УДК 621.372

**В.П. Шибицкий, Н.Н. Савчук**

# ОПТИМИЗАЦИЯ И РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ НЕЧЕТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

*Современные компьютерные средства позволяют моделировать электронные системы в соответствии с классическими методами анализа и синтеза на основе теории нечеткой классификации информационных объектов без формирования промежуточных матричных, топологических и других моделей.*

В настоящее время разработаны методы анализа и синтеза [1,2,3,5] электронных систем, основанные на матричных, топологических и структурно-числовых моделях. Современный уровень развития программных и аппаратных средств компьютеров позволяет решать задачи анализа и синтеза [4,5] электронных систем методами искусственного интеллекта в соответствии с классической теорией анализа и синтеза электронных систем без формирования матричных, топологических моделей, а также описанием алгоритмов в соответствующей алгебре. Для формальной реализации классического подхода в анализе и синтезе электронных систем рассмотрим множественную модель электронной системы в виде информационного объекта [4] на основе теории нечеткой классификации.

По аналогии с электрической электронную систему определим на основе теоретико-множественных понятий [5]. Первичными понятиями будем считать множество узлов $X \ni x_i$, где $x_i$ - любой узел и множество двухполюсных компонентов $Q \ni q_i$, здесь $q_i$ - любая двухполюсная компонента. Составим декартово произведение $X_x = X \times X$, представляющее множество всех пар узлов $(x_i, x_j)$, $(i \neq j)$. Пара узлов понимается как двухэлементное множество узлов, так что $(x_i, x_j) = \{x_i, x_j\}$.

Электронная система есть бинарное отношение

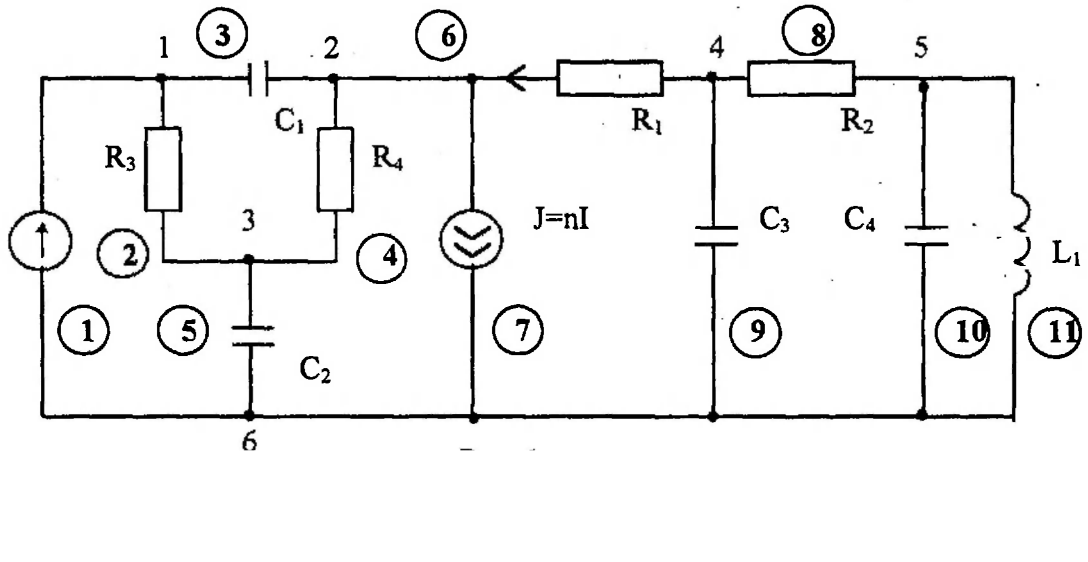
$$S \subset X_x \times Q \tag{1}$$

и такое, что для узлов $x_i$, $x_j$, образующих пару, определен тип отношения $q_i \in Q$. Такое описание позволяет сформировать систему S в виде функции

$$Q = S(X_x) \tag{2}$$

с областью определения на нечетком множестве $X_x \subset X_x$.

Поясним формулы (1) и (2) на примере системы (рис.1) с множеством узлов $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ и множеством типов двухполюсных компонентов $Q = \{e, C_1, C_2, C_3, C_4, R_1, R_2, R_3, R_4, L_1, J\}$.



Пусть y = {1, 2}, z = {1, 3}. Тогда S-образами этих пар узлов являются двухполюсн компоненты S (1,2) ={$C_1$}, S(1,3) = {$R_3$}. Пересечение этих S-образов дает пустое множес во: $S(1, 2) \cap S(1, 3) = \varnothing$. Из условия (2) видно, что в реальной физической системе люб двухполюсная компонента $q_i$ подключена параллельно к одной и только одной паре узлов, которой она образует пару [{ $x_i$, $x_j$ }$q_i$]. Эта пара - ветвь системы. Множество таких пар, п нимаемых как единое целое, и есть система, которую можно записать в виде формулы:

$$S = \begin{pmatrix} 1,6 & 1,3 & 1,2 & 2,3 & 3,6 & 2,6 & 4,2 & 4,6 & 4,5 & 5,6 & 5,6 \\ e & R_1 & C_1 & R_4 & C_2 & J & R_1 & C_3 & R_2 & C_4 & L_1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Это множество S = {$s_1$, $s_2$, $s_3$, $s_4$, $s_5$, $s_6$, $s_7$, $s_8$, $s_9$, $s_{10}$, $s_{11}$} можно представить в виде с вокупности значений функций, где

$s_1$ = {(6, 1) e}; $s_5$ = {(3, 6) $C_2$}; $s_9$ = {(4, 6) $C_3$};
$s_2$ = {(1, 3) $R_3$}; $s_6$ = {(4, 2) $R_1$}; $s_{10}$ = {(5, 6) $C_4$};
$s_3$ = {(1, 2) $C_1$}; $s_7$ = {(2, 6) J}; $s_{11}$ = {(5, 6) $L_1$}.
$s_4$ = {(2, 3) $R_4$}; $s_8$ = {(4, 5) $R_2$};

Структура системы S, определяемой как бинарное отношение, эквивалентна абст рактному, а не топологическому графу. Определение электронной системы в виде специаль ного множества S позволяет применить методы теории нечеткой классификации. Люба структурная часть системы: дерево, путь, контур является нечетким подмножеством базово го множества S с заданными функциями принадлежности [4].

Для базового множества S дерево D является нечетким подмножеством $D \subset S$ с за данной функцией принадлежности $\mu_D(s_i)$ для любого $s_i \in S$. Процесс формирования множе ства D из элементов $s_i \in S$ включает следующие этапы.

**Утверждение 1.** Любой элемент $s_i \in S$ может быть включен в пустое множество D и предопределяет включение пары узлов {$x_i$, $x_j$} в множество $X_D$.

На последующих шагах в множество D включаются только те элементы $s_i \in S$, для которых значение функции принадлежности равно единице:

$$\mu_D(s_i) = \begin{cases} 1, \text{ если } \{x_i, x_j\}_k \cap X_D = x_i \text{ или } x_j; \\ 0, \text{ если } \{x_i, x_j\}_k \cap X_D = \varnothing \text{ или } \{x_i, x_j\}, \end{cases}$$

где k изменяется от 1 до n-1; n - число узлов электронной системы.

Функция $\mu_D(s_i)$ показывает, что на каждом шаге включения $s_i \in S$ в множество D. число элементов множества $X_D$ увеличивается на единицу. Процесс формирования множест ва D заканчивается, когда число элементов в множестве $X_D$ будет равно числу элементов множества X исходной системы.

Пусть необходимо сформировать систему уравнений в соответствии с классическими методами узловых потенциалов и контурных токов. Применим способ разбиения электрон ной схемы на части для формирования системы только дифференциальных уравнений. Это означает, что индуктивные элементы должны иметь размерность сопротивления, а емкост ные - размерность проводимости. Системы уравнений, сформированные по такому принци пу разбиения электронной схемы, называют уравнениями состояний.

Метод узловых потенциалов предполагает выбор системы координат и формирова ние собственных и взаимных узловых проводимостей.

Система координат однозначно определяется на подмножестве узлов $X_2$, в котором фиксируется базисный узел $x_i$ . Элемент $x_i \in X_2$ является аналогом узлового потенциала (рис.2). Подмножество $X_2 \subset X$ фиксирует некоторое подмножество $S_2 \subset S$ (рис.3). Существование системы координат в соответствии с методом узловых потенциалов определяется связностью элементов подмножества $S_2$.

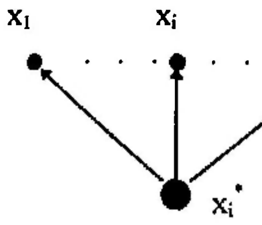



Рис.2

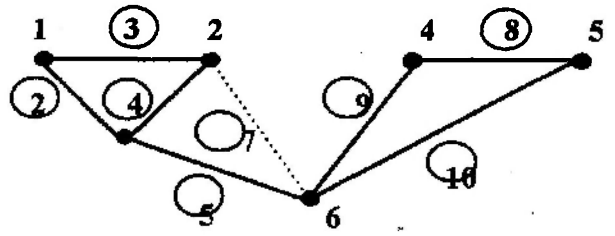



Рис.3

Из определений (1) и (2) следует, что любая часть является собственным подмножеством множества (3). При этом формирование отдельных частей в соответствии с принятыми методами анализа сводится к булевым операциям над множественным образом S. Множество S разбиваем на части:

$$S = S_1 \cup S_2 \cup S_3. \tag{4}$$

Для источников, для реактивных и зависимых элементов системы (3) разбиение (4) определено следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} 6,1 & 2,4 & 5,6 \\ e & R_1 & L_1 \end{Bmatrix} \subset S_1, \quad \begin{Bmatrix} 1,2 & 3,6 & 4,6 & 5,6 \\ C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \end{Bmatrix} \subset S_2, \quad S_3 = \begin{Bmatrix} 2,6 \\ J \end{Bmatrix}.$$

Для подмножеств $S_1$, $S_2$, $S_3$ формируются подмножества узлов соответственно - $\{1,2,4,5,6\} \subset X_1$, $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \subseteq X_2$, $X_3=\{2, 6\}$.

Операция включения элементов резистивной части

$$\begin{Bmatrix} 2,3 & 4,5 \\ R_4 & R_2 \end{Bmatrix} \subset S \tag{5}$$

в подмножества $S_1$, $S_2$ определятся из отношения $\{x_i, x_j\} \subset X_2$; $x_i, x_j \in X_1$, где $\{x_i, x_j\}$- пара узлов соответствующего элемента подсистемы (5).

Окончательно подмножество

$$S_2 = \begin{pmatrix} & 1,2 & 3,6 & 4,6 & 5,6 & 1,3 & 2,3 \\ C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & R_3 & R_4 & R_2 \end{pmatrix}^{4,5}$$

В соответствии с методом узловых потенциалов формируем собственные узловые подмножества.

Относительно каждого узла $x_i \in X_2$ формируем части $S_2 \overset{x}{\subset} S_2$, пары узлов которых имеют один общий узел:

$$S_2^1 = \begin{pmatrix} 1,2 & \\ C_1 & R_3 \end{pmatrix}^{1,3}; \quad S_2^2 = \begin{pmatrix} 1,2 & \\ C_1 & R_4 \end{pmatrix}^{2,3};$$

$$S_2^3 = \begin{pmatrix} 3,6 & 2,3 & 1,3 \\ C_2 & R_4 & R_3 \end{pmatrix}; \quad S_2^4 = \begin{pmatrix} 4,6 & 4,5 \\ C_3 & R_2 \end{pmatrix};$$

$$S_2^5 = \begin{pmatrix} 5,6 & 4,5 \\ C_4 & R_2 \end{pmatrix}.$$

Число подмножеств $S_2$ равно числу элементов в множестве $X_2$. Узлам $x_1 \in X_2$ ставятся во взаимно однозначное соответствие узловые переменные метода узловых потенциалов.

Связь узловых переменных задана структурой подмножества $S_2$ и определяется формально в результате пересечения ее частей:

$$S_2^{1,2} = S_2^1 \cap S_2^2 = \begin{pmatrix} 1,2 \\ C_1 \end{pmatrix}; \quad S_2^{1,2} = S_2^1 \cap S_2^2 = \begin{pmatrix} 1,2 \\ C_1 \end{pmatrix};$$

$$S_2^{2,3} = S_2^2 \cap S_2^3 = \begin{pmatrix} 2,3 \\ C_1 \end{pmatrix}; \quad S_2^{4,5} = S_2^4 \cap S_2^5 = \begin{pmatrix} 4,5 \\ R_2 \end{pmatrix}.$$

где $S_2^q \subset S_2^{\cdot\cdot}$, (здесь q ={$x_i$, $x_j$}- пары узлов компонент системы).

В электронных системах связи узловых переменных могут задаваться искусственно. Например, двухполюсная компонента [{$x_m$, $x_n$} $q_l$] управляет по напряжению источником тока [{$x_i$,$x_j$}$q_m$]. Отношение [{$x_i$,$x_j$}$q_m$] $\in S_2$, $S_2$, и знаки устанавливаются по парам узлов и орядку элементов в парах узлов зависимых компонент. Правило включения зависимой роводимости $g_m$ в собственные $S_2$ и взаимные $S_2$ подмножества иллюстрируются рис.4.

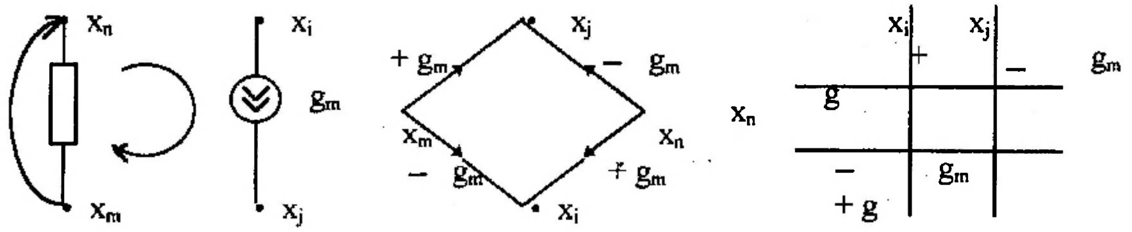



Рис.4

Предлагаемая методика формирования собственных и взаимных узловых проводимостей электронной системы разработана в прямом соответствии с методом узловых потенциалов и позволяет распараллелить процесс их вычисления (рис.5).

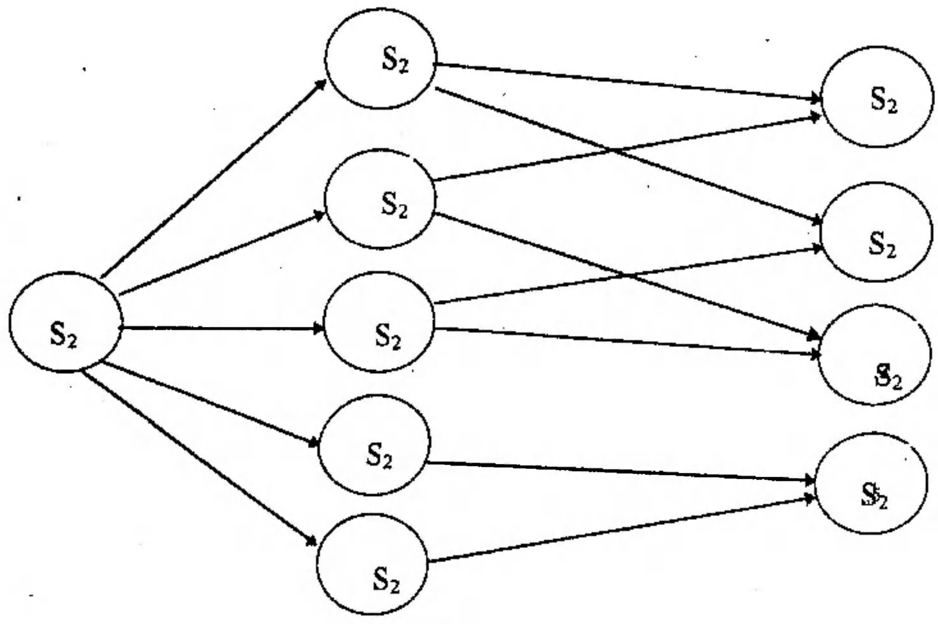



Рис.5

Далее рассмотрим формирование частей подсистемы $S_1$ по методу контурных токов (рис.6).

Метод контурных токов предполагает формирование собственных и взаимных контурных сопротивлений. Системой координат при этом является система независимых контуров. Множественным аналогом контура в этой системе будем считать соответствующее контуру подмножество узлов электронной схемы. Направление обхода контура задается отношением порядка в соответствующем контуру множестве узлов. Для формирования системы контурных переменных необходимо выделить в подмножестве $S_1$ несвязные части.

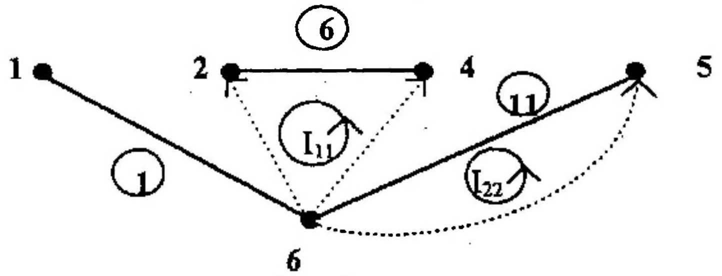



Рис.6

Из подмножества $S_1$ выделим части $S_1$, пары узлов которых $\{x_i, x_j\} \subset X_2$:

$$S_1^1 = \begin{pmatrix} 2,4 \\ R_1 \end{pmatrix}; \quad S_1^2 = \begin{pmatrix} 5,6 \\ L_1 \end{pmatrix}; \quad S_1^3 = \begin{pmatrix} 6,1 \\ e \end{pmatrix}.$$

Если $S_1 \neq \varnothing$, то разобьем подсистему $S_1$ на части $S_q \subset S_1$, для которых выполняется условие связности. Связность формально означает, что для всех пар узлов части $S_q$ справедливо:

$$\forall \{x_i, x_j\}_1 \bigcap_{n=1}^{m} \{x_i, x_j\}_n \neq \varnothing,$$

где $m = |S_q|$, а для подмножеств узлов $X_q$ частей $S_q$ справедливо условие

$$\bigcap_{q=1}^{k} X_q = \varnothing,$$

где k - число частей.

В частях $S_q$ узлы степени единица положим равными базисному и разобьем на элементы дерева и дополнения. Степень узла $x_k \in X$ есть число ветвей системы, имеющих общий узел $x_k$. Преобразованные подсистемы $S_q$ относительно элементов дополнения дерева разобьем на части $S_1 \subset S_q$, содержащие множества узлов $X_k \ni x_k$ со степенью $x_k$, равной двум. Парам узлов $\{x_i, x_j\} \subset X_2$ и подмножествам узлов $X_k$ подсистемы $S_1$ ставятся во взаимно однозначное соответствие контурные переменные. Связь контурных переменных определяется в результате операции

$$\forall \overset{1}{S_1} \bigcap_{k=1}^{r} \overset{k}{S_1} = \overset{q}{S_1} \neq \varnothing,$$

где r - число контурных переменных.

Для системы контурных переменных, представляющих в данном случае два контурных тока $I_{11}$, $I_{22}$ (рис.6), и системы узловых потенциалов можно сформировать неоднородную систему координат для составления системы дифференциальных уравнений (рис.7). Отношения узловых и контурных переменных в неоднородной системе координат определяются в результате булевых операций над множественными аналогами узловых и контурных переменных и записываются в форме подматриц $\pi$ и $\rho$.

Проверка отношения $x_i \in \{x_i, x_j\}$, $X_k$, узловых $x_i \in X_2$ и контурных $\{x_i, x_j\} \subset X_2$, $X_k$ переменных позволяет формировать элементы $e_i$ нового множества $e_i \in \pi$. Формирование элементов $e_i$ для системы (3) показано на рис.7:

$$\{2\} \in \{4,2\} \Rightarrow e_1;$$
$$\{4\} \in \{4,2\} \Rightarrow e_2;$$
$$\{5\} \in \{5,6\} \Rightarrow e_3.$$

Для зависимых ветвей $[\{4,2\}\ R_1]$, $[\{2,6\}\ J]$ с передачей по току n отношение $n \in e_i$ устанавливается в результате пересечения соответствующих пар узлов зависимых компонент с образами узловых и контурных переменных:

$$\{2,6\} \cap \{2\} \neq \varnothing;$$
$$\{4,2\} \cap \{4,2\} \neq \varnothing.$$

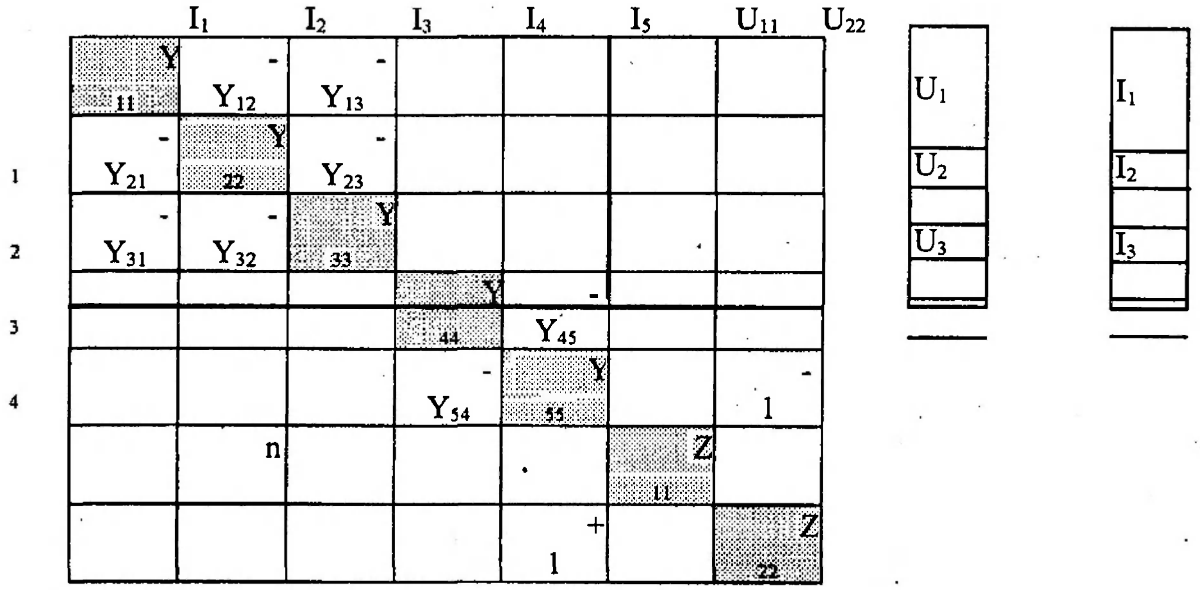



Рис.7

Для сформированной системы дифференциальных уравнений в неоднородном каноническом координатном базисе рассмотрим методику моделирования схемой функции электронной системы. Коэффициенты полиномов схемной функции определяются по методу неопределенных коэффициентов с привлечением методов теории приближения функции. Схемная функция будет иметь вид:

$$F(p) = \gamma\, \frac{\dfrac{\operatorname{sign}(p_o)\, e^{R_o}}{(p-p_o)} + \dfrac{\operatorname{sign}(p_1)\, e^{R_1}}{(p-p_1)} + \ldots + \dfrac{\operatorname{sign}(p_m)\, e^{R_n}}{(p-p_n)}}{\dfrac{(p-p_m)\operatorname{sign}(p_o)e^{R_o}}{(p-p_o)} + \dfrac{(p-p_m)\operatorname{sign}(p_1)e^{R_1}}{(p-p_1)} + \ldots + \operatorname{sign}(p_m)e^{R_n}},$$

где $\gamma = p_{i+1} - p_i$ ; n, m - максимальные степени полиномов числителя и знаменателя схемной функции.

Значения переменных вычисляются следующим образом:

$$R_i = \ln|\det H(p_i)| - \ln|K_i|;$$
$$K_i = (-1)^{m-i}(m-i)!\, i!,$$

где $\det H(p_i)$ - детерминантная функция системы уравнений, составленной методом неопределенных коэффициентов. Система уравнений решается с применением LU разложений. Для повышения точности процесса рассчитівается

$$\ln |\det H(p_i)| = \sum_{k=1}^{n} \ln |U_{kk}|.$$

Знак детерминантной функции определяется отдельно исходя из знаков сомножителей $U_{kk} = \operatorname{sign} n_k \,|\, U_k \,|$, где $\operatorname{sign} n_k$ - переменная со значениями +1, -1. Переменные $\operatorname{sign}(p_i)$ находятся так:

$$\operatorname{sign}(p_i) = (-1)^{m-1} \operatorname{sign} 1\,(p_i);$$

$$\operatorname{sign} 1\,(p_i) = \prod_{k=1}^{n} \operatorname{sign} n_k.$$

Предложенная методика формирования системы уравнений позволяет распараллелить процесс вычисления схемной функции относительно ее коэффициентов полиномов (рис.8).

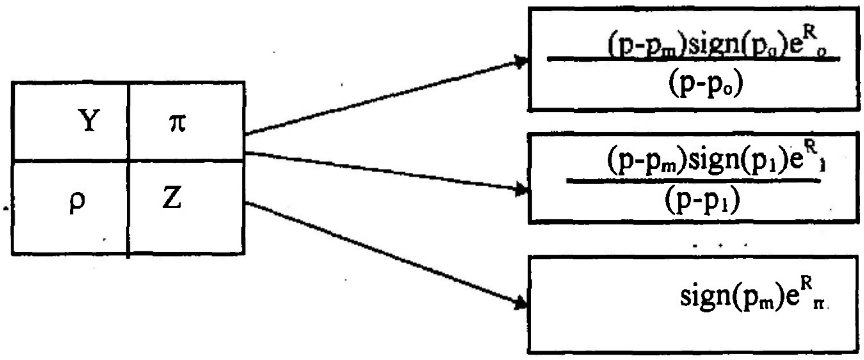



Рис.8

На основе изложенной методики разработана программа на объектно-ориентированном языке Паскаль под Windows. Пример моделирования электронной системы показан на рис.9.

Для электронной схемы (рис.9) приведены результаты моделирования в виде ее амплитудных F (рис.10) и фазовых $\psi$ (рис.11) частотных характеристик в диапазоне частот от 10 до 117 Гц.

Исходные данные для моделирования электронной схемы (см. рис.9) приведены в табл.1, которая является базой данных. Информация о ветви схемы в базе данных представлена в форме записи с идентификаторами полей.

Значения полей имеют различные типы и для полей в записи задано отношение порядка. Для идентификации поля записи задается первичный ключ, который определяет запись для всей базы данных.

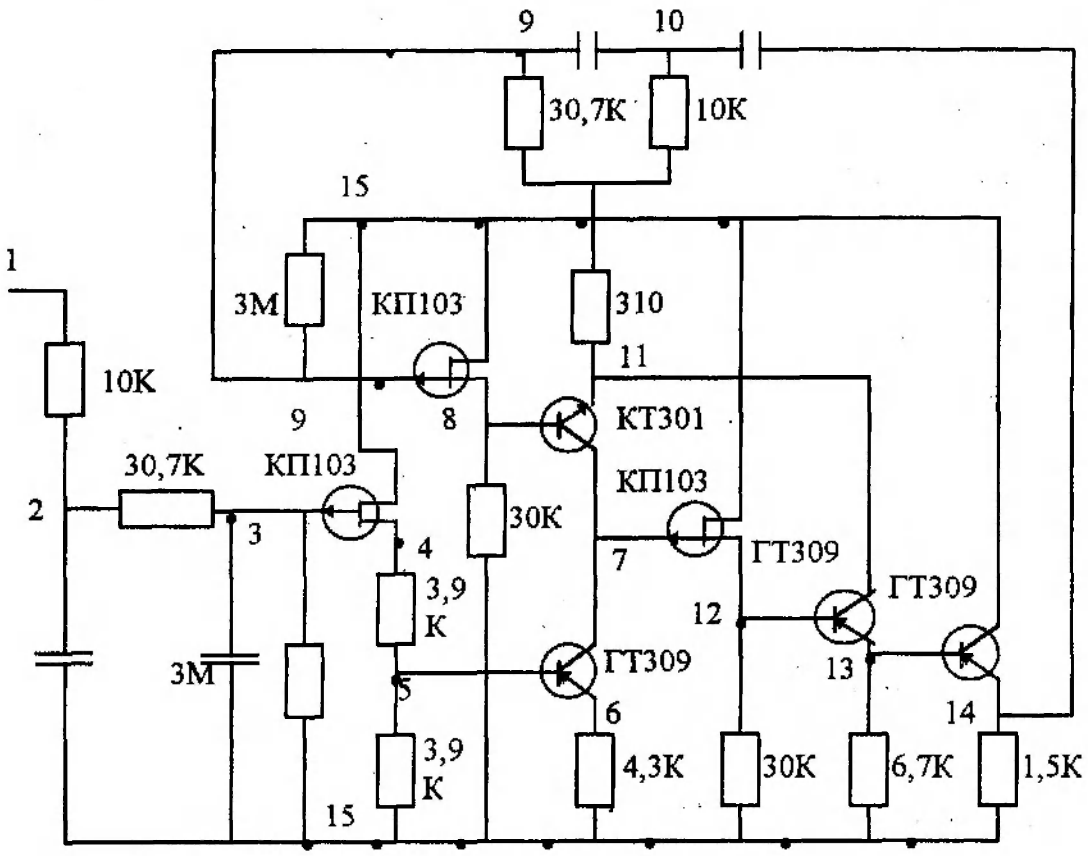

9
10
30,7K
10K
15
1
3M
КП103
310
11
10K
9
8
КТ301
30,7K
КП103
КП103
2
3
4
30K
7
ГТ309
ГТ309
3,9
K
12
3M
ГТ309
13
5
6
14
3,9
K
4,3K
30K
6,7K
1,5K
15

Рис.9

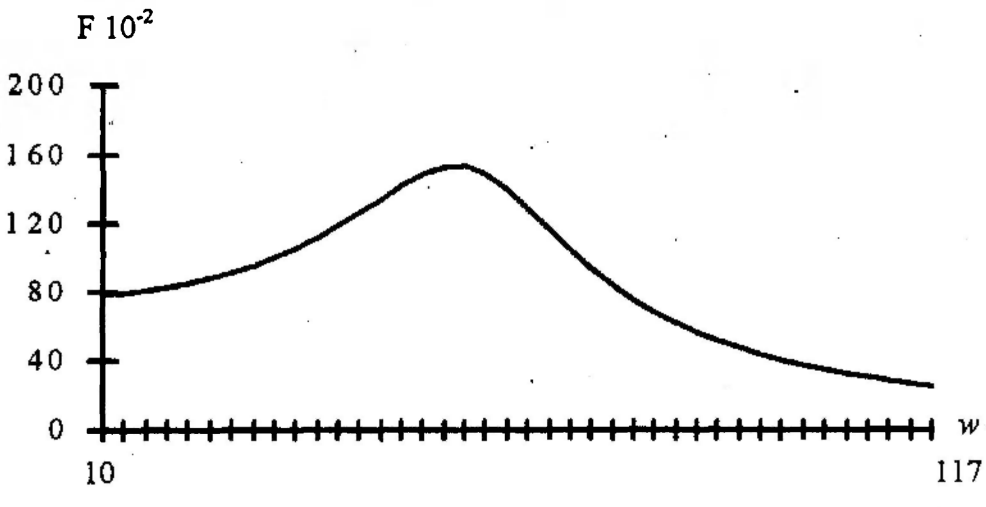

F $10^{-2}$
200
160
120
80
40
0
w
10
117

Рис.10

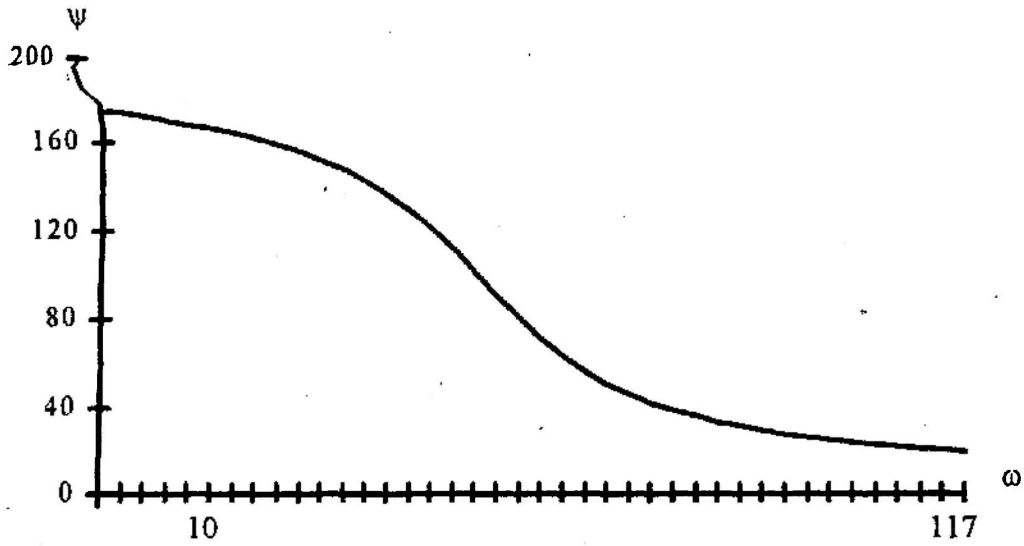



Рис.11

На этапе обработки исходной информации создается база данных (табл.2), в которой фиксированы отношения для зависимых ветвей со всеми возможными их типами (зависимая проводимость, зависимое сопротивление, передачи по току или передачи по напряжению).

Такой подход к анализу электронной системы позволяет применить методы нечеткой классификации ветвей системы в связи наличием зависимых двухполюсных компонент и распараллелить процесс вычислений от ввода информации о системе до формирования коэффициентов полиномов схемной функции.

Эта задача решается на основе объектно-ориентированного программирования, когда информационным объектом является электронная система, а ее элементом - ветвь этой системы.

В предлагаемом подходе для анализа электронной системы используются теоретико-множественная модель на основе теории нечеткой классификации и объектно-ориентированный метод программирования, что позволяет моделировать электронную систему на уровне современной информационной технологии.

Таблица 1

| Номер ветви | Пара узлов | | Тип ветви | Номинал |
|---|---|---|---|---|
| | исток | сток | | |
| 1 | 1 | 2 | R | 10K |
| 2 | 2 | 15 | C | 59100P |
| 3 | 2 | 3 | R | 30,7K |
| 4 | 3 | 15 | C | 19250P |
| 5 | 3 | 15 | R | 3M |
| 6 | 4 | 3 | R | 100M |
| 7 | 4 | 15 | R | 100K |
| 8 | 8 | 9 | R | 100M |
| 9 | 8 | 15 | R | 100K |
| 10 | 11 | 8 | R | 1K |
| 11 | 7 | 11 | R | 100K |
| 12 | 12 | 7 | R | 100M |

Окончание табл. 1

| Номер ветви | Пара узлов исток | Пара узлов сток | Тип ветви | Номинал |
|---|---|---|---|---|
| 13 | 12 | 15 | R | 100K |
| 14 | 13 | 12 | R | 1K |
| 15 | 11 | 13 | R | 100K |
| 16 | 14 | 13 | R | 1K |
| 17 | 15 | 14 | R | 100K |
| 18 | 14 | 15 | R | 1,5K |
| 19 | 13 | 15 | R | 6,7K |
| 20 | 12 | 15 | R | 30K |
| 21 | 6 | 15 | R | 4,3K |
| 22 | 8 | 15 | R | 30K |
| 23 | 5 | 15 | R | 3,9K |
| 24 | 4 | 5 | R | 3,9K |
| 25 | 6 | 5 | R | 1K |
| 26 | 6 | 7 | R | 100K |
| 27 | 15 | 9 | R | 3M |
| 28 | 15 | 9 | R | 30,7K |
| 29 | 9 | 10 | C | 19250P |
| 30 | 10 | 15 | R | 10K |
| 31 | 15 | 11 | R | 310 |
| 32 | 10 | 14 | C | 59100P |

Таблица 2

| Номер ветви | Управляющая ветвь | | | Зависимая ветвь | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Пара узлов | | Тип управления | Пара узлов | | Тип ветви | Номинал |
| 1 | 4 | 3 | U | 4 | 15 | J | 5m |
| 2 | 8 | 9 | U | 8 | 15 | J | 5m |
| 3 | 11 | 8 | U | 7 | 11 | J | 30m |
| 4 | 12 | 7 | U | 12 | 15 | J | 5m |
| 5 | 13 | 12 | U | 11 | 13 | J | 40m |
| 6 | 14 | 13 | U | 15 | 14 | J | 40m |
| 7 | 6 | 5 | U | 7 | 6 | J | 40m |

## Список литературы

1. *Нагорный Л.Я.* Декомпозиция и распараллеливание алгоритмов решения систем не линейных уравнений большой размерности. - К.: Знание, 1981. - 26 с.

2. *Дмитришин Р.В.* Поліномні методи символьного аналізу електричних кі Автореферат дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук. - Львів, 1996. - 34 с.

3. *Шевелев А.Г.* Идентификация динамических объектов с многими регулируемыми величинами. // Проблемы моделирования и цифровой обработки сигналов-К.:КМУГА,1996. - С.26-30.

4. *Кудиненко А.В., Шибицкий В.П., Савчук Н.Н.* Структурный метод идентификации электронной системы с распараллеливанием вычислительного процесса.-К.:КМУГА,1997.

5. *Усынин В.И.* Структура множества цепей. - К.:Вища шк., 1980 . - 102 с.

Стаття надійшла до редакції 20 квітня 1998 року.

**В'ячеслав Петрович Шибицький** (1944) закінчив Київський інститут інженерів цивільної авіації в 1967 році. Кандидат технічних наук, доцент кафедри основ обчислювальної техніки та бортових обчислювальних пристроїв Київського міжнародного університету цивільної авіації. Автор більше 60 наукових праць. Напрямок наукової діяльності - комп'ютерна інженерія, моделювання електронних систем та систем управління.

**Vyacheslav P. Shibitsky** (b. 1944) graduated from Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers (1967). PhD (Eng) ass. professor of Fundamentals of computer machines and board computers Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Author of more than 60 publications in the field of computer engineering and simulation of electronic systems and system control.

**Микола Миколайович Савчук** (1969) закінчив Київський міжнародний університет цивільної авіації в 1995 році. Аспірант кафедри основ обчислювальної техніки та бортових обчислювальних пристроїв Київського міжнародного університету цивільної авіації. Напрямок наукової діяльності - розробки в галузі комп'ютерної інженерії. Автор п'яти наукових праць.

**Mykola M. Savtchuk** (b. 1969) graduated from Kyiv International University of Civil Aviation (1995). Post-graduate of Fundamentals of computer machines and board computers Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Specializes in the field of computer engineering. Author of 5 publications.