

Применение технологии цифрового двойника в информационно-измерительных системах

В. А. Баронова[✉], Н. В. Романцова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] vasilisabaron@gmail.com

Аннотация

Введение. Статья посвящена созданию автоматизированной системы сбора данных узла учета тепловой энергии теплосети и разработке цифровой модели данной системы. Цифровые двойники широко используются в энергетике для оптимизации работы теплоэлектроцентралей (ТЭЦ): своевременного технического ремонта, прогнозирования различных аварийных сценариев, планирования производства тепловой энергии. Приводятся примеры рассматриваемых автоматизируемых систем, внедренные в производство. Актуальность работы заключается в возможности прогнозирования размеров дефектов трубопровода на основании измерительных данных и данных цифрового двойника.

Цель работы. Разработка распределенной информационно-измерительной системы контроля теплоснабжения с внедрением цифрового двойника.

Материалы и методы. Данные о теплоносителе: температура, давление и расход моделируются по нормальному закону распределения согласно тепловому графику ТЭЦ. Представлено математическое и алгоритмическое обеспечение для прогнозирования состояния технологического оборудования на основе данных о теплоносителе. Прогнозируется глубина каверны, возникающая в трубопроводе. В качестве критерия предельного состояния используется условие прочности. Для определения предельного действующего напряжения в стенке трубы используются ОСТ 153-39.4-010–2002 и формула Барлоу.

Результаты. Были разработаны цифровой двойник системы контроля теплоснабжения; структура распределенной информационно-измерительной системы для узла контроля теплоснабжения; алгоритмическое и программное обеспечение для работы распределенной информационной системы; алгоритмическое и программное обеспечение для прогнозирования состояния трубопровода; проведена проверка работоспособности программного обеспечения в нормальном режиме работы и в режиме невозможности установления связи с сервером.

Заключение. Применение технологии цифрового двойника в системе контроля теплоснабжения позволяет оптимизировать тепловой график объекта путем моделирования оптимальных значений теплоносителя, исходя из параметров окружающей среды, с погрешностью моделирования температуры воды в подающем трубопроводе $\Delta t = \pm 5^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды от -8 до $+3^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: цифровой двойник, узел учета теплоснабжения, распределенная измерительная система, моделирование данных, прогноз язвенной коррозии трубопровода

Для цитирования: Баронова В. А., Романцова Н. В. Применение технологии цифрового двойника в информационно-измерительных системах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 107–116.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-107-116

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20064, <https://rscf.ru/project/24-29-20064/>, а также гранта Санкт-Петербургского научного фонда (договор № 24-29-20064 от 22.05.2024).

Статья поступила в редакцию 10.07.2024; принята к публикации после рецензирования 19.03.2025; опубликована онлайн 30.04.2025



Application of Digital Twin Technology in Information and Measurement Systems

Vasilisa A. Baronova ✉, Natalia V. Romantsova

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ vasilisabaron@gmail.com

Abstract

Introduction. The article addresses the problem of creating an automated system for data collection from heat metering units, as well as a digital twin of such a system. Digital twins are widely used in the energy sector to optimize the operation of thermal power plants, including their timely maintenance, forecasting various emergency scenarios, or planning thermal energy production. Practical examples of such systems are presented. The relevance of this work lies in the possibility of predicting the size of pipeline defects based on both measurement and digital twin data.

Aim. Development of a distributed information and measurement system for heat supply monitoring with the introduction of a digital twin.

Materials and methods. The parameters of the heat-carrying agent, such as temperature, pressure, and flow, were simulated according to the normal distribution law and the thermal schedule of power plants. This information was further used to develop a mathematical and algorithmic support for predicting the state of technological equipment. The depth of a cavity defect which may occur in the pipeline was predicted. The strength condition was used as a criterion for the failure limit state. To determine the ultimate strength of the pipe wall, OST 153-39.4-010-2002 and the Barlow formula were used.

Results. The obtained results include a digital twin of the heat supply control system, the structure of a distributed information and measurement system for the unit of heat supply monitoring, algorithmic and software systems for the operation of the distributed information and measurement system and for predicting the failure state of the pipeline. The software operability was verified in normal operation and in the absence of access to the server.

Conclusion. The use of digital twin technology in heat supply monitoring makes it possible to optimize the thermal graph of the object by simulating the optimal values of the heat-carrying agent based on environmental parameters with an error in modeling the water temperature in the supply pipeline of $\Delta t = \pm 5^\circ\text{C}$ at ambient temperatures from -8 to $+3^\circ\text{C}$.

Keywords: digital twin, heat metering unit, distributed information and measurement system, data simulation, forecast of internal corrosion of the pipeline

For citation: Baronova V. A., Romantsova N. V. Application of Digital Twin Technology in Information and Measurement Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 107–116.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-107-116

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 24-29-20064, <https://rscf.ru/project/24-29-20064/>, and a grant from the St Petersburg Science Foundation (agreement № 24-29-20064 dated 05/22/2024).

Submitted 10.07.2024; accepted 19.03.2025; published online 30.04.2025

Введение. В настоящее время во многих отраслях промышленности компании ведут учет данных о производительности оборудования. Использование цифровых двойников может позволить компаниям быстрее решать физические проблемы, обнаруживать их с гораздо большей степенью точности, проектировать и создавать более качественные продукты. В области тепловой энергетики [1] цифровой двойник поможет оптимизировать работу тепло-

электроцентралей, предотвращать сбои в подаче тепловой энергии и рационально подходить к ее потреблению.

Использование автоматизированных систем сбора данных позволяет решать следующие производственные задачи в теплоэнергетике:

- измерение мгновенных и усредненных значений параметров контролируемых объектов;
- контроль использования теплоресурсов;
- сокращение времени сбора и обработки

измерительных данных;

- ведение архива измерительных данных;
- поддержка управляющих решений;
- обеспечение безаварийного режима работы объекта;
- формирование отчетов коммерческого учета тепла на основе архивных данных.

Автоматизированные системы контроля в области теплоэнергетики успешно разрабатываются и реализуются.

Автоматизированная система учета тепловой энергии на Новосибирской ТЭЦ-4 осуществляет отображение текущих параметров теплоносителя, архивирование данных, контроль аварийных изменений параметров и их сигнализацию, формирование отчетных документов.

Автоматизированная система коммерческого и технического учета энергоресурсов Чебоксарской ТЭЦ-2 выполняет измерение, сбор и визуализацию параметров теплоносителя, ведение архивов данных и формирование отчетов, сигнализирование об отклонении параметров теплоносителя от заданных, передачу данных в центр сбора технологической информации.

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) ТЭЦ "Белый Ручей" поселка Депо выполняет визуализацию параметров технологического процесса, мониторинг температурных и гидравлических данных, хранение и архивирование данных, автоматическое управление и регулирование технологических процессов [2].

Описанные автоматизированные системы выполняют контроль и учет параметров теплоносителя. Однако такие системы не позволяют прогнозировать состояние контролируемого объекта и оценивать остаточный ресурс. Разработанная система дает возможность рассчитывать параметры прогнозируемого дефекта трубопровода и вырабатывать управляющее решение в зависимости от полученных значений.

Цифровой двойник системы контроля теплоснабжения. Цифровой двойник – это виртуальная модель физического объекта, предназначенная для моделирования его поведения [3–6]. Разработанный цифровой двойник моделирует работу узла учета тепловой энергии. На рис. 1 представлено условное изображение исследуемого объекта.



Рис. 1. Исследуемый объект

Fig. 1. Study subject

Для учета теплоэнергии и контроля качества подачи теплоснабжения измеряют следующие параметры: t_1 – температура теплоносителя в подающем трубопроводе; p_1 – давление теплоносителя в подающем трубопроводе; R_1 – расход теплоносителя в подающем трубопроводе; t_2 – температура теплоносителя в обратном трубопроводе; p_2 – давление теплоносителя в обратном трубопроводе; R_2 – расход теплоносителя в обратном трубопроводе; t_3 – температура воздуха в колодце обратного трубопровода; F_3 – влажность воздуха в колодце обратного трубопровода.

В качестве моделируемого объекта будем рассматривать ТЭЦ-15 ПАО "ТГК-1". Зона теплоснабжения ТЭЦ-15 распространяется на Кировский, Адмиралтейский и Центральный районы Санкт-Петербурга. Теплофикационная установка ТЭЦ-15 предназначена для снабжения потребителей теплом и горячей водой по открытой схеме с непосредственным водоразбором от старой очереди и блочной части ТЭЦ. Нагрев сетевой и подпиточной воды осуществляется в бойлерах до 110 °С и при необходимости, в зависимости от температуры наружного воздуха, в водогрейных котлах до максимальной температуры 130 °С [7].

На рис. 2 представлен температурный график ТЭЦ-15 ТМ "Автовская" на отопительный сезон 2018/19 г. [8].

Температура теплоносителя в прямом трубопроводе зависит от температуры наружного воздуха. При понижении температуры окружающей среды температуру теплоносителя увеличивают для обеспечения соблюдения норм СанПиН.

Данные о теплоносителе являются случайными величинами и моделируются по следую-

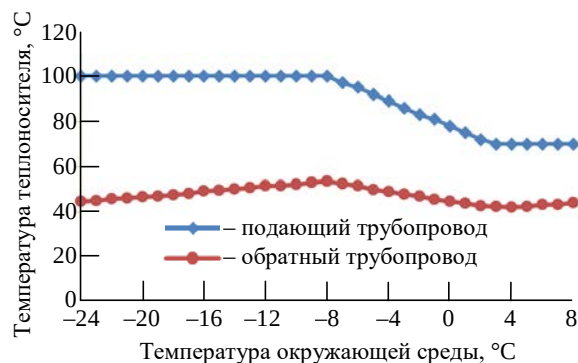


Рис. 2. Температурный график тепломатриалы "Автотская"

Fig. 2. Heating curve of the Avtovo heating system

щему принципу: значение температуры теплоносителя моделируется согласно температурному графику ТЭЦ в зависимости от температуры окружающей среды, значение которой считывается с онлайн-сервиса прогноза погоды. Несоответствие прогноза погоды реальным значениям температуры окружающей среды будет приводить к погрешности моделирования температуры воды в подающем трубопроводе $\Delta t = \pm 5^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды от -8 до $+3^\circ\text{C}$. В остальной части диапазона устанавливается постоянное значение температуры воды в подающем трубопроводе, и погрешность измерения температуры окружающей среды не влияет на моделируемое значение. Особенности расчета погрешности приведены в [9].

Значения давления и расхода теплоносителя моделируются как нормально распределенные величины с математическим ожиданием параметра, характерным для ТЭЦ-15.

Для моделирования нормально распределенной случайной величины используется метод Бокса–Мюллера, который позволяет получить два независимых значения x_1 и x_2 нормальной случайной величины из двух независимых значений z_1 и z_2 равномерной случайной величины для подающего и обратного трубопроводов:

$$\begin{cases} x_1 = \sqrt{-2 \ln(z_1)} \sin(2\pi z_2); \\ x_2 = \sqrt{-2 \ln(z_1)} \cos(2\pi z_2). \end{cases}$$

К полученным значениям добавляется аддитивная и случайная составляющие погрешности. Случайная составляющая погрешности моделировалась выборочно по следующим законам распределения: равномерный, Гаусса, Симпсона.

Интеграция технологии цифрового двойника в распределенную систему контроля теплоснабжения. Разработанный цифровой двойник системы внедряется в распределенную информационно-измерительную систему контроля теплоснабжения. Структура данной измерительной системы представлена на рис. 3.

Нижний уровень системы представлен датчиками температуры, давления и расхода для прямой и обратной ветвей трубопровода. Датчики подключаются к устройству сбора данных (программируемый логический контроллер – ПЛК), которое представляет собой промышленный контроллер с поддержкой протокола Modbus. На верхнем уровне системы осуществляется обработка и управление измерительными данными.

На основе полученных измерительных данных осуществляется прогнозирование технологического состояния оборудования. При обрыве связи с сервером измерительные данные моделируются цифровым двойником.

На рис. 4 представлен граф состояний, описывающий работу системы.

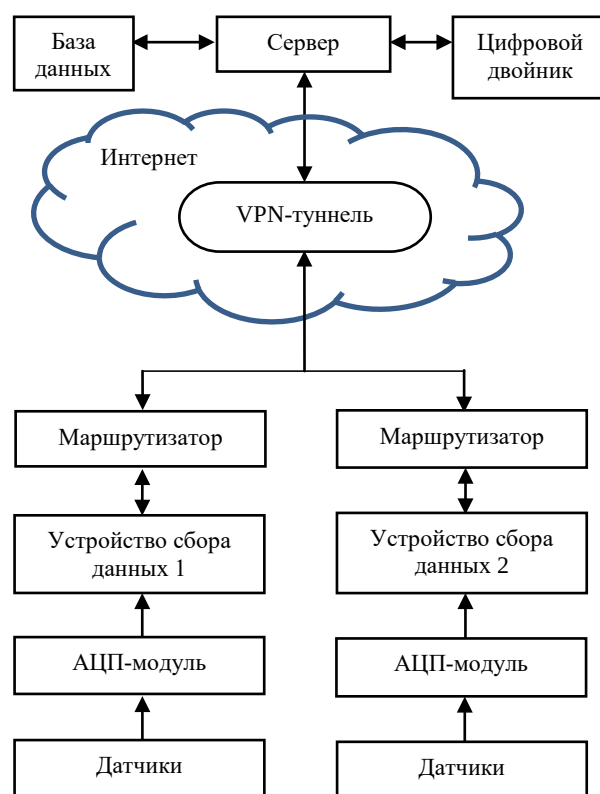


Рис. 3. Структура распределенной измерительной системы контроля теплоснабжения

Fig. 3. Structure of a distributed measuring system for heat supply monitoring



Рис. 4. Граф состояний работы системы

Fig. 4. Graph of system operation states

Большую часть времени система находится в ожидании времени начала измерения. Измерения происходят каждые 20 мин: 0, 20, 40 мин каждого часа. Такая периодичность определяется особенностью измерения значений расхода R_1 , R_2 теплоносителя, которые являются усредненными оценками за выбранное время. Полученные значения записываются в память программируемого логического контроллера. Если ТСР-соединение устанавливается, то данные считываются из памяти ПЛК. Если возникает ошибка установления ТСР-соединения, то измерительные данные моделируются. На основании полученных данных осуществляется прогнозирование состояния трубопровода. Все полученные значения записываются в базу данных. Затем система возвращается в состояние ожидания.

Для записи измеренных значений в память контроллера была разработана программа на языках МЭК: SFC, ST, IL. Используемый ПЛК фирмы WAGO имеет энергонезависимую память объемом 24 Кбайт и следующий диапазон адресов, доступных для записи: %MW0...%MW12287. Для идентификации измерений необходимо записывать следующие данные: дата и время измерения, номер измерительного канала, измеренное значение. Для записи одного кортежа из восьми измеряемых параметров требуется 42 байт. Для хранения записей с результатами измерения за сутки необходимо 2.9 Кбайт. Следовательно, архив будет содержать записи измеренных значений для восьми полных дней. Запись в память осуществляется сдвигом указателя на текущую ячейку памяти на двойное слово. Для этого создается указатель-итератор

сдвига, который после каждой записи сравнивается с его максимальным значением. При превышении максимально установленного значения итератора 12095 ему присваивается значение 1, что указывает на адрес %MW0. Также программа предусматривает измерение мгновенных параметров и их усреднение за время между основными измерениями.

Прогнозирование состояния трубопровода. На трубопроводы, расположенные под землей, действует внешняя коррозия, обусловленная составом почвы, ее температурой и влажностью. Также действует внутренняя коррозия, скорость которой зависит от характеристик транспортируемого продукта.

Монтаж тепломагистрали в непроходном канале и наличие тепловой изоляции препятствуют образованию внешней коррозии трубопровода. В дальнейшем будем учитывать влияние внутренней коррозии на состояние труб [10].

Металлы подвергаются следующим видам коррозии:

- 1) равномерная, которая характеризуется небольшой глубиной и охватывает всю площадь поверхности металла;
- 2) пятнами, которая характеризуется небольшой глубиной и большой площадью локализации на отдельных частях поверхности металла;
- 3) язвенная, характеризуемая относительно большой глубиной проникновения в материал, диаметр язвы сопоставим с глубиной;
- 4) точечная, характеризуемая небольшой площадью относительно глубины проникновения в материал.

Наибольшую опасность для трубопровода представляют язвенная и точечная коррозия, поскольку они имеют большую скорость проникновения в материал относительно других видов, что может привести к образованию сквозных отверстий и, как следствие, к возникновению аварийной ситуации.

Для трубопроводов, подверженных коррозии, критерием предельного состояния будет являться условие прочности согласно [11]:

$$[\sigma] \geq \sigma_d, \quad (1)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение, взятое из ГОСТ 14249–89; σ_d – действующее напряжение в стенке сосуда.

Действующее напряжение в стенке трубы от рабочего давления определяется по формуле Барлоу [12]:

$$\sigma_d = \frac{pD}{2S}, \quad (2)$$

где p – давление в трубе; D – диаметр трубы; S – толщина стенки трубы.

В данной статье рассматривается влияние одиночной язвы. В вершине дефекта возникает локальное перенапряжение при наличии рабочего давления в стенке трубы, тогда неравенство (1) будет выглядеть следующим образом:

$$[\sigma] \geq \alpha_\sigma \sigma_{\text{нетто}}, \quad (3)$$

где α_σ – коэффициент концентрации напряжений; $\sigma_{\text{нетто}}$ – напряжение в сечении, где находится язва, определяется согласно (2).

Для одиночных язв выражение для коэффициента концентрации имеет вид, представленный в [13]. При расчетах принимаем, что язва имеет сферическую форму, тогда коэффициент концентрации напряжений можно выразить следующим образом:

$$\alpha_\sigma = 1 + 3.57 \cdot 0.5 \left[\frac{1.12 - 0.9 \cdot 0.5}{1 - a/S(1 - 1.5 \cdot 0.5)} \right],$$

где a – глубина каверны.

Глубина дефекта a пропорциональна скорости коррозии (v_k). Скорость язвенной коррозии зависит от температуры t_1 , давления p_1 и расхода R_1 теплоносителя. Скорость коррозии за время между измерениями рассчитывается согласно [14]. Для расчета глубины язвы a_0 , образовавшейся ко времени проведения первого измерения τ_0 , принимаем среднюю скорость язвенной коррозии 0.18 мм/г при учете круглосуточной работы теплосетей со среднегодовой температурой теплоносителя 60 °С [14] и среднем pH ≈ 8.7 [15]. После проведенных расчетов на основании неравенства (3) делается вывод о выработке управляющего решения.

На рис. 5 представлен алгоритм для расчета глубины образовавшегося дефекта и выработки управляющего решения.

Результаты. В ходе работы были получены следующие результаты:

1) разработан цифровой двойник системы контроля теплоснабжения;

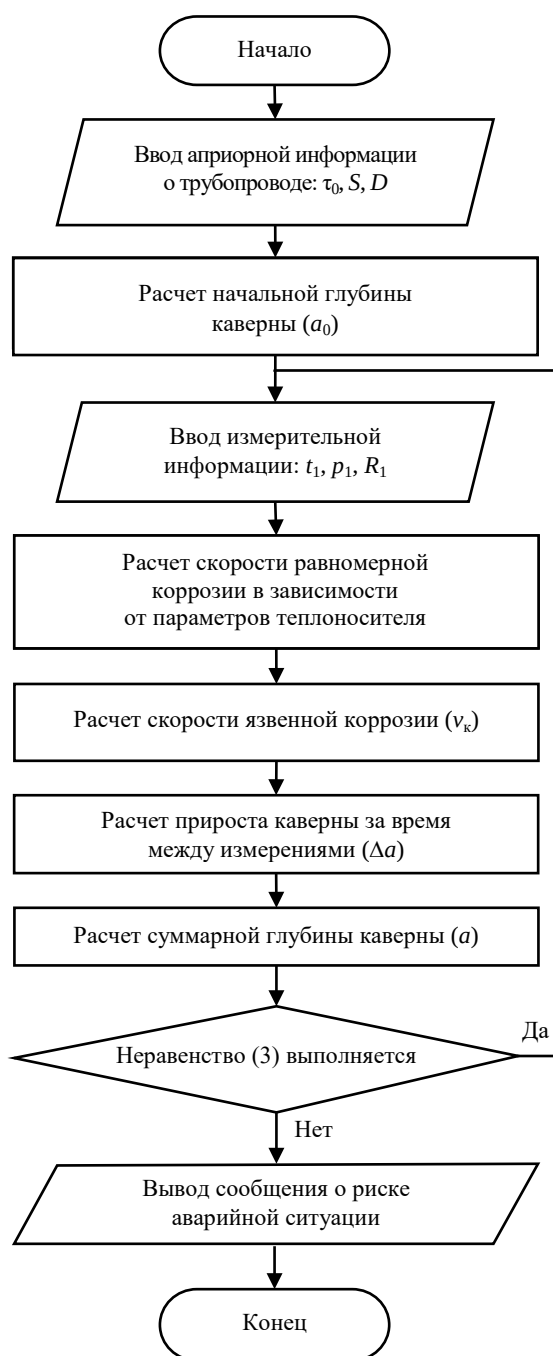


Рис. 5. Алгоритм расчета глубины язвенной коррозии
Fig. 5. Algorithm for calculating the depth of pitting corrosion

2) разработана структура распределенной информационно-измерительной системы для узла контроля теплоснабжения;

3) разработано алгоритмическое и программное обеспечение для работы распределенной информационной системы;

4) разработано алгоритмическое и программное обеспечение для прогнозирования состояния трубопровода;

id	GUID	TimeStamp	DeviceType	DeviceSpetif	MeasureVal1	MeasureVal1	MeasureVal1	Error
34	6553565534	22-04-2024T17:10:10	T11	ТПУ 205	°C		40	0,2 no
35	6553565534	22-04-2024T17:10:10	T21	ТПУ 205	°C		40	0,2 no
36	6553565534	22-04-2024T17:10:10	P11	ПДТВХ-1-02	МПа		0	0 no
37	6553565534	22-04-2024T17:10:10	P21	ПДТВХ-1-02	МПа		0	0 no
38	6553565534	22-04-2024T17:10:10	R11	Акрон-01	м3/час		0	0 no
39	6553565534	22-04-2024T17:10:10	R21	Акрон-01	м3/час		0	0 no
40	6553565534	22-04-2024T17:10:10	T31	ИБТМ-7 Н темп	°C		20	1 no
41	6553565534	22-04-2024T17:10:10	F31	ИБТМ-7 Н влаж	%		20	1 no
42	6553565534	22-04-2024T17:20:10	T11	ТПУ 205	°C		71	0,4 Error
43	6553565534	22-04-2024T17:20:10	T21	ТПУ 205	°C		45,3	0,23 Error
44	6553565534	22-04-2024T17:20:10	P11	ПДТВХ-1-02	МПа		1,01	0 Error
45	6553565534	22-04-2024T17:20:10	P21	ПДТВХ-1-02	МПа		0,25	0 Error
46	6553565534	22-04-2024T17:20:10	R11	Акрон-01	м3/час		3482,51	0,04 Error
47	6553565534	22-04-2024T17:20:10	R21	Акрон-01	м3/час		3397,41	0,04 Error
48	6553565534	22-04-2024T17:20:10	T31	ИБТМ-7 Н темп	°C		12	1 Error
49	6553565534	22-04-2024T17:20:10	F31	ИБТМ-7 Н влаж	%		64	1 Error

Рис. 6. Запись измерительных данных в базу

Fig. 6. Recording of measurement data in the database

id	GUID	TimeStamp	Corrosion fo	Corrosion depth
1	6553565534	22-04-2024T16:30:10	0,000001	1,260002
2	6553565534	22-04-2024T16:40:10	0,000001	1,260002
3	6553565534	22-04-2024T16:50:10	0,000006	1,260002
4	6553565534	22-04-2024T17:00:10	0,000006	1,260015
5	6553565534	22-04-2024T17:10:10	0,000001	1,260015
6	6553565534	22-04-2024T17:20:10	0,000006	1,260023

Рис. 7. Запись прогнозируемых данных в базу

Fig. 7. Recording of predicted data in the database

5) проведена апробация разработанного программного обеспечения в условиях обрыва линии связи.

На рис. 6 и 7 представлены таблицы из базы данных с записью измеренных параметров.

В базу записываются следующие данные об измерении: id, id измерительной системы, время измерения, тип измерительного прибора, спецификация прибора, единица измерения, измеряемая величина, погрешность измерения, состояние канала измерения.

Графа Error показывает состояние канала в момент записи значений. Запись Error обозначает повреждение канала связи, следовательно, измерительные данные в строках 42–49 были смоделированы цифровым двойником системы.

В таблицу прогнозирования состояния трубопровода записываются следующие данные: id, id измерительной системы, время измерения, прогноз прироста коррозии, прогноз общей глубины коррозии.

Оценку погрешности прогнозируемой величины каверны будем производить на основе средней скорости язвенной коррозии 0.18 мм/г и средней температуры теплоносителя 60 °C. Рассчитаем и примем за действительное значение прироста каверны за 10 мин, равное $7 \cdot 10^{-6}$ мм. Из данных,

приведенных на рис. 7 в строке 6 (соответствует измерительным данным в строках 42–49 на рис. 6), видно, что расчетное значение, полученное на основе смоделированных данных при температуре теплоносителя 71 °C, составляет $6 \cdot 10^{-6}$ мм.

Исходя из того, что погрешность несоответствия прогноза погоды реальным значениям температуры окружающей среды приводит к погрешности моделирования температуры воды в подающем трубопроводе $\Delta t = \pm 5$ °C, можно рассчитать приrost коррозии в соответствии с измерительными данными в строках 42–49 на рис. 6. Рассмотрим максимальное и минимальное значения погрешности прогнозирования каверны на основе данных цифрового двойника. Прогнозируемый приrost каверны составляет: при 70 °C – $6.4 \cdot 10^{-6}$ мм; при 75 °C – $6.8 \cdot 10^{-6}$ мм; при 95 °C – $8.7 \cdot 10^{-6}$ мм; при 100 °C – $9.3 \cdot 10^{-6}$ мм. Таким образом, минимальная погрешность прогнозирования прироста каверны при использовании данных цифрового двойника будет составлять $\Delta a = \pm 0.4 \cdot 10^{-6}$ мм, а максимальная погрешность будет составлять $\Delta a = \pm 0.6 \cdot 10^{-6}$ мм.

При прогнозировании коррозионного износа рекомендуется применять модель, которая прогнозирует большую глубину дефекта. Из полученных значений и их малых расхождений можно сделать вывод, что модель адекватно описывает прогнозируемый приrost каверны как при использовании измерительных данных, так и при использовании цифрового двойника.

Заключение. Применение технологии цифрового двойника в системе контроля теплоснабжения позволяет оптимизировать теп-

ловой график объекта путем моделирования оптимальных значений теплоносителя, исходя из параметров окружающей среды, с погрешностью моделирования температуры воды в подающем трубопроводе $\Delta t = \pm 5^\circ\text{C}$ при температуре окружающей среды от -8 до $+3^\circ\text{C}$. В остальной части диапазона температур окружающей среды неточность определения воздуха не влияет на моделируемое значение теплоносителя.

Разработанный алгоритм прогнозирования технологического состояния оборудования помогает вырабатывать управляющее решение о ремонте трубопровода для предупреждения аварийных ситуаций, таких как прорыв трубопровода. Расчет размеров дефекта выполнен на основе априорной информации о трубопроводе: количестве лет в эксплуатации, диаметре и толщине стенки трубы и параметрах теплоносителя: температуре, давлении, расходе и его pH.

Список литературы

1. Информационно-измерительная система узла контроля магистрального теплопровода / В. В. Алексеев, В. С. Коновалова, Н. В. Романцова, А. В. Царёва // Мягкие измерения и вычисления. 2022. Т. 54, № 5. С. 16–26.
doi: 10.36871/2618-9976.2022.05.002
2. Куликов А. Н., Угроватов А. Ю., Углов П. В. Мини-ТЭЦ – объекты малой энергетики, и как их автоматизировать // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. 2023. Т. 80, № 5. С. 26–29.
3. Сосфенов Д. А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 4. С. 35–43.
doi: 10.25198/2077-7175-2023-4-35
4. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyberphysical manufacturing / Y. Cai, B. Starly, P. Cohen, Y.-S. Lee // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 10. P. 1031–1042.
doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.094
5. Adaptive federated learning and digital twin for industrial internet of things / W. Sun, S. Lei, L. Wang, Z. Liu, Y. Zhang // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. Vol. 17, № 8. P. 5605–5614.
doi: 10.1109/TII.2020.3034674
6. Jeon S. M., Schuesslbauer S. Digital Twin Application for Production Optimization // IEEE Intern. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore, 14–17 Dec. 2020. IEEE, 2020. P. 542–545.
doi: 10.1109/IEEM45057.2020.9309874
7. Схема теплоснабжения Санкт-Петербурга на 2020 г. Т. 1 (ч. 1, 2.1). URL: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2019/08/26/27/%D1%82%D0%BE%D0%BC_1_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8_1_2..pdf (дата обращения: 04.04.2024).
8. График регулирования отпуска тепла от ТЭЦ филиала "Невский" ПАО ТГК-1 на отопительный сезон 2018/2019 гг. URL: https://energomonitoring.com/wp-content/uploads/2019/02/2018_grafik_regulirovaniya_Teploset.pdf (дата обращения: 04.04.2024).

content/uploads/2019/02/2018_grafik_regulirovaniya_Teploset.pdf (дата обращения: 04.04.2024).

9. Baronova V. A., Romantsova N. V., Tyarkin Ya. A. Providing the Adequacy of the Heat Metering System Model // Conf. of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), St Petersburg, Russia, 29–31 Jan. 2024. IEEE, 2024. P. 324–326.
doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468386

10. Притула В. В. Подземная коррозия трубопроводов и резервуаров. М.: Акела, 2003. 225 с.

11. Гевлич С. О., Гевлич Д. С., Васильев К. А. Диагностика тепловых сетей и городских водопроводов // Технические науки – от теории к практике. 2015. Т. 45, № 9. С. 114–123.

12. Отставнов А. А., Харькин В. А. О стандартизованных трубных изделиях из реактопластов, армированных стекловолокном // Сантехника. 2014. № 2. С. 48–52.

13. ОСТ 153-39.4-010-2002. Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов и трубопроводов головных сооружений: утв. и введен в действие приказом Минэнерго России от 5 авг. 2002 г., № 255: дата введения 01.10.2002.

14. Чапаев Д. Б., Оленников А. А. Расчет скорости внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей из углеродистых сталей // Изв. высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. Т. 55, № 4. С. 33–36.
doi: 10.17073/0368-0797-2012-4-33-36

15. Результаты производственного контроля качества и безопасности горячей воды ТЭЦ филиала "Невский" ПАО ТГК-1 за 2020 г. URL: https://www.tgc1.ru/fileadmin/clients/spb/disclosure/2020/rezultaty_proizvodstvennogo_kontrolja_kachestva_i_bezopasnosti_gorjachei_vody_tehc_filiala_nevskii_v_sankt-peterburge.pdf (дата обращения: 04.04.2024).

Информация об авторах

Баронова Василиса Андреевна – магистр по направлению "Приборостроение" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного

го электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – проектирование распределенных измерительных систем на основе ПЛК. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: vasilisabaron@gmail.com

Романцова Наталия Владимировна – кандидат технических наук (2016), доцент (2023), доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – проектирование распределенных измерительных систем на основе ПЛК; алгоритмическое обеспечение для расчета погрешности измерения при синтезе измерительных систем; обработка измерительных данных и преобразование измерительных сигналов; передача данных по беспроводным каналам при воздействии мощных помех. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: nvromantsova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7764-0338>

References

1. Alekseev V. V., Konovalova V. S., Romantsova N. V., Tsareva A. V. Information and Measuring System of the Control Node of the Main Heat Pipeline. *Soft Measurements and Computing*. 2022, vol. 54, no. 5, pp. 16–26. (In Russ.)
doi: 10.36871/2618-9976.2022.05.002
2. Kulikov A. N., Ugrevatov A. Yu., Uglov P. V. Mini-CHP Plants – Small Energy Facilities, and How to Automate Them. *Industrial and heating Boilers and Mini-TPP*. 2023, vol. 80, no. 5, pp. 26–29. (In Russ.)
3. Sosfenov D. A. Digital Twin: History of Origin and Development Prospects. *Intellect. Innovations. Investments*. 2023, no. 4, pp. 35–43. (In Russ.)
doi: 10.25198/2077-7175-2023-4-35
4. Cai Y., Starly B., Cohen P., Lee Y.-S. Sensor Data and Information Fusion to Construct Digital-Twins Virtual Machine Tools for Cyberphysical Manufacturing. *Procedia Manufacturing*. 2017, vol. 10, pp. 1031–1042.
doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.094
5. Sun W., Lei S., Wang L., Liu Z., Zhang Y. Adaptive Federated Learning and Digital Twin for Industrial Internet of Things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021, vol. 17, no. 8, pp. 5605–5614.
doi: 10.1109/TII.2020.3034674
6. Jeon S. M., Schuesslbauer S. Digital Twin Application for Production Optimization. *IEEE Intern. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, 14–17 Dec. 2020. IEEE, 2020, pp. 542–545.
doi: 10.1109/IEEM45057.2020.9309874
7. St Petersburg Heat Supply Scheme 2020. Vol. 1 (Pt. 1, 2.1). Available at: https://www.gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2019/08/26/27/%D1%82%D0%BE%D0%BC_1_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8_1_2..pdf (accessed 04.04.2024). (In Russ.)
8. Regulation Diagram of Heat Supply from Nevsky branch TPP of TGC-1 in 2018–2019 Heating Period. Available at: https://energomonitring.com/wp-content/uploads/2019/02/2018_grafik_regulirovaniya_Teploset.pdf (accessed 04.04.2024). (In Russ.)
9. Baronova V. A., Romantsova N. V., Tyarkin Ya. A. Providing the Adequacy of the Heat Metering System Model. *Conf. of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon)*, St Petersburg, Russia, 29–31 Jan. 2024. IEEE, 2024, pp. 324–326.
doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468386
10. Pritula V. V. *Podzemnaya korroziya trubo-provodov i rezervuarov* [Underground Corrosion of Pipelines and Reservoirs]. Moscow, Akela, 2003, 225 p. (In Russ.)
11. Gevlich S. O., Gevlich D. S., Vasiliev K. A. Diagnostics of Thermal Networks and Urban Water Pipes. *Technical Sciences - from Theory to Practice*. 2015, vol. 45, no. 9, pp. 114–123. (In Russ.)
12. Ostavnov A. A., Kharkov V. A. About Standardized Tubular Products Made of Fiberglass Reinforced Thermoplastics. *Plumbing*. 2014, no. 2, pp. 48–52. (In Russ.)
13. OST 153-39.4-010–2002 Methodology for Determining the Residual Resource of Oil and Gas Field Pipe-Lines and Pipelines of Head Structures. Approved and put into effect by the order of the Ministry of Energy of the Russian Federation: 5 Aug. 2002: introduction 01.10.2002.
14. Chapaev D. B., Olennikov A. A. Calculation of Internal Corrosion Rate of Pipelines of Wather Thermal Networks from Carbon Steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, vol. 55, no. 4, pp. 33–36. (In Russ.)
doi: 10.17073/0368-0797-2012-4-33-36
15. The results of production control of the quality and safety of hot water at the Nevsky branch of PJSC TGC-1 for 2020. Available at: https://www.tgc1.ru/fileadmin/clients/spb/disclosure/2020/rezultaty_proizvodstvennogo_kontrolja_kachestva_i_bezopasnosti_gorjachei_vody_tehc_filiala_nevskii_v_sankt-peterburg.pdf (accessed 04.04.2024). (In Russ.)

Information about the authors

Vasilisa A. Baronova – master in Instrumentation Technology (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of the Department of Information and Measurement Systems and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: design of PLC-based distributed measurement systems.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vasilisabaron@gmail.com

Natalia V. Romantsova – Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor (2023), Associate Professor of Department of Information and Measurement Systems and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: design of PLC-based distributed measurement systems; algorithmic software for calculating measurement error in the synthesis of measurement systems; processing of measurement data and conversion of measurement signals; data transmission over wireless channels when exposed to powerful interference.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: nvromantsova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7764-0338>
