

УДК 621.317.73  
doi:10.21685/2307-5538-2021-3-6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ В СРЕДЕ SIMINTECH

И. Н. Воротников<sup>1</sup>, М. А. Мастепаненко<sup>2</sup>, Ш. Ж. Габриелян<sup>3</sup>, С. В. Мишуков<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Ставропольский государственный аграрный университет, Ставрополь, Россия  
<sup>1</sup>vorotn\_in@mail.ru, <sup>2</sup>mma\_26@inbox.ru, <sup>3</sup>shaliko69@mail.ru, <sup>4</sup>stas.mishukov.92@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Исследована возможность построения нестандартных многоэлементных измерительных схем емкостных датчиков в среде динамического моделирования SimInTech. *Материалы и методы.* На основе встроенных библиотек программной среды выполнено компьютерное моделирование измерительных схем датчиков с применением двух способов построения модели – расчетного и экспериментального. *Результаты.* Построены модели операционного усилителя и измерительной схемы четырехэлементной RC-цепи, проверена их работоспособность и проведен сравнительный анализ с существующими математическими моделями. На основе языка программирования среды SimInTech выполнено программирование отдельного расчетного блока, позволяющего проводить сложные вычислительные операции непосредственно в модели. Получены экспериментальная и расчетная кривые, описывающие зависимость изменения выходного напряжения от номинальных параметров измерительной схемы. *Выводы.* Разработана рабочая модель операционного усилителя и подтверждена целесообразность применения среды для исследования многоэлементных измерительных схем емкостных датчиков на основе встроенного математического решателя.

**Ключевые слова:** моделирование, измерительная схема, емкостной датчик, временная диаграмма, схема замещения

**Для цитирования:** Воротников И. Н., Мастепаненко М. А., Габриелян Ш. Ж., Мишуков С. В. Моделирование измерительных схем емкостных датчиков в среде SimInTech // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 48–53. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-6

## MODELING OF MEASUREMENT CIRCUITS CAPACITIVE SENSORS IN THE SIMINTECH ENVIRONMENT

I.N. Vorotnikov<sup>1</sup>, M.A. Mastepanenko<sup>2</sup>, Sh.Zh. Gabrielyan<sup>3</sup>, S.V. Mishukov<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia  
<sup>1</sup>vorotn\_in@mail.ru, <sup>2</sup>mma\_26@inbox.ru, <sup>3</sup>shaliko69@mail.ru, <sup>4</sup>stas.mishukov.92@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The possibility of constructing non-standard multi-element measurement circuits of capacitive sensors in the SimInTech dynamic modeling environment is investigated. *Materials and methods.* On the basis of the built-in libraries of the software environment, computer modeling of measuring circuits of sensors is performed using two methods of constructing the model – analytical and experimental. *Results.* Models of an operational amplifier and a measuring circuit of a four-element RC circuit are constructed, their operability is checked and a comparative analysis is carried out with existing mathematical models. Based on the SimInTech programming language, a separate calculation block is programmed, which allows performing complex computational operations directly in the model. Experimental and calculated curves describing the dependence of the change in the output voltage on the nominal parameters of the measuring circuit are obtained. *Conclusion.* The working model of the operational amplifier is developed and the expediency of using the environment for the study of multi-element measuring circuits of capacitive sensors based on the built-in mathematical solver is confirmed.

**Keywords:** simulation, measuring circuit, capacitive sensor, time diagram, substitution circuit

**For citation:** Vorotnikov I.N., Mastepanenko M.A., Gabrielyan Sh. Zh., Mishukov S.V. Modeling of measurement circuits capacitive sensors in the SimInTech environment. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):48–53. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-6

### Введение

Основным универсальным и эффективным методом научного познания различных технических объектов является построение их схем замещения (СЗ), позволяющее выполнить математическое моделирование и исследование основных параметров, свойств и характеристик под воздействием разнородных сигналов при различных условиях. Для моделирования и выполнения расчетов технических систем, приборов и компонентов применяется разнообразное программное обеспечение, такое как Mathcad (PTC Ink.), Matlab и Simulink (MathWorks), VisSim (Visual Solutions), LabVIEW (National Instruments) и др. При этом каждый из перечисленных программных комплексов выполняет строго определенный круг задач, ограниченный не только областями применения, но и низкой гибкостью при расчетах нестандартных динамических моделей.

Указанный недостаток может быть устранен с помощью современной среды динамического моделирования технических систем SimInTech (Simulation In Technic), реализующей принцип структурированной базы переменных сигналов, что позволяет создавать комплексные модели, объединяющие в себе несколько расчетных схем с различными физическими, электрическими, гидравлическими и другими процессами [1]. Эта особенность среды SimInTech, в частности, позволяет выполнить построение СЗ емкостных датчиков, состоящих из двух и более пассивных элементов – конденсаторов или резисторов, количество которых напрямую связано с полнотой описания характеристик исследуемого объекта или продукта как качественно, так и количественно [2].

### Материалы и методы

Исследования этих схем показывают, что наиболее достоверную информацию при описании электрических свойств объектов можно получить только при четырех- и более элементной структуре эквивалентной цепи, рассматриваемой в переходном и установившемся режимах [3]. При этом для преобразования получаемых параметров целесообразно применять измерительные схемы (ИС), в составе которых предусмотрены операционные усилители (ОУ), позволяющие выполнять анализ переходного процесса при воздействии на цепь импульсных сигналов различной формы широкого диапазона частот [4].

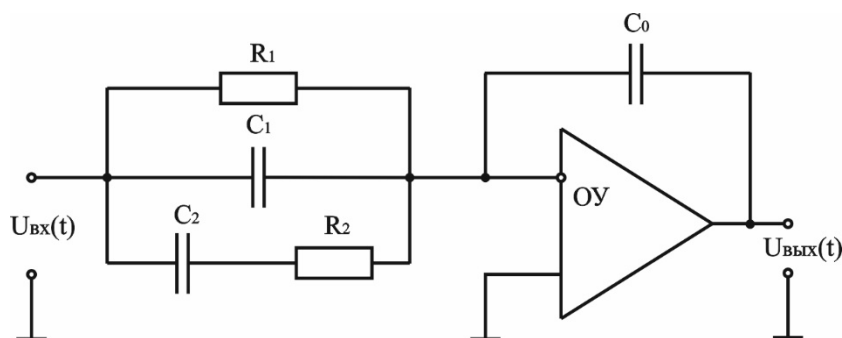


Рис. 1. ИС емкостного датчика

В таком случае стандартным техническим решением будет являться четырехэлементная RC-цепь, подключаемая к инвертирующему входу ОУ после источника опорного напряжения  $U_{вх}(t)$ , а в цепь отрицательной обратной связи (ООС) в свою очередь включается опорный элемент в виде конденсатора или резистора (рис. 1), при этом в случае с опорным конденсатором  $C_0$  напряжение на выходе  $U_{вых}(t)$  будет изменяться по экспоненциальному закону переходного процесса [5], описываемого выражением

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

где  $U_0$  – опорное напряжение, В;  $C_0$  – образцовый конденсатор, пФ;  $R_1, R_2$  – элементы СЗ в виде сопротивлений, Ом;  $C_1, C_2$  – элементы СЗ в виде емкостей, пФ.

Для построения приведенной выше четырехэлементной схемы датчика в среде динамического моделирования SimInTech был создан новый проект с электрической схемой, в которой предусмотрен математический решатель для электрических процессов (рис. 2). Основные элементы проектируемой модели, такие как резисторы  $R_1$ – $R_2$ , конденсаторы  $C_0$ – $C_2$ , вольтметры  $PV1$ – $PV3$ , нулевые потенциалы и другие, были взяты из стандартной библиотеки «ЭЦ-Динамика», обладающей достаточным количеством блоков для построения неограниченного количества различных электрических схем, параметры которых рассчитываются по мгновенным значениям применяемых элементов. Вывод результатов симуляции реализован с помощью временных диаграмм (ВД) посредством библиотеки «Вывод данных», позволяющей визуализировать протекающие процессы в проектируемой модели ИС емкостного датчика.

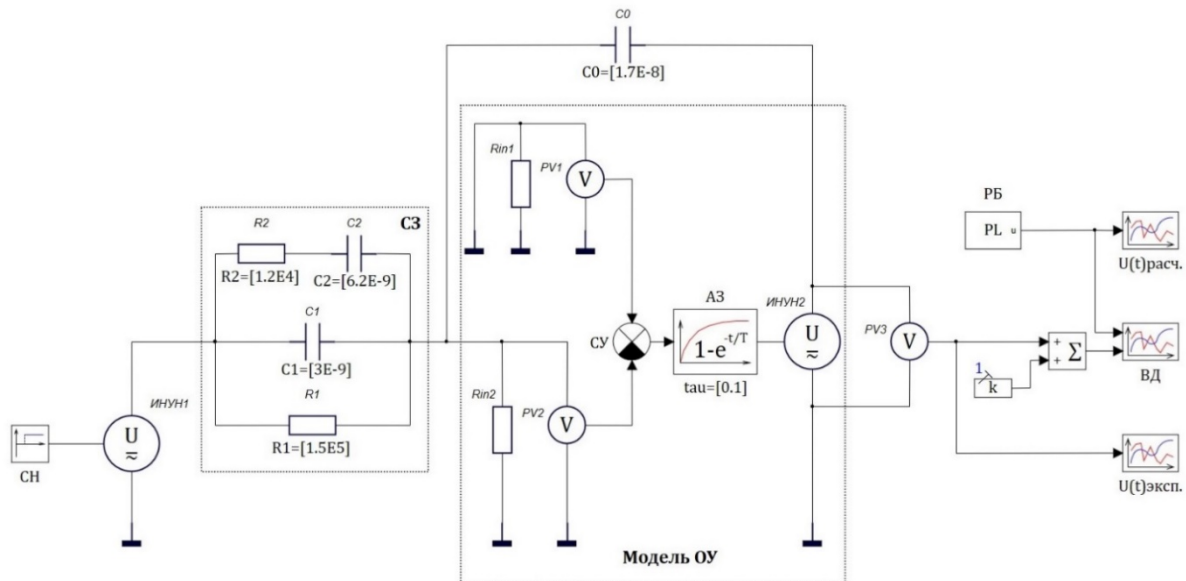


Рис. 2. Модель ИС в среде SimInTech

Поскольку в существующих библиотеках среды SimInTech отсутствует операционный усилитель, то потребовалось выполнить его построение посредством сравнивающего устройства (СУ), реализующего поэлементное вычитание одного входного векторного сигнала из другого, и апериодического звена (АЗ), представляющего из себя аналитико-дискретную непрерывную математическую модель, которая описывается линейным дифференциальным уравнением. Для этого звена были приняты следующие значения: коэффициент усиления  $k = 1 \cdot 10^5$ , постоянная времени  $\tau = 0,1$  с, время расчета  $t = 0,001$  с. С целью создания большого входного сопротивления входы модели ОУ подключены к резисторам  $R_{in1}$  и  $R_{in2}$  с величиной сопротивления 1 МОм.

Принцип работы модели ИС (рис. 2) заключается в следующем: от источника напряжения ИНУН1, управляемого через математическую связь блоком скачка напряжения СН, на схему замещения емкостного датчика посредством электрической связи подается опорное напряжение  $E_0$ , поступающее на инвертирующий вход модели ОУ, в которой с помощью идеального вольтметра  $PV2$  электрическая связь преобразуется в математическую и поступает на СУ, выполняющее сравнение поступающего сигнала и передающее результат в АЗ. Далее по заданному экспоненциальному закону АЗ преобразует сигнал в математический вид и передает его на управляемый источник напряжения ИНУН2, связанный через опорный конденсатор  $C_0$  с инвертирующим входом ОУ, после чего сигнал с помощью вольтметра  $PV3$  снимается с выхода ОУ и поступает на сумматор (СМ), который в свою очередь передает сигнал в виде экспериментальной кривой  $U(t)_{экс.}$  на блок временной диаграммы.

### Результаты

Проверка работоспособности построенной модели выполнялась методом сравнения с известным результатом математического моделирования в среде Mathcad на основе статьи [5],

в которой подробно описан алгоритм исследования и получены достоверные результаты совокупных измерений параметров многоэлементных цепей. Исходя из этого, были приняты следующие значения номинальных параметров:  $C_1 = 3$  нФ,  $R_1 = 150$  кОм,  $C_2 = 6,2$  нФ,  $R_2 = 12$  кОм,  $C_0 = 17$  нФ,  $U_0 = 5$  В.

Одним из преимуществ среды SimInTech является возможность создания расчетных блоков на встроенном языке программирования, что позволяет выполнять сложные вычислительные операции непосредственно в модели. Для проверки указанной функции было выполнено построение расчетного блока (РБ) по формуле (1) (рис. 3), в котором производится одно-временное конфигурирование входных и выходных портов, что дает возможность его интегрирования в разработанную модель ИС.

```

Блок "Язык программирования": LangBlock22
Файл  Правка  Поиск  Расчёт  Справка
[Иконки панели инструментов]
1  output u;
.
.  U=5;
.  C0=17E-9;
.  R1=150000;
.  C1=3E-9;
.  C2=6.2E-9;
.  R2=12000;
.
10 p=1/(R2*C2);
.  deltat=0.0001;
.
.  if time < deltat then u=0;
.
.  u =U*C1/C0+U*(time-deltat)/R1/C0+U*C2/C0*(1-exp(-(time-deltat)/R2/C2));

```

Рис. 3. Окно блока языка программирования SimInTech

Расчетный блок был применен с целью построения на ВД сразу двух кривых – расчетной  $U(t)_{\text{расч.}}$ , которая описывает протекающий в ИС переходный процесс с теоретической точки зрения, и экспериментальной  $U(t)_{\text{эксп.}}$ , полученный в результате моделирования в среде (рис. 4).

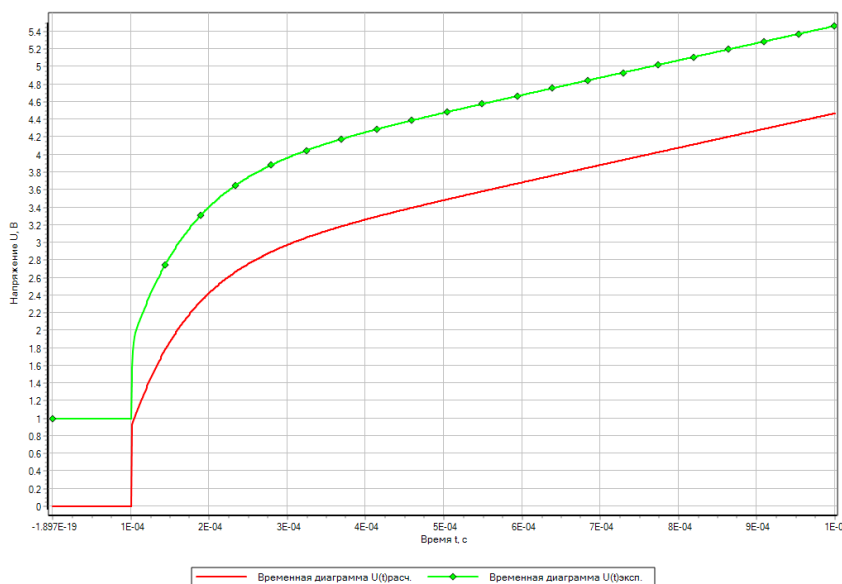


Рис. 4. Временные диаграммы экспериментальной и расчетной кривых

Поскольку построенные временные диаграммы кривых наложились друг на друга, то для наглядности потребовалось ввести дополнительный блок в виде СМ, который искусственно смещает экспериментальный график  $U(t)_{\text{эксп.}}$  на величину заданной константы равной 1 В, что в свою очередь позволяет визуально оценить совпадение полученных графиков.

### Заключение

Анализ результатов проведенного моделирования показывает, что полученные временные диаграммы в среде динамического моделирования SimInTech (рис. 4) полностью совпадают с известным результатом математического моделирования, что свидетельствует о работоспособности построенной модели емкостного датчика. При этом совпадение кривых на ВД показывает: во-первых, верное построение и работоспособность модели ОУ, что позволяет построить упрощенную субмодель в дополнение к базовым блокам среды; во-вторых, отражает целесообразность применения встроенного математического решателя среды, применительно к сложным динамическим моделям электрических цепей; в-третьих, свидетельствует о большом потенциале среды при выполнении исследований четырехэлементных СЗ емкостных датчиков с построением зависимости напряжения от входных параметров  $R_1, R_2, C_1, C_2$ .

### Список литературы

1. Карташов Б. А., Шабаяев Е. А., Козлов О. С., Щекатуров А. М. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. М. : ДМК Пресс, 2017. 423 с.
2. Сарваров Л. В., Сафаров М. Р. Сравнительный анализ способов вычисления параметров двухполосников // Материалы 50-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа : Изд-во УГНТУ, 2001. С. 100.
3. Mastepanenko M. A., Gabrielyan S. Z., Mishukov S. V. Improving the algorithms for measuring sensor parameters to determine the moisture content of dry and liquid agricultural products // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. № 488. doi: 10.1088/1755-1315/488/1/012028
4. Колдов А. С. Оценка погрешностей совокупных измерений параметров многоэлементных электрических цепей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 71–74.
5. Князьков А. В., Колдов А. С., Родионова Н. В., Светлов А. В. Совокупные измерения параметров многоэлементных электрических цепей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3. С. 69–78. doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-9

### References

1. Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shekaturov A.M. *Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech = SimInTech dynamic modeling environment for technical systems*. Moscow: DMK Press, 2017:423. (In Russ.)
2. Sarvarov L.V., Safarov M.R. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of two-pole. *Materialy 50-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Materials of the 50th Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Ufa: Izd-vo UGNTU, 2001:100. (In Russ.)
3. Mastepanenko M.A., Gabrielyan S.Z., Mishukov S.V. Improving the algorithms for measuring sensor parameters to determine the moisture content of dry and liquid agricultural products. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;(488). doi: 10.1088/1755-1315/488/1/012028
4. Koldov A.S. Estimation of errors in aggregate measurements of parameters of multi-element electrical circuits. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:71–74. (In Russ.)
5. Knyaz'kov A.V., Koldov A.S., Rodionova N.V., Svetlov A.V. Cumulative measurements of parameters of multi-element electrical circuits. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(3):69–78. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-9

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Игорь Николаевич Воротников

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электротехники,  
автоматики и метрологии,  
Ставропольский государственный  
аграрный университет  
(Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12)  
E-mail: vorotn\_in@mail.ru

#### Igor N. Vorotnikov

Candidate of technical sciences, associate professor,  
head of sub-department of electrical engineering,  
automation and metrology,  
Stavropol State Agrarian University  
(12 Zootekhnicheskiiy lane, Stavropol, Russia)

**Максим Алексеевич Мастепаненко**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электротехники,  
автоматики и метрологии,  
декан электроэнергетического факультета,  
Ставропольский государственный  
аграрный университет  
(Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12)  
E-mail: mma\_26@inbox.ru

**Шалико Жораевич Габриелян**

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,  
доцент кафедры электротехники,  
автоматики и метрологии,  
заместитель декана электроэнергетического  
факультета,  
Ставропольский государственный  
аграрный университет  
(Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12)  
E-mail: shaliko69@mail.ru

**Станислав Вадимович Мишуков**

ассистент кафедры электротехники,  
автоматики и метрологии,  
Ставропольский государственный  
аграрный университет  
(Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12)  
E-mail: stas.mishukov.92@mail.ru

**Maxim A. Mastepanenko**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of sub-department of electrical  
engineering, automation and metrology,  
dean of the faculty of electric power engineering,  
Stavropol State Agrarian University  
(12 Zootekhnicheskii lane, Stavropol, Russia)

**Shaliko Zh. Gabrielyan**

Candidate of agricultural sciences, associate professor,  
associate professor of sub-department  
of electrical engineering,  
automation and metrology,  
deputy dean of the faculty  
of electric power engineering,  
Stavropol State Agrarian University  
(12 Zootekhnicheskii lane, Stavropol, Russia)

**Stanislav V. Mishukov**

Assistant of sub-department of electrical engineering,  
automation and metrology,  
Stavropol State Agrarian University  
(12 Zootekhnicheskii lane, Stavropol, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 17.05.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 24.05.2021**

**Принята к публикации/Accepted 28.05.2021**