

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ**

САМАРА 2006

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Методические указания к лабораторной работе

САМАРА
Издательство СГАУ
2006

Составители: А.И. Колпаков, В. А. Колпаков, Г.П. Шопин

УДК 621.38

Исследование параметров операционного усилителя: метод. указания к лаб. работе / сост. А.И. Колпаков, В.А. Колпаков, Г.П. Шопин. Самара: Изд-во СГАУ 2006. 22 с.

В методических указаниях рассматриваются физические основы работы операционного усилителя (ОУ), приводятся его схемное решение, типичные характеристики, классификация и система параметров. Описываются схемы и методики измерения основных параметров ОУ. Кратко рассматриваются принципы его работы.

Выполнены на кафедре «Микроэлектроника», предназначены для студентов специальностей 210201, 210301 и 210302 и являются частью цикла работ по курсу «Электроника».

Печатаются по решению Самарского Редакционно-издательского совета

Рецензент В.И. Чепурнов

Цель работы: закрепление знаний в области физических основ операционного усилителя (ОУ) путем теоретического и экспериментального изучения механизмов формирования его характеристик гальванически взаимодействующими электронными схемами дифференциального усилителя, преобразователя уровня (интегрального усилителя) и усилителя мощности.

1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ

1. По конспекту лекций, данным методическим указаниям и рекомендованной литературе изучить физические основы ОУ.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.
3. Изучить порядок работы на лабораторном стенде.
4. Изучить принципы работы и основные характеристики ОУ.
5. Выполнить экспериментальную часть лабораторной работы необходимые расчеты и построение графиков для требуемых в работе зависимостей.
6. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы.

Приборы и принадлежности: лабораторный стенд, набор проводников.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Операционный усилитель представляет собой единую электронную схему, содержащую дифференциальный каскад, преобразователь уровня и усилитель мощности, работающие в непрерывной связи как единый неразрушаемый каскад, изъятие любого из трех элементов схемы приводит к уничтожению операционного усилителя как функционального элемента электронной схемы. К настоящему времени разработана универсальная типовая схема, отвечающая следующим основным принципам схемотехники ОУ (рис. 1.).

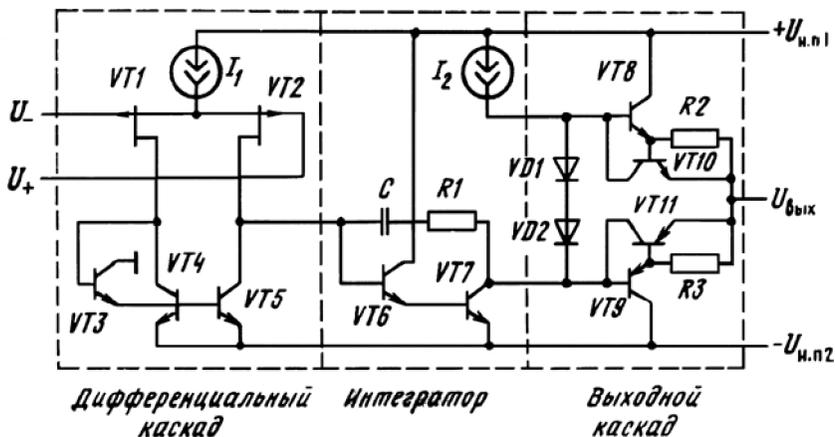


Рис.1. Схемотехническое решение функции операционного усилителя

Основные особенности этой схемы:

1. Основное усиление по напряжению должно быть сосредоточено в одном инвертирующем каскаде, выполненном на транзисторе VT7. Для повышения устойчивости работы каскада в большинстве практических случаях используют емкостную отрицательную обратную связь по схеме интегратора Миллера. Большой статический коэффициент усиления каскада обеспечивается за счет использования в качестве коллекторной нагрузки источника тока I_2 с большим внутренним сопротивлением. Плавный спад коэффициента усиления на высоких частотах, характерный для интегральных усилителей, обеспечивает устойчивую работу ОУ при замыкании петли внешней обратной связи. Практически этого достигают выбором величины емкости интегрирующего конденсатора C , которая должна быть такой, чтобы при частоте сигнала суммарный фазовый сдвиг в петле внешней обратной связи был равен 180° , а петлевой коэффициент усиления был меньше единицы.

2. Первый каскад ОУ должен выполняться по схеме ДК с однофазным выходом для того, чтобы его выходной ток (входной ток интегратора Миллера) обеспечивал перезаряд интегрирующего конденсатора. Такое схемотехническое решение позволяет наиболее просто решить задачу согласования каскадов при сохранении практически идеальной симметрии режима работы плеч дифференциального каскада. Это достигается за счет того, что погрешность работы отражателя тока, обусловленная базовыми

токами транзисторов $VT4$, $VT5$, естественным образом компенсируется входным током усилителя в интеграторе Миллера. Для полной компенсации необходимы идентичность параметров транзисторов $VT4$, $VT5$, $VT7$ и равенство токов I_1 и I_2 , поскольку тогда суммарный ток баз транзисторов $VT4$, $VT5$ будет совпадать с током базы транзистора $VT7$. Для увеличения статического коэффициента усиления ОУ в базовую цепь инвертирующего транзистора включают эмиттерный повторитель. При этом входной ток усилителя интегратора уменьшается в $1 + \beta$ раз. Для сохранения симметрии в отражатель тока также включают эмиттерный повторитель, обеспечивая взаимную согласованность параметров транзисторов в указанных повторителях.

3. Выходной каскад ОУ должен обеспечивать высокую нагрузочную способность, широкий динамический диапазон выходного сигнала, малый уровень искажений. Поэтому его обычно выполняют по двухтактной схеме повторителя на комплементарных транзисторах с цепями защиты от перегрузок. Подключение повторителя к выходу интегратора облегчается тем, что источник тока нагрузки интегратора I_2 одновременно выполняет функции элемента, задающего ток через диоды смещения $VD1$ и $VD2$.

Отличие реального ОУ от идеальной модели состоит в следующих ограничениях:

1. Допустимые диапазоны изменения выходного и синфазного входного сигналов должны изменяться в строго указанных пределах.
2. Накладываются ограничения на изменение выходного сигнала, которые определяются статической передаточной характеристикой ОУ, представляющей собой зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от входного дифференциального сигнала ΔU (рис. 2).

Три характерных участка на графике соответствуют трем режимам работы ОУ. Участки 1 и 2 соответствуют режимам ограничения выходного сигнала снизу и сверху, при этом $U_{\text{вых}}$ не зависит от ΔU и равно нижнему $U^{\text{н}}$ и верхнему $U^{\text{в}}$ уровням ограничения. Ограничение снизу является следствием насыщения транзистора $VT7$ (см. рис. 1), сверху – следствием насыщения выходного транзистора источника тока I_2 . Участок 3 соответствует режиму статического усиления, которое настолько велико, что характеристика на этом участке практически вертикальная.

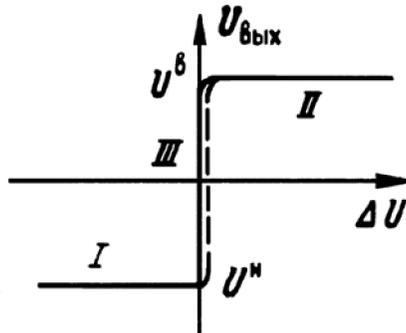


Рис. 2. Передаточная характеристика ОУ

Допустимый диапазон изменения входного синфазного сигнала ограничивается сверху насыщением выходного транзистора источника тока I_1 , и снизу – выходом транзисторов $VT1$ и $VT2$ из пологой области выходных характеристик. При стандартном напряжении питания ± 15 В допустимый диапазон изменения $U_{сф}$ и $U_{вых}$ обычно $\pm (12...14)$ В.

Согласно условному графическому обозначению ОУ (рис. 3), он имеет два входа и один выход. Вход, напряжение на котором сдвинуто по фазе на 180° относительно выходного напряжения, называется **инвертирующим** и обозначается кружочком.

ДА1

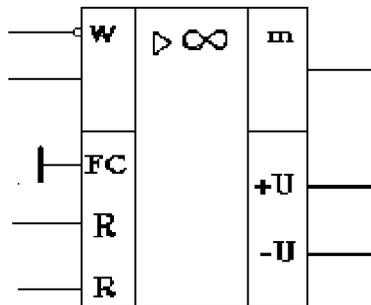


Рис.3. Условное обозначение ОУ

Второй вход является **неинвертирующим**, так как напряжение на нем и выходное напряжение совпадают по фазе. Кроме того, ОУ содержит выходы, к которым подключаются источники питающего напряжения $+U_{\text{ип}}$ и $-U_{\text{ип}}$, общая шина (в некоторых ОУ отсутствует), балансировочный резистор.

Два входа ОУ определяют и форму передаточной характеристики, представляющей собой зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ при нулевой частоте (рис.4).

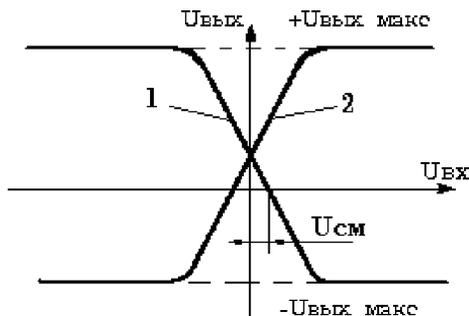


Рис. 4. Амплитудные характеристики ОУ:

1- включение ОУ с инверсией; 2- включение ОУ без инверсии

Кривая I (см. рис.2) соответствует подаче входного напряжения на инвертирующий вход, кривая II – на неинвертирующий вход. Эти характеристики получаются при подаче входного напряжения на один из входов при отсутствии напряжения на другом входе. Участок III кривых подчеркивает линейность зависимости $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$, а горизонтальные участки кривых (I,II) 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.

Другим отличием реальных ОУ является наличие паразитных связей, приводящих к рассогласованию сигнала на входе ОУ на ΔU , т.е. при замкнутой цепи отрицательной обратной связи оно уже становится отличным от нуля на ΔU . При этом значение ΔU можно рассматривать как погрешность ОУ по напряжению, приведенную ко входу. Различают две составляющие этой погрешности: статическую $\Delta U_{\text{ст}}$, соответствующую установившемуся режиму работы ОУ (при $\Delta U = \text{const}$), и динамическую $\Delta U_{\text{дин}}$, возникающую при изменении величины U , т. е. $\Delta U = \Delta U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{дин}}$.

Статическая погрешность в первом приближении определяется соотношением

$$\Delta U_{CT} = U_{см} + U/K_{U^*} + U_{сф}/M_{сф},$$

где $U_{см}$ – напряжение смещения ОУ, определяемое как значение ΔU при нулевых U и $U_{сф}$; K_{U^*} – статический коэффициент усиления напряжения с учетом выходного сопротивления $r_{вых}$ и сопротивления нагрузки R_n , $K_{U^*} = K_U R_n / (R_n + r_{вых})$; $M_{сф}$ – коэффициент ослабления синфазных входных сигналов ОУ. Параметры $U_{см}$ и $M_{сф}$ определяются в основном характеристиками входного ДК, в частности, для схемы ОУ, показанной на рис. 1, неидентичностью полевых транзисторов $VT1, VT2$ и биполярных транзисторов $VT4, VT5, VT7$ и $VT3, VT6$. Типовые значения параметров ОУ с полевыми транзисторами на входе следующие:

$$|U_{см}| \leq 50 \text{ мВ}; K_U \approx 10^5; M_{сф} > 10^7.$$

При использовании на входе биполярных транзисторов напряжение смещения существенно уменьшается (обычно не превышает 1-10 мВ), однако начинают сказываться входные токи и входные сопротивления ОУ.

Динамическая погрешность определяется характером изменения выходного напряжения ОУ. В первом приближении ее можно рассматривать как однородную функцию скорости изменения выходного напряжения $U = dU_{вых}/dt$. Обратная зависимость $v(\Delta U_{дин})$ называется *скоростной характеристикой*, типичный вид которой показан на рис. 5.

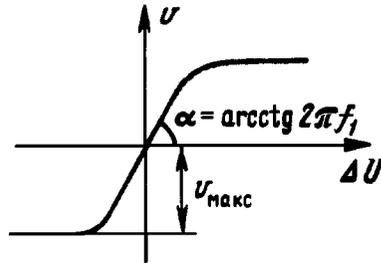


Рис. 5. Динамическая характеристика ОУ

Использование скоростной характеристики для определения погрешности динамической ОУ соответствует интерпретации ОУ как нелинейного интегратора с дифференциальным входом, для которого при отсутствии статической погрешности ($\Delta U = \Delta U_{дин}$)

$$U_{\text{ВЫХ}} = \int_0^t v(\Delta U) dt .$$

В области малых значений динамической погрешности скоростную характеристику аппроксимируют прямой, полагая

$$\Delta U_{\text{ДИН}} = \tau_T dU_{\text{ВЫХ}} / dt ,$$

где параметр τ_T , называемый постоянной времени ОУ, определяется крутизной входного каскада: $\tau_T = C/S_{\text{ВХ}}$. Значение τ_T связано с частотой f_1 единичного усиления ОУ соотношением $\tau_T = 0.5\pi f_1$, если вместо $U_{\text{ВЫХ}}$ подставить $U_{\text{ВЫХО}} \sin 2\pi f_1 t$.

Динамическую погрешность ОУ в линейном режиме часто представляют в операторной форме

$$\Delta U_{\text{ДИН}}(\rho) = \tau_T \rho U_{\text{ВЫХ}}(\rho) .$$

При увеличении $|\Delta U_{\text{ДИН}}|$ скорость v стремится к постоянному значению, модуль которого $v_{\text{МАКС}}$ называется *максимальной скоростью нарастания выходного напряжения*. Этот параметр *характеризует* быстродействие ОУ в режиме большого сигнала. Он позволяет, например, определить минимальное время переключения ОУ с одного режима ограничения на другой:

$$T_{\Phi_{\text{МИН}}} = (U^e - U^n) .$$

Скоростная характеристика ОУ определяется передаточной характеристикой входного дифференциального каскада и емкостью интегрирующего конденсатора, причем для каскада на биполярных транзисторах

$$\frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} = (I_1 C) th(\Delta U_{\text{ДИН}} / 2\varphi_T) ,$$

для каскада на полевых транзисторах (см. рис. 1)

$$\frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \Delta U_{\text{ДИН}} \frac{\sqrt{2I_1 I_{\text{СМАКС}}}}{CU_{\text{СИОТС}}} \sqrt{1 - \frac{I_{\text{СМАКС}} \Delta U_{\text{ДИН}}}{2I_1 I_{\text{СМАКС}}}} .$$

Максимальная скорость $v_{\text{макс}}$ определяется током питания входного ДК, т. е. $v_{\text{макс}} = I_1/C$. Следует отметить, что при использовании каскада на биполярных транзисторах увеличением I_1 , нельзя добиться повышения $v_{\text{макс}}$, так как рост крутизны каскада пропорционально I_1 требует пропорционального увеличения емкости C . В отличие от этого в каскаде на полевых транзисторах коэффициент усиления пропорционален $\sqrt{I_1}$ следовательно, и требуемая емкость должна быть увеличена пропорционально $\sqrt{I_1}$. При этом $v_{\text{макс}} \sim \sqrt{I_1}$ и, следовательно, увеличивая I_1 , можно повысить быстродействие ОУ, характеризуемое амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) ОУ (рис.6), а усиление импульсных (обычно прямоугольных) сигналов – скоростью нарастания выходного напряжения (рис.7).

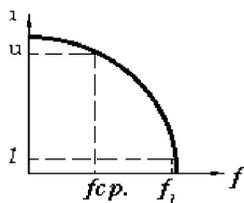


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика ОУ.

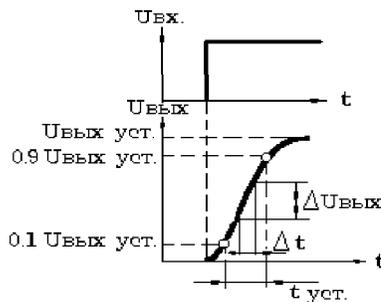


Рис.7. Реакция ОУ на скачок напряжения.

Операционный усилитель выполняет различные операции над аналоговыми сигналами при работе в схемах с отрицательной обратной связью. Он имеет высокое входное сопротивление и практически бесконечно большой коэффициент усиления по напряжению K_U .

Несмотря на то, что связь ОУ с общей шиной обычно не указывается явно (рис. 8, а), она всегда имеет место и осуществляется через источники питания (рис. 8, б).

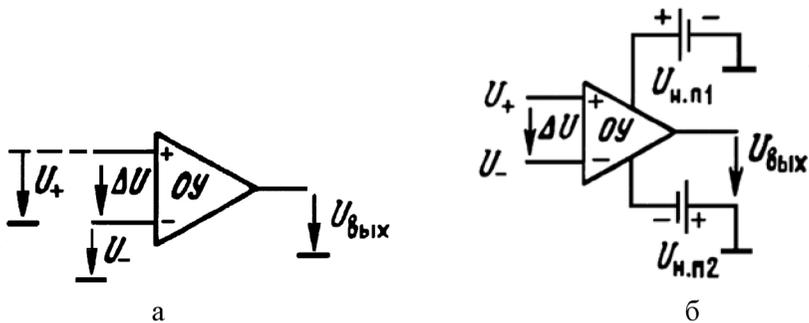


Рис. 8. Рабочие напряжения на электродах ОУ:
а – входных и выходных; б – электропитания

Поэтому функционально ОУ часто рассматривают как четырехполюсник, имеющий кроме общего вывода два входа и один выход. Один из входов усилителя обозначают знаком «+», что означает неинвертирующий, или прямой, вход. Инвертирующий вход в этом случае отмечают знаком «-». При работе ОУ в линейном режиме напряжение на его выходе возрастает с увеличением напряжения U_+ на прямом входе или с уменьшением напряжения U_- на инвертирующем. Дифференциальный и синфазный входные сигналы, соответственно ΔU и $U_{сф}$, определяются по формулам

$$\Delta U = U_+ - U_-; U_{сф} = 0,5(U_+ + U_-).$$

Операционный усилитель является дифференциальным устройством, способным реагировать только на дифференциальный сигнал. Влияние синфазного сигнала пренебрежимо мало и может рассматриваться лишь при оценке погрешности в работе ОУ.

Идеализированная модель ОУ предполагает, что связь между входным дифференциальным сигналом и выходным напряжением описывается соотношением

$$U_{\text{вых}} = K_U \Delta U.$$

Поскольку $K_U \rightarrow \infty$, то использовать ОУ можно только в условиях действия отрицательной обратной связи, осуществляемой через внешнюю цепь, как показано на рис.9.

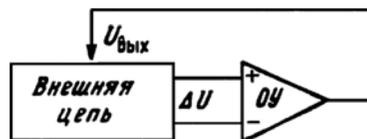


Рис. 9. Включение ОУ с обратной связью

Внешняя цепь чаще всего является линейной пассивной цепью, однако в общем случае может содержать дополнительные усилительные элементы. Обратная связь будет отрицательной, если при увеличении выходного напряжения $U_{\text{вых}} = U_{\text{о.с}}$ уменьшится ΔU . В этом случае в цепи обратной связи устанавливается равновесный режим, при котором $\Delta U = U_{\text{вых}}/K_U \rightarrow 0$, т.е. ОУ выполняет по отношению к внешней цепи функцию автоматического регулятора, формирующего на своем выходе такой сигнал управления внешней цепью, при котором дифференциальный сигнал ΔU на входе ОУ (рассматриваемый как сигнал рассогласования) принимает нулевое значение.

Для иллюстрации изложенного рассмотрим две простые схемы (рис. 10, 11). На рис. 10 управляемая цепь представлена двумя связями. Одна соединяет прямой вход ОУ с входным зажимом устройства ($U_+ = U_{\text{вх}}$), другая – инвертирующий вход ОУ с его выходом ($U_- = U_{\text{вых}}$). При этом сигнал рассогласования $\Delta U = U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}$.

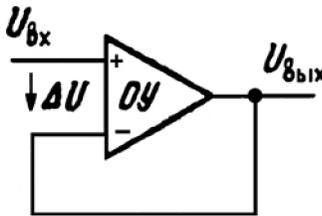


Рис. 10. Включение ОУ в режиме повторителя напряжения

Современные ОУ имеют следующие основные параметры.

Коэффициент усиления напряжения $K_{уи}$ – отношение изменения входного напряжения к вызвавшему его изменению входного напряжения. В общем случае коэффициент усиления напряжения, не охваченного обратной связью ОУ, равен произведению

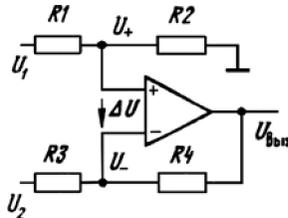


Рис. 11. Схема алгебраического сумматора напряжения

K_{ui} всех его каскадов. В настоящее время K_{ui} 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.6). 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 $U_{\text{вых. макс}}$ – максимальное значение выходного напряжения, при котором искажение не превышает заданного значения (см. рис.4). 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. 7). 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. 4). 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 $I_{вх}$ – 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 вызвать появление напряжения на выходе в отсутствии сигнала на входе.

Разность входных токов $\Delta I_{вх}$. Входные токи отличаются друг от друга на 10-12%. 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 $\Delta U_{см}$, дрейф разности входных токов $\Delta I_{вх}$.

Максимальное входное напряжение $U_{вх}$ – 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 $\pm U_{вх}$, в зарубежной литературе дано абсолютное значение диапазона.

Максимальное синфазное входное напряжение $U_{вх. сф}$ – наибольшее значение напряжения, прикладываемого одновременно к обоим входным выводам ОУ относительно нулевого потенциала, превышение которого нарушает работоспособность 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 $R_{н}$. Большая часть ОУ, разработанных в последнее время, имеет каскад, ограничивающий величину выходного тока при внезапном замыкании выходного контакта на шину источника пи-

тания 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 $K_{уи}$, $V_{U_{вых}}$, f_1 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 $K_{уи}=10^3 \dots 10^5$, $f_1=1,5 \dots 10$ МГц; **прецизионные** (инструментальные) с $K_{уи} > 0,5 \cdot 10^6$ 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 разнополярных источников питания от ± 5 до ± 27 В. В настоящее время чаще используют напряжения ± 5 и ± 15 В с допускаемым отклонением $\pm (5 \dots 10) \%$.

Таблица

Параметры операционных усилителей

Тип ОУ							
1	2	3	4	5	6	7	8
Параметры	140УД7, 1408УД2	140УД8	153УД2	153УД3, 140УД9	153УД5А	544УД1	154УД1
Коэффициент усиления $K_{уи}$	$50 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	10^6	$50 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$
Коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{ос.сф}$, дБ	70	90	65	80	120	80	80
Напряжение смещения $U_{см}$	4	20	6	2	1	15	5

МВ							
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_n , КОм	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 2	≥ 2
Максимальное выходное напряжение $U_{вых. макс.}$, В	11,5	10	11	10	10	10	12
Максимальное синфазное входное напряжение $U_{вх.сф}$	11	10	12	6	---	10	---

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
Скорость нарастания выходного напряжения $V_{ц\text{ вых.}}$, 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

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для исследования статических и динамических параметров ОУ представлена на рис. 12. Она включает в себя ОУ, потенциометр R1 (для измерений входного напряжения ОУ), генератор синусоидальных

сигналов Γ_1 (для снятия АЧХ ОУ), генератор импульсных сигналов Γ_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. Подключение сопротивления нагрузки R_n к выходу ОУ осуществляется с помощью переключателя $SA2$. Питание схемы происходит от двух источников постоянного напряжения $\pm U_{ин}$.

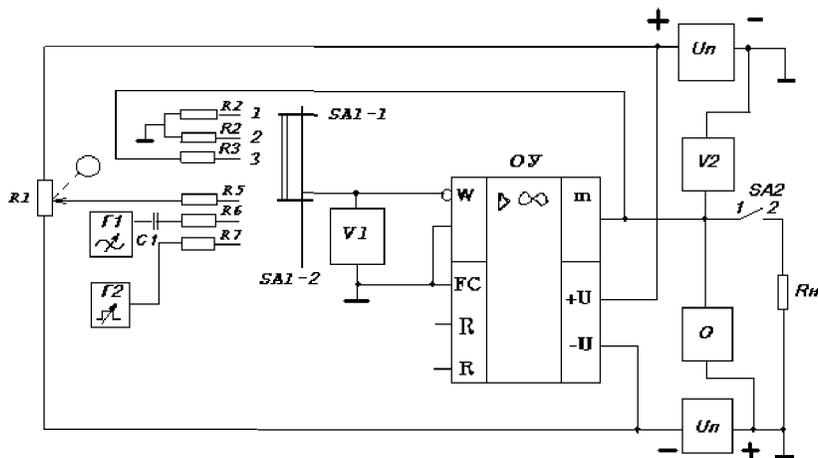


Рис.12.

Схема лабораторной установки

4. 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 $K_{\text{у}} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}}$ и сравнить их с паспортными данными. Установить переключатель SA2 в положение «1» («Выкл.») и оценить изменение $U_{\text{ВЫХ. макс}}$, $U_{\text{см}}$, $K_{\text{у}}$.

2. Исследование амплитудно-частотной характеристики ОУ.

Установить переключатели SA1 и SA2 в положение «2». Изменяя частоту синусоидального сигнала генератора Γ_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.

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 ОУ.
4. Теоретические и экспериментальные данные (таблицы, графики, расчеты).
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.
9. Чем определяется погрешность ОУ?
10. Что определяет скоростная характеристика?
11. Назовите параметры, характеризующие динамический и статический режимы работы операционного усилителя.
12. Каково соотношение между входным дифференциальным сигналом и выходным напряжением?
13. Объясните принцип работы ОУ в режиме повторителя напряжения, алгебраического сумматора напряжения.
14. Почему для ОУ необходимо питание U_+ и U_- ?
15. Какими элементами электронной схемы ОУ определяется его амплитудно-частотная характеристика?
16. Объяснить и описать динамическую и статическую погрешности ОУ.
17. Какие ограничения отличают модели реального и идеального ОУ?
18. Объяснить принцип работы дифференциального усилителя.
19. Объяснить принцип работы преобразователя уровня.
20. Объяснить принцип работы усилителя мощности.

Рекомендуемый библиографический список

1. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: справочник/под ред. С. В. Якубовского. – М.: Радио и связь, 1990. – 496 с.

2. Аваев, Н.А. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов / Н.А. Аваев, Ю.Е. Наумов, В.Т. Фролкин. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
3. Измерения и контроль в микроэлектронике: учеб. пособие для вузов / под ред. А. А. Сазанова. – М.: Высш. школа, 1984. – 367 с.
4. Ефимов И.Е., Микроэлектроника: Проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника: учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов – М.: Высш. школа, 1987. – 416 с.
5. Росадо, Л. Физическая электроника и микроэлектроника: / Л. Росадо; пер. с испан. С.И. Баскакова; под ред. В.А. Терехова; предисл. В.А. Терехова. – М.: Высш. шк., 1991. – 351 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	Общие требования к выполнению задания.....
2.	Теоретические основы работы.....
3.	Описание лабораторной установки.....
4.	Порядок выполнения работы.....
	Рекомендуемый библиографический список.....

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ**

*Методические указания
к лабораторной работе*

Составители: Колпаков Анатолий Иванович
Колпаков Всеволод Анатольевич
Шопин Геннадий Павлович

Редактор Т.И. Кузнецова
Компьютерная верстка О.А. Ананьев

Подписано в печать 26.10.2006 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 1,2. Усл.кр.- отт. 1,1. Уч. - изд.л. 1,25.

Тираж 150 экз. Заказ Арт. С-9(Д)/2006

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королева
443086, Самара, Московское шоссе, 34

Издательство Самарского государственного
аэрокосмического университета
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

