

РАСЧЁТНОЕ ЗАДАНИЕ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ № 2 «МАКРОМОДЕЛЬ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ»

При моделировании сложных электрических схем используют различные способы их упрощения. Все они связаны с понятием *иерархии*.

4.1 Иерархические блоки

Любой фрагмент схемы можно оформить в виде иерархического блока, символ которого представляет собой прямоугольник, и затем разместить его на схеме, что позволяет уменьшить ее размеры. Другое применение иерархических блоков – представление с их помощью повторяющихся фрагментов схем: различных фильтров, усилителей, выпрямителей, сумматоров и тому подобное.

4.2 Макромодели (схемы замещения)

Концепция макромоделей впервые была обнародована в 1970-х. Макромодели являются одним из типов SPICE-моделей и применяются для сокращения времени SPICE-моделирования системы и сходимости ошибок. Они дают возможность разработчику сконцентрировать усилия на высокоуровневом моделировании системы. Тем не менее, разработчики охотно применяют макромодели устройств и для моделирования систем, включающих много таких устройств.

Моделируемое устройство воспринимается как чёрный ящик. Существует три общих класса моделей моделирования: поведенческая модель, макромодель и модель с детализацией на уровне транзисторов (рисунок 1). Степень сложности каждого класса возрастает в порядке их перечисления в списке.

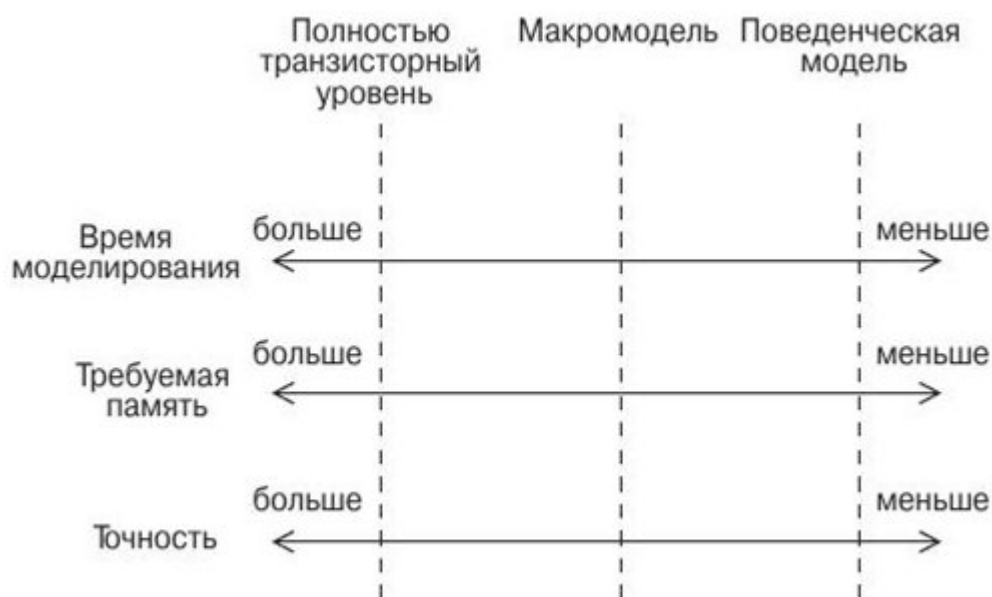


Рисунок 1 – Классы моделей

Модели на уровне транзисторов сложнее, чем макромодели или поведенческие модели, поэтому моделирование на таком уровне требует больше времени и большего объёма памяти. Такие завышенные требования могут замедлить процесс моделирования, особенно если в схеме имеется несколько моделей на уровне транзисторов. Тем не менее, если продолжительность процесса моделирования не имеет значения, то на уровне моделей транзисторов моделирование даст более точные результаты. Все три типа моделей могут точно подходить для конкретной схемы, но быть непригодными для других приложений.

Поведенческая модель наиболее точно отображает устройство как чёрный ящик. Она имеет весьма отдалённое или вовсе не имеет никакого отношения к реальному физическому устройству и моделирует только поведение реального объекта. С помощью макромодели можно выполнить более комплексное моделирование схемы; в данный тип модели обычно включаются модели реальных транзисторов во входных и выходных узлах. На таком уровне детализации модель более точно отражает работу реального устройства, хотя и не полностью.

Хотя сложность элементов макромодели сопоставима со сложностью транзисторной модели, количество элементов в листинге модели будет меньше. Суммарная сложность, или «интеллектуальность», макромодели будет ниже, чем модели на уровне транзисторов, поскольку макромодель, кроме моделирования списка определённых параметров, ничего больше не делает. Многие производители декларируют эти параметры в листинге SPICE-макромоделей.

Моделирование на системном уровне может включать сотни «строительных» блоков. При этом невозможно осуществить моделирование на уровне транзисторной SPICE-модели или макромодели. Даже если эти два уровня моделей приводят к сходимости и дают результаты, моделирование на системном уровне намного точнее при использовании правильно описанных поведенческих модулей. Применение в моделировании на уровне системы транзисторных моделей и макромоделей из-за их сложности приводит к потере точности и увеличению времени моделирования.

Как следствие, полная модель устройства в процессе моделирования потребует намного больше ресурсов памяти компьютера и будет выполняться дольше. При моделировании нескольких устройств одновременно, например, пяти- или шестиуровневых транзисторных операционных усилителей, SPICE-моделирование, скорее всего, завершится аварийным отказом, и получить результаты будет невозможно.

Отдельные фрагменты цепи или схемы замещения компонентов имеет смысл оформлять в виде макромоделей (подсхем). Описание макромодели начинается директивой `.SUBCKT` и заканчивается директивой `.ENDS`. Между ними помещаются описания компонентов, входящих в состав макромодели:

```
.SUBCKT <имя макромодели> <список узлов>  
+ [OPTIONAL:<<узел интерфейса>  
= <значение по умолчанию>*>*}
```

```
+ [PARAMS:<имя параметра>=<значение>*}  
+ [TEXT:<имя текстовой переменной> - <текст>*<имя макромодели>]  
{описание компонентов}  
.ENDS
```

Ключевое слово **OPTIONAL** используется для спецификации одного или более необязательных узлов макромодели – указываются имя узла и его значение по умолчанию. Если при вызове макромодели эти узлы не указываются, используются их значения по умолчанию, что удобно для задания источников питания цифровых устройств; после ключевого слова **PARAMS** приводится список параметров, значения которых передаются из основной цепи в макромодель. После ключевого слова **TEXT** – текстовая переменная, передаваемая из описания основной цепи в описание макромодели (используется только при моделировании цифровых устройств). Между директивами **.SUBCKT** и **.ENDS** можно помещать описания других макромоделей и другие директивы.

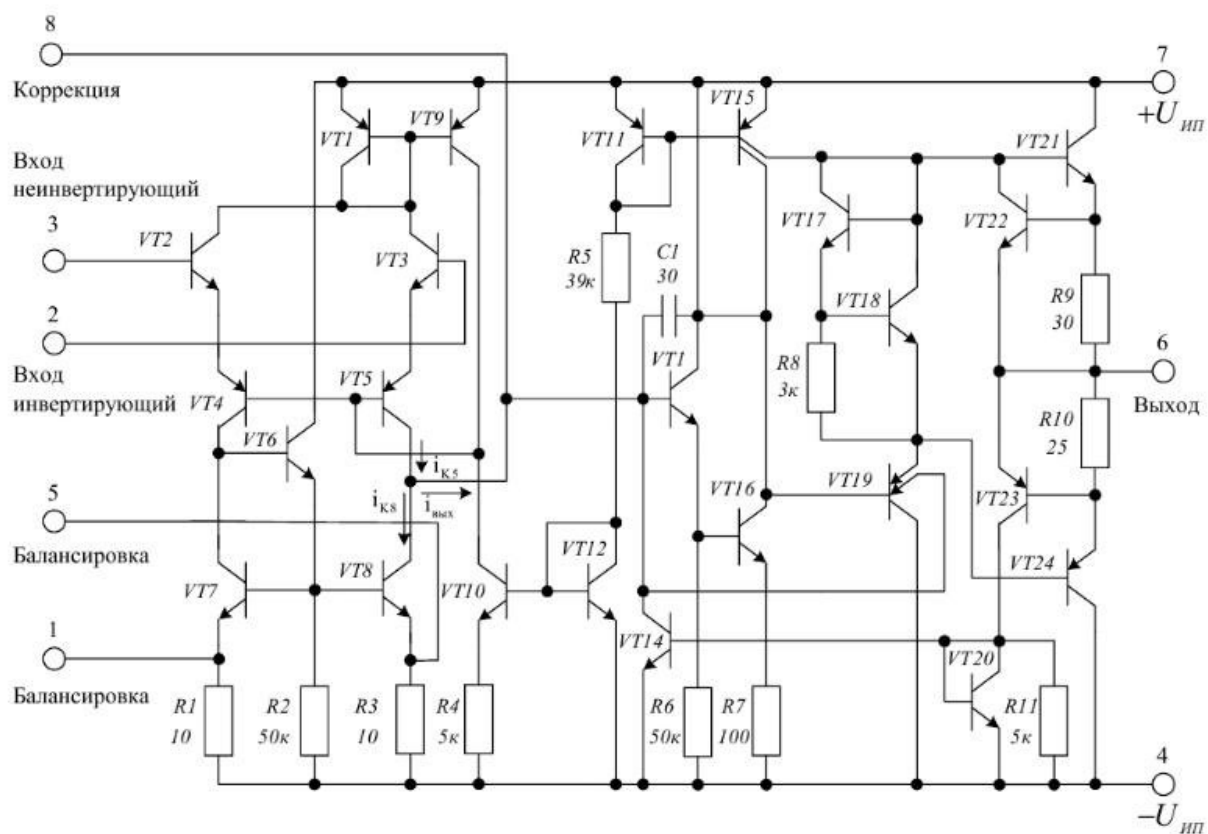


Рисунок 2 – Схема электрическая принципиальная ОУ К140УД7

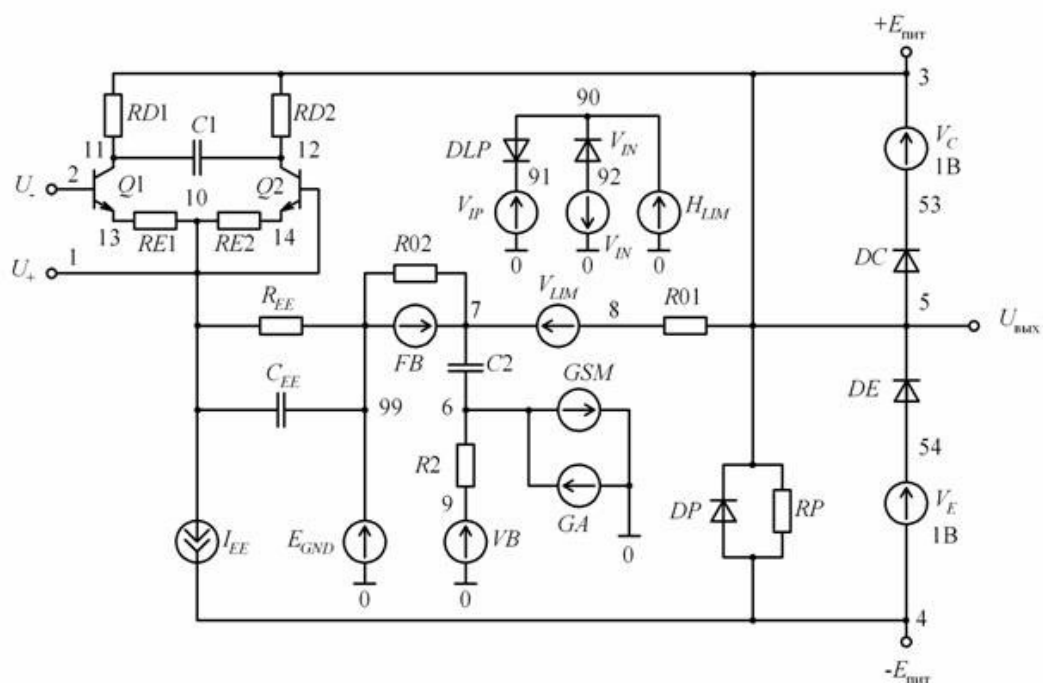


Рисунок 3 – Макромодель К140УД7

Как видно, реальная схема операционного усилителя К140УД7 (рисунок 2) содержит 23 биполярных транзистора, 11 резисторов и одну ёмкость. В то время как его макромодель (рисунок 3) использует транзисторы только на входном дифференциальном каскаде, так как он должен быть наиболее точно промоделирован.

Ниже (рисунок 4) по аналогии представлена полная электрическая схема операционного усилителя К140УД11 и описание его макромодели (листинг 1).

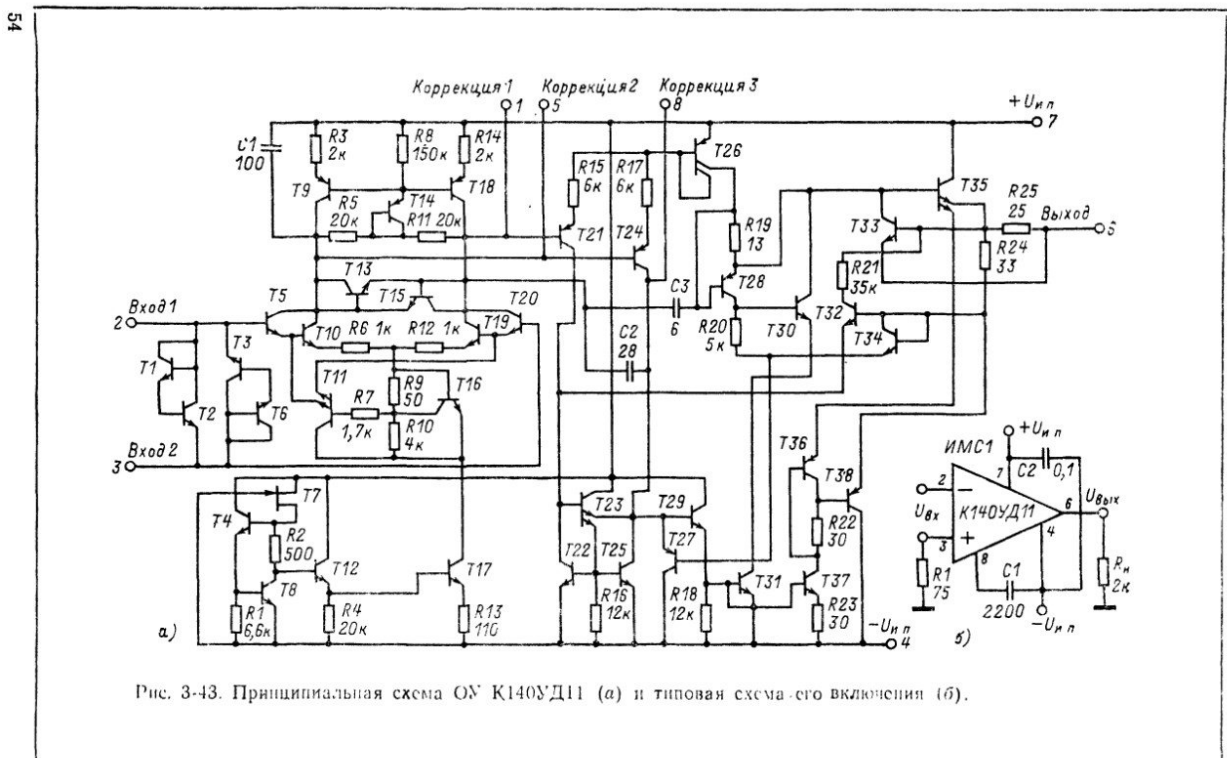


Рис. 3-43. Принципиальная схема ОУ К140УД11 (а) и типовая схема его включения (б).

Рисунок 4 – Схема электрическая принципиальная ОУ К140УД11

Листинг 1 – Макромодель ОУ К140УД11

```
* Макромодель ОУ К140УД11
* Соединения: неинвертирующий вход, инвертирующий вход,
* источник положительного питания, источник отрицательного питания, выход
.subckt k140ud11 1 2 3 4 5
c1 11 12 2.469E-12
c2 6 7 28.00E-12; емкость внутренней коррекции
```

cee 10 99 42.00E-12
dc 5 53 dx
de 54 5 dx
dip 90 91 dx
din 92 90 dx
dp 4 3 dx
Egnd 99 0 poly(2) (3.0) (4.0) 0.5.5
fb 7 99 poly(5) vb vc ve vip vln 0 4.737E6-5E6 5E6 5E6-5E6
ga 6 0 11 122.639E-3
gem 06 10 99 83.51 E-9
Iee 10 4 dc 1.400E-3
hlim 90 0 vlim 1K
q1 11 213 qx1
q2 12 1 14 qx2
r2 6 9 100.0E3
rc1 3 11 378.9
rc23 12378.9
re1 13 10 341.9
re2 14 10 341.9
ree 1099 142.8E3
ro1 8 5 30
ro2 7 99 40
rp 3 4 4.546E3
vb 9 0 dc 0
vc 3 53 dc 3
ve 54 4 dc 3
vlim 7 8 dc 0
vip 91 0 dc 25
vln 0 92 dc 25

```
.model dx D(Is=800.0E-18); модель диода
.model qx1 NPN(Is=800.0E-18 Bf=150); модель биполярного
транзистора
.model qx2 NPN(Is=970.0E-18 Bf=320)
.ends;
* конец описания макромодели
```

Вызов макромодели, т.е. включение её в нужное место цепи, осуществляется предложением:

```
Xxxx <список узлов> <имя макромодели>
+ [PARAMS:<имя параметра>= <значение>*>]
+ [TEXT:<имя текста>=<текст>*>]
```

Например, описанная выше макромодель ОУ К140УД11 может быть включена в схему предложением:

```
X1 40 1 51 6 8 K140UD11
```

По принципу иерархичности любая макромодель может содержать в себе другую макромодель. Имена узлов, устройств и моделей в описании макромодели являются локальными. Поэтому в основной цепи и в макромодели можно использовать совпадающие имена. При обращении в основной цепи к какому-нибудь имени макромодели применяют так называемые составные имена. Они образуются из имени макромодели и внутреннего имени, разделённых точкой. Например, конденсатор C2 макромодели X1 имеет составное имя X1.C2. При ссылке на компоненты макромоделей составные имена заключаются в квадратные скобки, например, V([XOP1.X3.R2]) – падение напряжения на резисторе R2, который входит в состав макромодели X3, которая, в свою очередь, является составной частью макромодели операционного усилителя XOP1.

Следует заметить, что использование встроенной модели ОУ при расчёте схем, состоящих даже из небольшого количества ОУ, приводит к

большим затратам машинного времени. Поэтому в тех случаях, когда не требуется высокая точность воспроизведения динамических характеристик ОУ, целесообразно применять упрощённые модели ОУ (рисунок 5).

Описание макромоделей можно поместить непосредственно в файл задания на моделирование или в библиотечный файл макромоделей ОУ, например, с именем `op.lib`. Тогда для включения этого ОУ в схему необходимо сначала по директиве `.LIB` обеспечить доступ к этому файлу и затем указать номера узлов подключения макромоделей:

```
.LIB D:\ORCAD\PSpICE\LIB\OP
.LIB X1 17 180 2 29 25 K140UD8A
```

При работе со схемным редактором PSpice Schematics библиотеки математических моделей компонентов подключаются по команде **Analysis › Library and Include Files**. Обратим внимание на механизм передачи параметров из описания основной схемы в описание макромоделей и проиллюстрируем его на следующем примере. Рассмотрим фрагмент описания схемы:

```
Test
.param C=1p LK=8m
.step param C Itet 5p 10p
X1 5 20 DL params: C={C} L={LK}
.subckt DL 1 2 params: C=0 LK=5m R=1k
    R1 1 2 {R}
    C1 2 0 {C}
    L1 1 2 {LK}
.ends DL
```

.end

Здесь по директиве .SUBCKT определены параметры макромодели C и R и заданы их значения по умолчанию. При вызове макромодели X1 указаны значения параметра C, принимающего значения 5 и 10 пФ, и параметра LK = 8 мГн. Сопротивление резистора R1 по умолчанию принимает значение 1 кОм. Здесь специально подчёркнуто, что локальные и глобальные параметры могут принимать как совпадающие ($C=\{C\}$), так и различные ($L=\{LK\}$) обозначения.

Простейшая макромодель операционного усилителя представлена на рисунке 5. В схеме можно выделить три блока:

I – моделирует входные параметры ОУ: напряжение смещения нуля, входные токи, входное дифференциальное сопротивление для синфазного и парафазного сигналов;

II – моделирует частотную зависимость коэффициента усиления (частоту среза ω_1) и ограничение скорости нарастания выходного напряжения;

III – моделирует выходные параметры ОУ: выходное сопротивление и ограничение выходного напряжения.

Для обеспечения коэффициента усиления на низких частотах равным K_0 необходимо, чтобы выполнялось соотношение:

$$S_{\text{ВЫХ}} \cdot R_{\text{ВЫХ}} = K_0 \implies S_{\text{ВЫХ}} = \frac{K_0}{R_{\text{ВЫХ}}}.$$

Максимальная скорость нарастания выходного напряжения в режиме большого сигнала определяется временем перезарядки ёмкости C_1 током источника $S_1 U_{\text{ВХ}}$. Выходной блок III имеет коэффициент усиления K_0 , тогда максимальная скорость v_{1m} зарядки ёмкости C_1 определяется как

$$v_{1m} = \frac{v_{\text{ВЫХ } m}}{K_0} = \frac{U_{\text{ВЫХ } m}}{K_0 \cdot t_{\text{нар } m}},$$

где $v_{\text{вых } m}$ – скорость нарастания выходного напряжения, В/с;

$U_{\text{вых } m}$ – максимальная величина выходного напряжения (см. рисунок 6), В;

$t_{\text{нар } m}$ – время нарастания выходного напряжения до максимального значения, с.

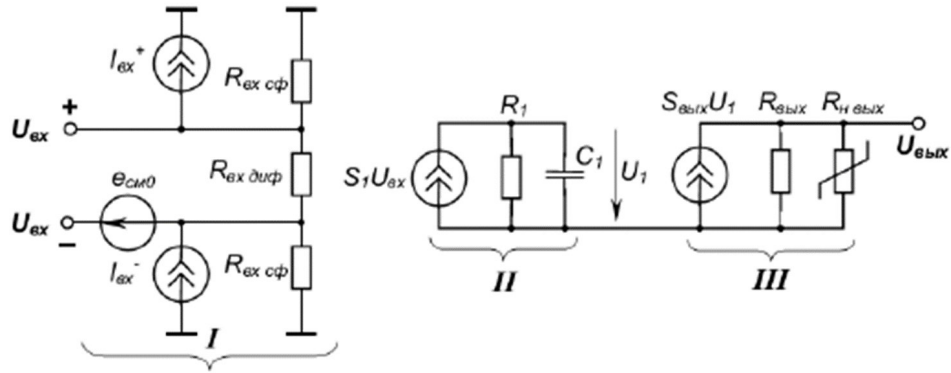


Рисунок 5 – Простейшая макромодель операционного усилителя с зависимыми источниками тока (ИТУН)

Частота среза коэффициента усиления определяется как

$$\omega_1 = \frac{1}{R_1 C_1}.$$

Задавшись сопротивлением R_1 на уровне единиц кОм, определяют ёмкость C_1 . А после и коэффициент S_1 , исходя из того, что коэффициент передачи блока II должен быть равен $S_1 \cdot R_1 = 1$.

Величину напряжения смещения нуля, а также максимальное и минимальное значение выходного напряжения определяют из передаточной характеристики операционного усилителя (рисунок 6).

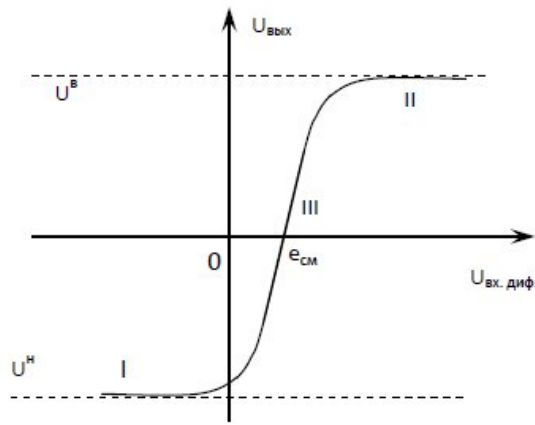


Рисунок 6 – Передаточная характеристика операционного усилителя

Входное дифференциальное сопротивление для парафазного сигнала определяется входным сопротивлением дифференциального каскада

$$R_{\text{вх пф}} = 2 [(\beta + 1) r_{\text{э}} + r_{\text{б}}].$$

Для синфазной составляющей входное сопротивление равно

$$R_{\text{вх сф}} = (\beta + 1) r_i,$$

где r_i – сопротивление источника тока.

Выходное сопротивление определяется выходным сопротивлением эмиттерного повторителя

$$R_{\text{вых}} = r_{\text{э}}.$$

Для моделирования ограничения напряжения $U_{\text{вых}}$ на уровне $U_{\text{н}}$ и $U_{\text{в}}$ (рисунок 6) в макромодели используется нелинейное сопротивление $R_{\text{н вых}}$ (рисунок 5). Однако вместо него можно использовать диодный ограничитель (рисунок 7) с источниками постоянного напряжения V1 и V2 равными $U_{\text{н}}$ и $U_{\text{в}}$ по модулю.

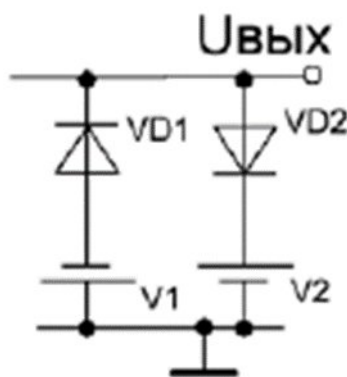


Рисунок 7 – Выходной каскад ОУ

Упражнение 1. Иерархические блоки

1. Собрать схему на рисунке 8, б с операционным усилителем в виде иерархического блока, схема которого представлена на рисунке 8, а.
2. Все транзисторы одинаковы и используют модель \$GENERIC_N. Параметры модели транзистора выбрать согласно варианту расчётного задания (Приложение А).
3. Модель диода – \$GENERIC с параметрами тока насыщения 10^{-18} А, ёмкости pn -перехода 1 фФ, последовательного сопротивления 1 Ом.
4. Провести моделирование передаточной характеристики, указав величину напряжения биполярного питания равным ± 15 В.
5. Собрать с использованием иерархического блока операционного усилителя схему повторителя, промоделировать его работу.

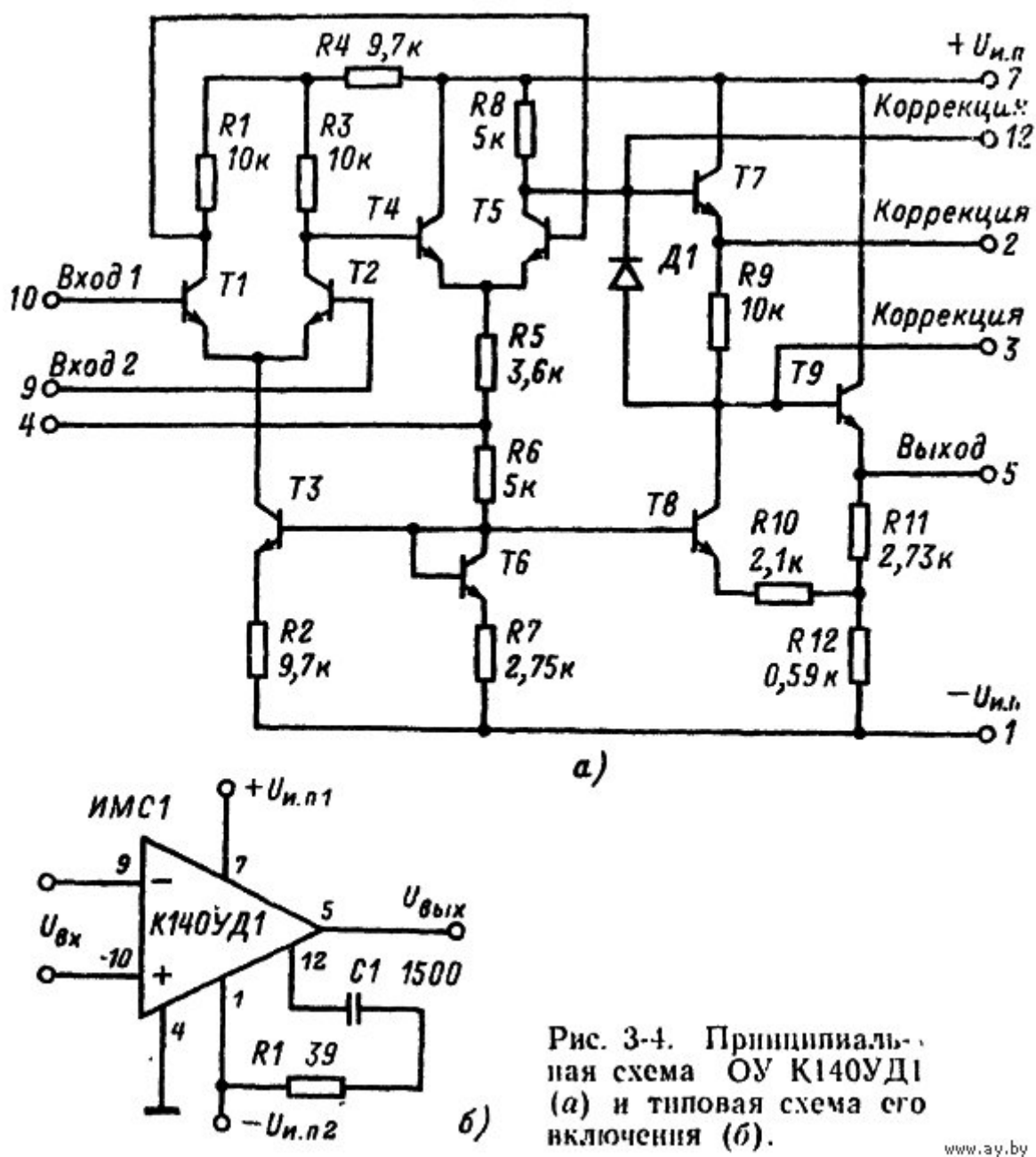


Рисунок 8 – Схема электрическая принципиальная ОУ К140УД1 (а) и его УГО (б)

Упражнение 2

1. Рассчитать параметры макромодели заданного преподавателем операционного усилителя.
2. Создать в рабочей папке при помощи текстового редактора Блокнот SPICE-описание схемы замещения операционного усилителя (рисунок 5).

3. Для этого удобно сначала пронумеровать все узлы схемы (нумерация не должна совпадать с нумерацией узлов входов / выходов).
4. После описания сохранить файл с расширением ***.lib**. При этом в одном файле может быть описание нескольких макромоделей, что создаст библиотеку макромоделей.
5. Открыть Micro-Cap, запустить редактор компонентов (**Windows > Component Editor...**). В нём выбрать справа в списке групп компонентов создать новую группу MyComponents, нажав правой кнопкой мыши по Standart.cmp и выбрав в контекстном меню Add Group, и запустить мастер импорта компонентов (Import Wizard) (рисунок 9). В открывшемся окне в поле File при помощи *Browse...* найти файл с описанием макромодели. Пункт *Include Local Subckts* предполагает импорт всех макромоделей из библиотеки (можно не указывать). Галочка на *Copy the above file to the library directory C:\...\library* предполагает копирование импортируемой библиотеки в директорию Micro-Cap (можно не указывать). Нажимаем *Далее*.

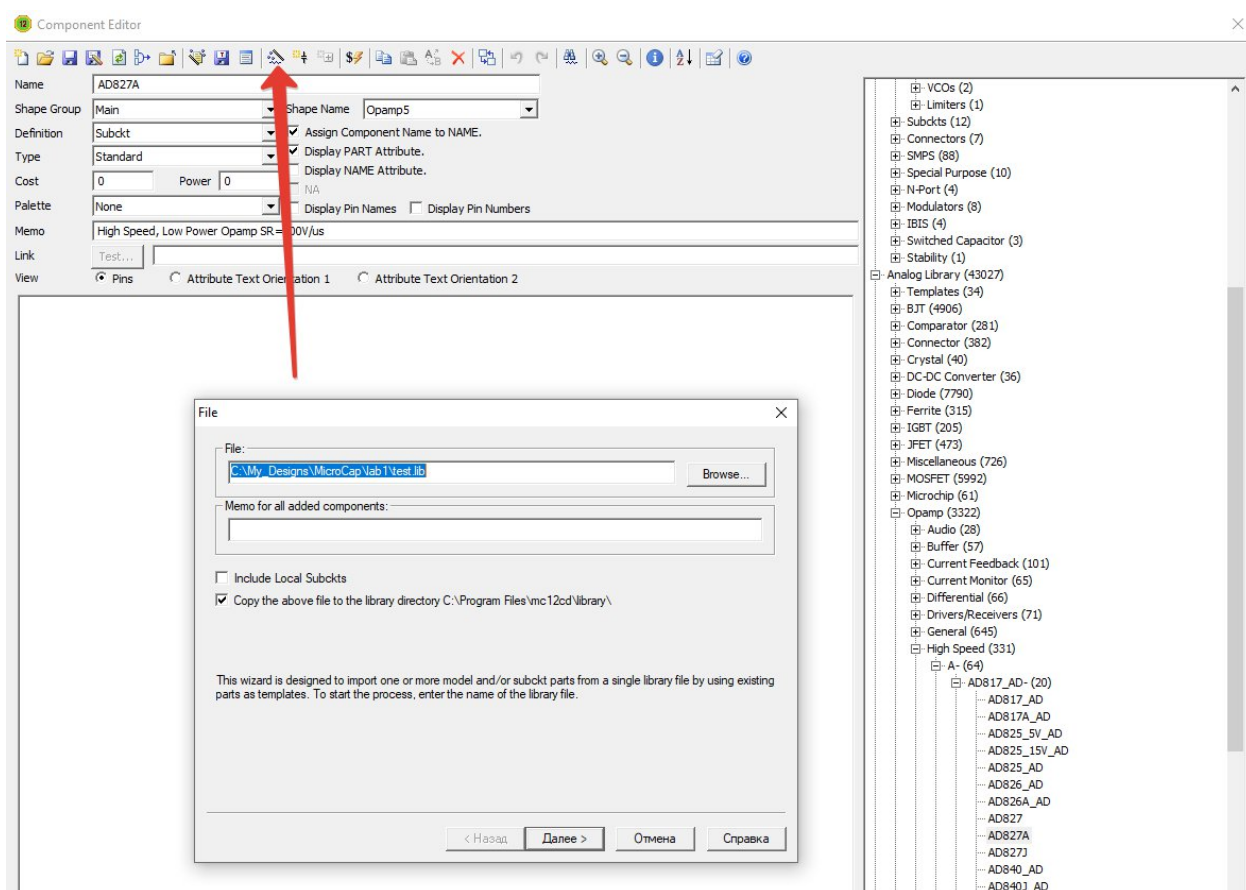


Рис. 4.13 – Импорт компонентов из файла

6. В следующем окне мастера – Suffix – предлагается ввести суффикс для компонента. В большинстве случаев необходимости в этом нет и нажимаем *Далее*.
7. В окне Import представлена итоговая информация по начинающемуся импорту. Нажать *Готово*.
8. В окне Choose a Template for... выбирается подходящий шаблон под импортируемый компонент (программа сравнивает количество входов и выходов у импортируемого компонента с имеющимися компонентами и предлагает выбрать шаблон). Здесь выбираем Unknoun и нажимаем *ОК*.
8. В окне Component Editor... появилась группа MyComponent с импортированным компонентом. В поле Name можно изменить его имя. Для изменения внешнего вида компонента на операционный усилитель

необходимо в списке Shape Name выбрать Oramp. Обратим внимание, что пины расставлены не верно, перетаскиваем левой кнопкой мыши их на нужные места.

9. Закрываем окно Component Editor... и дальше можно работать с данным компонентом в графическом редакторе. Для этого создаём файл с расширением *.cir.
10. Собрать схему согласно рисунку 8, б. Стоит учесть, что макромодель имеет только два входа и один выход, поэтому контактов 1, 4, 7 и 12 не будет. Промоделировать передаточную характеристику с величиной биполярного напряжения питания ± 15 В.
11. Сравнить результаты моделирования упражнений 1 и 2. Указать причину расхождения (если оно наблюдается), скорректировать электрическую схему или её SPICE-описание.
12. В качестве **отчёта** привести:
 - схему электрическую принципиальную с обозначением узлов;
 - расчёт или определение параметров макромодели по результатам моделирования ОУ на транзисторном уровне;
 - SPICE-описание и схему макромодели ОУ, его УГО;
 - сравнительное моделирование ОУ на транзисторном уровне и на уровне макромодели: передаточную характеристику, моделирование коэффициента усиления при амплитуде входного сигнала 1 мВ.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Вариант расчётного задания

№	SPICE-параметры транзистора				
	BF	BR	RC, Ом	RB, Ом	RE, Ом
1	100	0,1	200	100	0,5
2	150	0,2	50	150	1
3	200	0,05	100	50	2
4	50	0,001	150	100	5
5	150	0,01	250	150	0,5
6	200	0,001	100	50	1
7	50	0,01	150	100	2
8	100	0,1	250	150	5
9	150	0,2	50	50	0,5
10	200	0,05	100	100	1
11	150	0,01	150	150	2
12	200	0,001	250	50	5
13	50	0,01	100	100	0,5
14	100	0,1	250	150	1
15	150	0,2	150	50	2
16	200	0,05	250	100	5
17	50	0,001	100	150	0,5
18	150	0,01	150	50	1
19	200	0,001	250	100	2
20	50	0,01	50	150	5
21	100	0,1	100	50	0,5
22	150	0,2	125	100	1
23	200	0,05	150	150	2
24	50	0,001	175	50	5
25	100	0,01	200	100	0,5
26	150	0,1	225	150	1
27	200	0,2	250	50	2

Ёмкости $C_{JE} = N \text{ фФ}$, $C_{JC} = 4N \text{ фФ}$.

Время пролёта носителей заряда через базу $T_F = 2N \text{ нс}$.

Параметр $N = \begin{cases} N_0 \text{ при } N_0 < 5, \\ N_0/2 \text{ при } N_0 < 10, \\ N_0/4 \text{ при } N_0 < 30. \end{cases}$