



Научно-практический журнал. Основан в 2005 году. Предыдущее название «Вестник ВИЭСХ». Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям: 2.4.5 / 4.3.1 / 4.3.2. Входит в базу данных AGRIS и Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Редакционная коллегия:

Д.А. Тихомиров, д.т.н., профессор РАН, член-корр. РАН (главный редактор)
А.В. Виноградов, д.т.н., профессор (заместитель главного редактора);
А.Ю. Измайлов, д.т.н., профессор, академик РАН, член Президиума РАН;
Я.П. Лобачевский, д.т.н., профессор, академик РАН;
А.С. Дорохов, д.т.н., профессор, академик РАН;
А.Н. Васильев, д.т.н., профессор;
Д.А. Будников, д.т.н.;
М.М. Благовещенская, д.т.н., проф.;
М.Г. Тягунов, д.т.н., профессор;
В.И. Зацепина, д.т.н., профессор.

Иностранные члены редколлегии:

И.И. Гируцкий, д.т.н., профессор (Беларусь);
А.Б. Оспанов, д.т.н., профессор, член-корр. НАН РК (Республика Казахстан);
П.А. Утениязов, д.т.н., с.н.с. (Республика Узбекистан);
Пандиан Васант, д-р философии (Малайзия);
В. Вивекананд, д-р философии, доцент (Индия);
Салам Чафик-Тома, профессор (Франция).

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-74528 от 14.12.2018 г.
Адрес издателя, редакции и типографии:
109428, Москва,
1^й Институтский проезд, 5, стр. 1.
Телефон: (499)174-88-11; (499)174-89-01
E-mail: vestnikviesh@gmail.com
Ответственный секретарь

Р.М. Нурбагандова

Редактор

Т.В. Бердникова

Компьютерный оригинал-макет

В.В. Бижаев

Перевод – *Константин Моренко*

Выходит 4 раза в год (Свободная цена)

Дата выхода в свет 15.09.2025 г.

Формат 60×84/8. Объем 17,75 печ. л.

Тираж 100 экз. Печать цифровая.

Отпечатано в типографии

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

ISSN 2658-4859

Содержание номера

Электрофизические воздействия на материалы и среды

- Марченко Л.А., Кутыр'ев А.И.*
Параметры и режимы работы мобильных устройств для лазерной прополки растений 3
- Олонин И.Ю.*
Технико-экономическая оценка выращивания микрозелени капусты при разных способах освещения 17

Электроснабжение и электрооборудование

- Лансберг А.А., Виноградова А.В.*
Параметры проводов воздушных линий электропередачи 0,4 кВ для компьютерных моделей в MATLAB Simulink 23
- Стерхова Т.Н., Васильченко Д.А., Фролов М.А.*
Исследование усилителей переменного напряжения, реализованных на основе операционных усилителей 32
- Виноградов А.В., Моренко К.С.*
Структура системы сбора, хранения и обработки данных для управления конфигурацией электрической сети 38

Тепло-энергообеспечение и энергосбережение

- Пospelova И.Г., Дородов П.В., Возмищев И.В., Савчук И.В., Гаврилов Р.И., Торопов Л.А., Долматова А.Ю.*
Разработка энерго- и ресурсосберегающих установок для обеззараживания почвосмеси ИК-излучением 46
- Шелехов И.Ю., Алтухов И.В., Очиров В.Д.*
Применение полупроводниковых элементов в инженерных системах сельского хозяйства 54
- Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Хименко А.В.*
Исследование процесса конвективной сушки фруктов с оценкой скорости дегидратации материала 65

Технологии и средства механизации и роботизации

- Букреева А.К., Давыдова С.А., Букреев А.В.*
Математическое моделирование процесса измельчения корнеклубнеплодов для скормливания крупному рогатому скоту 73
- Пупин Д.С., Хорт Д.О.*
Разработка системы контроля силы сжатия роботизированного устройства для съема плодов яблони 82
- Ал-Жавхар А.Е.М., Майстренко Н.А., Егоров В.В.*
Получение и анализ характеристик состава отработавших газов дизеля на различных режимах холостого хода 89

Автоматизация и управление технологическими процессами

- Баев И.Б., Пиотровский Д.Л.*
Многокритериальная оптимизация и настройка системы автоматического управления для процесса сушки гофрокартона: экспериментальные методы и анализ устойчивости 97
- Рылов С.А.*
Описание IIoT датчиков в нотации OPC UA DI посредством стандарта AutomationML 103
- Шубин И.В., Шилин Д.В., Васильев А.Н.*
Сравнительное исследование методов идентификации особей крупного рогатого скота с помощью средств анализа визуальных образов 111
- Липа О.А., Судаков А.Н., Липа Д.А., Андрианов Е.А., Андрианов А.А.*
Нейросетевая видеоаналитика в обеспечении безопасности агроуристов 119
- Сохинов Д.Ю., Каргин В.А., Усанов К.М., Кравченко Р.А.*
Методологическое обоснование подхода к исследованию системы интеллектуального управления и контроля качества плодоовощной продукции 127

Возобновляемая и нетрадиционная энергетика

- Бекиров О.С., Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н.*
Разработка модульного компенсатора реактивной мощности для ветровой электростанции 135

Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex

The editorial board of the journal:

Dmitriy A. Tikhomirov, Dr.Sc.(Eng.),
Professor of the RAS, Corresponding
Member of the RAS (Editor in Chief);
Aleksandr V. Vinogradov, Dr.Sc.(Eng.),
Professor (Deputy Editor);
Andrey Yu. Izmaylov, Dr.Sc.(Eng.),
Professor, Member of the RAS,
Member of the Presidium of the RAS;
Yakov P. Lobachevskiy, Dr.Sc.(Eng.),
Professor, Member of the RAS;
Alexey S. Dorokhov, Dr.Sc.(Eng.),
Professor, Member of the RAS;
Aleksey N. Vasil'ev, Dr.Sc.(Eng.),
Professor;
Dmitry A. Budnikov, Dr.Sc.(Eng.);
Margarita M. Blagoveshchenskaya,
Dr.Sc.(Eng.), Professor;
Mikhail G. Tyagunov, Dr.Sc.(Eng.),
Professor;
Violetta I. Zatssepina, Dr.Sc.(Eng.),
Professor.

Foreign members of the Editorial Board:

Ivan I. Girutsky, Dr.Sc.(Eng.),
Professor (Belarus);
Asan B. Ospanov, Dr.Sc.(Eng.), Prof.,
Corresponding Member of NAS RK
(Republic of Kazakhstan);
Pulat A. Uteniyazov, Dr.Sc.(Eng.),
Chief Specialist,
(Republic of Uzbekistan);
Vasant Pandian, Dr. Philosophy,
Senior Lecturer, (Malaysia);
V. Vivekanand, Dr. Philosophy,
Assistant Professor (India);
Salam Chafik-Toma, Professor
(France).

PUBLISHER, EDITORIAL OFFICE'S AND PRINTING HOUSE ADDRESS

109428, Moscow,
1st Institutskiy proezd, 5, bld. 1.
Tel.: +7 (499) 174-88-11
+7 (499) 174-89-01
<http://www.vimsmit.com>
E-mail: vestnikviesh@gmail.com

EXECUTIVE EDITORS:

Nurbagandova R.M.
Berdnikova T.V.,
Bizhaev V.V.,
Translation into English –
Konstantin Morenko

Published 4 times per annum (Free price)

Release date 15.09.2025.
The format is 60×84/8.
Volume 17.75 printed sheet.
The circulation is 100 copies
Printed by FSAC VIM
Russian Academy of Science
ISSN 2658-4859

Contents

Electrophysical effects on materials and media

- Marchenko L.A., Kutyrev A.I.*
Parameters and operating modes of mobile devices for laser plant weeding 3
Olonin I.Y.
Technical and economic assessment of the cultivation of microgreens of cabbage
with different lighting methods 17

Power supply and electrical equipment

- Lansberg A.A., Vinogradova A.V.*
Parameters of 0.4 kV overhead power line wires for computer models
in MATLAB Simulink 23
Sterkhova T.N., Vasilchenko D.A., Frolov M.A.
Research of AC voltage amplifiers implemented using operational amplifiers 32
Vinogradov A.V., Morenko K.S.
Database structure for managing the configuration of a conceptual electrical grid 38

Heat supply and energy saving

- Pospelova I.G., Dorodov P.V., Vozmishchev I.V., Savchuk I.V.,
Gavrilov R.I., Toropov L.A., Dolmatova A.Yu.*
Development of energy-saving installations for disinfection of soil mixtures
with IR radiation 46
Shelekhov I.Yu., Altukhov I.V., Ochirov V.D.
Application of semiconductor elements in agricultural engineering systems 54
Kuzmichev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V.
Investigation of the convective drying process of fruits with an assessment
of the dehydration rate of the material 65

Technologies and means of mechanization and robotization

- Bukreeva A.K., Davydova S.A., Bukreev A.V.*
Mathematical modeling of the process of grinding root crops for feeding to cattle 73
Pupin D.S., Khort D.O.
Development of a compression force control system for a robotic device
for apple harvesting 82
Al-Jawhar A.E.M., Maystrenko N.A., Egorov V.V.
Obtaining and analysis of diesel engine exhaust gas profiles for different idle modes 89

Automation and technological processes control

- Baev I.B., Piotrovsky D.L.*
Multi-criteria optimization and adjustment of the automatic control system for the drying
process of corrugated cardboard: experimental methods and stability analysis 97
Rylov S.A.
Description of IIoT sensors in OPC UA DI notation using the AutomationML standard 103
Shubin I.V., Shilin D.V., Vasilyev A.N.
Comparative study of methods of identification of cattle using visual image analysis tools 111
Lipa O.A., Sudakov A.N., Lipa D.A., Andrianov E.A., Andrianov A.A.
Neural network video analytics in the safety of agritourists 119
Sokhinov D.Yu., Kargin V.A., Usanov K.M., Kravchenko R.A.
Methodological substantiation of the approach to the study of the intellectual
management system and quality control of fruit and vegetable products 127

Renewable and unconventional energy

- Bekirov O.S., Bekirov E.A., Voskresenskaya S.N.*
Development of a Modular Reactive Power Compensator for a Wind Power Plant 135

Полные тексты статей размещаются на сайте электронной научной библиотеки: elibrary.ru.
Перепечатка материалов, опубликованных в журнале, допускается только с разрешения редакции.



Исследование усилителей переменного напряжения, реализованных на основе операционных усилителей

Татьяна Николаевна Стерхова,

кандидат технических наук, доцент, e-mail: tatiana.sterh@mail.ru;

Дарья Алексеевна Васильченко,

студент;

Максим Андреевич Фролов,

студент

Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Российская Федерация

Реферат. Современные устройства релейной защиты и автоматики представляют собой сложные и комплексные системы, обладающие широкими логическими и математическими возможностями. В связи с этим процесс их тестирования становится значительно более сложным и требует использования специализированного оборудования и усилителей сигналов для реализации замкнутого цикла испытаний устройств релейной защиты и автоматики. Операционные усилители – это интегральные полупроводниковые микросхемы, предназначенные для усиления, обработки и преобразования аналоговых сигналов. Они широко применяются в радиоэлектронике благодаря высокому входному и низкому выходному сопротивлению, а также возможности работы в схемах с обратной связью. Наиболее распространенные – схемы неинвертирующего, инвертирующего усилителей и повторителя напряжения. (Цель исследования) Изучить принцип работы усилителей переменного напряжения, построенных на операционных усилителях, приобрести практические навыки работы с интерактивным эмулятором радиосхем Micro-Cap. (Материалы и методы) Использовали для проведения исследования программную модель Micro-Cap, предназначенную для моделирования и анализа электронных схем. Выбрали в качестве объекта исследования схему неинвертирующего усилителя, построенного на основе операционного усилителя. (Результаты и обсуждение) Получили осциллограммы сигналов, подтверждающие теоретические расчеты коэффициента усиления, равного 3. Построили амплитудно-частотную характеристику усилителя, на которой определили граничные частоты и уровень усиления на рабочей частоте. Показали, что экспериментальные данные соответствуют теоретическим значениям. (Выводы) Установили, что операционные усилители эффективны для использования в аналоговой схемотехнике, программный подход позволяет достаточно точно моделировать поведение реальных устройств. Констатировали, что полученные результаты могут быть использованы при проектировании усилительных каскадов в учебных заведениях.

Ключевые слова: операционный усилитель, неинвертирующий усилитель, коэффициент усиления, амплитудно-частотная характеристика, обратная связь, дифференциальный каскад, Micro-Cap, осциллограмма, синфазные помехи, полоса пропускания.

Для цитирования: Стерхова Т.Н., Васильченко Д.А., Фролов М.А. Исследование усилителей переменного напряжения, реализованных на основе операционных усилителей // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2025. Т. 72. №3. С. 32-37. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-3-32-37. EDN: HYEUVB.

Scientific article

Research of AC Voltage Amplifiers Implemented Using Operational Amplifiers

Tatyana N. Sterkhova,

Ph.D.(Eng.), associate professor, e-mail: tatiana.sterh@mail.ru;

Darya A. Vasilchenko,

student;

Maksim A. Frolov,

student

Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

Abstract. Modern relay protection and automation devices are complex systems with wide logical and mathematical capabilities. In this regard, the process of testing them becomes much more complicated and requires the use of specialized equipment and signal amplifiers to implement a closed-loop test of relay protection and automation devices. Operational amplifiers are integrated semiconductor chips designed to amplify, process and convert analog signals. They are widely used in radio electronics due to their high input and low output impedance, as well as the ability to work in feedback circuits. The most common are schemes of non-inverting, inverting amplifiers and voltage repeater. (Research purpose) The research purpose is studying the operation principle of AC voltage amplifiers built on operational amplifiers, acquiring practical skills in working with an interactive Micro-Cap radio circuit emulator. (Materials and methods) A Micro-Cap software model designed for modeling and analyzing electronic circuits was used to conduct the study. A non-inverting amplifier circuit based on an operational amplifier was chosen as the object of study. (Results and discussion) Waveforms of signals confirming theoretical calculations of the gain factor equal to 3 were obtained. The amplitude-frequency characteristic of the amplifier was constructed, on which the boundary frequencies and the gain level at the operating frequency were determined. It was shown that the experimental data correspond to the theoretical values. (Conclusions) It has been established that operational amplifiers are effective for use in analog circuitry, a software approach allows you to accurately simulate the behavior of real devices. It was stated that the results obtained can be used in the design of amplification cascades in educational institutions.

Keywords: operational amplifier, non-inverting amplifier, gain factor, amplitude-frequency response, feedback, differential cascade, Micro-Cap, oscilloscope, common-mode interference, bandwidth.

For citation: Sterkhova T.N., Vasilchenko D.A., Frolov M.A. Research of AC voltage amplifiers implemented using operational amplifiers. *Electrical technology and equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2025. Vol. 72. N3. 32-37 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-3-32-37. EDN: HYEYUB.

В настоящее время современные устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) – комплексные, сложноорганизованные устройства, обладающие широким логическим и математическим функционалом. Задачи тестирования подобных устройств становятся еще более сложными и требуют наличия необходимого оборудования – моделирующей системы (программного комплекса или программно-аппаратного комплекса (ПАК)), а также усилителей сигналов для проведения тестирований в замкнутом цикле устройств РЗА [1].

Операционные усилители (ОУ) представляют собой интегральные полупроводниковые микросхемы, состоящие из нескольких усилительных каскадов. Первый каскад ОУ обязательно имеет дифференциальный вход, что обеспечивает высокую помехоустойчивость и стабильность параметров. Изначально ОУ разрабатывались для выполнения математических операций над аналоговыми сигналами, таких как сложение, вычитание, интегрирование и дифференцирование, при работе в схемах с

отрицательной обратной связью (ООС). Со временем их применение расширилось и включает усилители, генераторы, фильтры, модуляторы, демодуляторы и другие устройства.

Несмотря на сложную внутреннюю структуру, ОУ часто моделируются как идеализированные элементы с бесконечно большим коэффициентом усиления, бесконечным входным сопротивлением, нулевым выходным сопротивлением и минимальным напряжением смещения. Это упрощает анализ схем. В технической литературе ОУ обозначаются различными графическими символами, отличающимися способом указания, инвертирующего и неинвертирующего входов [2].

Цель исследования – изучить принцип работы усилителей переменного напряжения, построенных на операционных усилителях, приобрести практические навыки работы с интерактивным эмулятором радиосхем *Micro-Cap*.

Материалы и методы. Упрощенная схема ОУ представлена на *рисунке 1*. Особенность его струк-

туры заключается в том, что на входе установлен дифференциальный каскад.

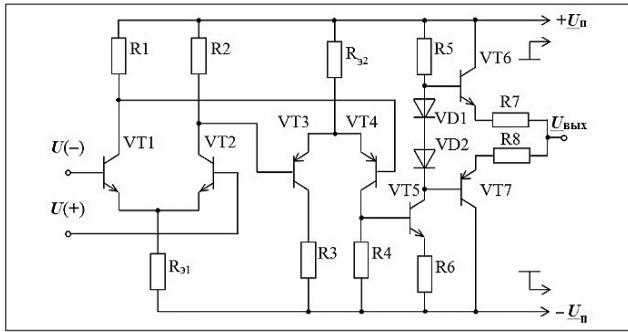


Рис. 1. Упрощенная схема ОУ

Fig. 1. Simplified schematic diagram of an operational amplifier

Схема дифференциального каскада выполнена в виде симметричного моста, который состоит из двух резисторов ($R1$ и $R2$) и двух транзисторов ($VT1$ и $VT2$). В цепь эмиттеров транзисторов включен резистор R_{31} (рис. 1) [3]. Для обеспечения симметрии каскада параметры транзисторов $VT1$ и $VT2$ должны быть идентичными, а сопротивления резисторов $R1$ и $R2$ – одинаковыми [4].

Особенности дифференциального каскада:

- малый уровень дрейфа выходного напряжения каскада (выходным напряжением дифференциального каскада служит напряжение между коллекторами транзисторов $VT1$ и $VT2$) из-за колебаний температуры, напряжений источников питания и старения элементов [5];
- высокий коэффициент усиления дифференциального входного напряжения (то есть разности напряжений входных сигналов) [6];
- низкий коэффициент усиления по отношению к синфазным входным сигналам, следовательно, высоким подавлением синфазных помех на входе дифференциального каскада [7];
- высокое входное сопротивление по отношению к поданным на его входы сигналам (дифференциальным и синфазным сигналам) [8];
- требует наличия двухполярного источника питания [9].

В составе ОУ предусмотрен второй дифференциальный каскад, построенный на транзисторах $VT3$ и $VT4$ (рис. 1). Данный каскад имеет несимметричный выход, что обусловлено требованиями последующего усилительного каскада на транзисторе $VT5$, который включен по схеме с общим эмиттером. Выходной (оконечный) каскад реализован на транзисторах $VT6$ и $VT7$ и работает в режиме AB . Начальное смещение для этого каскада обеспечивается с помощью

диодов $VD1$ и $VD2$.

Резисторы $R7$ и $R8$ выполняют функцию токоограничения: при подключении низкоомной нагрузки или возникновении короткого замыкания на выходе ОУ они ограничивают максимальный выходной ток, защищая тем самым выходные транзисторы $VT6$ и $VT7$ от повреждений [10].

Как правило, выходные каскады операционных усилителей рассчитаны на относительно небольшие токи (в пределах единиц и десятков миллиампер), поэтому в усилителях на базе ОУ чаще всего используются только входные каскады и каскады предварительного усиления [11].

Существуют три основные схемы включения ОУ в качестве усилителя напряжения: схема неинвертирующего усилителя, схема повторителя напряжения и схема инвертирующего усилителя (рис. 2-4).

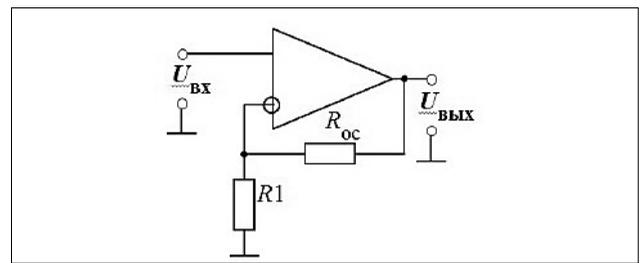


Рис. 2. Схема неинвертирующего усилителя напряжения, реализованная на ОУ

Fig. 2. Non-inverting voltage amplifier circuit implemented using an operational amplifier

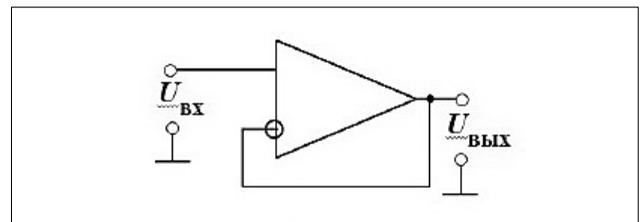


Рис. 3. Схема повторителя напряжения, реализованная на ОУ

Fig. 3. Voltage follower circuit implemented using an operational amplifier

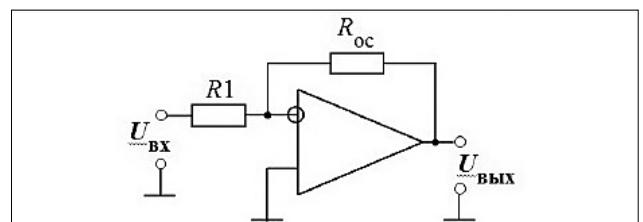


Рис. 4. Схема инвертирующего усилителя напряжения, реализованная на ОУ

Fig. 4. Circuit of an inverting voltage amplifier implemented using an operational amplifier

Неинвертирующий усилитель усиливает входной

сигнал $U_{вх}$ без изменения его фазы на выходе по отношению к фазе сигнала на входе [12]. Коэффициент усиления по напряжению неинвертирующего усилителя равен:

$$K_U = (R_{oc}/RI) + 1 \text{ б/р}, \quad (1)$$

где K_U – коэффициент усиления по напряжению, б/р; R_{oc} – резистор, подключенный к обратной связи, Ом; RI – резистор, подключенный ко входу ОУ, Ом.

Повторитель напряжения амплитуду входного сигнала $U_{вх}$ не усиливает, у него коэффициент усиления по напряжению практически равен единице ($K_U = 1$), и фазу выходного сигнала не изменяет. Повторитель напряжения имеет очень большое входное сопротивление и низкое выходное сопротивление и поэтому применяется для согласования источника сигнала с высоким выходным сопротивлением и нагрузки с низким сопротивлением. Иногда говорят, что повторитель применяется в качестве буферного каскада для уменьшения или устранения влияния, следующего за ним каскада на работу предыдущего [13].

Инвертирующий усилитель усиливает входной сигнал $U_{вх}$, изменяя его фазу на выходе на 180° по отношению к фазе сигнала на входе. Коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя рассчитывается по формуле:

$$K_U = -R_{oc}/RI \text{ б/р}. \quad (2)$$

Знак «минус» в формуле указывает на изменение фазы выходного сигнала на 180° (Медведев И.И. Схемотехника аналоговых электронных устройств: лабораторный практикум. Брянск: БГТУ. 2020. 64 с.).

Результаты и обсуждение. Используя вышеперечисленные теоретические аспекты и схемы, авторы смоделировали схему усилителя переменного напряжения на основе неинвертирующего усилителя в интерактивном эмуляторе радиосхем *Micro-Cap* (рис. 5), при запуске которой получили осциллограммы входного и выходного сигналов (рис. 6) со значениями в вершинах равными 1 В у входного сигнала и 3 В у выходного сигнала. Деление выходного сигнала на входной $3/1$ дает 3 – коэффициент усиления, проверить который возможно формулой (1). В нашем случае $R_2 = R_{oc} = 20$ Ом и по формуле (1) это будет равно 3, что соответствует экспериментальным вычислениям.

Также построили амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя (рис. 7), которая показывает усиление в децибелах равное 9,54 дБ. По условию операционный усилитель работает на частоте 2,5 МГц => основное падение усиления начнется на

$2,5/3 = 833,33$ кГц, что соответствует падению на 3дБ. По АЧХ усилителя видно, что усиление в этой точке примерно равно 6,54 дБ, что соответствует теоретическим вычислениям.

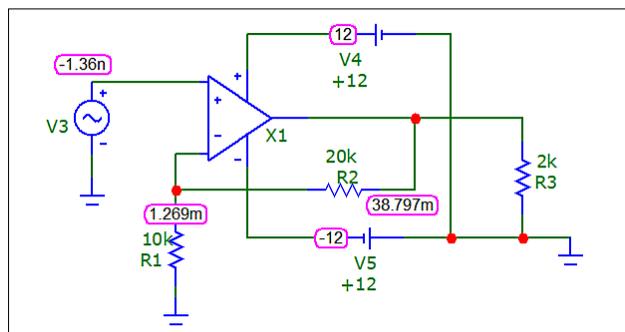


Рис. 5. Схема усилителя переменного напряжения на основе неинвертирующего усилителя

Fig. 5. AC voltage amplifier circuit based on a non-inverting amplifier

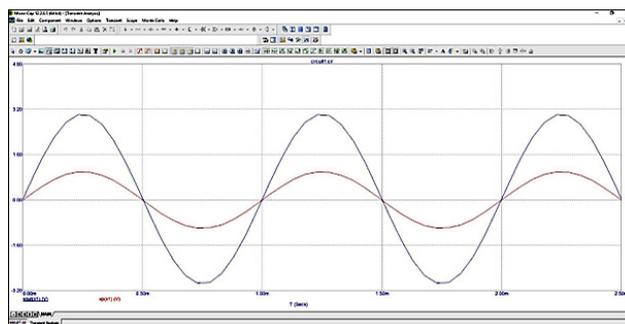


Рис. 6. Осциллограммы входного (красный) и выходного (синий) сигналов

Fig. 6. Waveforms of the input (red) and output (blue) signals

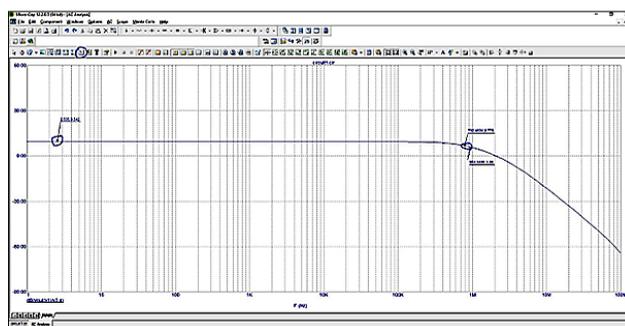


Рис. 7. График АЧХ неинвертирующего усилителя
Fig. 7. Amplitude-frequency response of a non-inverting amplifier

Выводы. В ходе исследования подробно рассмотрели принципы работы операционных усилителей в схемах усиления переменного напряжения. Установили, что ОУ представляют собой сложные интегральные микросхемы, основой которых служит дифференциальный входной каскад, обеспечиваю-

щий высокую помехоустойчивость и стабильность параметров. Исследовали три основные схемы включения ОУ: неинвертирующий усилитель, повторитель напряжения и инвертирующий усилитель, различающиеся своим функциональным назначением и характеристиками.

Анализ практической части, проведенный с использованием интерактивного эмулятора *Micro-Cap*, подтвердил теоретические расчеты коэффициента усиления для неинвертирующего усилителя. Экспериментально получили значение коэффициента усиления, равное 3, что совпадает с результатом, вычисленным по формуле. Построенная АЧХ усилителя показала уровень усиления на частоте 2,5 МГц, соответствующий теоретическим ожиданиям, включая падение усиления на 3 дБ.

Полученные результаты подтверждают корректность применяемых методов и моделей, что может быть использовано в дальнейших научных исследованиях.

Библиографический список

1. Уфа Р.А., Кабиров В.А., Андреев М.В. и др. Импульсно-модуляционные усилители переменного тока и напряжения для задач адекватной настройки устройств релейной защиты и автоматики // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2019. N5. С. 53-65. DOI: 10.1134/S0002331019050169. EDN: EPMXNJ.
2. Магеррамов Р.В. Простейший операционный усилитель на полевых транзисторах и его параметры // *Молодой ученый*. 2017. N2(136). С. 158-162. EDN: XIFMBP.
3. Валов В.В., Вахтин В.Е., Лебедев Е.С. Схемотехника транзисторных источников тока // *Молодой ученый*. 2024. N4(503). С. 43-48. EDN: JMHGGU.
4. Новиков И.Л., Вольхин Д.И., Вострецов А.Г. Криогенный биполярный маломощный усилитель постоянного тока для низкочастотных применений // *Радиотехника и электроника*. 2024. Т. 69. N1. С. 88-98. DOI: 10.31857/S0033849424010078. EDN: KZSOZZ.
5. Гаврушко В.В., Ионов А.С., Кадриев О.Р. и др. Кремниевые дифференциальные фотоприемники. Технология, характеристики, применение // *Журнал технической физики*. 2023. Т. 93. N9. С. 1353-1363. DOI: 10.21883/JTF.2023.09.56223.1360-23. EDN: ERHUBV.
6. Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н. Активные полосно заграждающие RC фильтры четвертого порядка с регулируемой полосой задерживания и неравномерностью амплитудно-частотной характе-

- ристики // *Радиотехника и электроника*. 2023. Т. 68. N2. С. 195-201. DOI: 10.31857/S0033849423020043. EDN: LBZCKG.
7. Hosseini A., Mohammadnejad S., Karami M.A. Differential high gain transimpedance amplifier with–3dB-bandwidth extension. *Microelectronics Journal*. 2023. Vol. 139. 105861. DOI: 10.1016/j.mejo.2023.105861.
 8. Chen Z. Design and optimisation of a two-stage amplifier based on a differential input stage and a common-source amplifier. *Applied and Computational Engineering*. 2024. Vol. 104. Iss. 1. 104-109. DOI: 10.54254/2755-2721/104/20241052.
 9. Pillay S., Srivastava V.M. Modelling and Design of Antenna Amplifier using an Active Loaded Differential Pair. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2023. Vol. 71. Iss. 5. 228-239. DOI: 10.14445/22315381/ijett-v71i5p224.
 10. Коротков А.С., Чан Т.Д. Анализ пассивного смесителя частот с управлением по току на произвольной промежуточной частоте с учетом входного и выходного импедансов // *Радиотехника и электроника*. 2023. Т. 68. N1. С. 83-94. DOI: 10.31857/S0033849423010072. EDN: CCZIBX.
 11. Альтудов Ю.К., Гаев Д.С., Пеху А.В. и др. Биполярный транзистор с оптической накачкой // *Микроэлектроника*. 2023. Т. 52. N6. С. 489-496. DOI: 10.31857/S0544126923600240. EDN: CSXYVP.
 12. Чан Т.Д., Коротков А.С. Анализ пассивного смесителя частот с управлением по току при использовании защитных интервалов сигналов гетеродина // *Радиотехника и электроника*. 2024. Т. 69. N3. С. 288-298. DOI: 10.31857/S0033849424030085. EDN: JUYVNY.
 13. Головкин А.А. Параметрический синтез различных радиоустройств с заданным количеством каскадов типа «нелинейная часть – резистивный четырехполюсник» // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2024. Т. 27. N2. С. 56-68. DOI: 10.18469/1810-3189.2024.27.2.56-68.

References

1. Ufa R.A., Kabirov V.A., Andreev M.V. et al. Pulse modulating AC power and voltage amplifiers for the problems of adequate setting of relay protection devices and automatics. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2019. N5. 53-65 (In Russian). DOI: 10.1134/S0002331019050169. EDN: EPMXNJ.
2. Magerramov R.V. The simplest operational amplifier on field-effect transistors and its parameters. *Young Scientist*. 2017. N2(136). 158-162 (In Russian). EDN:

- XIFMBP.
3. Valov V.V., Vakhtin V.E., Lebedev E.S. Circuitry of transistor current sources. *Young Scientist*. 2024. N4(503). 43-48 (In Russian). EDN: JMHGGU.
 4. Novikov I.L., Vol'khin D.I., Vostretsov A.G. Cryogenic bipolar low noise dc amplifier for low frequency applications. *Radio Engineering and Electronics*. 2024. Vol. 69. N1. 88-98 (In Russian). DOI: 10.31857/S0033849424010078. EDN: KZSOZZ.
 5. Gavrushko V.V., Ionov A.S., Kadriev O.R. et al. Silicon differential photodetectors. Technology, characteristics, application. *Journal of Technical Physics*. 2023. Vol. 93. N9. 1353-1363 (In Russian). DOI: 10.21883/JTF.2023.09.56223.1360-23. EDN: ERHUBV.
 6. Denisenko D.Yu., Prokopenko N.N. Active fourth-order band-stop RC filters with adjustable stopband and frequency response flatness. *Radio Engineering and Electronics*. 2023. Vol. 68. N2. 195-201 (In Russian). DOI: 10.31857/S0033849423020043. EDN: LBZCKG.
 7. Hosseini A., Mohammadnejad S., Karami M.A. Differential high gain transimpedance amplifier with – 3dB-bandwidth extension. *Microelectronics Journal*. 2023. Vol. 139. 105861. DOI: 10.1016/j.mejo.2023.105861.
 8. Chen Z. Design and optimisation of a two-stage amplifier based on a differential input stage and a common-source amplifier. *Applied and Computational Engineering*. 2024. Vol. 104. Iss. 1. 104-109. DOI: 10.54254/2755-2721/104/20241052.
 9. Pillay S., Srivastava V.M. Modelling and Design of Antenna Amplifier using an Active Loaded Differential Pair. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2023. Vol. 71. Iss. 5. 228-239. DOI: 10.14445/22315381/ijett-v71i5p224.
 10. Korotkov A.S., Chan T.D. Analysis of a Passive Current-Controlled Frequency Mixer at an Arbitrary Intermediate Frequency Taking into Account the Input and Output Impedances. *Radio Engineering and Electronics*. 2023. Vol. 68. N1. 83-94 (In Russian). DOI: 10.31857/S0033849423010072. EDN: CCZIBX.
 11. Altudov Yu.K., Gaev D.S., Pskhu A.V. et al. Bipolar transistor with optical pumping. *Microelectronics*. 2023. Vol. 52. N6. 489-496 (In Russian). DOI: 10.31857/S0544126923600240. EDN: CSXYVP.
 12. Tran T.D., Korotkov A.S. Analysis of a passive frequency mixer with current control by using protective intervals of heterodyne signals. *Radio Engineering and Electronics*. 2024. Vol. 69. N3. 288-298 (In Russian). DOI: 10.31857/S0033849424030085. EDN: JUYVNY.
 13. Golovkov A.A. Parametrical synthesis of various radio devices with the set quantity of identical cascades of type «the nonlinear part – the resistive two-port

network». *Physics of Wave Processes and Radio Systems*. 2024. Vol. 27. N2. 56-68 (In Russian). DOI: 10.18469/1810-3189.2024.27.2.56-68.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Стерхова Т.Н. – общее руководство, формулирование общих целей и задач исследования;

Васильченко Д.А. – оформление текста, формулирование выводов, оформление рисунков;

Фролов М.А. – анализ литературных источников, визуализация материалов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Sterkhova T.N. – general guidance, formulation of general goals and objectives of the study;

Vasilchenko D.A. – text design, formulation of conclusions, design of drawings;

Frolov M.A. – analysis of literary sources, visualization of materials.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.07.2025

Статья принята к публикации 18.09.2025