

И. Н. Воротников, С. В. Мишуков, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, Н. А. Ставицкая

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ
В СРЕДЕ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ SIMINTECH**

Ставропольский государственный аграрный университет

vorotn_in@mail.ru, stas.mishukov.92@mail.ru, mma_26@inbox.ru

shaliko69@mail.ru, nata.stavitzkaja@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Станислав Вадимович Мишуков, stas.mishukov.92@mail.ru

Моделирование является важнейшей процедурой научно-исследовательского познания сложных технических объектов, не требующее серьезных затрат времени, трудовых ресурсов и денежных средств на изготовление опытных моделей. Творческий процесс моделирования позволяет разнопрофильным специалистам выполнять сложные исследования и устранять неточности в конструкторской, технологической, нормативной и другой документации, что значительно упрощает создание новых и модернизацию известных технических решений в различных областях жизни человека. В частности, подобным средством моделирования является программная среда Simulation In Technic (SimInTech), раскрывающая достижения отечественных ученых в автоматизации, энергетике, теплотехнике, авиации и предоставляющая неограниченные возможности для исследований в указанных и других направлениях науки и техники. В рамках настоящей статьи рассматривается прикладная задача определения параметров многоэлементных двухполюсников, представляющих из себя четырехэлементную схему замещения емкостных измерительных преобразователей, применяемых для оценки влажности сельскохозяйственных культур. Для реализации алгоритма определения в среде модельно-ориентированного проектирования SimInTech была разработана и исследована модель операционного усилителя, которая отсутствовала в стандартных библиотеках среды. На основе вышеизложенного целью данной научной статьи является проверка работоспособности построенной модели операционного усилителя и подбор необходимых значений основных характеристик – коэффициента усиления и постоянной времени интегрирования. При этом были выполнены исследования влияния значений указанных характеристик на отклонение выходного напряжения от теоретического экспоненциального процесса в диапазоне от 10 до 10^5 для коэффициента усиления и от 0,1 до 9,0 с для постоянной времени интегрирования, что позволило установить оптимальные значения и оценить максимальную относительную погрешность в динамике.

Ключевые слова: моделирование, операционный усилитель, измерительная схема, емкостной преобразователь, двухполюсник, аperiodическое звено

I. N. Vorotnikov, S. V. Mishukov, M. A. Mastepanenko, Sh. Zh. Gabrielyan, N. A. Stavitskaya

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF OPERATIONAL AMPLIFIER
MODEL IN SIMINTECH MODEL-BASED DESIGN ENVIRONMENT**

Stavropol State Agrarian University

Modeling is the most important procedure for the scientific and research knowledge of complex technical objects, which does not require serious expenditure of time, labor and money for the production of experimental models. The creative modeling process allows diverse specialists to perform complex research and eliminate inaccuracies in design, technological, regulatory and other documentation, which greatly simplifies the creation of new and modernization of well-known technical solutions in various areas of human life. In particular, a similar modeling tool is the Simulation In Technic (SimInTech) software environment, which reveals the achievements of Russian scientists in automation, energy, thermal engineering, aviation and provides unlimited opportunities for research in these and other areas of science and technology. In the framework of this article, the applied problem of determining the parameters of multi-element bipolar circuits, which are a four-element replacement circuit of capacitive measuring transducers used to assess the moisture content of crops, is considered. To implement the detection algorithm in the SimInTech model-oriented design environment, an operational amplifier model was developed and investigated,

which was not available in the standard libraries of the environment. Based on the above, the purpose of this scientific article is to check the operability of the built operational amplifier model and select the necessary values of the main characteristics – the gain factor and the integration time constant. At the same time, studies were carried out on the effect of the values of these characteristics on the deviation of the output voltage from the theoretical exponential process in the range from 10 to 10^5 for the gain factor and from 0.1 to 9.0 s for the integration time constant, which made it possible to establish optimal values and estimate the maximum relative error in dynamics.

Keywords: modeling, operational amplifier, measuring circuit, capacitive converter, bipolar, aperiodic link

Разработка и проектирование сложных технических систем, приборов и объектов связана с необходимостью их предварительного моделирования в различных специализированных средах, что позволяет выполнить ряд исследований и выявить значительное количество ошибок, не прибегая к изготовлению опытных образцов, экспериментальных моделей и прототипов, на которые затрачиваются трудовые ресурсы, время и денежные средства. На сегодняшний день существуют сотни различных программных сред для моделирования – Mathcad, Simulink, Micro-Cap, Proteus, Electronics Workbench, Matlab, PSpice и другие, однако выбор подходящего программного обеспечения для конкретных задач остается открытым, поскольку не существует универсального инструмента, полностью удовлетворяющего требованиям разнопрофильных специалистов [1–2].

На решение данной проблемы направлено отечественное программное обеспечение Simulation In Technic (SimInTech), представляющее из себя комплексную среду моделирования в реальном времени с возможностью детального исследования энергетических, атомных, нефтегазовых и других технических объектов, реализованных в одном взаимосвязанном проекте, объединяющем переменные сигналы физического, математического, электрического или иного рода. Такое ПО предоставляет профильным специалистам неограниченное количество областей применения и формирует новый подход к моделированию в виде универсальной и доступной среды со всеми необходимыми инструментами и библиотеками, которые постоянно улучшаются и обновляются производителем при непосредственном участии ведущих научных коллективов страны [3–4].

Нестандартной областью применения среды SimInTech является построение измерительных цепей (ИЦ) и исследование протекающих в них переходных процессов. В качестве примера рассмотрим частную прикладную задачу определения параметров многоэлементных двухполюсников, представляющих из себя четырехэлементную схему замещения емкостных изме-

рительных преобразователей (ЕИП) (рис. 1), которые используются при определении электрофизических свойств различных продуктов [5].

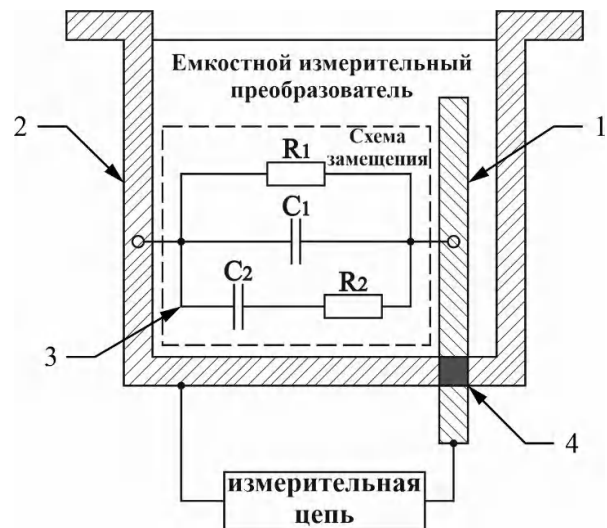


Рис. 1. Емкостной измерительный преобразователь и его схема замещения:

1 – внутренний электрод (стержневой); 2 – внешний электрод (контейнер); 3 – схема замещения; 4 – диэлектрическая вставка

Одним из способов реализации алгоритма определения RC -параметров двухполюсной схемы замещения является применение в измерительной цепи операционного усилителя (ОУ), модель которого отсутствует в стандартных библиотеках среды SimInTech, в связи с чем требуется ее разработка и исследование (рис. 2). Исходя из частотных характеристик универсальных ОУ, наиболее оптимальное решение построения модели заключается в использовании блока 1 «Аналитическая аперидика 1-го порядка» (АА), обеспечивающего вычисление выходного сигнала в дискретные моменты времени на каждом шаге интегрирования. Для реализации инверсного и прямого входов усилителя применено сравнивающее устройство (СУ) 2, выполняющее поэлементное вычитание одного входного векторного сигнала из другого. При этом сопротивление на входах модели «in –» и «in +» создается резисторами R_1 и R_2 , что позволяет приблизить характеристики ОУ к идеальным, то есть реализовать бесконечно большое сопротивление $R_{ex} \rightarrow \infty$.

Использование вольтметров 3–4 в предлагаемой модели обосновано необходимостью преобразования электрического сигнала в математический, что позволяет обеспечить стабильность и независимость работы блоков СУ и АА.

В свою очередь, математический сигнал на выходе блока 1 преобразуется в электрический с помощью блока 5, представляющего из себя источник напряжения (ИН), вход которого управляется функцией напряжения.

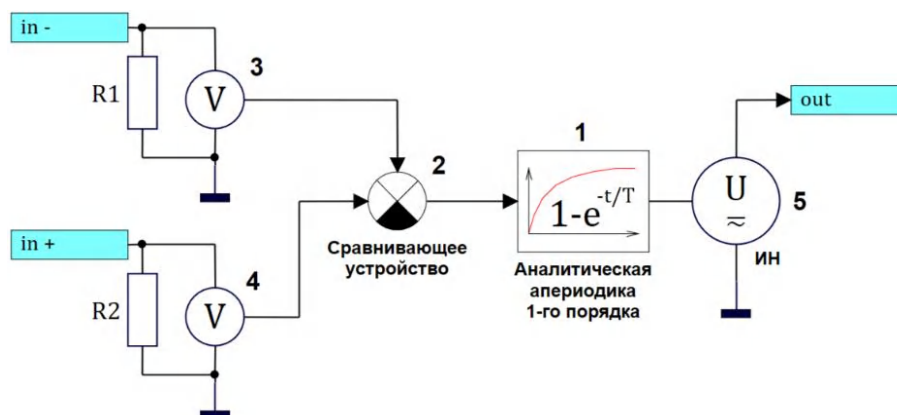


Рис. 2. Модель операционного усилителя в среде SimInTech:

1 – аналитическая апериодика; 2 – сравнивающее устройство; 3–4 – вольтметры; 5 – источник напряжения

В качестве основных характеристик ОУ рассматривались коэффициент усиления K и постоянная времени интегрирования τ , на основе которых выполнялся анализ изменения выходного напряжения $U_{\text{вых}}(t)$, изменяющегося в рамках поставленной прикладной задачи по экспоненциальному закону переходного процесса [6]:

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{U_0 C_1}{C_0} + \frac{U_0}{R_1 C_0} t + \frac{U_0 C_2}{C_0} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} \right),$$

где U_0 – напряжение на входе СЗ, В; C_0 – опорная емкость, пФ; R_1 , R_2 – сопротивления СЗ, кОм; C_1 , C_2 – емкостные элементы СЗ, пФ.

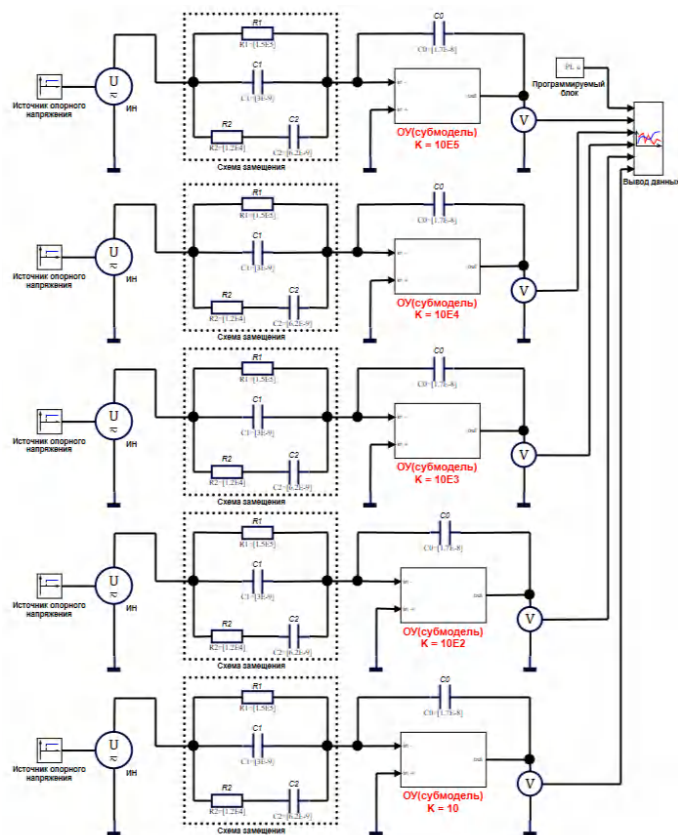


Рис. 3. Измерительная цепь для определения влияния коэффициента усиления K на модель ОУ

Для выполнения исследований в среде SimInTech построена отдельная ИЦ (рис. 3), включающая следующие компоненты:

- блок «Ступенька», выполняющий функцию источника опорного сигнала (ИОН) и формирующий математический сигнал установленной величины $U_0 = 5 \text{ В}$;
- блок «Источник напряжения» (ИН), генерирующий электрический сигнал напряжения в зависимости от установленного математического сигнала предыдущего блока;
- схему замещения в виде RC -цепи, состоящую из блоков резисторов R_1 – R_2 и конденсаторов C_1 – C_2 с произвольно заданными значениями сопротивления и емкости;
- исследуемую модель ОУ, объединенную в отдельный блок «Субмодель» с помощью библиотеки «Субструктуры», которая позволяет упростить конечный проект от большого количества блоков;
- опорный конденсатор C_0 , обеспечивающий обратную отрицательную связь ОУ;
- блок «Вольтметр идеальный», преобразующий электрический сигнал в математический, что необходимо для представления результатов исследований в графическом виде;
- блок «Временной график», обеспечивающий построение диаграмм изменения напряжения в графической форме;
- блок «Язык программирования», который выполняет построение идеальной расчетной кривой в соответствии с экспоненциальным законом по формуле.

Определение влияния коэффициента усиления K на выходное напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ модели ОУ выполнялось в диапазоне от 10 до 10^5 , при этом для каждого значения строились соответствующие графики, которые сравнивались с расчетным экспоненциальным процессом (рис. 4). В результате моделирования установлено, что при уменьшении коэффициента усиления форма экспоненциальной кривой переходного процесса значительно искажается и стремится к линейному характеру при малых значениях, о чем свидетельствует отклонение выходного напряжения от расчетного графика в диапазоне от $0,45$ до $2,5 \text{ В}$. Предпочтительным значением коэффициента усиления K для построенной модели ОУ является 10^5 , что подтверждается совпадением графика с расчетной экспоненциальной кривой [7].

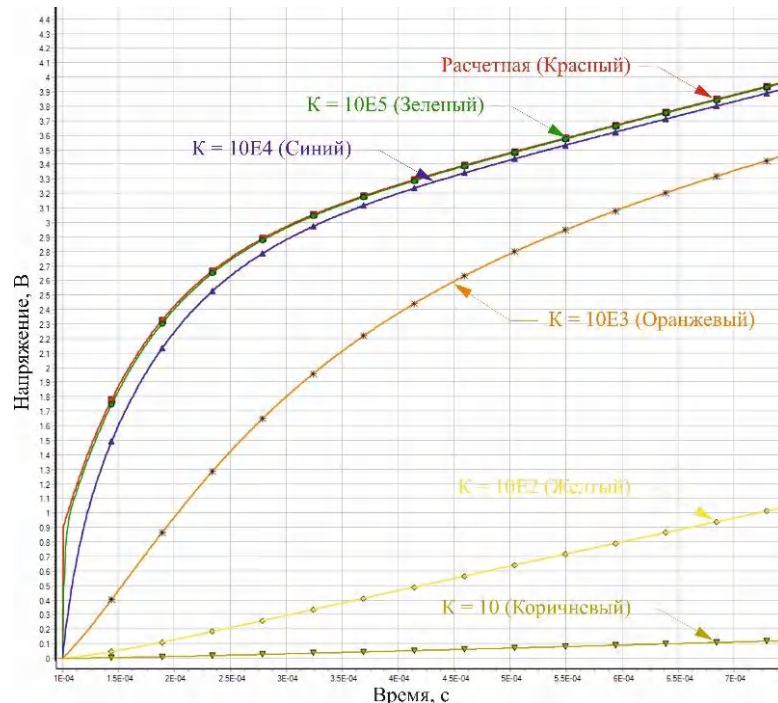


Рис. 4. Графические зависимости при изменении коэффициента усиления K

Для подтверждения сделанных выводов в измерительную цепь были добавлены пять СУ (рис. 5), что позволило реализовать пошаговое вычитание сигналов в модели ОУ при разных

значениях коэффициента усиления K от расчетной экспоненциальной кривой, являющейся эталонной функцией выходного напряжения реального ОУ.

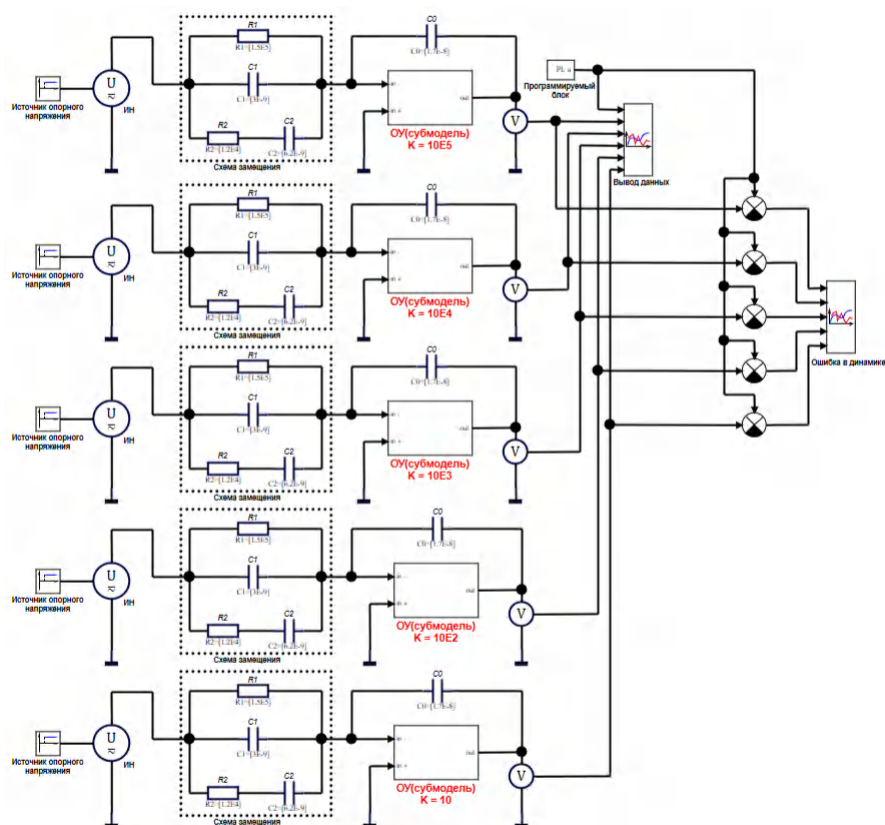


Рис. 5. Измерительная цепь для определения динамики отклонения выходного напряжения модели ОУ

В результате были получены кривые отклонения выходного напряжения $U_{\text{вых}}(t)$ (рис. 6), показывающие величину ошибки в течение заданного времени, что в свою очередь позволяет

определить максимальную относительную погрешность при изменении коэффициента усиления (см. таблицу).

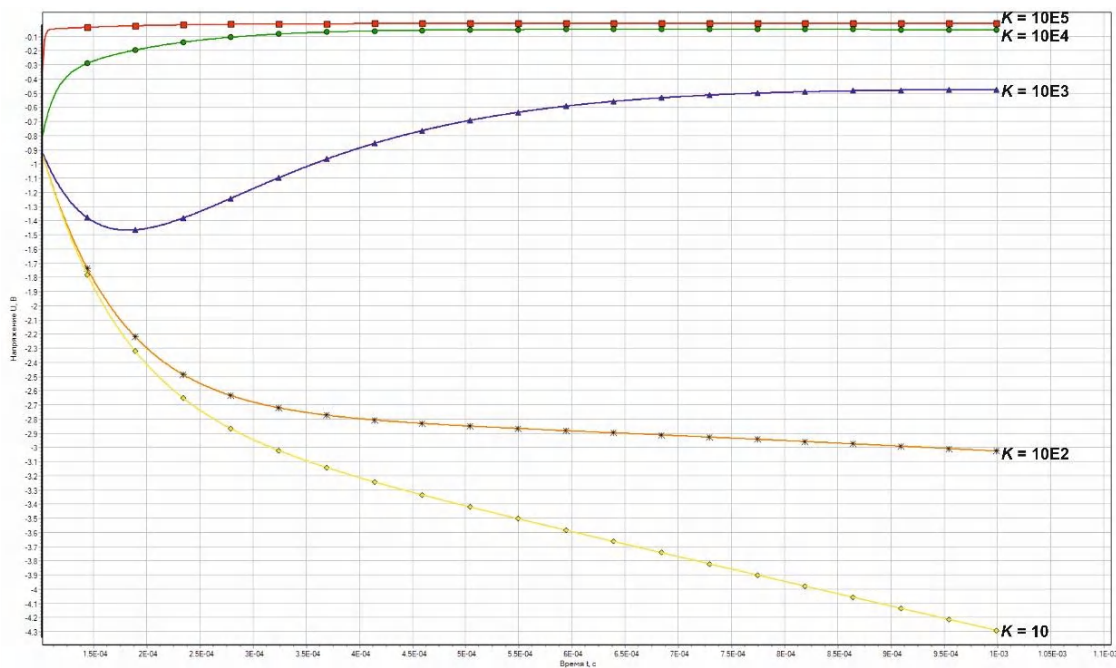


Рис. 6. Графические зависимости при оценке величины отклонения выходного напряжения

**Максимальная погрешность измерения
при оценке влияния коэффициента усиления K**

№ п/п	Коэффициент усиления K	Динамическое отклонение напряжения, В	Реальное значение напряжения, В	Максимальная погрешность измерения $\delta_{\max}$, %
1.	10^5	- 0,02	2,426	$\pm 0,82$
2.	10^4	- 0,177		$\pm 7,296$
3.	10^3	- 1,452		$\pm 59,852$
4.	10^2	- 2,297		$\pm 94,683$
5.	10^1	- 2,413		$\pm 99,464$

Аналогичным образом выполнено исследование влияния постоянной времени интегрирования τ на изменение выходного напряжения $U_{\text{вых}}(t)$ модели ОУ в диапазоне от 0,1 до 9,0 с, что позволило установить оптимальное значение, равное 0,1 с, которое подтверждается сопоставлением графика с расчетной экспоненциальной кривой. При этом использование значений τ от 0,5 до 9,0 с приводит к значительному искажению кривых и накоплению максимальной относительной погрешности $\delta_{\max}$ в диапазоне от $\pm 3,545$ до $\pm 56,761$ %, что неприменимо для получения точной модели ОУ.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о работоспособности предлагаемой модели операционного усилителя в среде SimInTech, верном выборе основных элементов и блоков, а также правильном подборе оптимальных значений коэффициента усиления $K = 10^5$ и постоянной времени интегрирования $\tau = 0,1$ с. Практическая значимость разработанной модели заключается в возможности ее применения при моделировании измерительных цепей контрольно-измерительных приборов и аппаратуры, что в свою очередь позволит обеспечить энерго- и ресурсосбережение технологических процессов в промышленности и сельском хозяйстве. Предложенная модель операционного усилителя успешно применена при решении частной прикладной задачи определения параметров многоэлементных двухполюсников, представляющих из себя четырехэлементную схему замещения емкостного измерительного преобразователя. При этом относительная погрешность измерений в процессе имитационного моделирования не превысила $\pm 0,23$ %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование объемных характеристик области нагрева контактного провода подвижной электрической дугой и их вычисление в среде MathCAD / И. А. Кондрашов, Ю. Г. Семенов, А. Д. Цой, Д. А. Кецакло // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 140–148. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_140. – EDN LUEWYO.
2. Иванов, В. Э. Модель усилителя постоянного тока с цифровым управлением в среде SimInTech / В. Э. Иванов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 3-1(117). – С. 49–57. – DOI 10.23670/IRJ.2022.117.3.008. – EDN PLNV CX.
3. Карачин, В. И. Динамическое моделирование в среде SimInTech микромашинных мехатронных модулей позиционирования лазерных источников облучения в установке экспресс-контроля структуры потоков скважинной жидкости / В. И. Карачин, Р. С. Кашаев, В. Ю. Корнилов // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 27–31. – DOI 10.26160/2541-8637-2023-11-27-31. – EDN TSCCSW.
4. Среда динамического моделирования SimInTech: официальный сайт. – Москва, 2024. – Режим доступа: URL: <https://simin-tech.ru> (дата обращения: 17.06.2024 г.).
5. Емкостный коаксиальный датчик для определения влажности и качества сыпучих сельскохозяйственных продуктов / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков // Сельский механизатор. – 2021. – № 9. – С. 33–35. – EDN GZTHPW.
6. Моделирование измерительных схем емкостных датчиков в среде SimInTech / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, Ш. Ж. Габриелян, С. В. Мишуков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2021. – № 3(37). – С. 48–53. – DOI 10.21685/2307-5538-2021-3-6.
7. Мишуков, С. В. Особенности имитационного моделирования измерительных схем емкостных датчиков / С. В. Мишуков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10, № 1(36). – DOI 10.26102/2310-6018/2022.36.1.017. – EDN SEJFYH.