

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РСФСР  
ПО ДЕЛАМ НАУКИ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ  
СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ  
ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

*Методические указания к лабораторной работе*

Составители: А. В. Волков, Г. П. Шопин

УДК 621.38

*Исследование статических и динамических параметров операционного усилителя: Метод. указания к лаборатор. работе / Куйбышев. авиац. ин-т.; Сост. А. В. Волков, Г. П. Шопин, Самара, 1991. 12 с.*

Рассматриваются характеристики интегральных операционных усилителей (ОУ) и проводится их сравнительный анализ. Даны теоретические основы работы ОУ и методика экспериментальной проверки его основных статических и динамических параметров. Описывается схема экспериментальной установки для исследования операционных усилителей. Составлены на кафедре «Микроэлектроника и технология радиоэлектронной аппаратуры».

Рекомендуется для студентов специальности 23.03.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Куйбышевского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С. П. Королева.

Рецензент В. А. Олейников

*Цель работы* — изучение характеристик операционных усилителей (ОУ), изготовленных по интегральной технологии, их конструктивных особенностей, методик расчета и экспериментальной проверки основных статических и динамических параметров.

*Задания:*

1. Изучить принцип работы и основные характеристики ОУ.
2. Изучить возможности улучшения характеристик и конструктивных параметров операционных усилителей.
3. Рассчитать основные статические и динамические параметры ОУ.
4. Ознакомиться с порядком и методикой выполнения работы.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

*Операционным усилителем* называют усилитель электрических сигналов, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми и импульсными сигналами при работе с обратными связями.

Основу всех ОУ составляют дифференциальные каскады. Первый каскад обеспечивает коэффициент усиления, достигающий нескольких сотен тысяч и единиц миллионов. В нем часто используются полевые транзисторы, обеспечивающие входные характеристики ОУ, в частности его высокое входное сопротивление. Выходным каскадом является бестрансформаторный двухтактный усилитель мощности (эмиттерный повторитель), работающий в режиме усиления «В» или «АВ»). Он служит для согласования высокого выходного сопротивления первого дифференциального каскада ОУ с низкоомным нагрузочным устройством. ОУ имеют низкое выходное сопротивление. Кроме того, в состав современных ОУ входят цепи защиты по входу от перенапряжений и по выходу от превышения выходного тока.

В настоящее время операционные усилители, изготавливаемые по интегральной технологии, являются самыми универсальными и

массовыми аналоговыми устройствами. Надежность ОУ, включающего в себя несколько сотен элементов и более, соответствует надежности отдельного транзистора, что обеспечивается интегральной технологией, при которой все элементы (транзисторы, диоды, резисторы и др.) и соединения между ними выполнены в едином технологическом цикле.

На рис. 1 приведено условное графическое обозначение ОУ. ОУ имеет два входа и один выход. Вход, напряжение на котором сдвинуто по фазе на  $180^\circ$  относительно выходного напряжения, называется инвертирующим и обозначается кружочком.

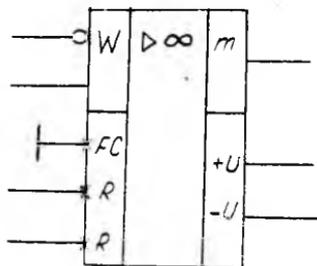


Рис. 1

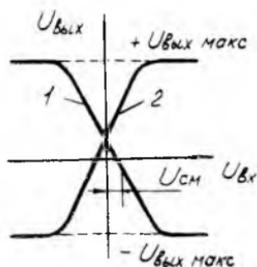


Рис. 2

Второй вход является неинвертирующим, так как напряжение на нем и выходное напряжение совпадают по фазе. Кроме того, ОУ содержит выводы, к которым подключаются источники питающего напряжения  $+U_{\text{ип}}$  и  $-U_{\text{ип}}$ , общая шина (в некоторых ОУ отсутствует), балансирующий резистор. В ОУ ранних выпусков имелись также выводы под цепи коррекции.

На рис. 2 представлена одна из важнейших характеристик ОУ — амплитудная (передаточная), представляющая собой зависимость  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  при нулевой частоте. Кривая 1 соответствует подаче входного напряжения на инвертирующий вход, кривая 2 — на неинвертирующий вход. Эти характеристики получаются при подаче входного напряжения на один из входов при отсутствии напряжения на другом входе. Наклонный (линейный) участок кривых подчеркивает линейность зависимости  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ . Горизонтальные участки кривых соответствуют режиму работы ОУ, при котором входное напряжение выходит за пределы линейного участка передаточной характеристики. Значения выходного напряжения  $U_{\text{вых макс}}$  и  $-U_{\text{вых макс}}$ , характеризующие эти участки, обычно на 1—2 В меньше напряжения питания.

Усиление сигналов различных частот определяется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) ОУ (рис. 3), а усиление им-

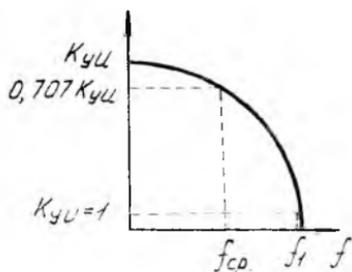


Рис. 3

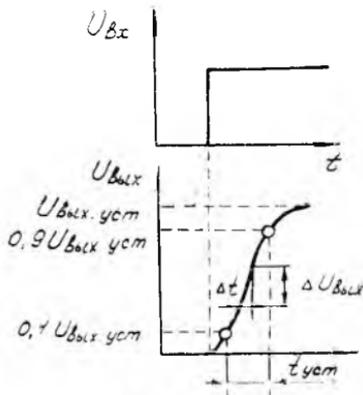


Рис. 4

пульсных (обычно прямоугольных) сигналов скоростью нарастания выходного напряжения (рис. 4).

Современные ОУ имеют следующие основные параметры.

Коэффициент усиления напряжения  $K_{yU}$  — отношение изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению входного напряжения. В общем случае коэффициент усиления напряжения, не охваченного обратной связью ОУ, равен произведению  $K_{yU}$  всех его каскадов. В настоящее время  $K_{yU}$  некоторых усилителей по постоянному току превышает  $3 \cdot 10^6$ . Однако значение его уменьшается с ростом частоты входного сигнала. При этом суммарная АЧХ имеет столько изломов, сколько усилительных каскадов в ОУ. Каждый каскад на высоких частотах вносит фазовый сдвиг, который влияет на устойчивую работу ОУ, охваченного отрицательной обратной связью (ООС). Устойчивой работы усилительных каскадов ОУ добиваются введением частотной коррекции — внешних нагрузочных  $RC$ -цепей. Для стабилизации двухкаскадного усилителя обычно требуется одна цепь, трехкаскадного — две. Многие ОУ последних выпусков не требуют внешних цепей коррекции, так как в их схему уже введены необходимые элементы.

Частота единичного усиления  $f_1$  — значение частоты входного сигнала, при котором значение коэффициента усиления напряжения ОУ падает до единицы (см. рис. 3). Этот параметр определяет максимально реализуемую полосу усиления ОУ. Выходное напряжение на этой частоте ниже, чем для постоянного тока, примерно в 30 раз.

Максимальное выходное напряжение  $U_{вых\ макс}$  — максимальное значение выходного напряжения, при котором искажение не превышает заданного значения (см. рис. 2). В отечественной практике этот параметр измеряется относительно нулевого

потенциала как в положительную, так и в отрицательную сторону  $\pm U_{\text{вых макс}}$ . В зарубежных каталогах приводится значение максимального диапазона выходных напряжений, который равен  $2U_{\text{вых}}$ . Выходное напряжение измеряется при определенном сопротивлении нагрузки. С уменьшением сопротивления нагрузки величина  $U_{\text{вых макс}}$  уменьшается.

Скорость нарастания выходного напряжения  $V_{U_{\text{вых}}}$  — отношение изменения  $U_{\text{вых}}$  от 10 до 90% от своего номинального значения ко времени, за которое произошло это изменение (см. рис. 4). Параметр характеризует скорость отклика ОУ на ступенчатое изменение сигнала на входе, при измерении ОУ охвачен ООС с общим коэффициентом усиления от 1 до 10.

Напряжение смещения  $U_{\text{см}}$  — значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ, чтобы на выходе напряжение было равно нулю (см. рис. 2). ОУ реализуется в виде микросхемы со значительным числом транзисторов, характеристики которых имеют разброс по параметрам, что приводит к появлению постоянного напряжения на выходе в отсутствие сигнала на входе. Параметр  $U_{\text{см}}$  помогает разработчикам рассчитывать схемы устройств, подбирать номиналы компенсационных резисторов.

Входные токи  $I_{\text{вх}}$  — токи, протекающие через входные контакты ОУ. Эти токи обусловлены базовыми токами входных биполярных транзисторов и токами утечки затворов для ОУ с полевыми транзисторами на входе. Входные токи, проходя через внутреннее сопротивление источника сигнала, создают падение напряжений, которое может вызывать появление напряжения на выходе в отсутствие сигнала на входе.

Разность входных токов  $\Delta I_{\text{вх}}$ . Входные токи могут отличаться друг от друга на 10...20%. Зная разность входных токов, можно легко подобрать номинал балансирующего резистора.

Все параметры ОУ изменяют свое значение — дрейфуют с изменением температуры. Особенно важными являются: дрейф напряжения смещения  $\Delta U_{\text{см}}$ , дрейф разности входных токов  $\Delta I_{\text{вх}}$ .

Максимальное входное напряжение  $U_{\text{вх}}$  — напряжение, прикладываемое между входными выводами ОУ, превышение которого ведет к выходу ряда параметров за установленные границы или разрушению прибора. В отечественных справочных материалах приводятся значения  $\pm U_{\text{вх}}$ , в зарубежной литературе дано абсолютное значение диапазона.

Максимальное синфазное входное напряжение  $U_{\text{вх сф}}$  — наибольшее значение напряжения, прикладываемого одновременно к обоим входным выводам ОУ относительно нулевого потенциала, превышение которого нарушает работоспо-

способность прибора. В отечественной документации приводится модуль величины  $U_{вх\ сф}$ , а в зарубежной — диапазон.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала  $K_{ос\ сф}$  — отношение коэффициента усиления напряжения, приложенного между входами ОУ, к коэффициенту усиления, общего для обоих входов напряжения.

Выходной ток  $I_{вых}$  — максимальное значение выходного тока ОУ, при котором гарантируется работоспособность прибора. Это значение определяет минимальное сопротивление нагрузки. Очень важно при расчете комплексного сопротивления нагрузки учитывать, что при переходных процессах включения (выключения) ОУ значения емкостной или индуктивной составляющей сопротивления нагрузки резко изменяются, и при неправильном подборе нагрузки схема может выйти из строя.

Часто вместо значения  $I_{вых}$  в документации приводят минимальное значение сопротивления нагрузки  $R_n$ . Большая часть ОУ, разработанных в последнее время, имеет каскад, ограничивающий величину выходного тока при внезапном замыкании выходного контакта на шину источника питания или нулевой потенциал. Предельный выходной ток при этом — ток короткого замыкания  $I_{кз}$  — равен 25 мА.

Конструкторы и технологи микросхем ОУ постоянно ищут способы улучшения основных параметров приборов (увеличение  $K_{yu}$ ,  $f_1$ ,  $V_{U_{вых}}$  и др.). Применяя схемотехнические решения и вводя новые технологические приемы, стараются снизить значения «паразитных» параметров  $U_{см}$ ,  $I_{вх}$ ,  $\Delta I_{вх}$  и их дрейфов, а также мощность, потребляемую прибором. Как правило, достичь максимальных значений всех параметров невозможно. Достижение максимального значения одного параметра часто осуществляется за счет ухудшения другого. Так, увеличение коэффициента усиления по напряжению влечет за собой снижение частотных свойств, и наоборот.

Результатом поисков и эволюции схемотехнических и технологических решений явилось создание ряда ОУ, которые согласно квалификации по ГОСТ 4.465-86 делятся: на универсальные (общего применения), у которых  $K_{yu} = 10^3 \dots 10^5$ ;  $f_1 = 1,5 \dots 10$  МГц; прецизионные (инструментальные) с  $K_{yu} > 0,5 \cdot 10^6$  и гарантированными малыми уровнями  $U_{см} \leq 0,5$  мВ и его дрейфа; быстродействующие со скоростью нарастания выходного напряжения  $V_{U_{вых}} \geq 20$  В/мкс; регулируемые (микромощные) с током потребления  $I_{пот} < 1$  мА. Паспортные данные ряда ОУ приведены в таблице.

Наиболее широко используют ОУ серий 140 и 153. Операционные усилители рассчитаны на применение симметричных разнопо-

Тип ОУ

Параметры	Тип ОУ						
	140УД7, 1408УД2	140УД8	153УД2	153УД3, 140УД9	153УД5А	544УД1	154УД1
Коэффициент усиления $K_{\beta \beta}$	$50 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$10^6$	$50 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$
Коэффициент ослабления сигнального сигнала $K_{ос \text{ сф.}}$ дБ	70	90	65	80	120	80	80
Напряжение смещения нуля $U_{см}$ , мВ	4	20	6	2	1	15	5
Частота единичного усиления, $f_1$ , МГц	0,8	1	3	1	1	15	1
Входное сопротивление $R_{вх}$ МОм, не менее	0,4	100	0,3	0,3	1,5	101	10
Выходное сопротивление $R_{вых}$ , Ом	—	—	—	—	—	200	200
Входной ток $I_{вх}$ , мкА	0,2	$0,05 \cdot 10^{-3}$	0,4	0,2	0,1	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,02
Сопротивление нагрузки $R_{н.кОм}$	$> 2$	$> 2$	$> 2$	$> 2$	$> 2$	$> 2$	$> 2$
Максимальное выходное напряжение $U_{вых \text{ макс}}$ , В	11,5	10	11	10	10	10	12
Максимальное входное сигнальное напряжение $U_{вх \text{ макс сф}}$ , В	11	10	12	6	—	10	—
Скорость нарастания выходного напряжения $V_{i, \text{вых}}$ , В/мкс	до 10	3	0,5	5	0,2	2	10
Напряжение источника питания $U_{ип}$ , В	15	15	15	15	10	15	5; 15
Потребляемый ток $I_{пот}$ , мА	3	5	3	3,6	3,5	3,5	0,15

лярных источников питания от  $\pm 5$  до  $\pm 27$  В. В настоящее время чаще всего используют напряжения  $\pm 5$  и  $\pm 15$  В с допусковым отклонением  $\pm (5 \dots 10) \%$ .

### ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для исследования статических и динамических параметров ОУ представлена на рис. 5. Она включает в себя ОУ, потенциометр  $R1$  (для изменений входного напряжения ОУ), гене-

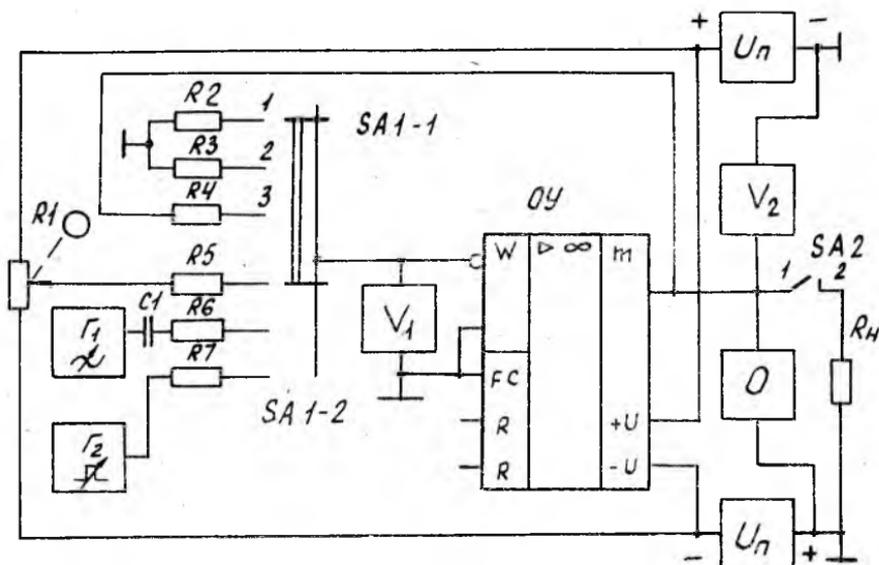


Рис. 5

ратор синусоидальных сигналов  $\Gamma_1$  (для снятия АЧХ ОУ), генератор импульсных сигналов  $\Gamma_2$  (для оценки скорости нарастания выходного напряжения ОУ), универсальные вольтметры  $V_1$  и  $V_2$  (для контроля соответственно входного и выходного напряжений, причем, при снятии амплитудной характеристики оба вольтметра регистрируют постоянное напряжение, а при снятии АЧХ вольтметр  $V_2$  регистрирует переменное напряжение; переключение рода работ осуществляется органами управления вольтметров), осциллограф  $O$  для контроля динамических параметров выходного напряжения ОУ. Подключение к ОУ необходимых элементов и приборов для снятия той или иной характеристики осуществляется с помощью переключателя  $SA1$ , имеющего три положения. Под-

ключение сопротивления нагрузки  $R_n$  к выходу ОУ осуществляется с помощью переключателя SA2. Питание схемы происходит от двух источников постоянного напряжения  $\pm U_n$ .

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для проведения работы необходимо ознакомиться с лабораторной установкой и приборами, необходимыми для исследований. Далее осуществлять действия в следующей последовательности.

1. Исследование амплитудной характеристики ОУ.

Установить переключатель SA1 в положение «1», а переключатель SA2 в положение «2». Изменяя положение потенциометра R1 с помощью вольтметров  $V_1$  и  $V_2$ , снять и построить амплитудную характеристику ОУ  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ , определить по ней максимальное выходное напряжение  $\pm U_{\text{вых макс}}$ , напряжение смещения  $U_{\text{см}}$  и коэффициент усиления  $K_{yU} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$  и сравнить их с паспортными данными. Установить переключатель SA2 в положение «1» («Выкл.») и оценить изменение  $U_{\text{вых макс}}$ ,  $U_{\text{см}}$ ,  $K_{yU}$ .

2. Исследование амплитудно-частотной характеристики ОУ.

Установить переключатели SA1 и SA2 в положение «2». Изменяя частоту синусоидального сигнала генератора  $\Gamma_1$  (при неизменном уровне этого сигнала во всем диапазоне частот), с помощью вольтметра  $V_2$  снять и построить амплитудно-частотную характеристику ОУ  $K_f = \Phi(f)$ , определить по ней частоты среза  $f_{\text{ср}}$ , единичного усиления  $f_1$  и сравнить полученные данные с паспортными. Установить переключатель SA2 в положение «1» («Выкл.») и оценить изменения  $K_f$ ,  $f_{\text{ср}}$ ,  $f_1$ .

3. Исследование скорости нарастания выходного напряжения (времени установления ОУ).

Установить переключатель SA1 в положение «3», а переключатель SA2 в положение «2». Используя деление масштабной сетки экрана осциллографа, определить время установления и максимальную скорость нарастания выходного напряжения при воздействии на вход ОУ прямоугольного импульса и сравнить полученные данные с паспортными. Установить переключатель SA2 в положение «1» и оценить изменение  $t_{\text{уст}}$  и  $V_{U_{\text{вых}}}$ .

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Условное графическое обозначение и характеристики ОУ.
3. Схема установки для исследования операционных усилителей.

4. Теоретические и экспериментальные данные (таблицы и графики).

5. Выводы.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что называется операционным усилителем?

2. Покажите условное графическое обозначение ОУ.

3. Как выглядит амплитудная характеристика ОУ?

4. Чем определяется полоса пропускания ОУ?

5. Как определить скорость нарастания выходного напряжения ОУ?

6. Каковы свойства идеального операционного усилителя?

7. Приведите классификацию ОУ, выпускаемых промышленностью.

8. Объясните графики, построенные по экспериментальным данным.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / Под ред. С. В. Якубовского. М.: Радио и связь, 1990. 496 с.

Измерения и контроль в микроэлектронике: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А. А. Сазонова. М.: Высш.шк., 1984. 367 с.

Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И. Микроэлектроника: Проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1987. 416 с.