

# Разработка функциональной модели рабочего процесса преобразователя температуры точки росы

С. О. Михин<sup>1</sup>, О. Н. Кошкур<sup>1</sup>, В. А. Ганжа<sup>2</sup>

УДК 551.508.71

Описан процесс формирования функциональной модели работы преобразователя, предназначенного для измерения температуры точки росы по воде в природном газе в диапазоне от 20 до  $-60^{\circ}\text{C}$ . В ней определены блоки и подсистемы функциональной модели, обеспечивающие сбор и обработку данных, хранение и распределение данных в постоянном запоминающем устройстве электронной платы, а также формирование градуировочной таблицы и преобразование искомого значения в выходной электрический сигнал постоянного тока. Подготовлена теоретическая (виртуальная) модель для дальнейшей работы по реализации концепции преобразователя температуры точки росы на отечественной элементной базе.

**Ключевые слова:** преобразователи температуры точки росы, сорбционно-емкостный чувствительный элемент влажности газа, функциональная модель, алгоритм, принципиальная электрическая схема, градуировочная таблица, контрольно-измерительный прибор, сбор и обработка данных

## Введение

Газотранспортная система Российской Федерации имеет рекордную протяженность в мире, а экспорт газа составляет 34% от всех экспортруемых минеральных ресурсов страны [1]. Поэтому очень важно обеспечить надежность функционирования газотранспортной системы, благодаря не только высокотехнологичному оборудованию на предприятиях транспорта газа, трубопроводам, изготовленным и смонтированным по современным технологиям, но и качеству транспортируемого газа. Важной характеристикой газа является влагосодержание, поскольку именно влага ведет к коррозионным процессам внутри трубопровода, снижает качественные показатели передаваемого потребителям газа,

уменьшает энергетическую эффективность оборудования и общий срок эксплуатации системы, приводит к необходимости проведения дополнительных ремонтных работ. Температура точки росы по воде [2] (далее – ТТР<sub>в</sub>) является контролируемым параметром кондиционности газа как для потребителей внутри страны, так и при экспорте. Значение этого параметра (в зависимости от назначения газопроводов) не должно превышать пределов, установленных требованиями ТР ЕАС 046/2018 «О безопасности газа горючего природного, подготовленного к транспортированию и (или) использованию» [3].

Наиболее распространены для измерения ТТР<sub>в</sub> газа в промышленных условиях преобразователи, построенные на сорбционно-емкостном принципе действия. Однако этот тип приборов представлен в России в основном зарубежными компаниями, а отечественных аналогов, доказавших свою состоятельность в условиях длительной эксплуатации, на данный момент нет. Конструктивно преобразователь включает: корпус, электронную плату и чувствительный

<sup>1</sup> ООО «Завод высоковольтных электронных компонентов «Прогресс», Ухта, Россия.

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

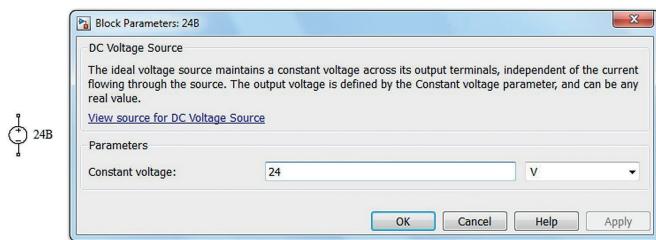


Рис. 1. Источник постоянного напряжения 24 В и его описание

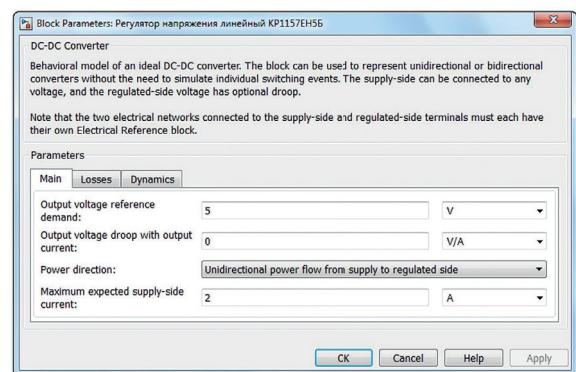


Рис. 2. DC-DC Converter и его описание

элемент, соединенный с электронными компонентами анализатора герметизирующим устройством. Чтобы обеспечить импортозамещение этих приборов, кроме разработки сорбционно-емкостной технологии изготовления чувствительных элементов, крайне важны схемотехника<sup>\*</sup> и алгоритм обработки данных анализаторов. Топология изготовления электронных плат преобразователей точки росы должна быть основана на унифицированных подходах, обеспечивающих простое и надежное техническое решение для серийного выпуска продукции. Один из таких подходов реализуется в преобразователе сигнала постоянного тока, который изменяется при изменении электрических параметров чувствительного элемента.

Разработка электронных принципиальных схем с последующим изготовлением электронных плат преобразователей температуры точки росы невозможна без моделирования процесса преобразования входных электрических величин, получаемых от чувствительного элемента прибора, в выходной сигнал постоянного тока преобразователя.

Цель работы состояла в разработке функциональной модели преобразователя температуры точки росы по воде в природном газе, обеспечивающей измерение TTP<sub>в</sub> в диапазоне от 20 до -60 °С.

Модель должна выполнять следующие функции:

- сбор и обработку данных;
- хранение и распределение данных в запоминающем устройстве электронной платы, формирование градуировочной таблицы;
- определение искомого значения по градуировочной характеристике и последующего

формирования выходного электрического сигнала.

Градуировочная характеристика, хранящаяся в постоянном запоминающем устройстве, представляет собой массив данных, полученных с чувствительного элемента влажности газа, размещенного в потоке газа и изменяющего свои электрические параметры в зависимости от влагосодержания. Этот массив, генерируемый с центрального процессора электронной платы, требуется преобразовать в стандартизованные сигналы приборов, используемых на опасных производственных объектах, включая токовый сигнал 4–20 мА.

## Разработка функциональной модели

Функциональная модель разработана в пакете прикладных программ MathLAB. Для моделирования использован пакет Simulink. Элементы модели взяты из библиотек Simulink и Simscape.

В качестве источника входных сигналов в функциональной модели используются изменяющиеся переменные, такие как электрическая емкость, полученная с чувствительного элемента влажности газа [4, 5], и температура, полученная с термосопротивления для компенсации измерения точки росы по температуре транспортируемой среды.

Напряжение к приборам КИПиА подается от источника постоянного тока номиналом в 24 В, в качестве которого в функциональной модели используется элемент из библиотеки Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Sources (рис. 1). Для питания компонентов электронной платы искомое напряжение понижается до 5 В. Для подобного преобразования в модели применен регулятор напряжения DC-DC Converter из библиотеки Simscape/SimElectronics/Sources (рис. 2).

\* Схемотехника – это проектное решение электроники прибора, его элементов, причинно-следственных связей между ними, разработка программного обеспечения, описывающего работу электроники. Все это невозможно осуществить без математической обработки и моделирования процесса.

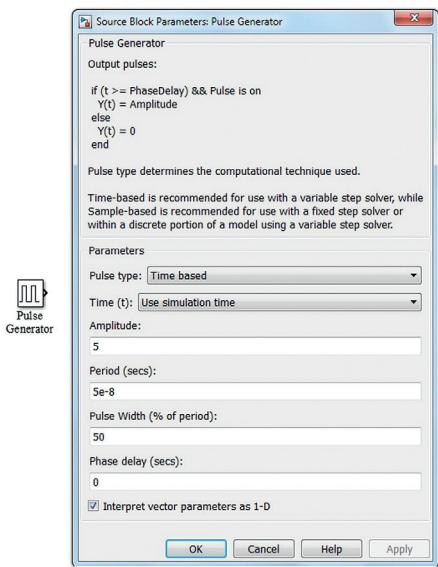


Рис. 3. Генератор прямоугольных импульсов и его описание

Для преобразования входных сигналов с чувствительного элемента в прямоугольные сигналы, поступающие на вход ЦПУ, в модели применяется в качестве генератора частоты Pulse Generator из библиотеки Simulink/Sources (рис. 3).

В модели используются три типа сигналов: Simulink Signal, Physical Signal и Electrical Signal. Для преобразования Physical Signal в Simulink Signal и обратно применяются соответствующие утилиты (рис. 4). Расположены они в разделе Simscape/Utilities.

Для измерения напряжения и тока используются вольтметр и амперметр, которые формируют на выходе Physical Signal (рис. 5). Найти элементы можно в библиотеке Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Sensors.

Для преобразования физического сигнала в электрическое напряжение служит блок PS Sensor из Simscape/SimElectronics/Sensors. Также в модели использованы следующие электрические элементы: резисторы (Resistors), реостат (Variable Resistors), конденсатор (Capacitor). Элементы можно найти: Simscape/Foundation Library/Electrical/Electrical Elements. Если имеются сложные функциональные зависимости от одной

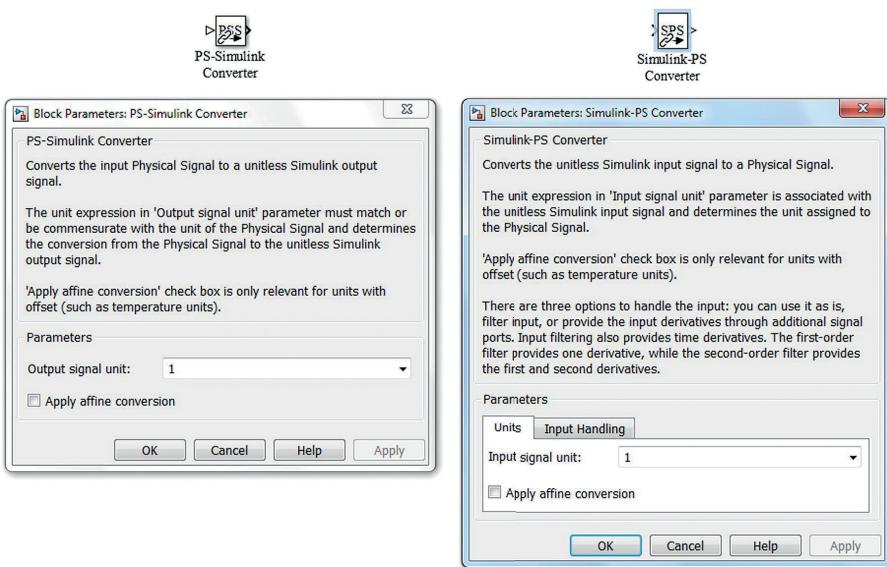


Рис. 4. Утилиты для преобразования сигналов одного типа в другой

переменной, то используются блоки Function (Fcn) из раздела Simulink/User-Defined Function). Подобные блоки применены на разных этапах моделирования, например, для нахождения значений электрических сопротивления или емкости чувствительного элемента.

При условном изменении температуры точки росы (рис. 6) в диапазоне от  $-40,07$  до  $+40,55$   $^{\circ}\text{C}$  изменяются характеристические показатели чувствительного элемента – термосопротивление и емкость. Например, при минимальной температуре термосопротивление ТСП-50П будет равно 42 Ом, при максимальной – 58 Ом. Электрическая емкость чувствительного элемента при этих температурах равна 600 и 1000 пКФ соответственно. Зависимость

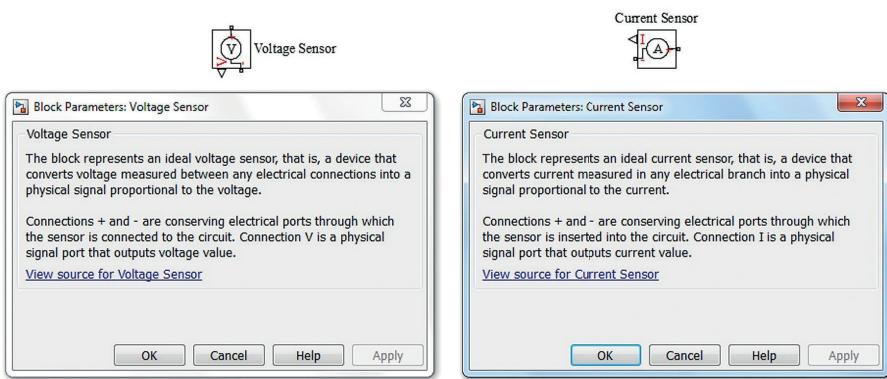


Рис. 5. Вольтметр и амперметр из библиотеки Simscape и их описание

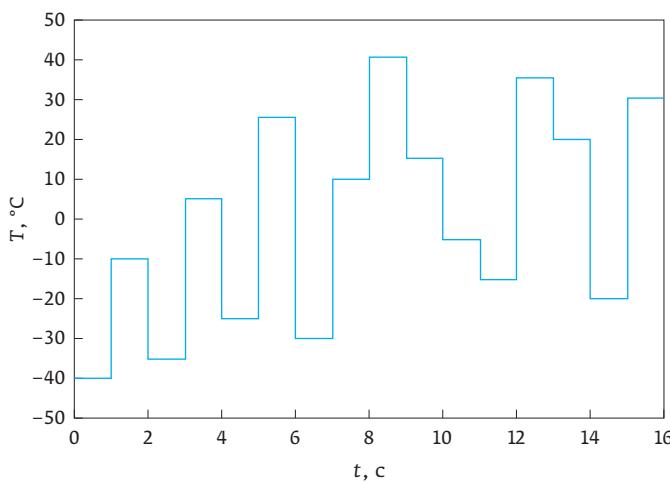


Рис. 6. Условное изменение температуры точки росы

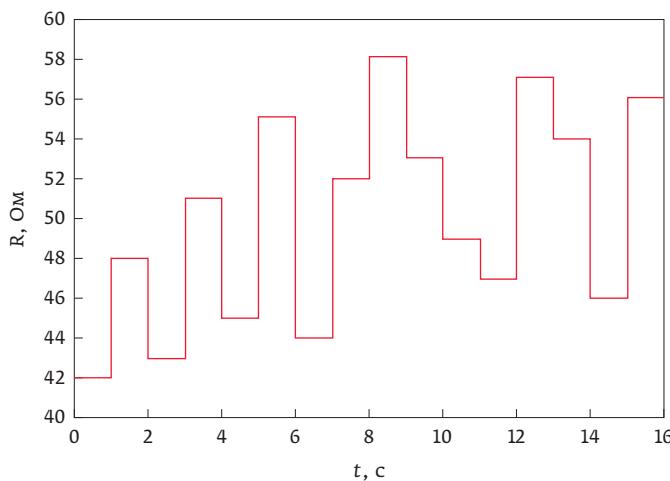


Рис. 7. Условное изменение сопротивления термосопротивления

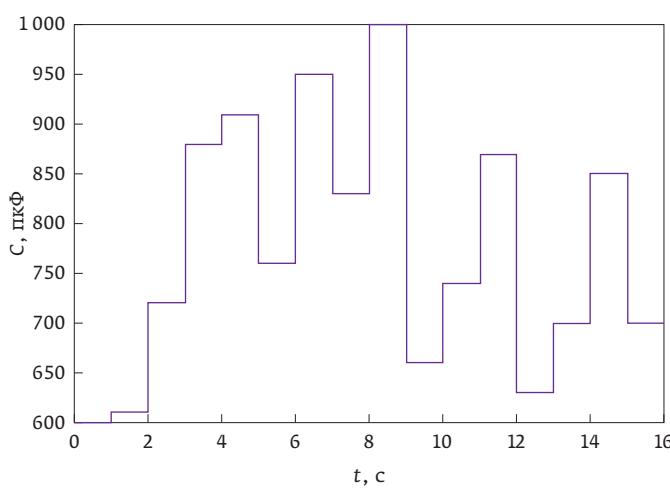


Рис. 8. Условное изменение емкости чувствительного элемента

сопротивления от времени показана на рис. 7, а емкости – на рис. 8.

Полученные значения обрабатываются процессором, им присваивается определенный код, после чего эти сигналы передаются в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), являющееся частью микропроцессора. Здесь, по предварительно занесенной в память базе данных (градуировочной характеристики), определяется кодированное значение, соответствующее текущей температуре точки росы. В модели база данных реализована при помощи блока подсистемы (Subsystem), который можно найти по адресу Simulink/Ports & Subsystems. Основные параметры блока показаны на рис. 9.

Подсистема «База данных» (рис. 10) построена на множестве источников типа Constant (рис. 11), библиотека Simulink/Sources, которые сопоставляют значение влажности газа термосопротивления и емкости чувствительного элемента (помимо

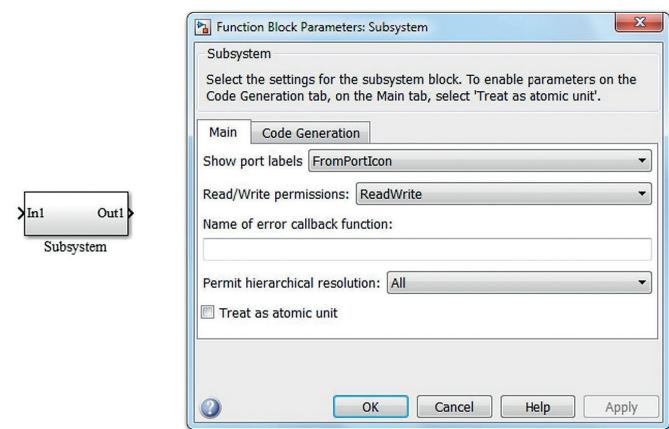


Рис. 9. Блок Subsystem и его описание

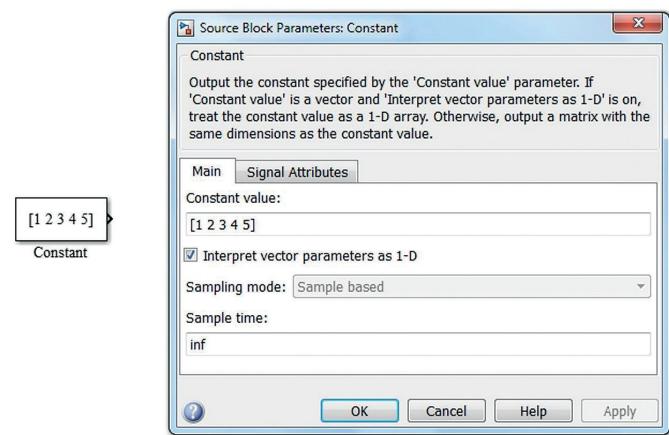


Рис. 10. Блок Constant и его описание

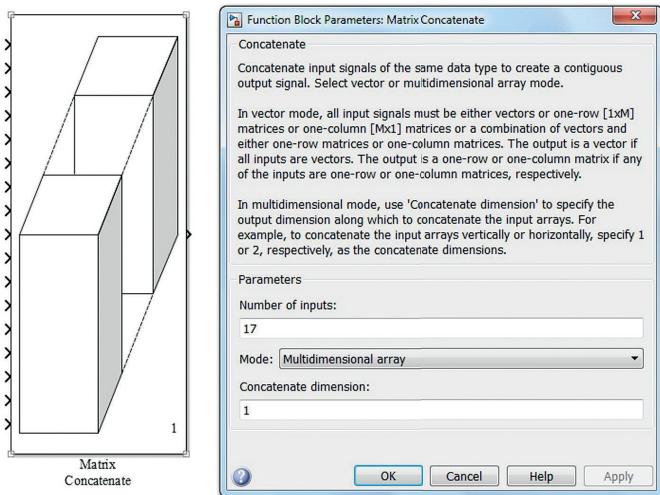


Рис. 11. Блок Matrix Concatenate и его описание

непосредственно константы, блок позволяет задать его как 1D-вектор, для этого значения вводятся через пробел и с двух сторон обрамляются квадратными скобками). Все эти источники сведены в единую матрицу при помощи блока Matrix Concatenate (рис. 12). Блок Matrix Concatenate находится в каталогах Simulink/Math Operation и в DSP System Toolbox/Math Functions/Martices and Linear Algebra/Matrix Operations. Теперь каждому значению сопротивления и емкости соответствует определенное условное значение температуры точки росы.

Выбор единственного верного показания точки росы осуществляется в блоке Direct Lookup Table (n-D) из Simulink/Lookup Tables (рис. 13). Формирование сигнала искомого значения точки росы происходит следующим образом: значение сопротивления задает

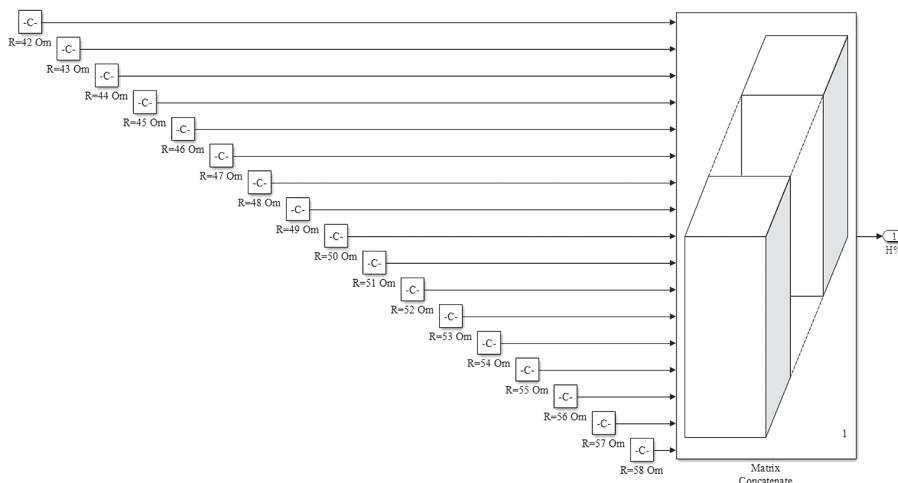


Рис. 12. Условная подсистема базы данных

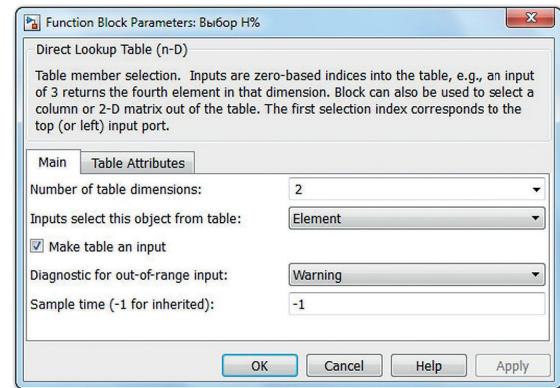


Рис. 13. Блок Direct Lookup Table (n-D) и его описание

номер столбца, значение емкости – номер строки, а выходной сигнал берется из базы данных из ячейки с соответствующими координатами в виде цифрового сигнала.

Полученный цифровой сигнал при помощи фильтра Analog Filter Design (DSP System Toolbox/Filtering/Filter Implementations) преобразуется в аналоговый электрический сигнал, который поступает на вход операционного усилителя. Схема после операционного усилителя образует так называемую токовую петлю. Значение силы тока в цепи коллектора биполярного транзистора должно находиться в пределах от 4 до 20 мА. Для отслеживания максимального, минимального и среднего значений выходного тока организован вывод этих значений на цифровой дисплей (Display), также как и построение графика при помощи виртуального осциллографа (Scope) (обоих можно найти в директории Simulink/Scins). Для подстройки токовой петли служит реостат, значение электрического сопротивления которого задается источником физического сигнала, который на схеме так и назван «Подстройка токовой петли».

Определение предельных значений реализовано следующим способом:

Блоки MinMax (рис. 14) из Simulink/Math Operation имеют два входа, сигналы на которых сравниваются между собой. Для определения максимального или минимального значения переменного сигнала необходимо организовать его задержку

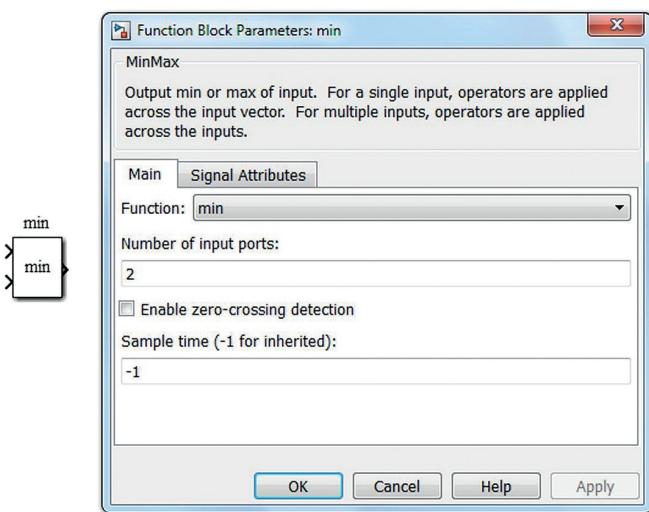


Рис. 14. Блок MinMax и его описание

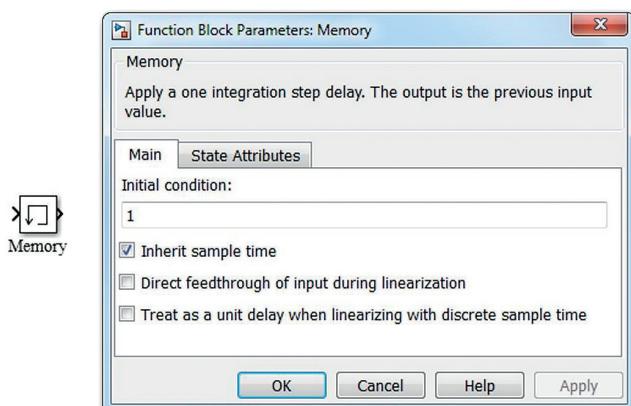


Рис. 15. Блок Memory и его описание

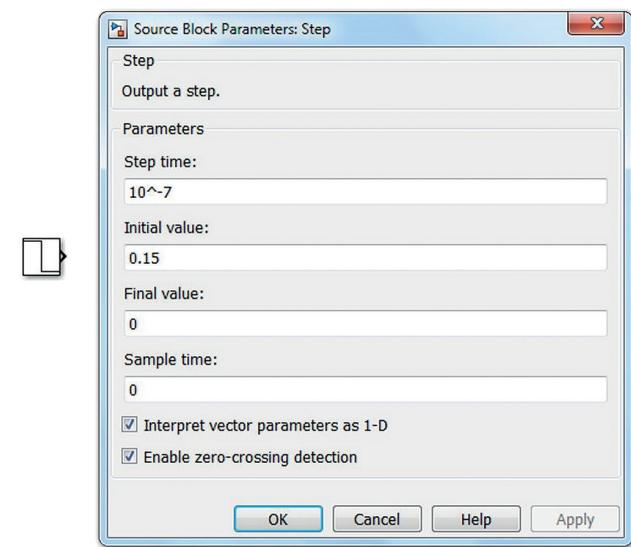


Рис. 16. Блок Step и его описание

во времени на одном из входов. Для этой цели в модели используются блоки Memory из директории Simulink/Discrete (рис. 15). Также, чтобы минимальное значение не было нулевым, принято решение подать на вход блока Memory не нулевой сигнал (для этого были просуммированы сигнал от источника Step (рис. 16) скачкообразного напряжения, который короткий промежуток времени подавал значимое, но не максимальное значение, и сигнал, фактически приходящий).

Для безопасной работы схемы в ней предусмотрено электрическое заземление (Electrical Reference). Наконец, чтобы схема модели, содержащей электронные элементы, была работоспособна, Simulink требуется дополнить схему так называемым решателем (Solver Configuration), раздел SimScape/Utilities (рис. 17), а для работы самого блока понадобится изменение настроек моделирования (Model Configuration Parameters). Итоговые настройки показаны на рис. 18.

Токовая петля на выходе функциональной модели составляет от 4,006 до 20,000 мА. Результаты условного моделирования представлены на рис. 19.

## ВЫВОДЫ

Сформированы блоки функциональной модели для сбора и обработки данных с чувствительного элемента влажности газа.

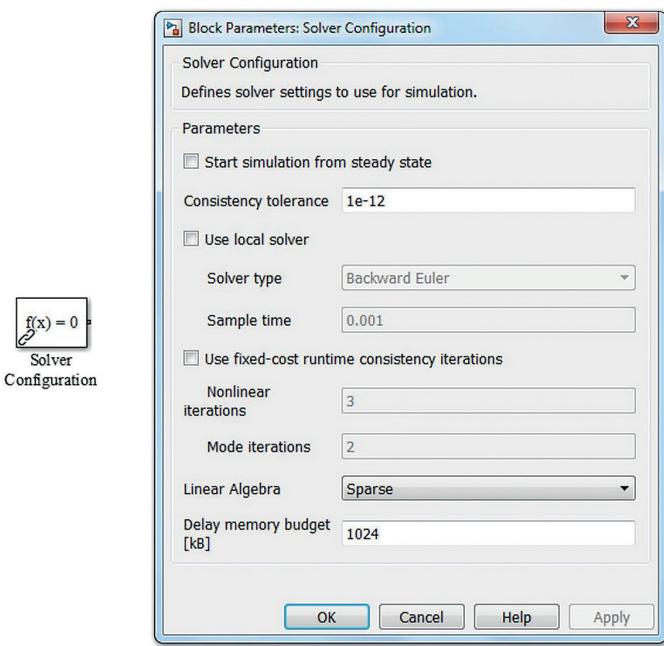


Рис. 17. Блок Solver Configuration и его описание

Определены подсистемы функциональной модели, обеспечивающие хранение и распределение данных в постоянном запоминающем устройстве электронной платы с формированием массива данных (входных величин чувствительного элемента) в градирновочной таблице.

Установлено, что реализованная функциональная модель преобразует искомые значения электрической емкости чувствительного элемента и температуры транспортируемой среды в выходной электрический сигнал постоянного тока 4-20 мА, что делает ее применимой для решения задач газовой гигрометрии.

Для подтверждения работоспособности функциональной модели необходимо разработать принципиальную электрическую схему, реализованную на отечественной элементной базе, изготовить

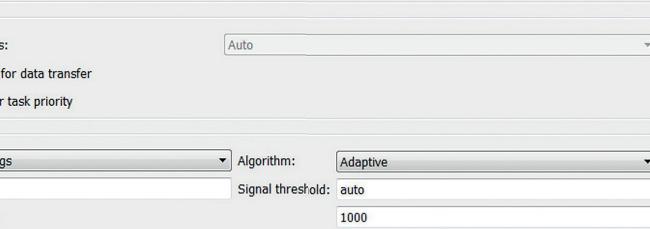


Рис. 18. Параметры моделирования

электронную плату для проведения испытаний в конструкции преобразователя температуры точки росы в рамках мероприятий по утверждению типа средств измерений.

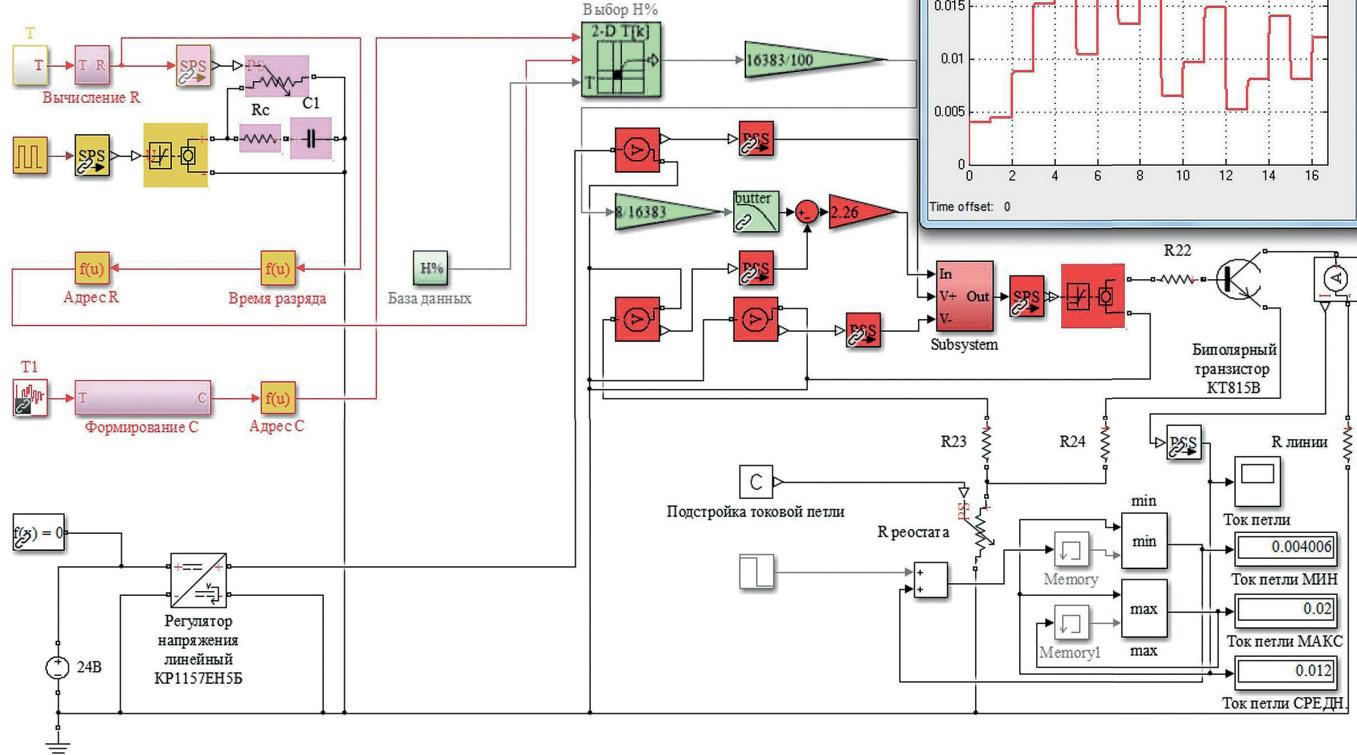


Рис. 19. Функциональная модель работы электронной платы преобразователя температуры точки росы



# РОССИЙСКИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ САММИТ

02-04 ОКТЯБРЯ 2024

МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО



## ОРГАНИЗАТОРЫ



**12 000+**

уникальных участников



**30+**

стран присутствия



**16 000+**

кв. м выставки



**230+**

компаний-участников



**23**

зала



**200+**

научных мероприятий

НА ПРАВАХ РЕКЛАМЫ

[www.rds summit.ru](http://www.rds summit.ru)

## Литература

- ГОСТ 20060-2021: Газ природный. Определение температуры точки росы [Электронный ресурс]. URL: [https://rosgosts.ru/file/gost/75/060/gost\\_20060-2021.pdf](https://rosgosts.ru/file/gost/75/060/gost_20060-2021.pdf) (дата обращения: 29.03.2024).
- Росстат: Россия в цифрах, 2019 год. [Электронный ресурс]. URL: <https://nangs.org/analytics/rossstat-rossiya-v-tsifrakh> (дата обращения: 29.03.2024).
- Узяков Р. Н., Чирков Ю. А., Кушнаренко В. М., Пояркова Е. В. Влияние непрогнозируемых факторов на коррозионные повреждения трубопроводов и оборудования. Нефтегазовое дело. 2019;6:87–100.
- Михин С. О., Копчиков А. Е., Агиней Р. В. Экспериментальное исследование влияния порообразователя на характеристики керамики, применяемой в конструкции сенсоров влажности. Датчики и системы. 2020;6:38–44.
- Михин С. О., Копчиков А. Е., Агиней Р. В. Исследование свойств сорбционно-емкостных сенсоров влажности газа на основе пористой керамики. Датчики и системы. 2020;9:46–52.

## References

- GOST 20060-2021: Natural gas. Determination of the dew point temperature [Electronic resource]. URL: [https://rosgosts.ru/file/gost/75/060/gost\\_20060-2021.pdf](https://rosgosts.ru/file/gost/75/060/gost_20060-2021.pdf) (date of application: 03.29.2024).
- Rosstat: Russia in numbers, 2019. [Electronic resource]. URL: <https://nangs.org/analytics/rossstat-rossiya-v-tsifrakh> (date of reference: 03.29.2024).
- Uzyakov R. N., Chirkov Yu. A., Kushnarenko V. M., Poyarkova E. V. The influence of unpredictable factors on corrosion damage to pipelines and equipment. Oil and gas business. 2019;6:87–100.
- Mikhin S. O., Korchikov A. E., Aginey R. V. Experimental study of the effect of a poroobrazovator on the characteristics of ceramics used in the design of humidity sensors. Sensors and systems. 2020;6:38–44.
- Mikhin S. O., Korchikov A. E., Aginey R. V. Investigation of the properties of sorption-capacitive gas humidity sensors based on porous ceramics. Sensors and systems. 2020. 9:46–52.

## Авторы / Authors

Михин Сергей Олегович, руководитель отдела перспективных разработок ООО «Завод высоковольтных электронных компонентов «Прогресс», Ухта, Россия.

Область научных интересов: приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Mikhin Sergey Olegovich, Head of the Advanced Development Department of Progress High-Voltage Electronic Components Plant LLC, Ukhta, Russia.

Research interests: Devices and methods for monitoring the natural environment, substances, materials and products. priborostroenie@zvekprogress.ru  
ORCID 0009-0008-6518-277X

Кошкур Олег Николаевич, генеральный директор ООО «Завод высоковольтных электронных компонентов «Прогресс», Ухта. Область научных интересов: приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Конденсаторостроение и полупроводниковая промышленность. Oleg Nikolaevich Koshkur, General Director of Progress High-Voltage Electronic Components Plant LLC, Ukhta, Russia. Research interests: Devices and methods for monitoring the natural environment, substances, materials and products. Capacitor engineering and semiconductor industry. zvekpost@mail.ru  
ORCID 0009-0006-6583-5043

Ганжа Владимир Александрович, д. т. н., профессор кафедры «Топливообеспечение и горюче-смазочные материалы», Сибирский федеральный университет, Красноярск, РФ. Область научных интересов: приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Ganzha Vladimir Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Fuel Supply and Fuel and Lubricants, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Research interests: Devices and methods for monitoring the natural environment, substances, materials and products. vladimirganzha@yandex.ru  
ORCID 0000-0002-0647-8502

## Конфликт интересов / Conflict of Interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 04.05.2024  
Принята к публикации 20.05.2024



ТЕЛЕГРАММ КАНАЛ  
НАУЧНОГО ИЗДАТЕЛЬСТВА  
ТЕХНОСФЕРА:



- Онлайн репортажи с крупнейших выставок отрасли
- Анонсы мероприятий с участием технических экспертов отрасли
- Скидки на журналы издательства до 25%
- Конкурсы и розыгрыши от ведущих компаний
- Книжные новинки и презентации новых выпусков журналов

Подписывайтесь и оставайтесь в курсе главных событий научно-технической сферы





## 26-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ОБОРУДОВАНИЯ, СЫРЬЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

26<sup>TH</sup> INTERNATIONAL EXHIBITION OF EQUIPMENT, RAW MATERIALS  
AND TECHNOLOGIES FOR PHARMACEUTICAL PRODUCTION

19–22.11.2024

МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО  
CROCUS EXPO, MOSCOW, RUSSIA

ЗАБРОНИРУЙТЕ  
СТЕНД

BOOK YOUR STAND



[PHARMTECH-EXPO.RU](http://PHARMTECH-EXPO.RU)

+7 495 799 55 85  
pharmtech@ite.group

**ITE**  
Организатор  
Organiser

