

Соболев Владимир Афанасьевич, Волченков Валерий Иванович

### **ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В СРЕДЕ MULTISIM 10.1**

Важной составляющей подготовки современных специалистов машиностроительного направления в цикле общепрофессиональных дисциплин государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования является курс "Электротехника и электроника". Одними из основных элементов аналоговых электронных устройств в настоящее время являются различные операционные усилители (ОУ) в интегральном исполнении, которые изучаются в этом курсе. В статье приведена методика проведения практического занятия по изучению характеристик и режимов работы ОУ в среде MULTISIM 10.1, которая позволяет студентам приобрести навыки в практическом применении этих устройств и углубить теоретические знания в данной области.

Адрес статьи: [www.gramota.net/materials/1/2016/8/21.html](http://www.gramota.net/materials/1/2016/8/21.html)

**Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.**

Источник

#### **Альманах современной науки и образования**

Тамбов: Грамота, 2016. № 8 (110). С. 79-84. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: [www.gramota.net/editions/1.html](http://www.gramota.net/editions/1.html)

Содержание данного номера журнала: [www.gramota.net/materials/1/2016/8/](http://www.gramota.net/materials/1/2016/8/)

#### **© Издательство "Грамота"**

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: [www.gramota.net](http://www.gramota.net)

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: [almanac@gramota.net](mailto:almanac@gramota.net)

## Список литературы

1. Варфоломеев С. Д., Гуревич К. Г. Биокинетика: практический курс. М.: ФАИР-ПРЕСС, 1999. 720 с.
2. Государственная фармакопея Российской Федерации: в 5-ти ч. / Научный центр экспертизы средств медицинского применения. Изд. 12-е. М., 2008. Ч. 1. 704 с.
3. Егоров Н. С. Основы учения об антибиотиках: учебник. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 2004. 528 с.
4. Коржавых Э. Лекарственные формы с модифицированным высвобождением и действием // Российские аптеки. 2003. № 4. С. 29-34.
5. Панарин Е. Ф., Нестеров В. В. Синтез и свойства сополимеров винилпирролидона с диацеталем акролеина // Высокомолекулярные соединения. 1978. Т. 20. № 1 (Б). С. 66-69.
6. Решедько Г. К. Значение ферментативной модификации аминогликозидов в развитии резистентности у бактерий // Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия. 1999. Т. 1. № 1. С. 40-50.
7. Соловский М. В., Никольская Н. В. Соли антибиотика гентамицина с карбоксилсодержащим сополимером N-винилпирролидона // Химико-фармацевтический журнал. 2000. Т. 34. № 11. С. 21-24.
8. Технология лекарств: учебник для фармацевтических вузов и факультетов / пер. с укр.; под ред. А. И. Тихонова. Харьков: НФАУ, 2002. 704 с.
9. Фармацевтические и медико-биологические аспекты лекарств: в 2-х т. / под ред. И. М. Перцева, И. А. Зупанца. Харьков: УкрФА, 1999. Т. 1. 442 с.
10. Хананов Э. А., Мизина П. Г., Симакина А. А. Пролонгированные лекарственные формы как способ снижения негативных воздействий на человеческий организм // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 1 (6). С. 1321-1323.
11. Хомяков К. П. Пролонгирование действия лекарственных препаратов путем использования их в смеси с полимерами или присоединения к полимерам // Успехи химии. 1964. Т. 33. № 9. С. 1051-1061.

## ON CERTAIN CHARACTERISTICS OF MODIFIED GENTAMYCIN

Sasu Nursiya Vazikhovna  
Udmurt State University  
nursiya\_valieva@mail.ru

Creation of long-acting pharmaceutical forms is a promising tendency in modern pharmacology. The realization of pharmaceutical forms with modified release in the area affected by a pathological process allows decreasing sharply undesirable body reactions to medicament treatment, reducing the therapeutic dose of a medicine and the frequency of its injection. On the basis of the Department of Biochemistry and Biotechnology of the Faculty of Biology and Chemistry of the Udmurt State University they conducted experiments on gentamycin modification by vinylpyrrolidone copolymer with acrolein diacetal for the purpose of studying the antimicrobial and pharmacokinetic parameters of this conjugate.

*Key words and phrases:* antibiotics; polymers; modification; long-acting properties; antimicrobial activity; elimination half-life.

УДК 621.3; 37

## Педагогические науки

Важной составляющей подготовки современных специалистов машиностроительного направления в цикле общепрофессиональных дисциплин государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования является курс «Электротехника и электроника». Одними из основных элементов аналоговых электронных устройств в настоящее время являются различные операционные усилители (ОУ) в интегральном исполнении, которые изучаются в этом курсе. В статье приведена методика проведения практического занятия по изучению характеристик и режимов работы ОУ в среде MULTISIM 10.1, которая позволяет студентам приобрести навыки в практическом применении этих устройств и углубить теоретические знания в данной области.

*Ключевые слова и фразы:* идеальный операционный усилитель (ОУ); реальный ОУ; коэффициент усиления; входное и выходное сопротивление; логарифмическая амплитудно-частотная характеристика; фазо-частотная характеристика; обратная отрицательная связь; схема включения ОУ; напряжение смещения; входной ток; активный четырехполюсник; среда Multisim10.1.

Соболев Владимир Афанасьевич, к.т.н.

Волченков Валерий Иванович, к.т.н., доцент

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
vasobolev@bmsu.ru

## ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В СРЕДЕ MULTISIM 10.1

В настоящее время основными элементами аналоговой электроники являются интегральные схемы (ИС) как общего, так и специального применения: усилители напряжений и токов, компараторы, различные источники питания, преобразователи и генераторы аналоговых сигналов, активные фильтры и т.д. Основу работы многих ИС разного назначения составляет интегральный операционный усилитель (ОУ) [1].

Интегральное исполнение ОУ позволяет рассматривать его как отдельный элемент в электронной схеме подобно диоду, транзистору со своими параметрами. Несмотря на большое число публикаций, посвященных

электронным схемам с ОУ, в методическом плане эта тема еще далеко не исчерпана. Это связано с применением новых компьютерных технологий в процессе обучения студентов при изучении курса электроники, которые дают новые возможности в плане понимания основных принципов работы различных электронных компонент [2]. Главное назначение ОУ в таких ИС – построение электронных схем с точно заданной передаточной функцией, которая зависит от параметров цепи обратной связи (ОС). В настоящее время различными производителями выпускаются сотни различных типов ОУ, оптимизированных для выполнения разных функций в схемах управления и контроля технологических установок.

В данной статье рассмотрена методика проведения практического занятия по изучению основных параметров и схем включения ОУ с использованием компьютерной среды *Multisim 10.1*. Цель этого занятия – разьяснение и закрепление теоретических знаний, приобретение практических навыков работы с ОУ.

В компьютерной программе *Multisim 10.1* имеется список моделей всевозможных ОУ, который раскрывается при нажатии кнопки *Place Analog* (Рис. 1) в меню программы.

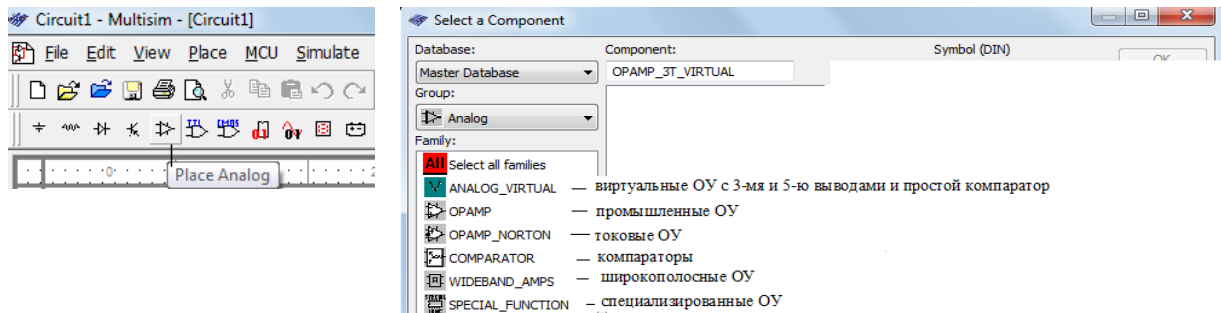


Рис. 1. Список имеющихся моделей ОУ в среде *Multisim 10.1*

В группе *ANALOG\_VIRTUAL* имеются две виртуальные модели ОУ с тремя и пятью выводами. Первая модель является простой универсальной моделью ОУ, близкой к идеальному ОУ, с возможностью произвольно изменять некоторые его статические характеристики (Рис. 2а). К ним относятся: напряжение смещения  $U_{см}$  (Input Offset Voltage (VOS)), которое характеризует падение напряжения на неинвертирующем входе ОУ; входной ток смещения (Input Bias Current ( $I_{BS}$ )); ток, потребляемый каждым входом ОУ; разность входных токов (Input Offset Current ( $I_{OS}$ )), при установке этой величины входной ток неинвертирующего входа увеличится на величину  $I_{OS}/2$ , а входной ток инвертирующего входа на эту величину уменьшится; коэффициент усиления по напряжению без ОС  $K_0$  (Open Loop Gain); частота единичного усиления (Unit-Gain Bandwidth ( $F_{max}$ )), которая равна произведению  $K_0$  на частоту среза ОУ; входное дифференциальное сопротивление (Input Resistance ( $R_i$ )) при отсутствии ОС; выходное сопротивление (Output Resistance ( $R_o$ )) при отсутствии ОС; допустимая величина положительного выходного напряжения (Positive Voltage Swing) при отсутствии ОС; допустимая величина отрицательного выходного напряжения (Positive Voltage Swing) при отсутствии ОС. Для этой модели не требуется внешний источник питания.

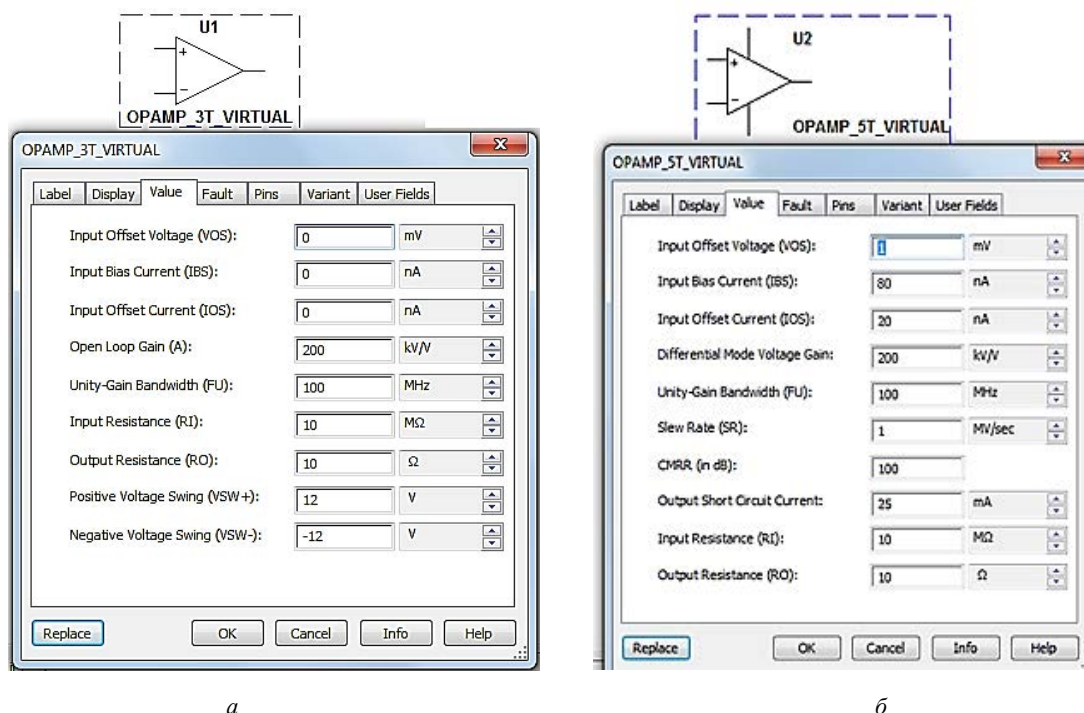


Рис. 2. Диалоговые окна виртуальных ОУ

Виртуальная модель ОУ с пятью выводами также является универсальной моделью ОУ с возможностью изменять большее число параметров, чем в предыдущей модели. Так, в ОУ с 5-ю выводами можно устанавливать еще дополнительные параметры (Рис. 2б): максимальную скорость нарастания выходного сигнала (Slew Rate (SR)); коэффициент ослабления синфазного напряжения (Common-Mode Rejection Ratio (CMRR)); максимальный ток короткого замыкания на выходе ОУ (Output Short Circuit Current). Кроме того, имеются два вывода для подсоединения биполярного источника питания. В приведенных моделях ОУ питаются от симметричных источников питания, обеспечивающих одинаковые по величине положительное и отрицательное напряжения относительно «земли». Выходное напряжение ОУ связано с входным дифференциальным сигналом следующим выражением:

$$U_{\text{вых}} = K_0(U_{\text{вх}+} - U_{\text{вх}-}),$$

где  $U_{\text{вх}+}$  – напряжение, подаваемое на неинвертирующий вход ОУ, а  $U_{\text{вх}-}$  – напряжение, подаваемое на инвертирующий вход ОУ.

Как известно, вследствие очень большого коэффициента усиления по напряжению ОУ очень чувствителен к внешним наводкам, собственным шумам и без ОС не применяется. Тем не менее, первые исследования следует провести с ОУ без ОС для понимания влияния неидеальности ОУ на его свойства, а затем перейти к изучению влияния ОС на параметры и функциональные возможности ОУ.

В качестве домашней подготовки студентам предлагается нарисовать эквивалентную схему идеального ОУ и записать его основные свойства. Далее предлагается исследовать влияние показателей неидеальности ОУ на его выходные характеристики. Для этого сначала нужно снять статическую передаточную характеристику исследуемого трехвыводного ОУ в двух квадрантах – для неинвертирующего и инвертирующего входов при нулевом напряжении смещения и нулевых входных токах ОУ (Рис. 3а), изменяя напряжение  $V1$  в диапазоне  $-10\text{мкВ} \rightarrow +10\text{мкВ}$  с шагом  $1\text{ мкВ}$ , и построить графики.

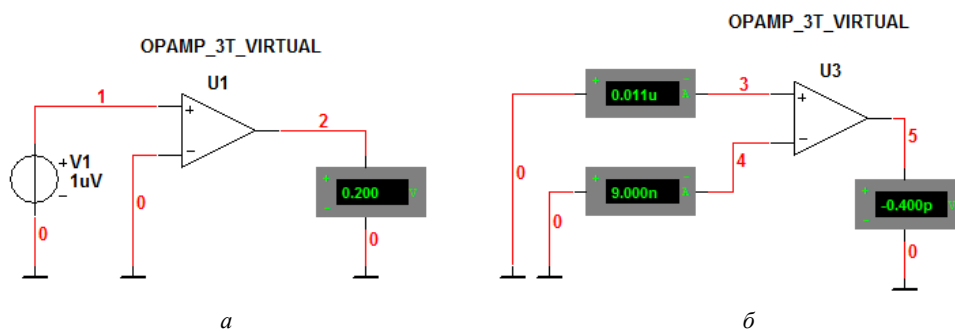


Рис. 3. Схема снятия передаточной характеристики ОУ

На графиках нужно определить область усиления (линейную область характеристики), предельные значения усиливаемого сигнала, при которых происходит их линейное усиление, отметить область насыщения. В этом эксперименте также нужно исследовать влияние величины напряжения смещения на передаточные характеристики ОУ и на погрешность значения выходного напряжения при измерении малых входных сигналов. Для этого в модели ОУ с тремя выводами следует установить некоторое напряжение смещения и провести заново исследование передаточной характеристики.

По итогам проведенных исследований необходимо сделать вывод о влиянии напряжения смещения на погрешность ОУ. По схеме (Рис. 3а) методом эквивалентного генератора можно определить выходное сопротивление ОУ.

На Рис. 3б показана схема исследования влияния входных токов на выходное напряжение, когда они равны и когда они не равны. При входных токах  $10\text{ нА}$  и токе сдвига  $2\text{ нА}$  на выходе ОУ появляется напряжение, пропорциональное току сдвига ОУ.

Как известно, универсальный ОУ из соображений устойчивости имеет частотную характеристику, аналогичную фильтру нижних частот [1]. Среда *Multisim* позволяет снять логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) и фазо-частотную характеристику (ФЧХ) ОУ с использованием Бode-плоттера. Схема измерения и результаты измерений показаны на Рис. 4.

С помощью визирной линии можно на графиках определить частоту среза ОУ. На Рис. 4а она равна приблизительно  $517\text{ кГц}$ . На Рис. 4б показана ФЧХ ОУ и на ней показана частота, при которой фаза входного сигнала меняется приблизительно на  $47^\circ$ .

Принцип организации отрицательной обратной связи (ООС) для ОУ заключается в подачи части выходного напряжения через цепь обратной связи на вход ОУ, чтобы она вычиталась из входного сигнала.

При этом приходим к классическому уравнению для коэффициента усиления с ООС:  $K_{\text{оос}} = \frac{K_0}{1 + \beta K_0} \approx \frac{1}{\beta}$

при большой глубине обратной связи, т.е.  $\beta K_0 \gg 1$ . Это приводит к появлению ошибки в схеме:

$V_{BX_{OC}} = \frac{V_{BX}}{1 + \beta K_0}$ , которую нужно учитывать при проведении точных измерений с использованием ОУ. Видим, что при увеличении входного сигнала ошибка увеличивается, при увеличении глубины ОС ошибка уменьшается, но при этом снижается стабильность работы ОУ.

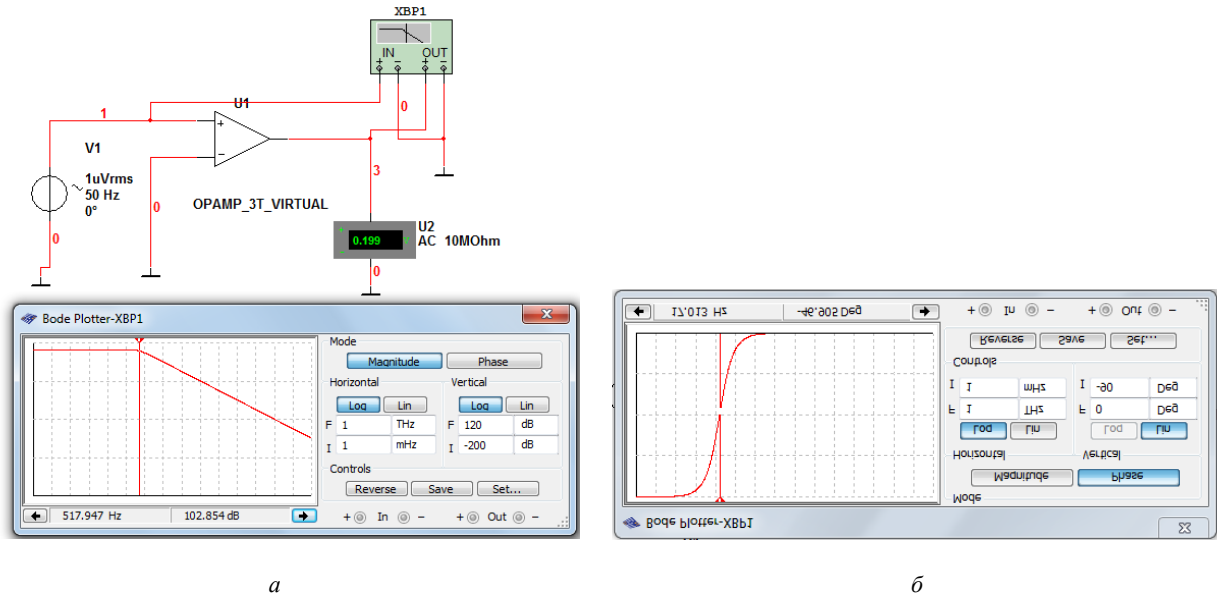


Рис. 4. Схема измерения ЛАЧХ и ФЧХ ОУ

Различают два основных вида схем включения ОУ: неинвертирующие (Рис. 5а) и инвертирующие (Рис. 5б).

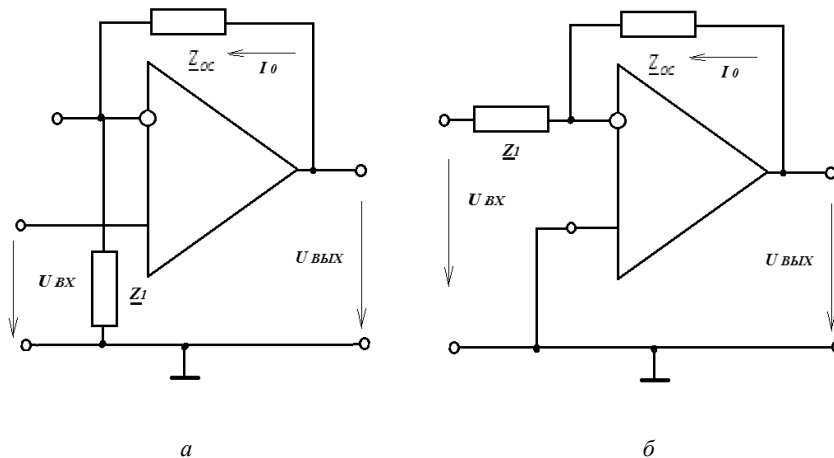


Рис. 5. Основные схемы включения ОУ

Обычно ОУ работают в режиме глубокой отрицательной связи. Как следствие, выход ОУ с ООС всегда стремится к тому, чтобы разность напряжений между входами стремилась к нулю, т.е. ОУ как бы «оценивает» напряжение между его входами и с помощью внешней цепи передает напряжение с выхода ОУ на вход, так что разность ( $U_{BX+} - U_{BX-}$ ) становится равной нулю. Это утверждение широко используется при анализе электрических цепей с ОУ, поэтому полезно его проверить на исследуемых моделях соответствующими измерениями.

Студентам предлагается спроектировать неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления по напряжению 100 и входным сопротивлением 1 кОм, если собственное входное сопротивление ОУ  $R_{BX0}$  равно 10 МОм и  $K_0=25 \times 10^3$ , провести моделирование его работы на виртуальном ОУ с тремя выводами, сравнить расчетные данные, затем провести исследование влияния входных токов на работу такого ОУ и способа компенсации этого влияния. В качестве домашней подготовки студенты должны рассчитать необходимые параметры данного неинвертирующего ОУ, начертить схему. На Рис. 6 приведена модель такого ОУ в среде *Multisim 10.1*.

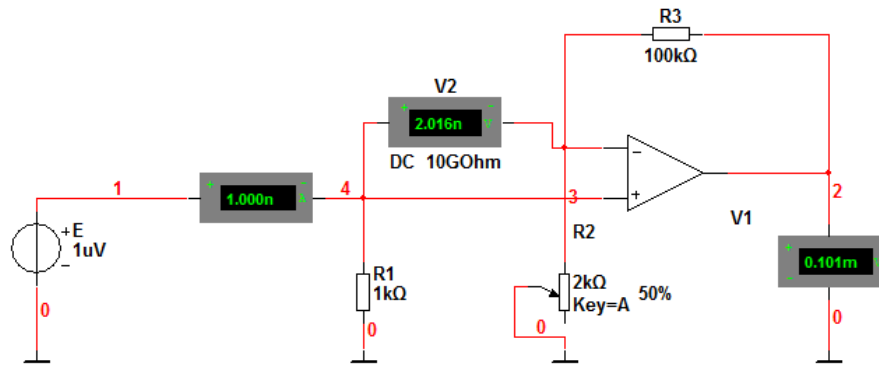


Рис. 6. Модель неинвертирующего ОУ

Следует обратить внимание студентов на показание вольтметра V2. Он показывает почти нулевую разницу потенциалов между инвертирующим и неинвертирующим входами.

На этой модели можно проследить изменение выходного напряжения в зависимости от величины напряжения смещения и входного тока, изменяя указанные параметры ОУ в его диалоговом окне. Изменяя величину построечного потенциометра R2, можно частично скомпенсировать возникающие погрешности, вносимые напряжением смещения и входными токами. Таким образом, после выполнения этого задания студенты получат навыки расчета простейших усилителей, научатся понимать влияние неидеальности параметров ОУ на выходное напряжение и узнают простой способ компенсации возникающих погрешностей. Также на схеме можно исследовать влияние ООС на частотные характеристики усилителя. Для этого нужно изменить источник постоянного напряжения на источник переменного напряжения и подключить Бode-плоттер.

Последняя часть практического занятия посвящена углубленному изучению материала на примере активного четырехполюсника на основе ОУ. Очень часто ОУ применяется в активных четырехполюсниках с различными конфигурациями внешних цепей. Рассмотрим активный четырехполюсник, который широко применяется на практике (Рис. 7).

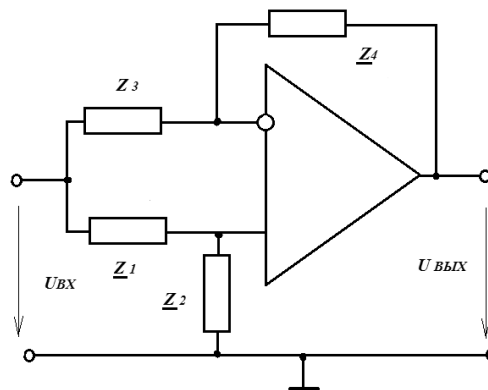


Рис. 7. Схема активного четырехполюсника с ОУ

Используя свойства идеального ОУ, можем записать выражение для комплексного коэффициента усиления по напряжению для активного четырехполюсника (Рис. 7), которое имеет следующий вид:

$$K_{оос}(j\omega) = \frac{Z_2 Z_3 - Z_1 Z_4}{Z_3 (Z_1 + Z_2)} \tag{1}$$

Из этого выражения понятно, что конкретный вид комплексного коэффициента усиления по напряжению зависит от наполнения комплексных сопротивлений внешней цепи активного четырехполюсника. Обычно комплексные сопротивления содержат только R и C элементы. Для рассмотренной схемы могут быть получены различные схемы усилителей, преобразователей аналоговых сигналов и фазовращателей. Например, при выполнении условия  $Z_3 = Z_4 = R$  и  $Z_1 = R_1, Z_2 = 1/j\omega C_2$  выражение (1) примет следующий вид:

$$K(j\omega) = \frac{1/j\omega C_2 - R_1}{1/j\omega C_2 + R_1} = \frac{1 - j\omega R_1 C_2}{1 + j\omega R_1 C_2} \tag{2}$$

Из выражения (2) видно, что при указанной конфигурации цепи ОС модуль комплексного коэффициента усиления не зависит от частоты сигнала и равен единице, а его аргумент имеет следующий вид:

$$\phi = -2\arctg(2\omega R1C2), \quad (3)$$

т.е. ФЧХ является функцией произведения  $\omega R1C2$ . Фазовый сдвиг при изменении этого произведения от 0 до  $\infty$  находится в пределах от  $0^0$  до  $-180^0$ .

На Рис. 8 показана модель рассмотренного активного четырехполюсника, на которой можно исследовать его ЛАЧХ и ФЧХ. Изменяя только величину сопротивления R1, можно осуществить регулировку фазы выходного сигнала по отношению к входному сигналу.

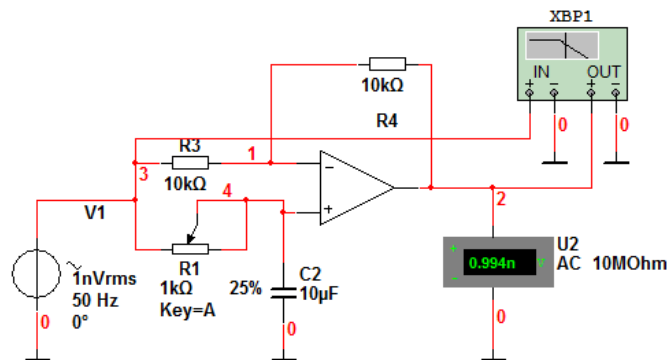


Рис. 8. Схема активного фазовращателя на базе ОУ

Таким образом, предложенное практическое занятие с использованием среды *Multisim10.1* позволяет изучить основные свойства и характеристики ОУ и может быть использовано при углубленном изучении указанной темы.

#### Список литературы

1. Опачий Ю. А., Глудкин О. П., Гуров А. И. Аналоговая и цифровая электроника: учебник для вузов / под ред. О. П. Глудкина. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 768 с.
2. Соболев В. А. Применение среды *MULTISIM 10.1* для изучения режимов работы биполярного транзистора // Альманах современной науки и образования. 2016. № 5 (107). С. 68-72.

#### STUDYING RUNNING REGIMES OF OPERATIONAL AMPLIFIERS IN *MULTISIM 10.1* ENVIRONMENT

Sobolev Vladimir Afanas'evich, Ph. D. in Technical Sciences  
Volchenskov Valerii Ivanovich, Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor  
Bauman Moscow State Technical University  
vasobolev@bmsu.ru

The course “Electrical Engineering and Electronics” is an important component of training modern specialists in machine-building in the cycle of general professional disciplines established by the state educational standard of higher professional education. Operational amplifiers (OA) in the integrated circuit form, which are studied in this course, are one of the basic elements of analogous electronic devices. The article proposes methodology to conduct practical study on OA characteristics and operating regimes in *Multisim 10.1* environment that allows students to acquire practical skills in using these devices and to deepen their theoretical knowledge in this sphere.

*Key words and phrases:* ideal operational amplifier (OA); actual operational amplifier; amplification factor; input and output resistance; decibel-log frequency response; phase-frequency response characteristic; negative feedback; OA circuit connection; bias voltage; input current; active quadripole; *Multisim 10.1* environment.