

Министерство высшего и среднего специального  
образования РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ПРАМ-2.6  
В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

У т в е р ж д е н о  
редакционно-издательским  
советом института  
в качестве  
методических указаний  
к лабораторным работам  
и курсовому проектированию  
для студентов спец. 0701  
и к лабораторным работам  
для ФПК ИТР

Куйбышев 1989

Составители: В.А.Бочкарев, Г.П.Вечканов,  
Р.А.Вечканова

УДК 621.372.54:681.3.06

Использование программы ПРАМ-2.6 в учебном процессе:  
Метод.указания /Сост.В.А.Бочкарев, Г.П.Вечканов, Р.А.Веч-  
канова; Куиб.авиаци.ин-т.Куйбышев, 1989. 32 с.

Приведено описание программы анализа статического состоя-  
ния, переходных процессов, частотных характеристик, чувстви-  
тельности и спектра сигналов цифроналоговых схем ПРАМ-2.6.  
Программа реализована на ЕС ЭВМ. Описаны назначение и форма-  
ты предложений описания и директив управления ходом вычисли-  
тельного процесса.

Рецензенты: доц. М.А.Куликов, доц.канд.техн.  
наук Н.А.Малыгин

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ПРАМ-2.6 В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Редактор А.П.Закхардяева  
Корректор Е.Г.Филипова

Подписано в печать 17.03.89 г. Формат 60x84<sup>1</sup>/16.  
Бумага оберточная белая. Печать оперативная.  
Усл.п.л. 1,9. Уч.-изд.л. 1,8. Т. 300 экз.  
Заказ № 4940. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева,  
443001, г. Куйбышев, ул.Молодогвардейская, 151.

---

Тип.им.В.П.Мяги Куйбышевского полиграфического  
объединения.443099, г.Куйбышев, ул.Венцека, 60.

## ВВЕДЕНИЕ

Программа ПРАМ-2.6 предназначена для анализа и оптимизации нелинейных схем.

Входной язык программы имеет свободный формат. Компонентами электронных цепей могут быть линейные и нелинейные резисторы, проводимости, конденсаторы, катушки индуктивностей, трансформаторы, независимые и зависимые источники напряжения и тока, диоды, биполярные и полевые транзисторы.

Программа ПРАМ-2.6 позволяет описывать различные типы нелинейных элементов с помощью таблиц, встроенных функций и подпрограмм, составляемых пользователем на языке ФОРТРАН-IV.

Программа имеет библиотеку моделей, которая может пополняться пользователем. Общее количество узлов в анализируемой схеме может достигать 500.

Программа ПРАМ-2.6 осуществляет следующие виды расчетов электронных цепей:

1. Анализ стационарного режима по постоянному току итерационным методом Ньютона-Рафсона.
2. Анализ переходных процессов методом неявного интегрирования.
3. Расчет чувствительности отклика цепи к изменению заданного параметра элемента схемы.
4. Расчет коэффициента передачи в режиме малого сигнала.
5. Анализ допустимых отклонений параметров компонентов.
6. Расчет температурных зависимостей.
7. Спектральный анализ.
8. Оптимизация параметров.
9. Анализ по переменному току в режиме малого сигнала.

В данных методических указаниях описываются не все возможности программы ПРАМ-2.6. Это сделано для обеспечения простоты понимания материала и ускорения процесса освоения студентами методов работы с программой. Описанные в методических указаниях возможности программы ПРАМ-2.6 вполне достаточны для использования ее в учебном процессе.

## I. ОПИСАНИЕ ВХОДНОГО ЯЗЫКА

### I.1. Пример подготовки формализованного задания

Формализованное задание состоит из текста описания схемы и директив на проведение анализа.

Директивы начинаются с префикса "звездочка". Любое формализованное задание всегда начинается с директивы „CIRCUIT“; обеспечивающей очистку памяти для подготовки к решению новой задачи.

Ниже в качестве примера приведен текст формализованного задания на анализ усилителя мощности, схема которого приведена на рис. I.

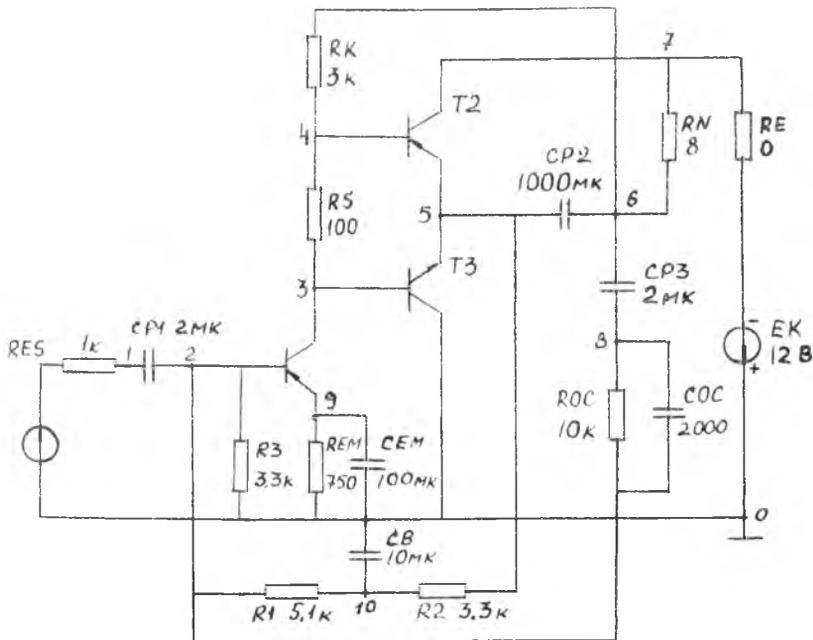
Пример. Текст формализованного задания

```
*CIRCUIT                                1
*: УСИЛИТЕЛЬ  МОЩНОСТИ                  2
GT310E/PNP/ IS=5E-8 VT=30MV NI=0,5 NV=1,6 > 3
TF=5,4N TR=4N CE=20P CC=10P FI=1 GA=0,5 > 4
GZ=1E-5 NG=1E-3 AF=0,99 AR=0,5 GS=1      5
GT402B/PNP/ IS=2,2U VT=0,026 NI=0,1 NV=1,5 > 6
TF=15N TR=8N CE=50P CC=20P FI=1 GA=0,5 > 7
GZ=1E-4 NG=1E-3 AF=0,98 AR=0,5 GS=1      8
GT404B/NPN/ IS=3U VT=30MV NI=0,2 NV=1,4 > 9
TF=12N TR=6N CE=60P CC=30P FI=1 GA=0,5 > 10
GZ=1E-4 NG=1E-3 AF=0,98 AR=0,5 GS=1      11
R1 2 10 5,1K; R2 10 5 3,3K; R3 0 2 3,3K  12
Rk 6 4 3K; RS 3 4 100; RN 6 7 8          13
ROC 8 2 10K; COC 8 2 2000PF; CP3 6 8 20MKF; ЦЕПЬ ОС 14
CB 0 10 100MKF; CP1 1 2 20MKF           15
CP2 5 6 10000MKF                         16
RE 0 7 0 E 12V; ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ         17
RES 0 1 1K E 0V; ИСТОЧНИК ВХОДНОГО СИГНАЛА 18
RB1 30 2 70; RB2 31 4 50; R33 33 3 50.СОПРОТИВЛЕНИЯ 19
T1 3 10 9 GT310E; К Б 9                   БАЗЫ ТРАНЗИСТОРОВ 20
T2 7 31 5 GT402B; T3 0 33 5 GT404B       21
*: СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ                    22
#DC VNALL ALL                             23
#RUN                                        24
#: ОТКЛИК НА СИНУСОИДАЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ 25
```

```

ASIN/SIN/ :ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ SIN      26
,RES,E=0,1*ASIN(2000PHI*TIME):АМПЛ.СИГНАЛА В.1ВОЛЬТ 27
#TIME /-1 0 3MS                          28
#CCTR *PLOT(60) *F V6                    29
#RUN FPER=1MS NPER=1 MAXSTEP=0,05MS     30
*END                                       31

```



Р и с. I

Текст формализованного задания записывается в позициях 1...72 каждой строки. В позициях 73...80 производится нумерация строк.

Строки 2, 22, 25, начинающиеся с символов (\*:), являются заголовками, которые выводятся на печать в начале шага задания. Заголовки необязательны.

В строках с 3 по II описываются параметры биполярных транзисторов. В строках I2...2I описываются узлы подключения и параметры элементов схемы.

Предложения в строках 23, 24 обеспечивают статический анализ схемы по постоянному току (директива \*DC) с печатью всех напряжений, токов, значений параметров и мощностей потерь в элементах (ALL), а также всех узловых напряжений (VALL).

Директива \*RUN указывает начало расчета шага задания. В задании столько шагов, сколько директив \*RUN.

Предложения в строках 26...29 подготавливают сигнал синусоидальной формы с амплитудой 0,1 В и периодом 1 мс, действующий в течение времени (TIME) 0...3 мс, директивой \*DCTR указывают на необходимость произвести расчет сначала статического режима, а затем переходного процесса при заданном синусоидальном воздействии, подготовить результаты расчета переходного процесса для напряжения в узле 6 к выдаче на печать в виде графика (\*PLOT(60)) в 60 точках и по директиве \*F выполнить спектральный анализ формы напряжения в узле 6.

Параметры директивы \*RUN (строка 30) обеспечивают спектральный анализ последнего (третьего) периода в выходном напряжении VB (NPER=1), период анализа равен 1 мс (PPER=1), директива \*END - конец задания.

## 1.2. Масштабирование чисел

Числа (параметры элементов, источников, функций и т.д.) масштабируются по правилу  $N\mathcal{A}$ , где  $N$  - число,  $\mathcal{A}$  - масштабный коэффициент, возможные значения которого перечислены в табл. I.

Т а б л и ц а I

Символическое обозначение префикса	Величина масштабного коэффициента
$D \pm n n$	$10^{\pm n n}$
$E \pm n n$	$10^{\pm n n}$
$T$	$10^{12}$
$G$	$10^9$
$ME$	$10^6$

## Окончание табл. I

Символическое обозначение префикса	Величина масштабного коэффициента
<i>K</i>	$10^3$
<i>M</i>	$10^{-3}$
<i>U</i>	$10^{-6}$
<i>N</i>	$10^{-9}$
<i>P</i>	$10^{-12}$
<i>PHI</i> }	$\mathcal{N} = 3.1415926$
<i>PI</i> }	

При отсутствии  $\mathcal{A}$ , а также при использовании обозначений, отличных от указанных в табл. I, величине  $\mathcal{A}$  присваивается значение I.

Коэффициент  $\mathcal{A}$  может состоять из нескольких символов, однако программа идентифицирует  $\mathcal{A}$  только по первым символам, указанным в табл. I.

Физические величины  $\mathcal{N}\mathcal{A}$  должны задаваться в международной системе единиц (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Физическая величина	Единица измерения
Сопротивление	Ом
Проводимость	См
Индуктивность	Гн
Емкость	Ф
Напряжение	В
Ток	А
Время	с
Частота	Гц

Например, величина 188 Ом может быть представлена в следующем виде: 188, 188OHM, 0.188E3, .188E3, 0.188K, 0.188KOM, 188E-6ME, 188E-6ME6OHM, ..., а величина 125 пФ в виде: 125E-12, 125P, 125PF, 125E-3N, 125P-12, 125E-6U, 125E-6UMKPF, ...

величина  $2\pi$  представляется в виде:  $2PI, 2PI, .2EPI$ .  
Пробелы между числом  $N$  и масштабным коэффициентом  $2$  недопустимы.

### 1.3. Описание компонентов схемы

Каждый компонент схемы описывается одним предложением. Предложение начинается с имени, содержащего произвольное количество символов. Имена предложений различаются по первым 8 символам.

Первый символ (префикс) определяет тип элемента:  $R$  - резистор,  $G$  - проводимость,  $C$  - конденсатор,  $L$  - катушка индуктивности,  $T$  - встроенная модель транзистора или диода,  $V$  - напряжение,  $I$  - ток.

Пробелы используются как разделители и в имени предложения не должны встречаться.

Каждый пассивный двухполюсник схемы описывается одним предложением. Описание двухполюсников показано в строках I2...I6 и I9 примера раздела 1.1.

В одной строке может размещаться несколько предложений, разделенных символами (;). В конце предложения после символа (:) могут помещаться комментарии. Текст между двоеточием и концом строки или точкой с запятой игнорируются при вводе данных. В конце последнего предложения в строке точка с запятой может не ставиться.

Предложение может переноситься в другую строку, для чего в конце строки ставится символ (>):

```
R1 2 15 10K : 5430ВЫА ДЕЛИТЕЛЬ; R2 4 >  
5 25K ; R12 7 14 200
```

Узлы схемы нумеруются произвольным образом числами от 0 до 999. Номер 0 дается базовому (общему) узлу, от которого отсчитываются потенциалы всех узлов. Пробелы используются в качестве разделителей между элементами в предложении. Знаки (,) и (=) воспринимаются программой как пробелы.

### 1.4. Описание независимых источников

Независимые источники (источники сигналов, питания) указываются только в виде субпараметров в описаниях элементов  $R$  и  $G$ .

В примере раздела I.I независимый источник питания описан в строке I7:

```
RE 0 7 0 E 12V : ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ
```

Он включен последовательно с резистором  $R_0$  знаком "+" к узлу 0, а знаком "-" к узлу 7. Внутреннее сопротивление источника равно 0. Источник дает напряжение 12 В. Символ  $V$  является только пояснением к числу 12 (12 В), никак не влияя на его величину, так как не является масштабным множителем из табл. I.

Если источник имеет внутреннее сопротивление, например 0.1 Ом, то он описывается следующим образом:

```
RE 0 7 0.1 E 12V
```

Аналогично описывается источник сигнала:

```
RI 77 II 2.2K E 0.01=SIGNAL(TIME)
```

Здесь источник включен между узлами 77 (знаком "+") и II (знаком "-"), имеет внутреннее сопротивление 2.2 кОм. Источник дает изменяющееся во времени ( $TIME$ ) напряжение. Закон изменения напряжения сигнала задается функцией  $SIGNAL$ , которая должна быть предварительно описана. Константа перед именем функции (в примере 0.01) является обязательной.

В примере раздела I.I в строке I8 вставлено описание источника сигнала с нулевым напряжением:

```
RES 0 1 1K E 0V : ИСТОЧНИК ВХОДНОГО  
: СИГНАЛА
```

Это заготовка для источника, которая не мешает в первом шаге (строки 22...24) произвести расчет по постоянному току. Во втором шаге (строки 25...30) он становится источником синусоидального сигнала:

```
RES 0 1 1K E 0.1*ASIN(20000PI*TIME)
```

что обеспечивается предложениями в строках 26, 27.

Независимые источники тока  $I$  подключаются параллельно проводимости  $G$  :

```
G1 15 4 1E-3 J 0.05A
```

Здесь источник постоянного тока 0.05 А с внутренней проводимостью 0.003 См подключен параллельно проводимости  $\sigma I$  и направлен от узла 15 к узлу 4.

Идеальный источник тока с функциональной зависимостью тока от времени описывается предложением

СИСТ 2 7 8 J 1E-3\*ТОК(TIME)

Функция ТОК должна быть предварительно определена и описана.

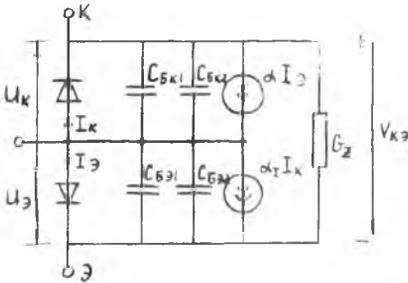
### 1.5. Встроенная модель биполярного транзистора

В программе используется модель Эберса-Молла, составленная для  $n-p-n$  и  $p-n-p$  транзисторов (рис. 2). Модель Эберса-

Молла описывается уравнениями:

$$I_E = \begin{cases} I_S (e^{u_E / m \varphi_T} - 1), & u_E > 0, \\ (I_S u_E) / m \varphi_T, & u_E < 0; \end{cases}$$

$$I_K = \begin{cases} n_I I_S (e^{u_K / (n_V m \varphi_T)} - 1), & u_K > 0, \\ (n_I I_S u_K) / (n_V m \varphi_T), & u_K < 0; \end{cases}$$



Р и с. 2

$$C_{БЭ1} = C_{ЭБ1} \left( \frac{\varphi}{\varphi - u_E} \right)^{\beta_1};$$

$$C_{БК1} = C_{КБ1} \left( \frac{\varphi}{\varphi - u_K} \right)^{\beta_1};$$

$$C_{БЭ2} = \frac{\alpha_I \tau I_E}{m \varphi_T}; \quad C_{БК2} = \frac{\alpha_I \tau I_K}{n_V m \varphi_T}.$$

В исходных данных для каждого транзистора указывается имя модели транзистора (например ПТ310Е в строке 3 примера раздела 1.1), тип проводимости  $PNP$  или  $NPN$  и 15 параметров:

- $I_S$  - ток насыщения эмиттерного перехода ( $I_S$ ) ;
- $V_T$  - температурный потенциал перехода база-эмиттер ( $m \varphi_T$ );
- $n_I$  - множитель для расчета тока насыщения коллекторного перехода ( $n_I I_S$ );

- $NV$  - множитель для расчета температурного потенциала перехода база-коллектор ( $n_V, m\varphi_T$ ) ;
- $TF$  - среднее время пролета носителей через базу при нормальном включении транзистора в схеме ОБ ( $\tau$ ) ;
- $TR$  - среднее время пролета при инверсном включении ( $\tau_I$ ) ;
- $CE, CC$  - барьерные емкости эмиттерного ( $C_{Ej}$ ) и коллекторного ( $C_{Kj}$ ) переходов при нулевом смещении ;
- $FI$  - контактная разность потенциалов ( $\varphi$ ) ;
- $GA$  - показатель степени в выражении для барьерной емкости ( $\gamma$ ) ;
- $GZ$  - выходная проводимость при нулевом смещении ( $G_Z$ ) ;
- $NG$  - коэффициент пропорциональности для выходной проводимости ;
- $AF, AR$  - коэффициенты усиления тока в схеме ОБ в нормальном ( $\alpha$ ) и инверсном ( $\alpha_I$ ) включении ;
- $GS$  - максимальная проводимость перехода.

Имена параметров и их числовые значения разделяются пробелами, знаками (=) или запятыми. Все параметры задаются в международной системе единиц. Параметры могут перечисляться в произвольном порядке и иметь функциональную зависимость:

... AF 1\*FUNC(IRK)...

Здесь параметр  $AF$  функционально зависит от тока через резистор  $RK$ . Функция  $FUNC$  должна быть предварительно определена.

Включение транзистора в схему выполняется предложением вида

T1 3 30 9 GT310E ,

где  $T1$  - обозначение транзистора в схеме (первый символ "T" является обязательным, остальные символы произвольные);

3 30 9 - номера узлов, к которым подключены коллектор, база, эмиттер;

GT310E - имя модели транзистора.

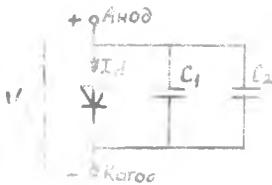
В модели Эберса-Молла не учитывается объемное сопротивление

тела базы. При необходимости оно должно быть дополнительно описано в виде пассивного элемента:

$\begin{matrix} \text{П1} & 3 & 102 & 12 & \text{ГТ8205} \\ \text{RБ} & 5 & 102 & 70 & \end{matrix}$

Здесь  $RБ = 70 \text{ Ом}$  — сопротивление

### 1.6. Встроенная модель диода



Модель полупроводникового диода приведена на рис. 3. Она состоит из идеального диода, описанного выражениями:

$$I_d = \begin{cases} I_S (e^{u_d} - 1) & u_d > 0 \\ -I_S u_d / \varphi_T & u_d < 0 \end{cases}$$

Р и с. 3

барьерной  $C_1$  и дифференциальной  $C_2$  емкостей:

$$C_1 = C_j \left( \frac{\varphi_0}{\varphi_0 - u_d} \right)^\gamma; \quad C_2 = \tau_T I_d / \varphi_T$$

Модель диода в программе описывается семью параметрами:

$I_S$  — обратный тепловой ток ( $I_S$ );

$V_T$  — температурный потенциал перехода ( $\varphi_T$ );

$\tau_T$  — среднее время жизни дырок ( $\tau_T$ );

$C_J$  — барьерная емкость перехода при  $u_d = 0$  ( $C_j$ );

$\varphi_0$  — контактная разность потенциалов перехода ( $\varphi_0$ );

$\gamma$  — показатель степени в выражении для барьерной емкости ( $\gamma$ );

$G_S$  — максимальная дифференциальная проводимость ( $G_S$ ).

Во входных данных, как и для транзистора, сначала описывается модель диода. Например, описание диода с именем D9E должно иметь вид:

$\begin{matrix} \text{D9E/DIODE/ IS=1E-13 VT=0.026 TT=1.2N} \\ \text{CJ=3PF FI=1V GA=0.5 GS=1} \end{matrix}$

В схему диод включается предложением

ТД1 10 4 Д9Е ,

где ТД1 - обозначение диода в схеме (первый символ "Т" является обязательным, остальные символы произвольные);

10 4 - номера узлов, в которых подключаются анод и катод диода;

Д9Е - имя модели диода.

1.7. Встроенная модель полевого транзистора с управляющим  $p-n$  - переходом

В программе используется модель, состоящая из двух генераторов тока с квадратичными характеристиками (рис. 4). Модель описывается уравнениями:

$$I_{GS} = \begin{cases} 0, & V_{GS} \leq V_p, \\ \beta (V_{GS} - V_p)^2, & V_p \leq V_{GS} \leq V_U, \\ \beta (V_U - V_p)^2 + G_P (V_{GS} - V_U), & V_{GS} > V_U; \end{cases}$$

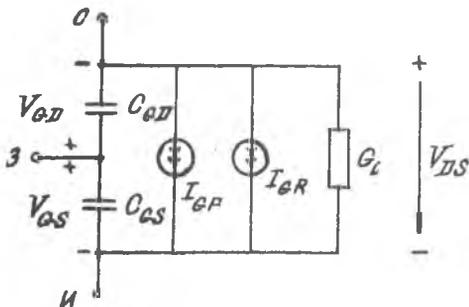
$$I_{GR} = \begin{cases} 0, & V_{GD} \leq V_p, \\ \beta (V_{GD} - V_p)^2, & V_p \leq V_{GD} \leq V_U, \\ \beta (V_U - V_p)^2 + G_R (V_{GD} - V_U), & V_{GD} > V_U; \end{cases}$$

$$C_{GS} = \frac{C_S}{\left(1 - \frac{V_{GS}}{\varphi}\right)^2}; \quad C_{GD} = \frac{C_D}{\left(1 - \frac{V_{GD}}{\varphi}\right)^2}.$$

В исходных данных указывается имя модели транзистора (например КП03И), тип канала ( $NJFET$  - для канала  $n$  - типа,  $PJFET$  - для канала  $p$  - типа) и 9 параметров:

$BE$  - передаточная проводимость ( $\beta$ );

$V_p$  - напряжение отсечки ( $V_p$ , В);



Р и с . 4.

$V_U$  - верхняя граница квадратичного участка проходной характеристики, выше которой она продолжается линейно ( $V_U$ , В);

$C_S, C_D$  - барьерные емкости переходов "затвор-исток" ( $V_S, \Phi$ ): и "затвор-сток" ( $C_D, \Phi$ ) при нулевом смещении;

$F_I$  - контактная разность потенциалов ( $\varphi$ , В);

$G_A$  - показатель в выражении для барьерной емкости ( $\gamma$ );

$G_Z$  - выходная проводимость при нулевом смещении ( $G_Z$ , См);

$n_G$  - коэффициент пропорциональности в выражении для выходной проводимости ( $n_G$ ).

В приведенных выше формулах  $G_P, G_R$  - крутизна проходной характеристики в нормальном и инверсном режимах;

$$G_0 = G_Z + n_G (G_P + G_R).$$

П р и м е р описания параметров модели полевого транзистора:

```
КП103И/PJFET/ VE=1E-3 VP=-3V VM=-0.5V CS=26P >
CD=25P FI=1V GA=0.5 GZ=0 YG=0.1
```

Включение модели полевого транзистора в схему производится предложением

TKPI I2 3 7 КП103И ,

где ТКП - обозначение транзистора в схеме (префикс "Т" обязательный);

I2 3 7 - номера узлов, к которым подключаются сток, затвор и исток;

КП103И - имя модели транзистора.

## 1.8. Полевой транзистор с изолированным затвором (МОП)

Для моделирования характеристик МОП-транзистора используется описанная выше встроенная модель полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом. Модель МОП-транзистора имеет ту же структуру и отличается лишь значениями параметров. В частности, напряжение  $V_p$  принимает отрицательное или положительное значение в зависимости от степени обеднения (обогащения) канала электронами.

Для МОП-транзисторов параметр  $\gamma$  равен нулю.

## 1.9. Описание функций

Программа позволяет моделировать большое количество самых разнообразных функций  $f(x)$ , где аргумент  $x$  может быть временем (*TIME*), падением напряжения (*VRI*) или током (*IR5*) через элемент схемы, значением другой функции.

Встроенная функция вида

$$f(x) = A + B \text{ (функ}((x - C)/D))^{**E}$$

реализуется путем задания конкретных значений параметров  $A, B, C, D$  и "функ". Здесь "функ" - имя одной из функций ФОРТРАНА: *ABS, EXP, LOG, SIN, TAN, ATAN*, либо "пробел" - нет функции.

Пример. Функция

$$f(x) = 0,005 + 7,5 \sin\left(\frac{x - 0,3}{0,00319}\right)$$

описывается предложением

```
FF/SIN/ A=5M B=7.5 C=0.3 D=3.19M E=1
```

Здесь функции дано имя *FF*, имя ФОРТРАН-функции указывается в косых скобках.

По умолчанию параметры принимают значения:

$$A=0; B=1; C=0; D=1; E=1.$$

Пример. Функция  $f(x) = 1 + x$  описывается предложением

```
F1// A=1
```

Параметры  $A, B, C, D$  могут сами иметь функциональную зависимость.

**Пример.** Часто встречающаяся функция синусоидального воздействия вида

$$f(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

при  $U_m = 0.01$  В,  $f = 1$  кГц,  $\varphi = 0.12$  рад описывается предложением

```
ASIN/SIN/ B=0.01 C=-0.12
AIST=1*ASIN(2000PHI+TIME)
```

Здесь значение функции получает переменная  $A(S)$ .

Имеется возможность продолжить описанную функцию либо периодически, либо линейно.

**Пример.** Предложение

```
PN/EXP/ B=1U D=0.26 L=0 U=0.5
```

описывает экспоненциальную характеристику

$$x = 10^{-6} \exp(x/0,26),$$

которая параметрами  $L$  и  $U$  при  $x < 0$  и  $x > 0.5$  аппроксимируется линейной зависимостью.

Продолжение функции задается параметрами, перечисленными ниже:

- $P$  - период. Если  $P > 0$ , то функция  $f(x)$  будет периодической с периодом, равным значению параметра  $P$ ;
- $L$  - нижняя граница. Если  $x < L$ , то  $f(x) = f(L) + f'(L) * (x - L)$ ;
- $U$  - верхняя граница. Если  $x > U$ , то  $f(x) = f(U) + f'(U) * (x - U)$ ;
- $SL$  - крутизна функции на нижней границе. Если  $x < L$  и  $SL \neq 0$ , то  $f(x) = f(L) + SL * (x - L)$ ;
- $SU$  - крутизна функции на верхней границе. Если  $x > U$  и  $SU \neq 0$ , то  $f(x) = f(U) + SU * (x - U)$ ;
- $SM$  - минимально допустимая крутизна функции. Если  $f'(x) < SM$ , то  $f'(x) = SM$ .

Допускается суммирование с функцией  $f(x)$  произвольного количества величин.

Пр и м е р. Присваивание переменной  $SUM$  значения суммы токов через резисторы  $R1, R2, R3, R4, R5$

```
SUMMA/ A=1 1*IR2 1*IR3 1*IR4 1*IR5
SUM=1*SUMMA(IR1)
```

Функции могут задаваться таблично с помощью встроенных функций  $TAB1$  и  $TAB2$ .

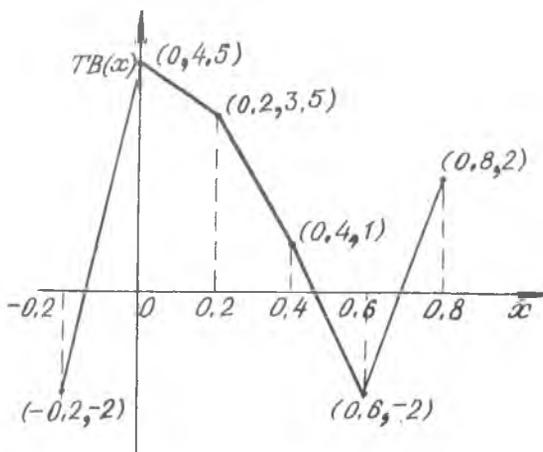
Функция на основе  $TAB1$  задается предложением:

имя - функции ( $TAB$ )  $C$  величина  $D$  величина  $Y1, Y2...$

Эта функция описывает координаты точек, равномерно расположенных на оси  $x$ . Здесь  $C$  - начальное значение  $x = x_{нач}$ ;  $D$  - приращение  $\Delta x$ ;  $Y1$  - значение функции в точке  $C = x_{нач}$ ;  $Y2$  - значение функции в точке  $x_{нач} + \Delta x$  и т.д. Соседние точки соединяются прямыми линиями.

Пр и м е р. Табличное описание функции, изображенной на рис. 5, имеет вид:

```
TB/TAB1/ C=-0.2 D=0.2 -2 4.5 3.5 1 -2 2
```



Р и с. 5

Функция с помощью встроенной функции  $TAB?$  описывается следующим предложением:

имя-функции  $TAB2$  [  $P$  величина  $x_1 x_2 y_1 y_2 \dots$  ]

Здесь  $x_1, y_1, x_2, y_2, \dots$  — координаты точек, через которые проходит функция. Соседние точки соединяются прямыми линиями. Информация в квадратных скобках необязательна. Параметр  $P$  указывает, что функция периодическая с периодом, равным значению "величина", и что функция задана только на одном периоде.

Пример. Функция, изображенная на рис. 5, описывается предложением

$TB1/TAB2/$  в 0 1 в 2 в.1 5 в.1 7 в 11 в

Эту функцию можно сделать периодической с периодом, например 10.

$TB1/TAB2/ P=10$  в 0 1 в 2 в.1 5 в.1 7 в 11 в

В общем виде функциональные зависимости вводятся следующим образом:

константа  $\{ / \}$  имя-функции ( [ константа  $\{ / \}$  ] аргумент).

Информация в квадратных скобках необязательна. Здесь "имя-функции" — имя предварительно описанной функции, "аргумент" — параметр или отклик схемы (ток или напряжение ветви).

Пример. Генератор импульсного сигнала с внутренним сопротивлением 2.2 кОм, включенный между узлами 7 и 11, может быть задан следующим образом:

$RG 7 11 2.2k E 0.2=TB1(IME=TIME)$

Амплитуда импульса равна 0.02 В, единичному интервалу на оси  $x$  (рис. 6) соответствует 1 мкс, аргументом является время ( $TIME$ ).

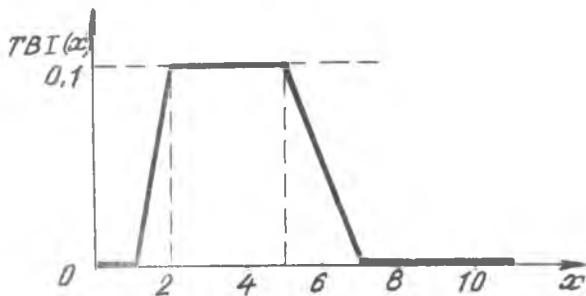
Имеется возможность реализовать функциональную зависимость в виде деления и умножения без введения специальной функции:

константа  $[ * \text{ аргумент } ] \{ / \}$  аргумент.

Примеры.

```

SN=1+SQM(IR4)
KY312,AF=1+FAF(IRC)
OF=1+IRNAFF/IRT
G22 0 1 0 J 1+FSIN(TIME)
SMM=1+SM*OF
R12=0.1+SMH
    
```



Р и с. 6.

### 1.10. Зависимые и нелинейные источники

Зависимые источники напряжения  $V$  или тока  $I$  управляются напряжением или током пассивных элементов.

Пр и м е р.  $G1 \ 1 \ 7 \ 1E-6$   
 $VIST \ 2 \ 3 \ 0.08 \ vG1$

Здесь зависимый источник напряжения  $VIST$  управляется напряжением на элементе  $G1$ . Крутизна управления равна  $0.08$ .

Пр и м е р.  $R55 \ 7 \ 2 \ 1K$   
 $IL \ 4 \ 20 \ 100 \ vR55$

Зависимый источник тока  $IL$  управляется с крутизной  $100$  напряжением на резисторе  $R55$ .

Аналогично описываются зависимые источники, управляемые током.

В нелинейные управляемые источники вводятся функциональная зависимость тока источника от напряжения на этом источнике или напряжения источника от тока через источник.

Пр и м е р  
 $FZ // E=4.4 \ L=-5 \ U=5$   
 $ISZ \ 10 \ 20 \ 1E-2 * FZ(V|SZ)$

Здесь  $ISZ$  - имя источника тока;  
 $VISZ$  - напряжение на источнике  $ISZ$ .

Пр и м е р.  $VA \ 3 \ 17 \ 0.01 * FZ(I|VA)$

Здесь  $VA$  - имя источника напряжения, а  $I|VA$  - ток через него.

В программе реализовано перемножающее устройство. Например, величина тока зависимого источника тока  $I_{ZAV}$  будет равна произведению напряжений на элементах  $R_X$  и  $R_Y$ , если использовать предложение  $I_{ZAV} = 25 \cdot V_{RX} \cdot V_{RY}$ .  
Здесь ток вытекает из узла 5 и втекает в узел 25.

## I.II. Использование переменных

Переменные используются для хранения промежуточных результатов вычислений, численных значений функций. Переменная имеет имя, которое может начинаться с любой буквы кроме  $V, I, W, PW$ . С использованием переменных мы уже встречались в разделе I.9, где переменные с именами  $SM, DF, SMM, R12$  получали значения функций.

П р и м е р ы.

```

SUM1//1*CEPS ; ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ SUM1
PREAL=-0,5*SUM1(G1); ПЕРЕМЕННАЯ PREAL ПОЛУЧАЕТ
      : ЗНАЧЕНИЕ PREAL=-0,5*(G1*CEPS)
SUM2// 1 -1*PREAL*PREAL;ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ SUM2
ARG=1*SUM2(W11);ПЕРЕМЕННАЯ ARG ПОЛУЧАЕТ
      : ЗНАЧЕНИЕ ARG=1-PREAL**2*W11
SORT// E=0,5 ;ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ SORT
PIMAG=1*SORT(ARG); ПЕРЕМЕННАЯ PIMAG ПОЛУЧАЕТ
      : ЗНАЧЕНИЕ PIMAG=SQRT(1-PREAL**2*W11)
PI// -1*EPIT2 1*MINU; ОПРЕДЕЛЕНИЕ
      : ФУНКЦИИ П1(X)=X-EPIT2*MINU
P2/LOG/ A=1*P1(OP) B=1*TP1 D=1*MAC2 : ОПРЕДЕЛЕНИЕ
      : ФУНКЦИИ П2(X)=П1(OP)+TP1*LOG(X/MAC2)
F=0,5*P2(AL); ПЕРЕМЕННАЯ F ПОЛУЧАЕТ ЗНАЧЕНИЕ
      : F=0,5*((OP-EPIT2*MINU)+TP1*LOG(AL/MAC2))

```

В программе ПРАМ-2.6 предусмотрены 5 встроенных параметров, значения которым присваиваются программой в процессе работы.

В данных методических указаниях рассматриваются только три параметра:

*TIME* - независимая переменная при анализе статического состояния (\*DC) и (или) переходных процессов (\*TR);

*FREQ* - мнимая часть комплексной частоты, деленная на  $2\pi$ ;

*TEMP* - температура окружающей среды в градусах Цельсия.

В начале расчета все встроенные параметры, кроме *TEMP*, по умолчанию принимают значения, равные нулю. Параметр *TEMP* имеет начальное значение, равное +25°C. Значения параметров диективно могут быть изменены.

Пример использования встроенных параметров:

ASIN/SIN/ : ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ SIN

```
R1 2 5 0.2 E 0.01*ASIN(2000PHI*TIME)
:R1.E- ИСТОЧНИК СИГНАЛА СИНУСОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ
:      С ЧАСТОТой 1 КГц
```

## 2. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ АНАЛИЗА СХЕМЫ

### 2.1. Изменение описаний компонентов

Любое из предложений описания компонентов электронной схемы может быть изменено, заменено или удалено.

Исправляющее предложение начинается с символа (.) и может быть вставлено в текст формализованного задания в любом месте после исправляемого предложения.

Пример. Исправляемые предложения:

```
N1=1
FF/SIN/ 0=1*N1
R1 2 3 1K E 0
R5 4 10 5.6K
R6 2 7 3.3K
```

Исправляющие предложения:

```
,R1,E=0,01*FF(5000*PI*TIME)
,N1=5
,R1=5.6K
,R5 5 24 10K
,R6=1.2K
```

Результат:

```
N1=5
FF/SIN/ 3=1*N1
R1 2 3 5.6K E 0.01*FF(5000*PI*TIME)
R5 5 24 10K
R6 2 7 1.2K
```

Любое предложение может быть удалено, для этого указывается имя удаляемого предложения и знак "минус".

П р и м е р.

R1- ;УДАЛЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ОПИСАНИЯ РЕЗИСТОРА R1

## 2.2. Модификация параметров

Изменение параметров компонентов можно производить также с помощью директивы \* *MODIFY*.

Эта директива вставляется после описания схемы перед той управляющей директивой, по которой должен быть выполнен анализ схемы с заданными в \* *MODIFY* изменениями.

П р и м е р ы.

```
*MODIFY RK=3.3K R3=2.7K
```

```
*MODIFY RE.E 15V RES.E=0,2V ;ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ
:ИСТОЧНИКОВ, ВКЛЮЧЕННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО С РЕЗИС-
:ТОРАМИ RE И RES
```

```
*MODIFY RS*1.1 ROC/1.5 ;ПАРАМЕТР RS УВЕЛИЧИВАЕТСЯ
:В 1.1 РАЗ, А ПАРАМЕТР ROC УМЕНЬШАЕТСЯ В 1.5 РАЗ
```

```
*MODIFY T1.VT=0.026V T2.AF=0,956 ;МОДИФИКАЦИЯ
:ПАРАМЕТРА VT ТРАНЗИСТОРА T1 И ПАРАМЕТРА AF
:ТРАНЗИСТОРА T2
```

### 2.3. Анализ схемы по постоянному току

Расчет режима по постоянному току выполняется по директиве \*DC,

В примере раздела 1.1 директива \*DC находится в строке 23. Она указывает, что необходимо произвести расчет режима по постоянному току с печатью всех напряжений, токов, значений параметров и мощностей потерь в элементах (ALL), а также всех узловых напряжений (VNULL).

Если необходимы только узловые напряжения, то директиву следует записать так:

```
*DC VNULL
```

Для исключения любой печати директива \*DC записывается без параметров.

### 2.4. Оптимизация параметров

Программа обеспечивает возможность подстройки параметров схемы для достижения оптимального режима по постоянному току.

Запись директивы оптимизации (\*OPTIM) рассмотрим на примере формализованного задания для анализа схемы рис. 1.

```
П р и м е р.      *OPTIM 0.001 R3 3,3K 1K 10K 0,5K >
                  REM 750 500 1000 100
                  *CC *PRINT R3 REM V5=6V IRK=2MA
```

Здесь путем оптимизации значений резисторов *R3* и *REM* обеспечивается напряжение 6 В в узле 5 ( $V5 = 6V$ ) и ток 2 мА через резистор *RK* ( $IRK = 2mA$ ). Оптимальные значения *R3* и *REM* определяются с погрешностью 0.001. Начальное значение *R3* равно 3.3 кОм. Поиск оптимального значения *R3* ведется в пределах от 1 кОм до 10 кОм с начальным шагом 0.5 кОм. Аналогичные параметры задаются для резистора *REM*. Промежуточные решения печатаются в виде таблицы (\*PRINT R3 REM в директиве \*DC).

Директиву оптимизации можно записать проще:

```
*OPTIM R3 REM
*CC V5=6V IRK=2MA VNULL
```

По умолчанию погрешность равна 0.01 оптимум ищется в пределах от 0 до IE74, шаг выбирается автоматически, по завершению процесса оптимизации на печать будут выданы напряжения во всех узлах (VNA44).

## 2.5. Расчет чувствительности

Чувствительность компоненты координатного базиса  $X_i$  к изменению параметра  $C_j$  равна

$$S_{ij} = \frac{\partial X_i}{\partial C_j} C_j$$

Компоненты координатного базиса, или отклик цепи — это узловые напряжения, падения напряжений на элементах, токи независимых источников, индуктивных ветвей и резистивных ветвей типа  $R = 0$ .

Чувствительность  $S_{ij}$  позволяет рассчитать приращение  $\Delta X_i$  отклика  $X_i$  цепи по известному относительному изменению параметра  $C_j$ :

$$\Delta X_i = S_{ij} V_j$$

где  $V_j = \Delta C_j / C_j$  — относительное изменение параметра  $C_j$ .

Пусть в схеме рис. 1 требуется определить и напечатать чувствительность напряжения в узле 5 к изменению величин резисторов  $R_2$  и  $R_3$ . Для этого следует использовать директиву:

■DC V4/R2 V4/R3 или ■DC V4/R2/R3

## 2.6. Наихудший случай и оценка влияния разброса параметров компонентов

Для оценки влияния разброса параметров элементов на заданную компоненту координатного базиса директивой \*MODIFY назначаются допуски элементов и присваиваются классы допусков. Класс допуска на результаты расчетов никакого влияния не оказывает, он нужен только для обозначения допусков при распечатке результатов решения.

П р и м е р.

■MODIFY 2 0.05 0.15 R2 R4

Здесь резисторам  $R2$  и  $R4$  назначен класс допуска 2 с относительным положительным отклонением 0.05 и отрицательным - 0.15.

Для каждого класса допуска записывается отдельная директива \*MODIFY. Расчет наилучшего случая производится директивой \*DO с субпараметром \*WORST и компонентой координатного базиса, для которой ищется наилучший случай.

Пример записи директивы расчета наилучшего случая для напряжения в узле 5 при отклонении  $\pm 10\%$  параметров элементов  $R1, R2, R3$  напряжения источника питания:

```
*MODIFY 1 A.1 4 F1 R2 R3 RE.E  
*DO *WORST V5
```

Результаты расчетов выводятся на печать тремя таблицами. Каждая таблица состоит из 4-х столбцов.

В первом столбце указываются имена элементов, для которых назначены допуски по директиве \*MODIFY. Во втором столбце - величины параметров элементов: в первой таблице - номинальные, во второй - с отклонением в пределах допусков, обеспечивающих минимальное наилучшее значение для выходного параметра ( $V5$  в предыдущем примере), в третьей - с отклонениями в пределах допусков, обеспечивающих максимальное наилучшее значение для выходного параметра.

В третьем столбце каждой таблицы помещается величина  $S_j \Delta_j$ , где  $\Delta_j$  - относительная величина интервала изменения (допуска) параметра  $j$ -го элемента схемы;  $S_j$  - чувствительность выходного параметра к изменению величины  $j$ -го элемента.

В начале каждой таблицы печатается значение выходного параметра: номинальное, наилучшее минимальное и наилучшее максимальное соответственно.

В конце каждой таблицы печатается величина

$$RSS = \sqrt{\sum_{j=1}^n (S_j \Delta_j)^2},$$

которая может рассматриваться как среднеквадратическое значение разброса выходного параметра и может быть более полезной, чем оценка по методу наилучшего случая, т.е. когда всем параметрам присваиваются значения на границах их интервалов изменения.

В четвертых столбцах таблиц указываются классы допусков. Напомним, что оценку допусков, как правило, производят по данным первой таблицы.

Допуски могут назначаться и на параметры транзисторов.

П р и м е р.

```
*MODIFY 3 0.15 KT319B.15 KT319B.TF KT319B.AF
```

Здесь параметрам *IS*, *TF*, *AF* транзистора KT319B назначен класс допуска 3 с относительным отклонением  $\pm 0.15$ .

## 2.7. Вариация параметров

В программе вариация параметров обеспечивается с помощью двух директив:

*TIME* - вариация параметров при анализе во временной области и по постоянному току;

*FREQ* - вариация параметров при анализе в частотной области.

С помощью этих директив изменяются любые параметры и константы в указанных пределах.

П р и м е р ы.

```
*TIME 0 50 0.10; ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОТ 0 ДО 5 МКС  
:С ПОСТОЯННЫМ ШАГОМ 0.1 МКС  
*TIME 0 50; ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОТ 0 ДО 5 МКС  
:С АВТОМАТИЧЕСКИМ ВЫБОРОМ ШАГА (ШАГ ПЕРЕМЕННЫЙ)  
*TIME R1,E 0 10V 0.5V; ИЗМЕНЕНИЕ Э.Д.С. ВКЛЮЧЕННОЙ  
:ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО С R1, ОТ 0 ДО 10В С ПОСТОЯННЫМ  
:ШАГОМ 0.5В  
*TIME R1,E 0 10V; ИЗМЕНЕНИЕ Э.Д.С. С АВТОМАТИЧЕСКИМ  
:ВЫБОРОМ ШАГА  
*TIME R2 10K 5K 5K; ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПАРАМЕТРА  
:РЕЗИСТОРА R2 ОТ 10 ДО 5К С ШАГОМ 5К  
*TIME /-1 0 2E-6; ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОТ 0 ДО 2МКС  
:С ИНТЕРВАЛОМ ВЫДАЧИ НА ПЕЧАТЬ РАВНЫМ УПРАВЛЯЮЩЕМУ  
:ПАРАМЕТРУ MAXSTEP В ДИРЕКТИВЕ *RUN, НАПРИМЕР,  
:ПО СЛЕДУЮЩЕЙ ЗАТЕМ ДИРЕКТИВЕ *RUN MAXSTEP=4E-8  
:ПЕЧАТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА БУДЕТ ПРОИЗВОДИТЬСЯ  
:С ШАГОМ 0.04МКС  
*FREQ 1HZ 100KHZ; ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТЫ ОТ 1 ГЦ ДО 100 КГЦ  
:С АВТОМАТИЧЕСКИМ ВЫБОРОМ ШАГА  
*FREQ 40HZ 1MENZ -100; ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТЫ С ЛОГАРИФИ-  
:ЧЕСКИМ ШАГОМ, КОЛИЧЕСТВО ТОЧЕК В ИНТЕРВАЛЕ ОТ 40 ГЦ  
:ДО 1 МГЦ РАВНО 100  
*FREQ 100KHZ 200KHZ 2KHZ; ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТЫ ОТ 100 КГЦ  
:ДО 200 КГЦ С ПОСТОЯННЫМ ШАГОМ 2 КГЦ
```

## 2.8. Расчет температурных зависимостей

В программе моделируются температурные зависимости токов переходов транзисторов и диодов соотношениями

$$m\varphi_T = \xi m\varphi_{T0};$$
$$I_S = \xi^3 I_{S0} e^{\frac{E_g}{m\varphi_{T0}} \left(1 - \frac{1}{\xi}\right)},$$

где  $\xi = T / 300$ ;

$T = 273 + TEMP$  - абсолютная температура;

$TEMP$  - температура по шкале Цельсия;

$m\varphi_{T0}$  и  $I_{S0}$  - значения  $m\varphi_T$  и  $I_S$  при комнатной температуре;

$E_g = 1,1 В$  - ширина запрещенной зоны.

Пример.

```
*TIME TEMP -50 60
*DC *PL3T(50) IR3 IRK v5
```

Здесь температура изменяется от  $-50$  до  $60^{\circ}\text{C}$  с автоматическим выбором шага. Результат выдается в виде графика. На графике в 50-ти точках по оси аргумента ( $TEMP$ ) печатаются значения токов через резисторы  $R3$  и  $RK$  и напряжения в узле 5.

Шаг расчета можно задавать директивно:

```
*TIME TEMP -50 60 2
```

Здесь температура  $TEMP$  будет меняться от  $-50$  до  $60^{\circ}\text{C}$  с шагом  $2^{\circ}\text{C}$ .

## 2.9. Спектральный анализ

Задание на проведение спектрального анализа приведено в строках 25...30 формализованного задания для схемы рис. 1 (см. пример раздела 1.1).

В строке 26 определяется синусоидальная функция  $ASIN$ . В строке 27 с помощью этой функции формируется источник сигнала синусоидальной формы с частотой 1 кГц и амплитудой 0.1 В, включенный последовательно с резистором  $RES$ , описанном в строке 18.

Директивой *TIME* в строке 28 назначается интервал времени анализа 0...3мс, в котором укладывается три периода синусоидального сигнала.

Директивы в строках 29, 30 задают вид анализа и режим расчета: будет произведен расчет переходного процесса с предварительным расчетом режима по постоянному току (\**DCTR*), результаты расчета напряжения в узле 6 (*V6*) в зависимости от времени будут выданы на печать в виде графика (\**PLOT(60)*) с числом точек по оси времени, равным 60, по результатам расчета будет произведен гармонический анализ (директива \**FA*) одного, последнего периода (*NPER* = 1) длительностью *PERIOD* (3 мс) напряжения в узле 6.

Количество вычисляемых гармоник зависит от количества расчетных точек в периоде, заданных директивой \**PLOT*.

Если в периоде 20 точек, то вычисляются 15 гармоник, 40 точек – 25 гармоник и т.д. При спектральном анализе рекомендуется всегда использовать режим с субпараметром *MAXSTEP* в директиве \**RUN*.

Результаты расчетов выдаются на печать в виде таблицы спектральных линий, длина которых равна отношению амплитуды *n*-й гармоники к амплитуде 1-й гармоники в децибелах.

В таблице печатаются амплитуды, фазы, эффективные значения гармоник. Перед таблицей печатается значение постоянной составляющей анализируемого сигнала, в конце таблицы – значение коэффициента гармоник в относительных единицах.

Для обеспечения сходимости расчета переходного процесса целесообразно в области директив добавить строку вида:

```
*MODIFY VNALL=1e0 IALL=1e0
```

Эта директива обеспечивает замену относительного критерия сходимости, принятого в программе по умолчанию, на абсолютный. Значения параметров *VNALL* и *IALL* могут задаваться в широких пределах от  $10^{-5}$  до  $10^5$ . Чем больше эти параметры, тем лучше сходимость, но ухудшается точность.

## 2.10. Анализ переходных процессов

Программа позволяет вычислять реакцию в любой точке исследуемой схемы на воздействие сигнала произвольной формы.

Рассмотрим пример записи директив для анализа переходных процессов в схеме рис. 1 на входной импульс трапецидальной формы:

```
PULSE/TAB2/ 0 0 .3US # .35US 1 1.3US >
  1 1.35US 0 10US 0
,RES.E=0,1*PULSE(TIME)
*TIME /-1 0 2US
*DCTR *PLOT(100) RES.E V2 V4 V5 IRK
*RUN MAXSTEP=0.02US
```

Импульс трапецидальной формы длительностью 1 мкс задается функцией *PULSE*, построенной на основе встроенной функции *TAB2*

По директиве *\*DCTR* сначала производится расчет стационарного режима по постоянному току, а затем переходного процесса в интервале времени, заданном директивой *\*TIME*.

Результаты расчетов выдаются на печать в виде графика в 100 точках по оси времени. В соответствии с директивой *\*DCTR* на печать выдаются входной импульс (*RES.E*), графики переходных процессов напряжения в узлах 2, 4, 5 и тока через резистор *РК*. Все графики печатаются в одних координатных осях. Для каждой переменной масштаб выбирается автоматически из условия обеспечения максимального размаха в пределах поля графика.

Если переменные *RES.E*, *V2*, *V4*, *V5* требуется вывести в одном масштабе, то директиву *\*DCTR* следует записать в виде

```
*DCTR *PLOT(100) *Y RES.E *Y V2 *Y V4 *Y V5 IRK
```

Для всех переменных с субдирективами *\*Y* будет вычислен один масштаб.

Масштаб по оси *Y* может задаваться директивно.

Пример.

```
*DCTR *PLOT(100) RES.E 0 0,2V *Y V2 >
-10V 0V *Y V4 *Y V5 IRK 0 4mA
```

Здесь переменная *RES.E* печатается на графике от 0 до 0,2 В, напряжения в узлах 2, 4, 5 печатаются в пределах от -10 до 0 В, а ток *IRK* от 0 до 4 мА.

Для предотвращения аварийных ситуаций следует переходить от относительного критерия сходимости к абсолютному так, как показано в разделе 2.9.

## 2.II. Анализ частотных характеристик

Данный анализ производится по директиве *\*AC*. Предварительно по директиве *\*DC* должен быть выполнен расчет режима по постоянному току.

В полученной рабочей точке параметры нелинейных элементов линеаризируются, т.е. формируется малосигнальная линейная модель устройства, по которой и производится расчет частотных характеристик:

Результаты анализа – комплексные числа, которые выводятся на печать с помощью директив:

- \*RE* – вещественная часть (по умолчанию);
- \*IM* – мнимая часть;
- \*MA* – амплитуда;
- \*DB* – амплитуда в децибелах;
- \*PH* – фаза в градусах;
- \*RAD* – фаза в радианах.

П р и м е р.

```
•DC VNULL
•FREQ IS 10MHZ -60
•AC •PLOT •DB •PH V7/E1
•RUN
```

Здесь частота изменяется от 10 Гц до 10 МГц в логарифмическом масштабе. Число точек на оси частот равно 60. По директиве *\*AC* производится частотный анализ и на печать выдается график (*\*PLOT*) зависимости амплитуды в децибелах и фазы в градусах отношения напряжения в узле 6 к напряжению фиктивного источника ЕДС, включенного последовательно с резистором *RES*.

### 3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СТРУКТУРЕ ЗАДАНИЯ, ВИДАХ АНАЛИЗА, СПОСОБАХ ВЫВОДА НА ПЕЧАТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Типовая структура многошагового задания на расчет электронной схемы имеет вид:

**\* CIRCUIT**

{ Описание элементов схемы }  
{ Директивы управления заданием }

**\* RUN**

{ Замена, удаление элементов схемы и описание новых элементов }

**\* RUN**

{ Директивы управления заданием }

**\* RUN**

.....

**\* RUN**

**\* END**

Программа имеет следующие директивы, определяющие вид анализа:

**\* DC** - анализ по постоянному току;

**\* DC TR** - расчет режима по постоянному току с последующим расчетом переходных процессов;

**\* TR** - расчет переходных процессов с нулевыми начальными условиями, с начальными условиями, задаваемыми пользователем с помощью директивы **\* MODIFY** или предварительно рассчитанными по директиве **\* DC**;

**\* AC** - анализ в частотной области.

Вывод результатов расчета на печать производится директивами:

**\* PRINT** - печать таблицы;

**\* PLOT** - печать графиков;

**\* P PLOT** - печать результатов в виде таблиц и графиков.

По этим директивам на печать могут выводиться:

- а) переменные с именем  $R1\ C2\ KT312.AF\ R1.E\dots$  ;
- б) отклики цепи  $V1\ VR1\ IC2\ IR2\dots$  ;
- в) передаточные функции  $V1/ER5\ IR2/JG2\dots$  ;
- г) функции чувствительности  $V5/ERBT\ VRS/IC2\dots$  ;

где  $V1, V5$  - напряжения в узлах 1 и 5

$VR1, VRS$  - падения напряжения на резисторах  $R1$  и  $RS$  ;

$IC2, IR2$  - токи через элементы  $C2$  и  $R2$  ;

$ER5, ERBT$  - напряжения фиктивных источников напряжения, включенных последовательно с резисторами  $RS$  и  $RBT$  ;

$JG2$  - ток фиктивного источника тока, включенного параллельно проводимости  $G2$  ;

$R1.E$  - напряжение источника питания или сигнала, включенного последовательно с резистором  $R1$  ;

$KT312.AF$  - параметр  $AF$  транзистора  $KT312$ .

П р и м е р.

```
*OCTR *PRINT CX V5 *PLOT V6 VCX ICX
```

Печатается таблица значений  $CX, V5$  и графики  $V6, VCX, ICX$  в зависимости от времени. Шаг по времени и масштаб для каждого параметра выбирается автоматически.

По директиве  $*RUN$  начинается расчет описанного выше варианта задания.

Директива  $*END$  - конец формализованного задания.

#### Библиографический список

1. Ильин В.Н. Основы автоматизации схемотехнического проектирования. - М.: Энергия, 1979. - 392 с.
2. Чуа Л.О., Лин П.М. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы /Пер. с англ. Ред. В.Н.Ильин. - М.: Энергия, 1980. - 640 с.
3. Разевиг В.Д., Раков В.К., Капустян В.И. Машинный анализ и оптимизация электронных схем. - М.: МЭИ, 1981. - 80 с.
4. Удалов Н.Н., Разевиг В.Д. Программа анализа нелинейных радиоэлектронных схем на ЕС ЭВМ. - М.: МЭИ, 1981. - 90 с.