравнений для активных цепей:

1. Указываются все известные напряжения в схеме.
2. Все сопротивления обозначаются через проводимости.
3. Записываются уравнения Кирхгофа для токов для тех узлов, которые соединены с зависимыми и независимыми источниками напряжения.

Проведем анализ активной цепи для схемы, представленной на рис. 9.1.

Известные напряжения в данной схеме:

$$U_1 = E ; \quad U_4 = m \cdot U_3.$$

Уравнения Кирхгофа для токов будем записывать только для 2-го и 3-го узлов:

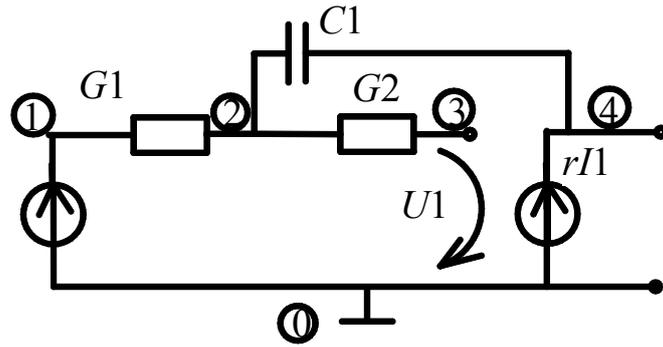


Рис. 9.1. Пример активной цепи с ИНУН

$$2 \text{ узел: } -U_1 \cdot G_1 + U_2 \cdot (G_1 + G_2 + pC_1) - U_3 \cdot G_2 - U_4 \cdot pC_1 = 0.$$

$$3 \text{ узел: } -U_2 \cdot G_2 + U_3 \cdot G_2 = 0.$$

С учетом известных напряжений эти уравнения переписываются следующим образом:

$$2 \text{ узел: } U_2 \cdot (G_1 + G_2 + pC_1) - U_3 \cdot (G_2 + m \cdot pC_1) = E \cdot G_1.$$

$$3 \text{ узел: } -U_2 \cdot G_2 + U_3 \cdot G_2 = 0.$$

Или в матричной форме:

$$\begin{vmatrix} (G_1 + G_2 + pC_1) & (-G_2 - m \cdot pC_1) \\ -G_2 & G_2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U_2 \\ U_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} E \cdot G_1 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Операционный усилитель обычно моделируется с помощью ИНУН (рис. 9.2).

Если к операционному усилителю подключить обратную связь, то, как видно из рис. 9.2, напряжение на его выходе не будет бесконечно большим только в том случае, если напряжения на его входах будут равны между собой.

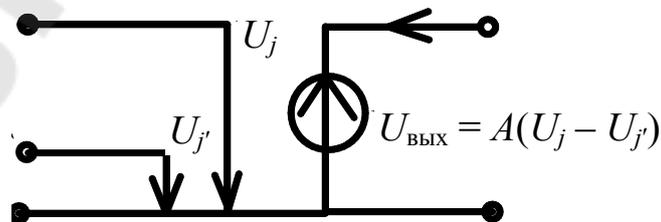


Рис. 9.2. Модель операционного усилителя:  
 $A$  – коэффициент усиления; ОУ стремится к бесконечности

Из этого сформулируем еще одно правило, добавив его к трем, ранее описанным.

4. Положим потенциалы на входах операционного усилителя одинаковыми (не забывая, что если один вход усилителя заземлен, то и напряжение на другом входе будет равным нулю). Уравнение Кирхгофа для токов для выходного узла записывать не нужно.

Проведем анализ активной цепи для схемы, представленной на рис. 9.3.

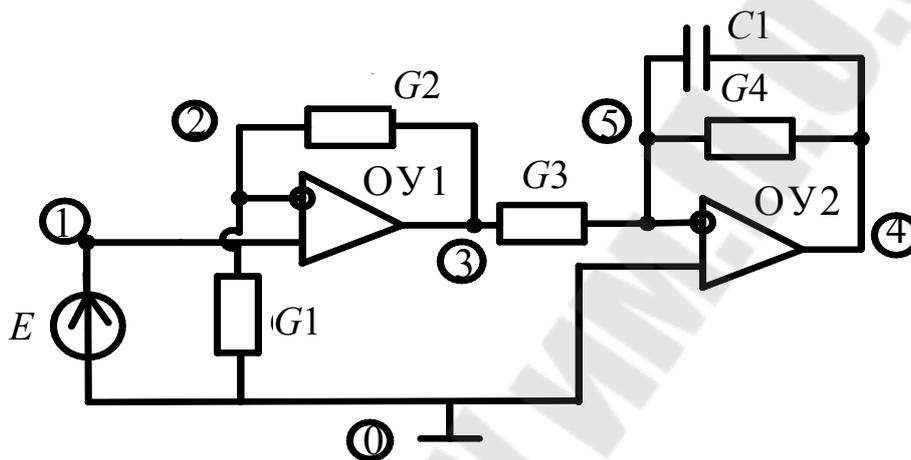


Рис. 9.3. Активная цепь с двумя ОУ

Известные напряжения в данной схеме:

$$U_1 = E; \quad U_2 = U_1 = E; \quad U_5 = 0.$$

Уравнения Кирхгофа для токов будем записывать только для 2-го и 5-го узлов:

$$2 \text{ узел: } U_1 \cdot (G_1 + G_2) - U_3 \cdot G_2 = 0.$$

$$5 \text{ узел: } -U_3 \cdot G_3 + U_5 \cdot (G_3 + G_4 + pC_1) - U_4 \cdot (G_4 + pC_1) = 0.$$

С учетом известных напряжений эти уравнения переписутся следующим образом:

$$2 \text{ узел: } U_3 \cdot G_2 = E \cdot (G_1 + G_2).$$

$$5 \text{ узел: } -U_3 \cdot G_3 - U_4 \cdot (G_4 + pC_1) = 0.$$

или в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} G & 0 \\ -G_3 & -(G_4 + p \cdot C_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_3 \\ U_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E(G_1 + G_2) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Далее токи в ветвях рассчитываются обычным способом.

## **9.2. Порядок выполнения работы**

1. Произвести анализ активной цепи согласно правилам, изложенным выше.
2. Рассчитать неизвестные узловые потенциалы.
3. Найти токи в ветвях и сделать проверку по первому закону Кирхгофа.

## **9.3. Содержание отчета**

Отчет должен содержать исходные данные, рисунок схемы, порядок расчетов, необходимые уравнения и матрицы для расчета, а также результаты проверки по первому закону Кирхгофа.

## **9.4. Контрольные вопросы**

1. Правила составления уравнений для активных цепей.
2. Чему равны входные токи операционных усилителей?
3. Как найти выходные токи операционных усилителей?

## Лабораторная работа № 10

### Чувствительность системы линейных уравнений

**Цель работы:** изучить применение метода для расчета чувствительности характеристик электрической схемы к изменению параметров элементов.

#### 10.1. Краткие теоретические сведения

Чувствительность – это некоторая физическая величина, которая позволяет получить дополнительную информацию о поведении физической системы. С ее помощью можно определить, как изменение какого-либо параметра схемы влияет на поведение всей схемы; можно также сравнивать качество различных цепей, имеющих одинаковый отклик при номинальных параметрах.

Чувствительность  $DF_h$  определяется как дифференциал (производная) функции  $F$  по некоторому параметру  $h$ :

$$DF_h = \frac{dF}{dh}.$$

Причем функция  $F$  может быть произвольной функцией цепи (полюсом, нулем), а параметр  $h$  – значением параметра (или элемента) схемы.

Пусть дана система линейных уравнений вида:

$$T \cdot X = W. \quad (10.1)$$

Ее нормальное решение:

$$X = T^{-1} \cdot W. \quad (10.2)$$

Найдем чувствительность всех элементов вектора  $X$  по отношению к некоторому параметру  $h$ .

Продифференцируем выражение (10.1) относительно вектора  $X$  по параметру  $h$ :

$$T \cdot \frac{dX}{dh} + \frac{dT}{dh} \cdot X = \frac{dW}{dh}. \quad (10.3)$$

Определим искомую функцию  $\frac{dX}{dh}$ :

$$\frac{dX}{dh} = -T^{-1} \cdot \left( \frac{dT}{dh} \cdot X - \frac{dW}{dh} \right). \quad (10.4)$$

Порядок расчета чувствительности системы линейных уравнений:

1. Решаем систему линейных уравнений (10.1), находим вектор  $X$ .
2. Составляем матрицу  $\frac{dT}{dh}$ , вектор  $\frac{dW}{dh}$  и находим вектор  $\frac{dX}{dh}$ .

Рассмотрим цепь с двумя зависимыми источниками, изображенную на рис. 10.1.

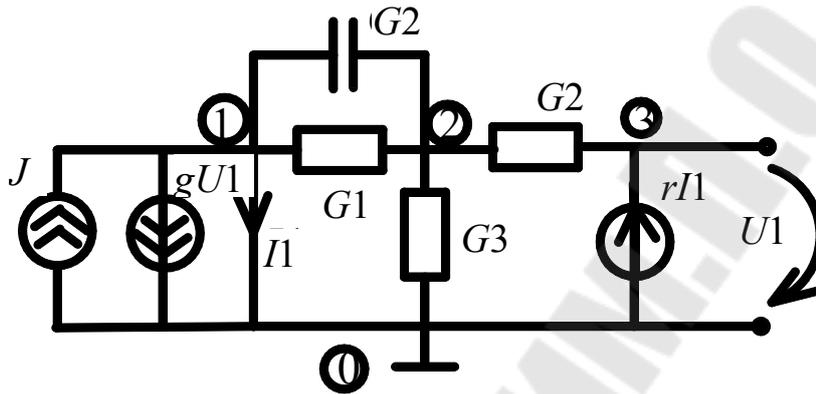


Рис. 10.1. Цепь с двумя зависимыми источниками

Запишем матрицы, необходимые для расчета схемы, модифицированным методом с проверкой

$$\begin{matrix}
 & & & & \Pi & I_{\text{зи}} \\
 \begin{matrix} n+1 \\ n+2 \end{matrix} & \left[ \begin{array}{ccc|ccc}
 (G1 + pC1) & (-G1 - pC1) & & g & 1 & 0 \\
 (-G1 - pC1) & (G1 + G2 + G3 + pC1) & -G2 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -G2 & & G2 & 0 & 1 \\
 1 & 0 & & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & & 1 & -r & 0
 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} U1 \\ U2 \\ U3 \\ \Pi \\ I_{\text{зи}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 & Y_{\text{нд}} & & & U_{\text{нд}} & W
 \end{matrix}$$

$Y_{\text{нд}}$  – дополненная матрица узловых проводимостей для расчета схемы модифицированным методом с проверкой;

$U_{\text{нд}}$  – вектор узловых потенциалов с добавленными токами элементов второй группы;

$W$  – вектор независимых источников.

Узловые потенциалы (с добавленными токами) ищутся в виде:

$$U_{\text{нд}} = Y_{\text{нд}}^{-1} \cdot W.$$

Найдем чувствительность узловых потенциалов и токов элементов 2-й группы (т. е. вектора  $X$ ) к изменению параметра  $G1$ . Составим матрицу  $\frac{dT}{dG1}$  и вектор  $\frac{dW}{dG1}$ .

$$\frac{dT}{dG1} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \frac{dW}{dG1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Тогда чувствительность узловых потенциалов и элементов 2-й группы определится по формуле (10.4).

На практике очень редко требуется рассчитывать чувствительность всех компонент вектора  $X$ . Чаще всего изменяется одна величина  $F$ , связанная с этим вектором. Необходимо знать чувствительность функции  $F$  по отношению к нескольким параметрам  $h$ .

Допустим, что выходная величина  $F$  является линейной комбинацией элементов вектора  $X$ :

$$F = d^T X,$$

где  $d$  – постоянный вектор.

Например, если нужно определить функцию  $F$  как напряжение на выходе схемы  $U_{\text{вых}}$  из вектора  $X$ , равного

$$X = \begin{pmatrix} U1 \\ U2 \\ U_{\text{вых}} \\ I_{\text{вых}} \end{pmatrix},$$

то постоянный вектор  $d$  будет иметь вид:

$$d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Продифференцировав величину  $F$  по параметру  $h$  получим:

$$\frac{dF}{dh} = d^T \cdot \frac{dX}{dh}. \quad (10.5)$$

Подставив значения  $\frac{dX}{dh}$  (выражение 10.4), получим:

$$\frac{dF}{dh} = -d^T \cdot T^{-1} \cdot \left( \frac{dT}{dh} \cdot X - \frac{dW}{dh} \right). \quad (10.6)$$

Определим присоединенный вектор  $X^{\Pi}$  с помощью соотношения:

$$(X^{\Pi})^T = -d^T \cdot T^{-1} \quad (10.7)$$

Этот вектор можно определить при решении системы до расчета чувствительности. Если умножить обе части равенства на матрицу  $T$  и затем транспонировать левую и правую части, получим присоединенную систему уравнений относительно вектора  $X^{\Pi}$ :

$$T^T \cdot X^{\Pi} = -d.$$

Выражение (10.6) перепишется в виде:

$$\frac{dF}{dh} = (X^{\Pi})^T \cdot \left( \frac{dT}{dh} \cdot X - \frac{dW}{dh} \right). \quad (10.8)$$

Определение чувствительности таким способом называется методом присоединенной системы.

### Вычислительная процедура этого метода

1. Решаем исходную систему уравнений  $T \cdot X = W$ , определяя вектор  $X$ .
2. Решаем присоединенную систему:  $T^T \cdot X^{\Pi} = -d$ , определяя вектор  $X^{\Pi}$ .
3. Для каждого параметра  $h$  формируем матрицу  $\frac{dT}{dh}$  и вектор  $\frac{dW}{dh}$ , и, подставив в (10.7), вычисляем  $\frac{dF}{dh}$ .

Вернемся к схеме, изображенной на рис. 10.1, и найдем чувствительность тока источника тока управляемого током (ИТУТ) к изменению передаточного сопротивления, т. е. параметра  $r$ . Вектор  $X$  был уже определен ранее. Вектор  $d^T$  будет иметь вид:

$$d^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

Тогда присоединенный вектор  $X^{\Pi}$  находится из выражения (10.7).

Вектор  $\frac{dW}{dr} = 0$ . Матрица  $\frac{dT}{dr}$  выглядит следующим образом:

$$\frac{dT}{dr} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Чувствительность тока ИТУТ к изменению передаточного сопротивления  $r$  рассчитывается по формуле:

$$\frac{dI_{\text{ИТУТ}}}{dr} = (X^{\text{П}})^T \cdot \frac{dT}{dr} \cdot X.$$

### 10.2. Порядок выполнения работы

1. Составить матрицы, необходимые для расчета заданной схемы на ПЭВМ модифицированным методом с проверкой.
2. Найти вектор  $X$  – вектор узловых потенциалов с добавленными токами элементов 2-й группы.
3. Определить чувствительность вектора  $X$  к изменению параметра  $h$ .
4. Определить чувствительность методом присоединенной системы.

### 10.3. Содержание отчета

Отчет должен содержать исходные данные, рисунок схемы, порядок расчетов, необходимые матрицы для расчета, а также результаты расчета чувствительности.

### 10.4. Контрольные вопросы

1. Что называется чувствительностью?
2. Как определяется чувствительность для произвольного параметра?
3. Как определяется относительная чувствительность?
4. Как определяется чувствительность системы уравнений цепи?
5. Как определяется присоединенный вектор?
6. Как задается вектор  $d$ ?
7. Как определяется чувствительность с использованием присоединенной системы?

## Содержание

Лабораторная работа № 8	
Расчет цепей модифицированным узловым методом с проверкой .....	3
Лабораторная работа № 9	
Узловой анализ активных цепей .....	7
Лабораторная работа № 10	
Чувствительность системы линейных уравнений .....	11

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

## **АНАЛИЗ АКТИВНЫХ ЦЕПЕЙ**

**Лабораторный практикум  
по курсу «Математическое моделирование  
узлов промышленной электроники»  
для студентов специальности 1-36 04 02  
«Промышленная электроника»  
дневной формы обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

Авторы-составители: **Щуплов Вячеслав Валентинович  
Котова Юлия Евгеньевна**

Редактор *Л. Ф. Теплякова*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 12.06.07.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 0,97.

Изд. № 175.

E-mail: [ic@gstu.gomel.by](mailto:ic@gstu.gomel.by)

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Издательский центр учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.