

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение Высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский Санкт-Петербургский
государственный политехнический университет»**

**Факультет технической кибернетики
Кафедра «Измерительные информационные технологии»**

Дьяченко Ю.Н.

Основные характеристики операционных усилителей

**Методические указания
к практическим и лабораторным работам**

Санкт-Петербург

2013

Методические указания содержат описания практических и лабораторных работ, выполняемых с применением программы моделирования электрических и электронных схем Multisim, а, также, на лабораторных стендах, в том числе на лабораторной станции NI ELVIS II+.

Целью работы является обучение студентов знанию основных характеристик и параметров операционных усилителей и умению их определять в процессе компьютерного моделирования и экспериментального исследования.

Методические указания предназначены для студентов обучающихся по направлениям подготовки 200100 «Приборостроение», 230400 «Информационные системы и технологии», 090900 «Информационная безопасность» и изучающих дисциплины «Электроника», «Электроника и схемотехника», «Электроника и микропроцессорная техника».

Печатается по решению кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Оглавление

Основные характеристики и параметры операционных усилителей	4
Работа 11.1	11
Исследование основных характеристик операционных усилителей с использованием программы моделирования Multisim	11
Программа работы	11
Методические указания по проведению моделирования работы ОУ	12
Работа 11.2	20
Экспериментальное исследование основных характеристик	20
операционных усилителей	20
Программа работы	20
Методические указания по проведению лабораторной работы	22
Литература	30

Основные характеристики и параметры операционных усилителей

Подробное описание структуры, особенностей построения ОУ, его основных характеристик и параметров содержится в соответствующей технической литературе [1], [2], [3], [4]. В данном разделе приведена только краткая информация, необходимая для выполнения работы. Детальную информацию о параметрах ОУ, приведенных в табл. 11.2 можно найти на сайте компании Analog Devices [7].

Операционный усилитель – дифференциальный усилитель постоянного тока с высоким коэффициентом усиления по напряжению, имеющий два входа – инвертирующий и не инвертирующий.

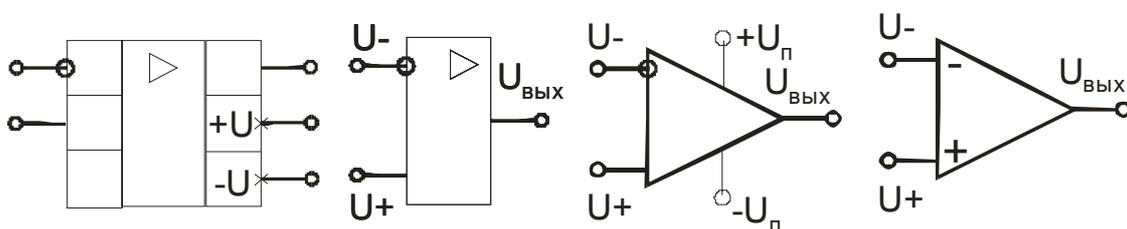


Рис. 11.1. Варианты обозначения ОУ с выводами питания и без них.

Основные статические характеристики и параметры ОУ

Дифференциальное напряжение между входами – входное напряжение

$$U_{\text{ВХ}} = U_{+} - U_{-}$$

Синфазное напряжение – среднее значение напряжения на входах относительно нулевого узла (земли)

$$U_{\text{сф}} = 0,5 \cdot (U_{+} + U_{-})$$

Как правило, синфазное напряжение представляет собой помеху.

Передаточная характеристика на постоянном токе (рис. 11.2) – зависимость величины выходного напряжения от величины входного напряжения

$$U_{\text{ВЫХ}} = F(U_{\text{ВХ}})$$

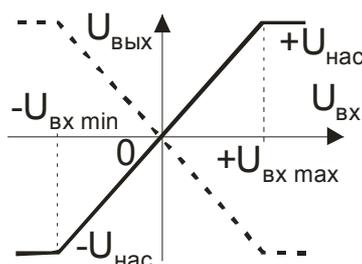


Рис. 11.2. Передаточные характеристики ОУ.

Характеристика имеет линейный рабочий участок и нерабочие области насыщения ОУ $\pm U_{\text{нас}}$. Её расположение зависит от того, на какой из входов подают $U_{\text{вх}}$.

Коэффициент усиления по напряжению k – отношение изменения $U_{\text{вых}}$ к вызвавшему его изменению входного напряжения $U_{\text{вх}}$ при работе усилителя на *линейном участке* передаточной характеристики.

$$k = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} \quad (11.1)$$

Типовое значение $k = (10^4 \div 10^7)$.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала КОСС – отношение коэффициента усиления k к коэффициенту усиления синфазного сигнала $k_{\text{сф}}$.

$$M_{\text{сф}} = \left| \frac{k}{k_{\text{сф}}} \right|$$

В справочниках приводят значение логарифмического КОСС

$$L_{\text{сф}} = 20 \log_{10} M_{\text{сф}} \text{ [дБ]} \quad (11.2)$$

Как правило, $U_{\text{сф}}$ является для ОУ паразитным, следовательно, чем выше $M_{\text{сф}}$, тем качественнее усилитель.

Типовое значение для ОУ $M_{\text{сф}} = 10^3 \div 10^6$, $L_{\text{сф}} = (60 \div 120)$ дБ

Напряжение смещения нуля $U_{\text{см}}$ – дифференциальное входное напряжение ОУ, при котором $U_{\text{вых}} = 0$.

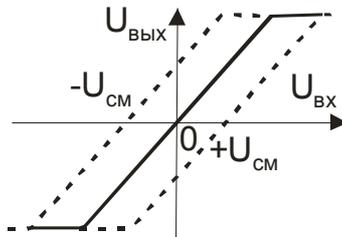


Рис. 11.3. Передаточные характеристики ОУ с учетом $U_{\text{см}}$.

Передаточная характеристика реального ОУ (рис. 11.3) смещена относительно нуля на $\pm U_{\text{см}}$. Возникает $U_{\text{см}}$ из-за несимметричности входного дифференциального каскада ОУ. Типовое значение $U_{\text{см}}$ современных ОУ:

- входной каскад на биполярных транзисторах (БТ) $U_{\text{см}} = (0,01 \div 0,5)$ мВ;
- входной каскад на полевых транзисторах (ПТ) $U_{\text{см}} = (0,1 \div 2)$ мВ.

Значение $U_{\text{см}}$ зависит от влияющих факторов – температуры, напряжения питания ОУ, времени.

Средний входной ток – среднее значение токов инвертирующего и не инвертирующего входов ОУ

$$I_{\text{вх}} = 0,5 \cdot |I_{+} + I_{-}| \quad (11.3)$$

Типовые значения:

ОУ с БТ $I_{\text{ВХ}} = (1 \div 500) \text{ нА}$ – ток базы; ОУ с ПТ $I_{\text{ВХ}} = (1 \div 500) \text{ пА}$ – ток затвора.

Ток смещения (разностный входной ток)

$$I_{\text{СМ}} = |I_+ - I_-| \approx (0,05 \div 0,5) I_{\text{ВХ}} \quad (11.4)$$

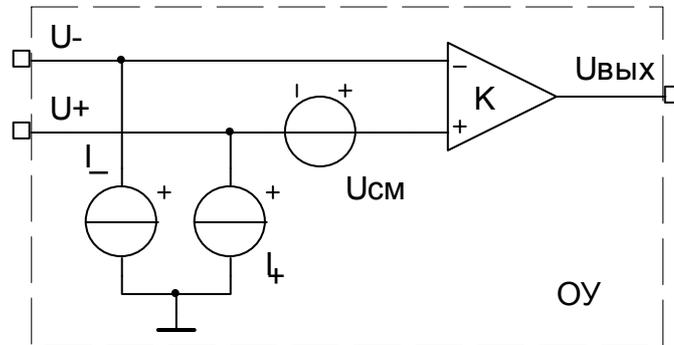


Рис. 11.4. Эквивалентная схема ОУ с напряжением смещения и входными токами.

Наличие напряжения смещения и входных токов отражает эквивалентная схема ОУ с источником напряжения $U_{\text{СМ}}$ и источниками токов I_+ и I_- на входе ОУ.

Входное сопротивление $r_{\text{ВХ}}$ – сопротивление между входами ОУ – для дифференциального сигнала. Типовые значения:

для БТ - $r_{\text{ВХ}} = (10^5 \div 10^7) \text{ Ом}$; для ПТ - $r_{\text{ВХ}} = (10^{10} \div 10^{13}) \text{ Ом}$.

Входное сопротивление для синфазного сигнала $r_{\text{СФ}}$ – сопротивление каждого входа ОУ на узел земли. Типовые значения:

для БТ - $r_{\text{СФ}} \approx (10^2 \div 10^3) r_{\text{ВХ}}$; для ПТ - $r_{\text{СФ}} \approx r_{\text{ВХ}}$.

Выходное сопротивление $r_{\text{ВЫХ}}$ – сопротивление с выхода ОУ на узел земли.

Типовое значение $r_{\text{ВЫХ}} = (50 \div 500) \text{ Ом}$.

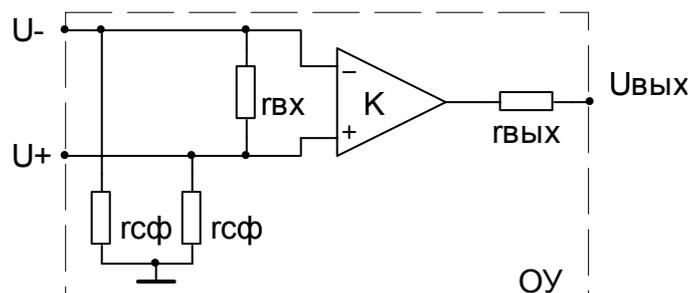


Рис. 11.5. Эквивалентная схема ОУ с входными и выходным сопротивлениями. Сопротивления $r_{\text{ВХ}}$, $r_{\text{СФ}}$, $r_{\text{ВЫХ}}$ являются динамическими, следовательно, их определяют по соответствующим приращениям напряжений и токов. В упрощенной эквивалентной схеме ОУ (рис. 11.5) их изображают в виде постоянных сопротивлений.

Основные динамические характеристики и параметры ОУ

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость коэффициента усиления ОУ от частоты входного синусоидального напряжения:

$$k(f) \quad \text{при} \quad U_{\text{вх}} \rightarrow \sin$$

На практике, учитывая высокое значение k , удобнее использовать логарифмическую АЧХ, которую обычно и приводят в справочниках

$$k(f) = 20 \log_{10} |k(f)| \quad [\text{дБ}]$$

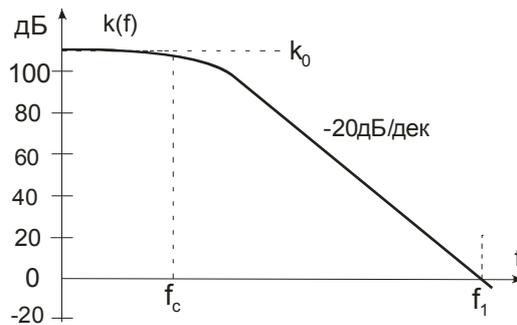


Рис. 11.6. Типовая АЧХ ОУ.

Спад АЧХ на высоких частотах -20 дБ/дек означает, что при увеличении частоты f в 10 раз значение $k(f)$ уменьшается в 10 раз, т.е. $k(f)$ изменяется обратно пропорционально f .

Частота единичного усиления f_1 – частота, на которой $k(f_1) = 1$

Типовое значение $f_1 = (0,1 \div 100) \text{ МГц}$.

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) – зависимость от частоты угла фазового сдвига между выходным и синусоидальным входным напряжениями ОУ:

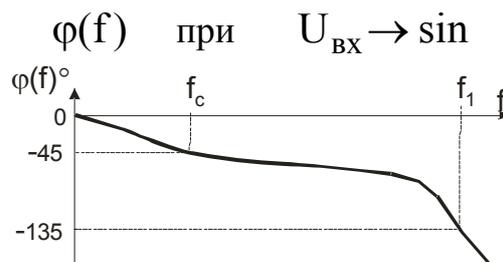


Рис. 11.7. Типовая ФЧХ ОУ.

Для большинства ОУ выполняется условие $|\varphi(f_1)| \leq 135^\circ$, обеспечивающее устойчивую работу устройств на основе ОУ с отрицательными обратными связями.

Переходная характеристика – выходная реакция ОУ $U_{\text{вых}}$ на прямоугольный входной импульс $U_{\text{вх}}$.

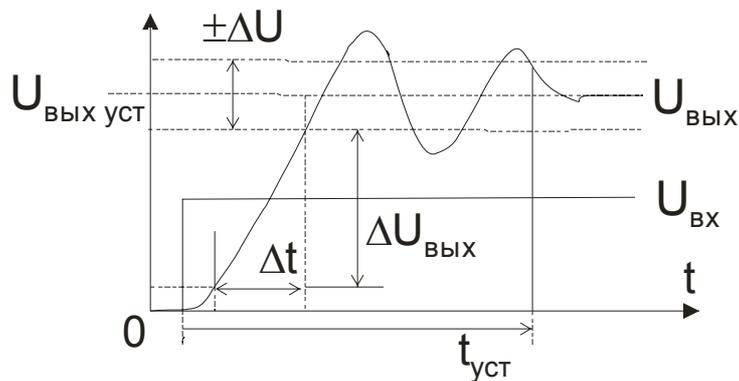


Рис. 11.8. Типовая переходная характеристика ОУ.

Максимальная скорость нарастания выходного напряжения V_{\max} – наибольшая скорость изменения $U_{\text{ВЫХ}}$ ОУ при воздействии на его вход прямоугольным импульсом $U_{\text{ВХ}}$.

$$V_{\max} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t} \quad (11.5)$$

Типовой диапазон $V_{\max} = (0,3 \div 100) \text{В/мкс}$

Практически определяют V_{\max} на участке кривой отклика $U_{\text{ВЫХ}}$ между 10 и 90%-ми уровнями амплитуды. Конечное значение V_{\max} приводит к ограничению амплитуды и искажению формы $U_{\text{ВЫХ}}$ ОУ при увеличении частоты.

Частота полной мощности $f_{\text{ПМ}}$ – наибольшая частота входного синусоидального напряжения, при которой выходное напряжение ОУ максимальной амплитуды $U_{\text{ВЫХ max}}$ ещё сохраняет синусоидальную форму. Значение $f_{\text{ПМ}}$ связано с V_{\max} зависимостью:

$$f_{\text{ПМ}} = \frac{V_{\max}}{2\pi \cdot U_{\text{ВЫХ max}}} \quad (11.6)$$

При дальнейшем увеличении частоты $U_{\text{ВХ}}$, синусоидальное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ приобретает треугольную форму, а его амплитуда начинает уменьшаться.

Таблица 11.1. Основные параметры ОУ

Параметры	$I_{вх}$	$I_{см}$	$\Delta I_{вх Т}$	$U_{см}$	$\Delta U_{см Т}$	k	$L_{сф}$	$r_{вх}$	$r_{сф}$	$r_{вых}$	f_l	V_{max}	$f_{пм}$	U_n
	I_b	I_{os}	$\Delta I_b/\Delta T$	V_{os}	$V_{os}/\Delta T$	A_{v0}	CMR	R_{in}	$R_{inсm}$	R_{out}	GBP	SR	FPB	
Единицы измерения	пА	пА	пА/К	мкВ	мкВ/К	В/мВ	дБ	МОм	Гом	Ом	МГц	В/мкс	кГц	В
	рА	рА	рА/К	μV	$\mu V/K$	V/mV	dB	M Ω	G Ω	Ω	MHz	V/ μs	kHz	V
Тип ОУ	Max	Max	Typ	Max	Typ	Min	Min	Typ	Typ	Typ	Typ	Typ	Typ	Max
AD797	10 ⁶	4·10 ⁵		150	0,5	2000	115	0,01	0,1		100	20	280	36
AD8510	80	70	*	400	2	120	110				8	20		36
AD8610	10	10	*	100	0,5	100	90				25	60		27
AD8627	1	0,5	*	750	2,5	300	105				5	5		27
AD8641	1	0,5	*	750	2,5	220	90				3,5	3		27
AD8698	700	700		100	1	900	120				1	0,4		30
ADA4000-1	40	40	*	1500	2	100	80	10 ⁴			5	2		36
ADTL082	100	100	*	5000	10	100	80	10 ⁶			5	20		36
OP113	6·10 ⁵	5·10 ⁴		150	1	1000	96				3,4	1,2		36
OP1177	2000	1000		60	0,5	1000	120				1,3	0,7		36
OP177	2000	2000		60	0,3	2000	115	40	200	60	0,6	0,3		44
OP183	6·10 ⁵	5·10 ⁴	1600	1000	3	100	70			15	5	15	50	36
OP184	4·10 ⁵	5·10 ⁴	150	100	0,5	150	86				4	4	35	36
OP193	2·10 ⁴	4·10 ³		150	0,5	500	97				0,035	0,015		36
OP200	1000	1000		200	0,5	3000	110	10	100		0,5	0,1		40
OP249	75	25	*	900		500	80	10 ⁶		35	4,7	22		36

Основные параметры ОУ, приведенные в таблице носят ориентировочный характер, т.к. их значения допускают значительный разброс. Для ряда параметров приведены предельные наибольшие (Max) или наименьшие (Min) значения, за которые не должны выходить результаты, полученные в ходе проведения моделирования. Для ряда параметров приведены типовые значения (Typ), причем результаты, полученные в ходе проведения моделирования, не должны многократно отличаться от типовых величин.

Обозначение основных параметров ОУ, приведенных в табл. 11.1.

$I_{вх}$ - входной ток ОУ

$I_{см}$ - разностный входной ток (ток смещения) ОУ

$\Delta I_{вх Т}$ - температурный коэффициент входного тока ОУ

* - входной ток удваивает своё значение на каждые 10 градусов

$U_{см}$ - напряжение (э.д.с.) смещения ОУ

$\Delta U_{см Т}$ - температурный коэффициент напряжения смещения

PSRR – логарифмический коэффициент ослабления нестабильности источников питания

k - собственный статический коэффициент усиления ОУ (его значение приведено в тысячах – размерность В/мВ)

$r_{вх}$ - входное сопротивление ОУ для дифференциального сигнала

$r_{сф}$ - входное сопротивление ОУ для синфазного сигнала

$r_{вых}$ - выходное сопротивление ОУ

$L_{сф}$ - коэффициент ослабления синфазного сигнала ОУ (КОСС)

f_1 - частота единичного усиления ОУ

V_{max} – максимальная скорость изменения выходного напряжения ОУ

$f_{пм}$ – частота полной мощности ОУ

$U_{п max}$ – максимально-допустимое напряжение питания ОУ

Работа 11.1

Исследование основных характеристик операционных усилителей с использованием программы моделирования Multisim

Цель работы – знание основных характеристик и параметров операционного усилителя (ОУ) и умение их определять с использованием программы компьютерного моделирования Multisim.

Программа работы

1. Снять передаточную характеристику ОУ на постоянном токе. Определить значения:
 - коэффициента усиления ОУ по постоянному току;
 - выходные напряжения насыщения ОУ (максимальное и минимальное);
 - напряжение смещения ОУ.
2. Определить коэффициент ослабления синфазного сигнала ОУ.
3. Измерить значения входных токов ОУ. Определить значения:
 - напряжение смещения ОУ;
 - среднего входного тока ОУ;
 - тока смещения (разностного входного тока) ОУ.
4. Снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазо-частотную характеристику (ФЧХ) ОУ. По снятым характеристикам определить:
 - частоту единичного усиления ОУ;
 - скорость спада АЧХ ОУ на высоких частотах;
 - угол фазового сдвига на частоте единичного усиления ОУ.
5. Определить максимальную скорость нарастания выходного напряжения ОУ.
6. Определить частоту полной мощности ОУ.
7. Оформить отчет по работе, провести сравнительный анализ результатов моделирования и паспортных данных ОУ, оценить полученные результаты.

Методические указания по проведению моделирования работы ОУ

Таблица 11.2. Варианты заданий

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип ОУ	AD8698	AD8510	AD8627	OP183	ADTL082	OP1177	AD8610	AD797
№ вар.	9	10	11	12	13	14	15	16
Тип ОУ	OP177	OP184	OP113	AD8641	ADA4000-1	OP200	OP249	OP193

Запустите программу **Multisim** и выберите заданный тип ОУ в меню **Place/Component/ Analog** или в панели **Components**. Аналогичным образом выбирают другие элементы, необходимые для построения схемы.

В разделе **Sources** выбирают источники постоянного напряжения для питания каскада, например **VDD** и **VCC**. Используют двухполярное питание, поэтому напряжения источников устанавливают равными по значению $12 \div 15\text{В}$ и противоположными по знаку, причем общее напряжение, приложенное к ОУ не должно превышать значения $U_{\text{п max}}$.

Если на схеме не проставлены номера узлов, откройте пункт меню **Options/Sheet Properties/ Circuit** установите опцию **Show all**.

1. Снятие передаточной характеристики ОУ на постоянном токе

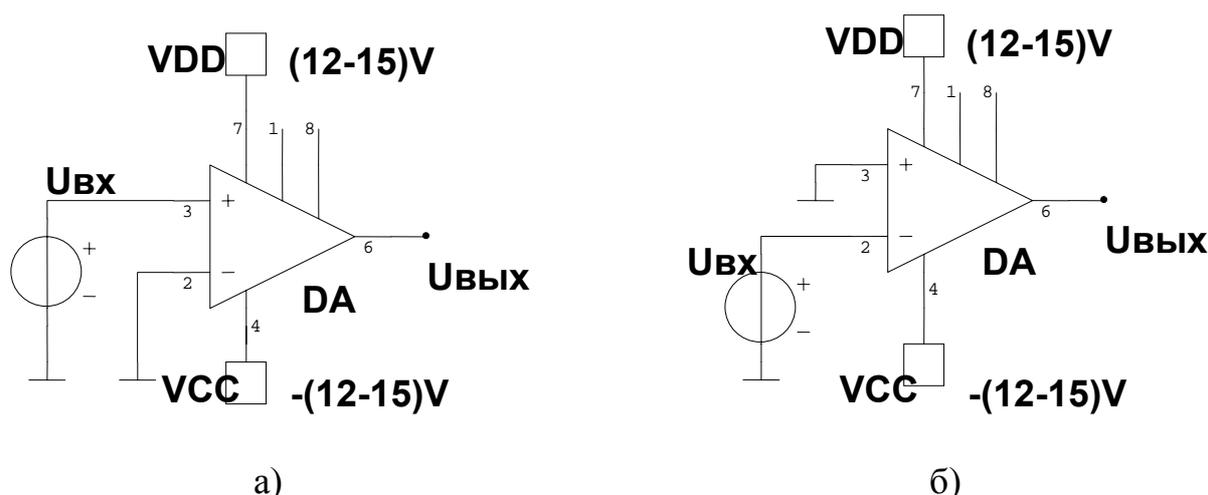


Рис. 11.9. Схемы для снятия передаточной характеристики ОУ.

Для снятия передаточной характеристики $U_{\text{вых}} = F(U_{\text{вх}})$ собирают схемы рис. 11.9а и 11.9б, которые позволяют получить характеристики ОУ в не инвертирующем и инвертирующем режимах. К выходу схемы необходимо подклю-

чить соединительный контакт, чтобы образовался узел. Напряжение $U_{вх}$ на обе схемы можно задать от одного источника и одновременно построить две характеристики на одном графике. Используя анализ *Simulate/Analysis/DC Sweep* можно ступенями заданной величины изменять напряжение одного или двух источников и наблюдать изменения напряжений в любых узлах схемы. Для получения передаточной характеристики ОУ задают изменения напряжения $U_{вх}$.

Необходимые установки:

- Source: узел подключения источника $U_{вх}$;
- Start value и Stop value: начальное и конечное значения $U_{вх}$
- Increment: величина шага приращения $U_{вх}$;
- Output: выходной узел схемы – $U_{вых}$;

Основную часть графика характеристики должен занимать линейный рабочий участок. Кроме того, должны быть небольшие участки положительного и отрицательного насыщения усилителя, примерно как представлено на рис. 11.2. Для достижения этой цели необходимо правильно подобрать пределы изменения $U_{вх}$ и величину шага приращения $U_{вх}$, учитывая высокое значение коэффициента усиления ОУ и его напряжение смещения. Если пределы изменения и шаг приращения $U_{вх}$ слишком велики, то на графике будут видны только участки насыщения ОУ, а рабочий участок будет представлять собой практически вертикальную линию.

По снятой передаточной характеристике определяют:

- выходные напряжения насыщения ОУ $\pm U_{нас}$;
- напряжение смещения ОУ $U_{см}$;
- коэффициент усиления ОУ на рабочем участке характеристики, который рассчитывают по формуле (11.1).

Определять по графику величины напряжений и их приращений удобно с использованием маркеров.

2. Определение коэффициента ослабления синфазного сигнала (КОСС) ОУ

Измерение КОСС обычно производится по схеме, представленной на рис. 11.10 [5,6]. Для корректной работы такой схемы необходимо выполнить условие:

$$\frac{R2}{R1} = \frac{R4}{R3} \gg 1, \text{ например } R1 = R3 = 100 \text{ Ом}, \quad R2 = R4 = 100 \text{ кОм}.$$

Номиналы резисторов могут быть другими, но равенство должно точно выполняться. Напряжение $U_{сф}$ задают от источника постоянного напряжения.

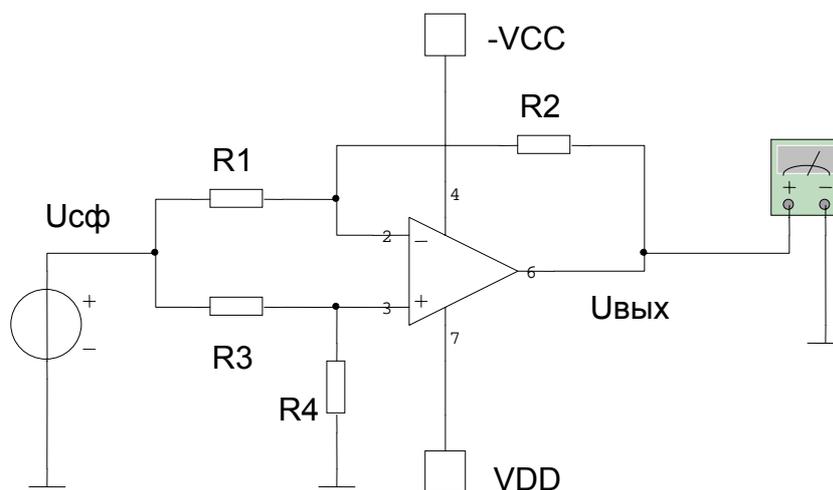


Рис. 11.10. Схема измерения КОСС.

Моделирование проводят двумя способами, причем полученные результаты должны совпадать. В первом случае проводят два измерения $U_{\text{вых}}$ мультиметром при значениях $U_{\text{сф}}$ равных $-(5 \div 8)\text{В}$ и $+(5 \div 8)\text{В}$.

Во втором случае используют анализ *Simulate/Analyses/DC Sweep*, позволяющий ступенями заданной величины изменять напряжение $U_{\text{сф}}$ и наблюдать изменения напряжения $U_{\text{вых}}$.

Необходимые установки:

- Source: узел подключения источника $U_{\text{сф}}$;
- Start value и Stop value: начальное и конечное значения $U_{\text{сф}}$ задают в диапазоне $\pm(5 \div 8)\text{В}$, таким образом, чтобы не превысить допустимого значения $U_{\text{сф max}}$.
- Increment: величина шага приращения $U_{\text{сф}}$, устанавливают $(0,5 \div 1)\text{В}$;
- Output: выходной узел схемы – $U_{\text{вых}}$;

Значение КОСС рассчитывают по формуле:

$$M_{\text{сф}} \approx \frac{\Delta U_{\text{сф}}}{\Delta U_{\text{вых}}} \cdot \frac{R2}{R1}$$

Приращения напряжений $\Delta U_{\text{сф}}$ и $\Delta U_{\text{вых}}$ определяют по установкам входного источника и показаниям мультиметра, или по полученному графику с использованием маркеров. Наряду с $M_{\text{сф}}$ по формуле (11.2) определяют значение логарифмического КОСС $L_{\text{сф}}$.

3. Измерение входных токов и напряжения смещения ОУ

Для определения значений напряжения смещения $U_{\text{см}}$ и входных токов I_+ и I_- ОУ применяют схему, приведенную на рис. 11.11 [5,6], представляющую собой

повторитель напряжения с заземленным входом ($U_{\text{вх}}=0$). Методика измерения основана на том, что I_+ и I_- создают падения напряжения на подключенных к входам резисторах $R1$ и $R2$, что приводит к появлению дополнительного смещения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$.

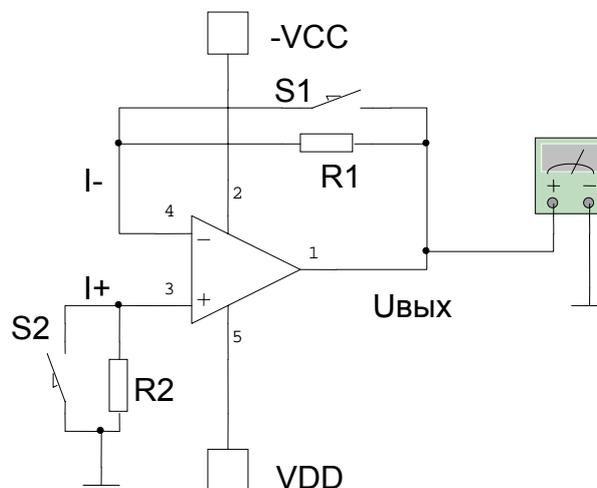


Рис. 11.11. Схема для измерения напряжения смещения и входных токов ОУ.

Значение сопротивлений резисторов $R1=R2=R$ выбирают в зависимости от типа исследуемого ОУ, т.к. $I_{\text{вх}}$ в ОУ с входными каскадами на биполярных и полевых транзисторах могут отличаться на несколько порядков. Используя данные табл. 11.2 можно предварительно оценить значение R , из условия:

$$I_{\text{вх}} \cdot R = (0,001 \div 1)\text{В}$$

Величину $U_{\text{вых}}$ измеряют двумя способами: с помощью мультиметра и с использованием анализа режима по постоянному току *Simulate/Analyses/DC Operating Point*. Результаты, полученные в обоих случаях, должны совпадать.

Проводят четыре измерения $U_{\text{вых}}$ при разных положениях ключей $S1$ и $S2$.

$S1$ и $S2$ замкнуты. На выходе напряжение смещения нуля $U_{\text{см}}$.

$$U_{\text{вых1}} = U_{\text{см}}$$

$S1$ замкнут, $S2$ разомкнут. На выходе добавляется падение напряжения от I_+ .

$$U_{\text{вых2}} = I_+ \cdot R + U_{\text{см}}$$

$S1$ разомкнут, $S2$ замкнут. На выходе добавляется падение напряжения от I_- .

$$U_{\text{вых3}} = -I_- \cdot R + U_{\text{см}}$$

$S1$ и $S2$ разомкнуты. На выходе добавляется падение напряжения от I_+ и I_- .

$$U_{\text{вых4}} = I_+ \cdot R - I_- \cdot R + U_{\text{см}}$$

По результатам измерения $U_{\text{ВЫХ } i}$ определяют значения $U_{\text{СМ}}$, I_+ и I_- , а по формулам (11.3) и (11.4) рассчитывают соответственно входной ток $I_{\text{ВХ}}$ и ток смещения $I_{\text{СМ ОУ}}$. Величину $I_{\text{СМ}}$ так же можно определить непосредственно по измеренным значениям $U_{\text{ВЫХ } 4}$ и $U_{\text{СМ}}$, причем оба результата должны приблизительно совпадать. То же относится и к величине $U_{\text{СМ}}$, определенной ранее в п.1.

Напряжения $U_{\text{ВЫХ } i}$ могут иметь любой знак, в зависимости от знака $U_{\text{СМ}}$ и направления $I_{\text{ВХ}}$ – втекающий или вытекающий ток. В справочной литературе приводят положительное значение $U_{\text{СМ}}$ и $I_{\text{ВХ}}$ независимо от его направления.

4. Снятие амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной характеристик (ФЧХ) ОУ

Для построения характеристик можно использовать схему, приведенную на рис.11.9а, с тем изменением, что в качестве генератора входного сигнала $U_{\text{ВХ}}$ используют источник переменного синусоидального напряжения или функциональный генератор, как изображено на рис. 11.12.

В ходе проведения частотного анализа синусоидальный источник по умолчанию генерирует напряжение амплитудой 1В, следовательно, масштаб вертикальной оси графика АЧХ будет отражать значение коэффициента усиления ОУ. В случае использования функционального генератора необходимо предварительно установить режим генерации синусоидального напряжения амплитудой 1В.

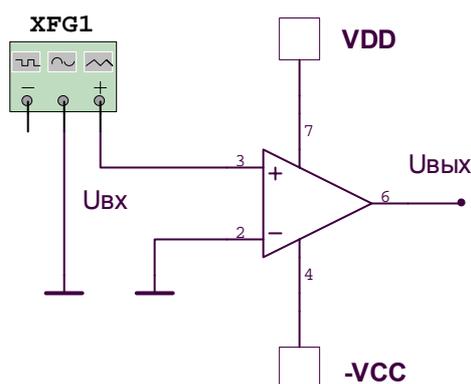


Рис. 11.12. Схема для снятия АЧХ и ФЧХ ОУ.

Следует отметить, что программа моделирования не совсем корректно отражает АЧХ ОУ не охваченного цепью обратной связи, поэтому характеристика носит в определенной мере качественный характер. Значение коэффициента усиления на низких частотах оказывается существенно заниженным, однако, спад АЧХ на высоких частотах и частота единичного усиления f_1 отражаются правильно.

Моделирование проводят в режиме *Simulate/Analyses / AC Analysis*.

Необходимые установки:

- Start frequency: начальную частоту устанавливают $(1 \div 10)$ Гц;
- Stop frequency: конечную частоту подбирают экспериментально в ходе проведения моделирования и устанавливают равной $(2 \div 4)f_1$;
- Sweep type: масштаб частотной оси - логарифмический десятичный;
- Number of points per decade: количество точек на декаду в которых проводится анализ, достаточно 10 точек;
- Vertical scale: масштаб вертикальной оси. АЧХ снимают дважды: на одном графике используют обычный логарифмический масштаб, на другом логарифмический в децибелах;
- Output: выходной узел каскада, в котором измеряется переменное выходное напряжение $U_{\text{вых}}$.

По полученным АЧХ и ФЧХ, с помощью маркеров, определяют значения частоты f_1 , крутизны спада АЧХ в [дБ/дек], угла фазового сдвига φ на частоте f_1 и сравнивают их с паспортными и теоретическими данными.

5. Определение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ

Для измерения параметра V_{max} используют одну из схем, приведенных на рис. 11.13а или 11.13б [5, 6]. Схемы представляют собой соответственно не инвертирующий или инвертирующий повторитель напряжения, нагруженный минимально допустимым сопротивлением нагрузки R_n .

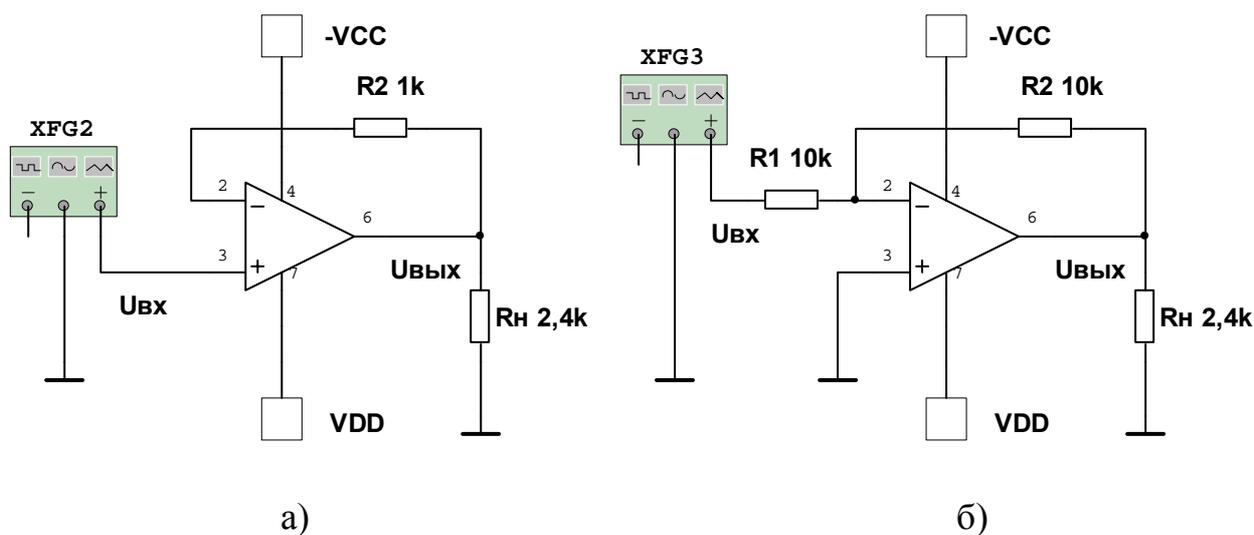


Рис. 11.13. Схемы для определения V_{max} и $f_{\text{пм}}$ ОУ.

В качестве источника $U_{вх}$ удобно использовать функциональный генератор, расположенный на приборной панели. Можно, но менее удобно, использовать для этой цели генератор импульсного напряжения прямоугольной формы и синусоидального напряжения из панели компонентов.

Необходимые измерения проводят или с использованием двухканального осциллографа, или в режиме *Simulate/Analyses/ Transient Analysis*, позволяющем исследовать зависимость от времени сигналов в узлах схемы при воздействии на ее вход сигналов различной формы.

Необходимые установки:

- Initial condition – автоматическая установка начальных условий.
- Start time – время начала анализа – 0.
- End time – конечное время анализа устанавливают в ходе проведения моделирования таким образом, чтобы можно было рассмотреть 1 ÷ 3 периода $U_{вых}$.
- Minimum number of time points – количество точек временной оси, в которых проводятся расчеты. При установленных по умолчанию 100 точках временные диаграммы могут получиться «угловатыми», поэтому рекомендуется устанавливать 1000 точек.
- Output – узлы $U_{вх}$ и $U_{вых}$.

В генераторе задают режим генерации прямоугольного напряжения $U_{вх}$. Амплитуду $U_{вх}$ задают близкой к значению максимального выходного напряжения ОУ $U_{нас}$, определенному в п.1 работы, примерно на $(2÷3)U$ меньше $U_{нас}$. Коэффициент заполнения (Duty cycle) – 50%. Частоту $U_{вх}$ и время анализа подбирают в процессе моделирования, исходя из того, что напряжение $U_{вых}$ должно в итоге принять трапецеидальную или треугольную форму.

Значение V_{max} рассчитывают по формуле (11.5), определив $\Delta U_{вых}$ и Δt с помощью маркеров по полученной временной диаграмме $U_{вых}$. Рассчитывают скорость фронта и спада импульса, а в качестве окончательного результата берут меньшее значение.

6. Определение частоты полной мощности ОУ

Для определения частоты $f_{пм}$ используют схемы рис. 11.13, но в генераторе задают режим генерации синусоидального напряжения. Амплитуду $U_{вх}$ устанавливают такой же, как и при измерении V_{max} , причем на низких частотах до 1кГц не должно быть искажений синусоидальной формы $U_{вых}$. Частоту $U_{вх}$ увеличи-

вают до тех пор, пока на временной диаграмме не станут заметны треугольные искажения синусоидальной формы $U_{\text{вых}}$. Соответствующее значение частоты и является значением частоты $f_{\text{пм}}$.

Необходимо отметить, что в начале анализа могут проявиться искажения формы сигнала не связанные с $f_{\text{пм}}$, а вызванные переходным процессом. Их можно исключить, выбрав время начала анализа не равным нулю.

Для проверки полученных в п.5 и п.6 результатов используют связывающую V_{max} и $f_{\text{пм}}$ формулу (11.6), учитывая, что формула и результат определения $f_{\text{пм}}$ носят приближенный характер.

7. Требования к отчету по работе

В отчёте должны быть приведены:

- схемы с номиналами элементов, использованные при моделировании;
- полученные результаты измерений;
- необходимые расчёты величин по полученным результатам;
- графики передаточной характеристики, АЧХ и ФЧХ ОУ;
- анализ результатов проведенного исследования, в виде сравнения полученных и рассчитанных параметров ОУ с паспортными величинами, например в виде табл. 11.3.

Таблица 11.3. Паспортные и экспериментально полученные параметры ОУ.

Параметр	Единицы	Значение		Норма да/нет
		Паспорт	Эксперимент	
k				
$U_{\text{см}}$	мкВ (мВ)			
$k_{\text{П}}$	мкВ/В			
$K_{\text{П}}$	дБ			
$I_{\text{вх}}$	пА (нА)			
$I_{\text{см}}$	пА (нА)			
V_{max}	В/мкс			
$f_{\text{пм}}$	кГц			
$L_{\text{сф}}$	дБ			

Работа 11.2

Экспериментальное исследование основных характеристик операционных усилителей

Цель работы – знание основных характеристик и параметров операционного усилителя (ОУ) и умение их практического измерения.

Программа работы

1. Снять передаточную характеристику ОУ на постоянном токе. Определить:
 - значение коэффициента усиления ОУ по постоянному току;
 - выходные напряжения насыщения ОУ (максимальное и минимальное).
2. Измерить значение напряжения смещения ОУ. Определить:
 - напряжение смещения ОУ;
 - коэффициент влияния нестабильности источников питания ОУ;
 - логарифмический коэффициент ослабления нестабильности источников.
3. Измерить значения входных токов ОУ. Определить:
 - значение среднего входного тока ОУ;
 - значение тока смещения (разностного входного тока) ОУ.
4. Исследовать динамические характеристики ОУ. Определить:
 - максимальную скорость нарастания выходного напряжения;
 - частоту полной мощности.
5. Измерить коэффициент ослабления синфазного сигнала ОУ. Определить:
 - линейный КОСС
 - логарифмический КОСС
6. Оформить отчет по работе, провести сравнительный анализ результатов моделирования и паспортных данных ОУ, оценить полученные результаты.

Таблица 11.4. Основные параметры ОУ

Параметры	$I_{вх}$	$I_{см}$	$U_{см}$	$K_{п}$	k	$L_{сф}$	$r_{вх}$	f_1	V_{max}
	I_b	I_{os}	V_{os}	PSRR	A_{v0}	CMR	R_{in}	GBP	SR
Единицы измерения	нА	нА	мВ	дБ	В/мВ	дБ	МОм	МГц	В/мкс
	пА	пА	мV	dB	V/mV	dB	$M\Omega$	MHz	V/ μ s
Тип ОУ	max	max	max	min	min	min		min	min
К140УД6	50	15	8	75	50	70	1	1	2
К140УД7	400	200	4	75	40	70	0,4	0,8	0,3
К140УД12	50	20	5	75	50	70	5	1	0,8
К140УД17	10	5	0,15	90	120	100	30	0,4	0,1
К140УД18	1	0,2	10	80	50	80	10^6	2	4
К140УД22	0,2	0,05	10	80	50	80	10^6	4	7

В ОУ К140УД6/7/12/17 входной каскад построен на биполярных транзисторах, а в ОУ К140УД18/22 – на полевых транзисторах.

Основные параметры ОУ, приведенные в таблице носят ориентировочный характер, т.к. их значения допускают значительный разброс. Для ряда параметров приведены предельные наибольшие (max) или наименьшие (min) значения, за которые не должны выходить результаты, полученные в ходе проведения экспериментов. Для ряда параметров приведены типовые значения, причем экспериментальные результаты не должны многократно отличаться от типовых величин.

Обозначение основных параметров ОУ, приведенных в табл. 11.4.

$I_{вх}$ - входной ток ОУ

$I_{см}$ - ток смещения (разностный входной ток) ОУ

$U_{см}$ - напряжение (э.д.с.) смещения ОУ

$K_{п}$ – логарифмический коэффициент ослабления нестабильности источников питания

k - собственный статический коэффициент усиления ОУ (его значение приведено в тысячах – размерность В/мВ)

$L_{сф}$ - коэффициент ослабления синфазного сигнала ОУ (КОСС)

$r_{вх}$ - входное сопротивление ОУ для дифференциального сигнала

f_1 - частота единичного усиления ОУ

V_{max} – максимальная скорость изменения выходного напряжения ОУ

Методические указания по проведению лабораторной работы

Выберите ОУ, запишите его тип и используйте при проведении всех экспериментов. Значения параметров ОУ приведены в табл. 11.4.

Для питания усилителей необходимо подключить к лабораторному стенду источники постоянного положительного и отрицательного напряжения. Напряжения источников $\pm U_{\text{П}}$ устанавливаются равными $\pm(14 \div 15)\text{В}$. Напряжения $\pm U_{\text{П}}$ подведены к усилителям внутри стенда через контакты установочных разъёмов, поэтому дополнительных подсоединений ОУ к питанию не требуется.

Конкретные схемы для проведения экспериментов приведены в соответствующих пунктах методических указаний.

1. Снятие передаточной характеристики ОУ на постоянном токе

Передаточные характеристики ОУ DA1 снимают дважды: в не инвертирующем и инвертирующем режимах. Для снятия первой характеристики собирают схему, приведенную на рис. 11.14. Для снятия второй характеристики, схему рис. 11.14 изменяют: не инвертирующий вход ОУ подключают к земле, а инвертирующий вход подключают к резистивному делителю R2, R3.

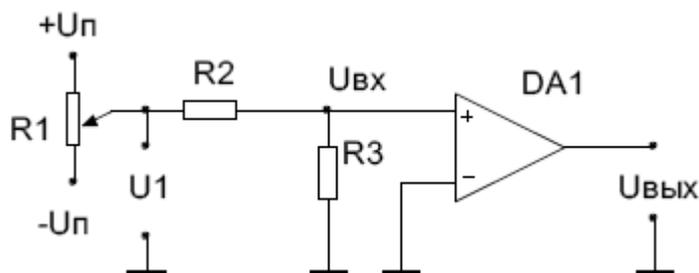


Рис. 11.14. Схема для снятия передаточной характеристики ОУ.

Особенность проведения эксперимента заключается в том, что непосредственное измерение напряжения $U_{\text{вх}}$ с достаточной степенью точности даже при использовании высокочувствительного вольтметра крайне затруднительно, так как коэффициент усиления ОУ велик и, при полном размахе $U_{\text{вых}}$, диапазон изменения напряжения $U_{\text{вх}}$ ограничен ($10 \div 100$) мкВ.

Для получения регулируемого напряжения $U_{\text{вх}}$ столь низкого уровня используют переменный резистор R1, на который подают двухполярное напряжение питания $\pm U_{\text{П}}$, и подключенный к движку R1 резистивный делитель R2 - R3 с высоким коэффициентом деления. Напряжение $U_{\text{вх}}$ после делителя:

$$U_{\text{вх}} = U_1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \approx U_1 \cdot \frac{R_3}{R_2} \quad (11.7)$$

U_1 – напряжение высокого уровня на движке R_1 , изменяющееся в пределах $\pm U_{\text{п}}$.

Примерные значения сопротивлений делителя составляют $R_2 = (1 \div 2) \text{Мом}$, $R_3 = (100 \div 1000) \text{Ом}$.

Другая сложность, возникающая в ходе проведения эксперимента – сильное воздействие низкочастотной помехи, мешающее снять рабочий участок характеристики по отдельным точкам. Поэтому характеристику строят приближенно по двум точкам, в которых и проводят измерения. Вольтметром измеряют напряжения U_1 на движке R_1 , соответствующие напряжениям $U_{\text{вх min}}$ и $U_{\text{вх max}}$ (рис. 11.2) перехода ОУ в режим насыщения, значения которых рассчитывают с использованием формулы (11.7). Фиксацию момента перехода ОУ в режим насыщения и приближенное измерение уровней $U_{\text{вых}} = \pm U_{\text{нас}}$ осуществляют подключенным к выходу ОУ осциллографом. Во избежание получения неверных результатов, не следует загонять ОУ в режим глубокого насыщения, для чего нужно подходить к уровням $\pm U_{\text{нас}}$ постепенно, так, чтобы на экране осциллографа, на прямой соответствующей напряжению насыщения, частично просматривалась переменная помеха.

В отчете по работе приводят график передаточной характеристики ОУ. Основную часть графика должен занимать наклонный рабочий участок, кроме того, должны быть небольшие участки положительного и отрицательного насыщения усилителя, примерно как на рис. 11.3 (с учетом напряжения смещения ОУ).

По снятой характеристике определяют:

- максимальное и минимальное выходные напряжения ОУ $\pm U_{\text{нас}}$;
- напряжение смещения ОУ $U_{\text{см}}$;
- коэффициент усиления ОУ на рабочем участке, рассчитанный по формуле (11.1) с использованием результатов измерения $U_{\text{вх min}}$, $U_{\text{вх max}}$ и $\pm U_{\text{нас}}$.

2. Измерение значения напряжения смещения ОУ

Приближенно напряжение смещения $U_{\text{см}}$ ОУ определяют по передаточной характеристике, полученной в п.1. Для точного измерения значения напряжения смещения применяют схему, приведенную на рис. 11.15 [5,6], в которой ОУ охвачен цепью отрицательной обратной связи R_1 - R_2 . На схему в представленном включении подается $U_{\text{вх}}=0$, следовательно, усиливается только собственное $U_{\text{см}}$

ОУ. Рекомендуемые значения сопротивлений $R1 = 100 \text{ Ом}$ и $R2 = (10 \div 100) \text{ кОм}$ окончательно подбирают в ходе проведения эксперимента, исходя из того, что выходное напряжение ОУ будет находиться в диапазоне $U_{\text{ВЫХ}} = (0,01 \div 1) \text{ В}$.

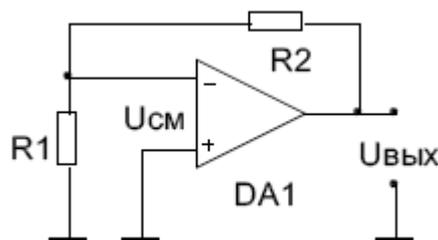


Рис.11.15. Схема для измерения напряжения смещения ОУ.

$U_{\text{ВЫХ}}$ измеряют вольтметром, а значение $U_{\text{СМ}}$ определяют по формуле

$$U_{\text{СМ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{(1 + R2/R1)}$$

Коэффициент k_{Π} влияния нестабильности источников питания ОУ, равный отношению изменения напряжения $U_{\text{СМ}}$ к вызвавшему его изменению одного из питающих напряжений, определяют по той же схеме, представленной на рис. 11.15. Напряжение источника, например положительного U_{Π} , уменьшают на $\Delta U_{\Pi} = (4 \div 5) \text{ В}$, измеряют напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ и определяют его изменение $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$. Аналогичный эксперимент проводят с отрицательным источником $-U_{\Pi}$, предварительно восстановив напряжение положительного источника. Значение k_{Π} рассчитывают для каждого источника питания ОУ отдельно по формуле:

$$k_{\Pi} = \frac{\Delta U_{\text{СМ}}}{\Delta U_{\Pi}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\Pi} \cdot (1 + R2/R1)} \quad \left[\frac{\text{мкВ}}{\text{В}} \right]$$

За окончательный результат принимают большее значение k_{Π} .

В справочниках обычно приводят логарифмический коэффициент ослабления нестабильности источников питания, который рассчитывают по формуле:

$$K_{\Pi} = 20 \text{Log}_{10} \left(\frac{10^6}{k_{\Pi}} \right) \quad [\text{дБ}]$$

3. Измерение входных токов ОУ

Для измерения значений входных токов I_{+} и I_{-} ОУ применяют схему, приведенную на рис. 11.16 [5,6], представляющую собой повторитель напряжения с заземленным входом ($U_{\text{ВХ}}=0$). Методика измерения основана на том, что I_{+} и I_{-} создают падения напряжения на подключенных к входам резисторах $R1$ и $R2$,

что приводит к появлению дополнительного смещения выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$.

Значение сопротивлений резисторов $R_1=R_2=R$ выбирают в зависимости от типа исследуемого ОУ, т.к. $I_{\text{ВХ}}$ в ОУ с входными каскадами на биполярных и полевых транзисторах могут отличаться на несколько порядков. Используя данные табл. 11.4 можно предварительно оценить значение R , из условия:

$$I_{\text{ВХ}} \cdot R = (0,01 \div 1)\text{В}$$

Как правило, нужно взять резисторы максимального номинала, имеющиеся на стенде – 2МОм.

Конденсаторы емкостью $C_1 = C_2 = (8 \div 50)\text{нФ}$, предназначенные для подавления помех, шумов и уменьшения вероятности самовозбуждения ОУ, на результаты измерений не влияют.

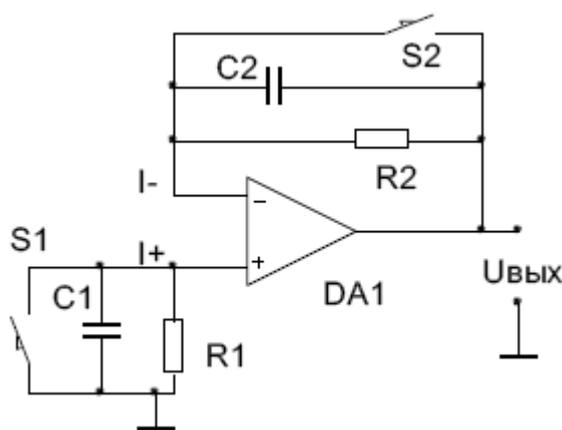


Рис.11.16. Схема для измерения входных токов ОУ.

Величину $U_{\text{ВЫХ}}$ измеряют с помощью вольтметра. Ключи на макете отсутствуют, поэтому вместо них используют перемычки, закорачивающие соответствующий резистор.

Проводят четыре измерения $U_{\text{ВЫХ}}$ при разных положениях ключей S_1 и S_2 .

S_1 и S_2 замкнуты. На выходе напряжение смещения нуля $U_{\text{см}}$.

$$U_{\text{ВЫХ1}} = U_{\text{см}}$$

S_2 замкнут, S_1 разомкнут. На выходе добавляется падение напряжения от I_+ .

$$U_{\text{ВЫХ2}} = I_+ \cdot R + U_{\text{см}}$$

S_2 разомкнут, S_1 замкнут. На выходе добавляется падение напряжения от I_- .

$$U_{\text{ВЫХ3}} = -I_- \cdot R + U_{\text{см}}$$

S_1 и S_2 разомкнуты. На выходе добавляется падение напряжения от I_+ и I_- .

$$U_{\text{ВЫХ}4} = I_+ \cdot R - I_- \cdot R + U_{\text{СМ}}$$

По результатам измерения $U_{\text{ВЫХ}i}$ определяют значения $U_{\text{СМ}}$, I_+ и I_- , а по формулам (11.3) и (11.4) рассчитывают соответственно входной ток $I_{\text{ВХ}}$ и ток смещения $I_{\text{СМ}}$ ОУ. Так же, величину $I_{\text{СМ}}$ можно определить непосредственно по измеренным значениям $U_{\text{ВЫХ}4}$ и $U_{\text{СМ}}$, причем оба результата должны приблизительно совпадать.

При исследовании ОУ с полевыми транзисторами на входе возникают сложности, связанные с низким значением входных токов. Изменения $U_{\text{ВЫХ}}$ могут быть настолько малы, что разрешающей способности вольтметра будет недостаточно для их измерения. В таком случае определяют максимально возможное значение токов по формуле:

$$I_{\text{ВХ}} < \frac{\Delta U_V}{R}$$

ΔU_V – цена младшего разряда (разрешающая способность) вольтметра.

Напряжения $U_{\text{ВЫХ}i}$ могут иметь любой знак, в зависимости от знака $U_{\text{СМ}}$ и направления $I_{\text{ВХ}}$ – втекающий или вытекающий ток. В справочной литературе приводят положительные значения $U_{\text{СМ}}$ и $I_{\text{ВХ}}$ независимо от его направления.

4. Определение динамических характеристик ОУ

Для измерения максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ V_{max} и его частоты полной мощности $f_{\text{ПМ}}$ используют одну из схем, приведенных на рис. 11.17а или рис. 11.17б [5, 6]. Схемы представляют собой соответственно не инвертирующий или инвертирующий повторитель напряжения, нагруженный минимально допустимым сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$.

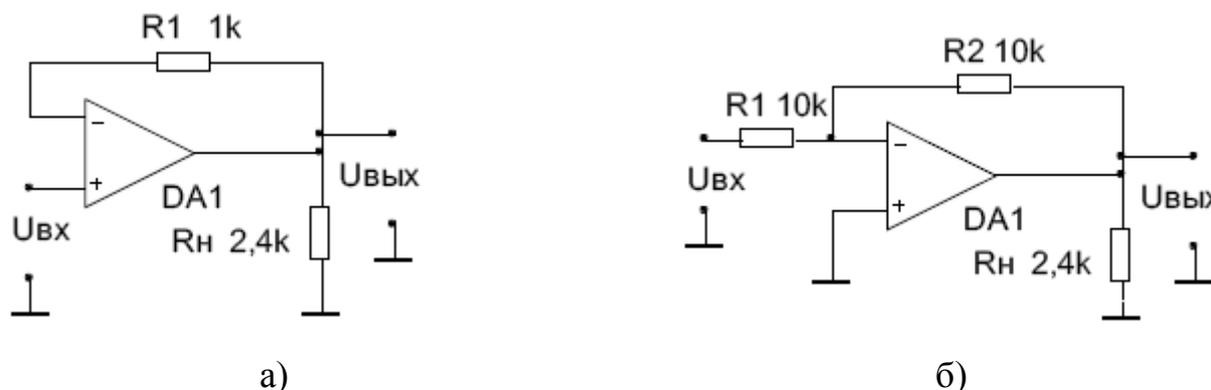


Рис. 11.17. Схемы для определения V_{max} и $f_{\text{ПМ}}$ ОУ.

При определении V_{\max} и $f_{\text{пм}}$ в качестве источника $U_{\text{вх}}$ используют генератор прямоугольного и синусоидального напряжения соответственно, а параметры $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ приближенно измеряют осциллографом.

Для измерения V_{\max} генератор включают в режим генерации прямоугольного напряжения $U_{\text{вх}}$. Амплитуду $U_{\text{вх}}$ задают близкой к значению максимального выходного напряжения ОУ $U_{\text{нас}}$, определенному в п.1 работы, примерно на $(2 \div 3)U_{\text{нас}}$ меньше $U_{\text{нас}}$. Частоту $U_{\text{вх}}$ и время развертки осциллографа подбирают в процессе эксперимента, исходя из того, что напряжение $U_{\text{вых}}$ должно принять в итоге трапецеидальную или треугольную форму.

Значение V_{\max} рассчитывают по формуле (11.5), определив $\Delta U_{\text{вых}}$ и Δt по полученной на экране осциллографа временной диаграмме $U_{\text{вых}}$. Рассчитывают скорость фронта и спада импульса, а в качестве окончательного результата берут меньшее значение.

Для определения частоты $f_{\text{пм}}$ так же используют одну из схем рис. 11.17, но в генераторе задают режим генерации синусоидального напряжения. Амплитуду $U_{\text{вх}}$ устанавливают такой же, как и при измерении V_{\max} , причем на низких частотах до 1кГц не должно быть искажений синусоидальной формы $U_{\text{вых}}$. Частоту $U_{\text{вх}}$ увеличивают до тех пор, пока не станут заметны треугольные искажения синусоидальной формы $U_{\text{вых}}$. Соответствующее значение частоты и является значением частоты $f_{\text{пм}}$.

Для проверки полученных результатов используют связывающую V_{\max} и $f_{\text{пм}}$ формулу (11.6), учитывая, что результаты экспериментов носят приближенный характер.

5. Определение коэффициента ослабления синфазного сигнала (КОСС) ОУ

Измерение КОСС обычно производят по схеме, представленной на рис. 11.18 [5,6]. Для корректной работы такой схемы необходимо выполнить условие:

$$\frac{R2}{R1} = \frac{R4}{R3} \gg 1 \quad (11.8)$$

Например $R1 = R3 = (100 \div 510) \text{ Ом}$, $R2 = R4 = (0,1 \div 1) \text{ МОм}$.

Номиналы резисторов могут быть другими, но равенство в соотношении (11.8) должно выполняться. Синфазный сигнал $U_{\text{сф}}$, амплитудой $(5 \div 8) \text{ В}$ и частотой $(50 \div 60) \text{ Гц}$ задают от генератора синусоидального напряжения.

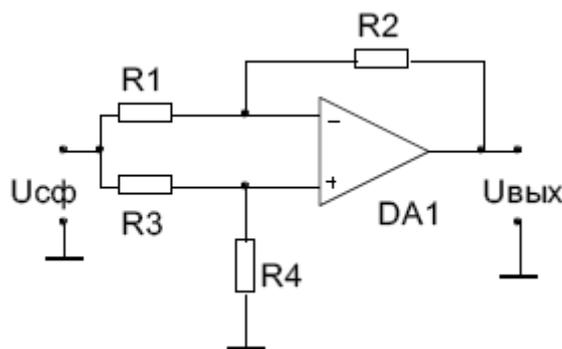


Рис. 11.18. Схема измерения КОСС.

Для измерения $U_{сф}$ и $U_{вых}$ можно использовать вольтметр, однако, удобнее использовать осциллограф, с помощью которого оценивают амплитуды соответствующих напряжений. Значение КОСС рассчитывают по формуле:

$$M_{сф} \approx \frac{U_{сф}}{U_{вых}} \cdot \frac{R2}{R1} \quad (11.9)$$

Необходимо отметить, что формула (11.9) справедлива в случае точного выполнения равенства (11.8). Однако практически это обеспечить невозможно из-за технологического разброса используемых резисторов, типовое значение которого составляет $\delta R = (3 \div 5)\%$. Считая, что погрешности δR отдельных резисторов случайны и не коррелированы, относительную погрешность измерения КОСС, обусловленную относительной неточностью выполнения условия (11.8), определяют из соотношения:

$$\delta M_{сф} \approx 2\delta R \cdot M_{сф} \cdot \frac{R1}{R2}$$

Значение $\delta M_{сф} > 50\%$ свидетельствует о том, что реальный КОСС ОУ скорее всего превышает полученное значение $M_{сф}$, ограниченное погрешностью резисторов δR . Можно увеличить отношение $R2/R1$, но и в таком случае возникают ограничения. Во-первых, увеличение усиления напряжения смещения ОУ может привести к его насыщению, во-вторых, усиливается влияние помех.

Наряду с $M_{сф}$ определяют значение логарифмического КОСС $L_{сф}$ по формуле (11.2).

6. Требования к отчету по работе

В отчёте должны быть приведены:

- схемы проведения экспериментов с номиналами элементов;
- результаты измерений, полученные при проведении экспериментов;
- необходимые расчёты величин по полученным результатам измерений;
- график передаточной характеристики ОУ;
- анализ результатов проведенного исследования, в виде сравнения полученных и рассчитанных параметров ОУ с паспортными величинами, например в виде табл. 11.5.

Таблица 11.5. Паспортные и экспериментально полученные параметры ОУ.

Параметр	Единицы	Значение		Норма да/нет
		Паспорт	Эксперимент	
k				
$U_{см}$	мкВ (мВ)			
$k_{П}$	мкВ/В			
$K_{П}$	дБ			
$I_{вх}$	пА (нА)			
$I_{см}$	пА (нА)			
V_{max}	В/мкс			
$f_{пм}$	кГц			
$L_{сф}$	дБ			

Литература

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12_е изд. Том I: Пер. с нем. – М.: ДМК. Пресс, 2008. – 832 с.: ил.
2. Балтруков Н.Н., Кочетков Ю.Д. Электротехника и электроника. Ч.2.: Учебное пособие. СПб.: Факультет технической кибернетики СПбГПУ, 2011. 135 с.
3. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Издательский дом «Долека-XXI». 2005.– 528 с.: ил.
4. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах.- 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отделение, 1988. – 304 с.: ил.
5. Достал И. Операционные усилители: Пер. с англ., М.: Мир, 1982. 512 с.
6. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. – 572 с.: ил.
7. Усилители и линейные компоненты. Операционные усилители. Операционные усилители (ОУ). Сайт Analog Devices Inc. 1995–2013. URL: <http://www.analog.com/en/all-operational-amplifiers-op-amps/operational-amplifiers-op-amps/products/index.html> (дата обращения 07.02.2013).