

УДК 519.853

DOI: 10.22213/2410-9304-2026-2-100-108

Метод создания автоматической системы управления теплоснабжением с использованием имитационных моделей

А. М. Петров, кандидат технических наук, доцент,

Заполярный государственный университет им. Н. М. Федоровского, Норильск, Россия

И. С. Беляев, кандидат экономических наук, доцент,

Заполярный государственный университет им. Н. М. Федоровского, Норильск, Россия

А. Н. Попов, доцент Академического департамента УИОТ,

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Создание интеллектуальных систем теплоснабжения является ключевым направлением развития городской инфраструктуры. Подходы, которые существуют при автоматизации подобных систем, зачастую не учитывают сложную взаимосвязь термодинамических и гидравлических процессов, протекающих в трубопроводах, а также не учитывают влияние человеческого фактора, обуславливающего зашумленность данных. Целью исследования является разработка метода построения автоматизированной системы управления (АСУ) теплоснабжением с интегрированной подсистемой имитационного моделирования для тестирования и настройки параметров с учетом структурных изменений и внешних воздействий. Методология базируется на представлении системы теплоснабжения в виде метрического графа. Для обработки трудноформализуемых зависимостей и зашумленных данных предложено использование нечетких нейронных сетей (ННС). Физика проходящих процессов (однофазность и многофазность потоков) описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных. Взаимодействие между элементами системы моделируется на основе модифицированной модели Фитц Хью – Нагумо. По результатам работы предложен метод непрерывного описания АСУ теплоснабжения через функции состояния, что составляет научную новизну работы. Получена система дифференциальных уравнений, описывающая динамику векторов управления и их взаимосвязь в пространстве состояний. Разработана имитационная модель, реализована в среде MATLAB. Для учета уравнений и анализа динамики системы в модели реализовано применение численных схем SSPRK и GFORCE. Также применен аддитивный показатель для оценки информативности элементов, который рассчитывается на основе коэффициентов запаса и формулы Шеннона. Определены формы бесшовного применения результатов работы в текущих процессах автоматического управления широкого спектра производств через интеграцию модели в систему теплоснабжения и тестирования на разностных аппроксимациях.

Ключевые слова: автоматическая система управления, имитационное моделирование, нечеткие нейронные сети, метрический граф, теплоснабжение однофазные потоки, многофазные потоки, принцип многомерности, модель Фитц Хью – Нагумо, MATLAB, цифровой двойник, анализ данных.

Введение

Повышение степени интеллектуализации систем теплоснабжения в настоящее время является важной частью развития цифровой инфраструктуры города, поскольку динамика развития такой системы является источником данных по ряду первостепенных и косвенных признаков темпов роста завода, района, города и так далее [1].

Однофазные и многофазные модели, имитирующие поведение рабочего тела системы теплоснабжения внутри трубопроводов, позволяют расширить спектр анализируемых количественных метрик, а также осуществлять более точное моделирование. Вследствие этого прогнозирование поведения системы в зависимости от внешних факторов [2, 3] и использование подобных моделей при построении цифрового двойника системы теплоснабжения позволяют

рассмотреть жизненный цикл системы не только с точки зрения термодинамических, гидравлических и химических процессов, но и с точки зрения их комбинаций друг с другом, тем самым приводя к глубокой Data-аналитике [4, 5].

Систему теплоснабжения как объект управления можно представить в виде комплексной структуры (совокупности исполнительных механизмов), особенностью которой является непосредственная связь между возмущающим воздействием в виде параметров окружающей и внутренней среды с устойчивостью автоматической системы управления (далее АСУ) [6]. Иными словами, динамичность изменения параметров окружающей среды (температура и влажность окружающей среды, скорость ветра, неравномерность распределения утеплителя и т. п.) и внутренней среды (ламинарные и турбулентные течения рабочего тела внутри трубо-

провода, фазность потоков, химическая реактивность фаз потока и тому подобное) влияет как на частоту аварий, возникающих на участках системы теплоснабжения, так и на общий износ исполнительных механизмов [7, 8].

В результате для создания эффективной автоматической системы управления теплоснабжением промышленного района (ПР) необходимо учитывать не только саму систему теплоснабжения (и минимальную ее единицу «исполнительный механизм» как локальный объект управления), но и воздействие на нее параметров окружающей и внутренней среды. Также необходим учет применяемых исполнительных механизмов и степень их износа, включая, общую схему автоматизации и конечных потребителей.

В связи с этим сформированы следующие задачи исследования:

1. Создать комплексную, имитационную модель автоматической системы управления теплоэнергетической установкой с учетом влияния структурных изменений.

2. Разработать метод создания автоматической системы управления системой теплоснабжением с помощью имитационного моделирования для тестирования системы и с возможностью настройки параметров.

Объектом исследования является алгоритмы работы имитационной модели автоматической системы управления теплоснабжением.

Предметом исследования являются методы имитационного моделирования автоматической системы управления теплоснабжением.

В качестве **научной новизны** данной работы заявляется разработанный метод непрерывного описания автоматической системы управления теплоснабжения через функции-состояния, реализованные в виде дифференциальных уравнений.

В методологию и методы исследования входит теоретическое и экспериментальное решение задач, осуществляемое при помощи стандартных и современных имитационных методик, методов статистической обработки данных, современных программных комплексов численного моделирования методом конечных элементов, систем компьютерного моделирования.

Для создания модели подобной системы требуется обширная база данных, получаемая не только от измерительно-вычислительных комплексов (далее ИВК), обслуживающих данную систему, но и непосредственно от команд специалистов-исследователей, которые собирали бы данные в «ручном режиме».

Наличие человеческого фактора и, как следствие, привязка сбора данных ко времени рабо-

ты команд закономерно является ключевой проблемой, так как приводит к наличию «зашумленности» в собираемом массиве данных [9]. Логично, что некорректные данные по любой из исследуемых количественных метрик системы теплоснабжения приведут к некорректному моделированию/прогнозированию/управлению системой теплоснабжения, что напрямую повлияет на ее ресурсо- и энергозатраты [10, 11].

Материалы и методы

Основным методом решения данной проблемы является использование узкоспециализированных искусственных нейронных сетей. В данном случае, предлагается использование нейронных сетей, функционирующих на правилах нечеткой логики, так называемые нечеткие нейронные сети (далее ННС) [12-14]. Данные сети эффективно используются для моделирования поведения системы теплоснабжения в зависимости от трудноформализуемых условий, а также в их обучение можно включить имитационные модели однофазных и многофазных потоков. Подобное изменение может уточнить поведение рабочего тела внутри трубопроводов и, как следствие, приведет к более точным результатам при моделировании [15].

Также повысить эффективность и точность преследуемых параметров можно за счет использования метода периодической корректировки нечеткой нейросетевой модели [16]. Однако метод обладает рядом недостатков, в частности связанных с отсутствием получения непрерывной информации о системе теплоснабжения и ее исполнительных и иных элементов.

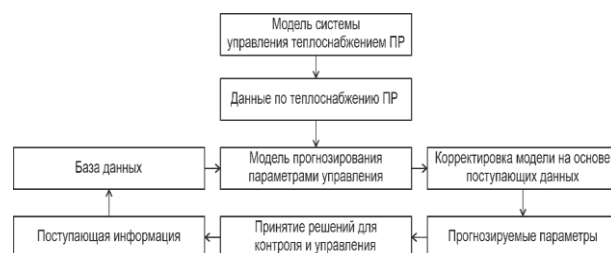


Рис. 1. Функциональная схема усовершенствованной автоматической системы управления

Fig. 1. Functional diagram of the improved automatic control system

При разработке метода создания автоматической системы управления теплоснабжением промышленного района с использованием имитационных моделей однофазных и многофазных потоков учитывались следующие принципы построения интеллектуальных систем:

1. Принцип многомерности, который позволяет представить систему теплоснабжения как комплексную структуру, элементы которой об-

ладают определенной вертикальной иерархией. При таком представлении появляется возможность отображения/визуализации ее в виде единого многоуровневого объекта. Также появляется возможность согласования с моделируемой/проектируемой иерархией блоков автоматической системы управления.

2. Принцип полноты информации и информационной энтропии, позволяющий представить и сравнить данные, получаемые с минимальной единицы (исполнительного или иного элемента) системы теплоснабжения в виде относительного объема информации (визуализированного расчета по формуле Шэннона).

3. Принцип оперативности, формирующий критерии для подсистемы поддержки и принятия решения, ключевой функцией которой будет своевременное управление режимами работы минимальной единицы (исполнительного или иного элемента) комплексной структуры.

4. Принцип единой системности, описывающий необходимый уровень и количество взаимосвязей между минимальными единицами (исполнительного или иного элемента) системы теплоснабжения.

5. Принцип простоты интегрирования, отвечающий за качественные метрики, функциональные и иные свойства минимальной единицы (исполнительного или иного элемента) системы теплоснабжения, как синергетически формирующий свойства уровней АСУ.

Освещаемый в данной работе метод учитывает описанные выше принципы, а также представляет систему теплоснабжения, как сложный управляемый процесс, аналитическая функция которого в пространстве состояний имеет вид:

$$\vec{D} = f(\vec{A}(t), \vec{B}(t), \vec{C}(t), \dots, \vec{N}(t), M(t)),$$

$$\vec{E} = f(\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}, \dots, \vec{N}, M), \quad (1)$$

где $\vec{A}(t), \vec{B}(t), \vec{C}(t), \dots, \vec{N}(t)$ – выраженные векторы управления, указывающие на текущее состояние исполнительных механизмов объекта по времени; $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}, \dots, \vec{N}$ – выраженные векторы управления, указывающие на текущее состояние исполнительных механизмов объекта в текущий момент времени; $M(t)$ – матрица, отражающая взаимодействие минимальных элементов системы внутри системы теплоснабжения за определенный период времени; M – матрица, отражающая взаимодействие минимальных элементов системы внутри комплексной структуры за текущий момент времени.

Ввиду того, что текущее состояние минимальных элементов системы можно одновременно рассматривать за определенный период времени, а

также за текущий период времени, в этом случае можно представить их в виде матричной формы, тогда предлагаемый метод заключается в создании нейросетевого модуля, который получает данные в трех вариациях их представления.

Иными словами, нейросетевой модуль способен по запросу оператора производить одновременно сравнение текущих данных, полученных с минимального элемента системы и сравнивать их. Сравнение происходит с хронологией измерения этого параметра в похожих условиях, производится усредненное сравнение по пространственной матрице. В результате фиксируется отклонение от условной нормы. Визуализация работы модуля представлена на рис. 2. Здесь 1 – матрица пространства состояний в текущий момент времени; 2 – выраженные вектору управления ряда минимальных элементов, представленных в виде единого массива данных (визуализация критерия устойчивости/годографа автоматической системы управления); 3 – фактическое текущее значение выраженных векторов управления ряда минимальных элементов; 4 – матрица пространства состояний за рассматриваемый период времени; 5 – выраженные вектору управления ряда минимальных элементов, за рассматриваемый период времени, представленные в виде равномерно распределенного хронологические массива данных; 6 – динамическое фактическое значение выраженных векторов управления ряда минимальных элементов за рассматриваемый период времени.

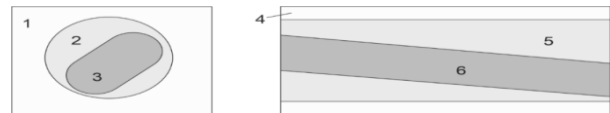


Рис. 2. Визуализация потока данных в нейросетевом модуле

Fig. 2. Visualization of the data flow in the neural network module

При должной оперативности получения потока данных о текущем состоянии минимальных элементов системы можно добиться повышения скорости обмена системы теплоснабжения.

Для соблюдения иерархии в обмене данными между сегментами общей комплексной структуры предлагается углубленная дифференциация:

1. Нижний логический уровень, являющийся основным и формирующим базовую схему автоматизации минимального элемента системы теплоснабжения с необходимым требованием по дистанционному управлению (первостепенным) и ручному (второстепенным).

1.1. Дистанционное управление, осуществляемое с нечеткого нейросетевого модуля, ос-

новываясь на нечетких нейросетевых моделях и выработанных правилах нечеткой логики. Включает возможность перехода с одного алгоритма функционирования на иные, в зависимости от поставленной цели (энергосбережение, удовлетворение запросов потребителей и т. п.).

1.2. Ручное управление, которое является косвенным способом управления и направленно на сохранение целостности системы в случае возникновения аварийных режимов и иных критических ситуаций.

2. Уровень режимов управления, на котором особенности поведения элементов системы теплоснабжения в рамках определенного технологического режима зависят от результатов, полученных в ходе использования имитационных моделей (в данном случае моделей однофазного и многофазного потоков).

2.1. Изменение в работе элементов на уровне регуляторов и схем управления.

2.2. Изменение в работе элементов на уровне электротехнических и электромеханических блоков, не связанных с регулированием.

2.3. Обновление баз знаний, взаимодействующих с нейросетевым модулем.

3. Уровень программно-аппаратного обеспечения, представляющий собой мультипрограммный комплекс, отвечающий за различные аспекты функционирования комплексной структуры (от противоаварийной системы до системы сбора и передачи данных).

3.1. Протоколы передачи данных от одного блока измерительно-вычислительных модулей системы теплоснабжения до другого и обеспечение защищенности информации между ними.

3.2. Сбор данных и принятие решения на уровне собранных данных.

4. SCADA-уровень, отвечающий за супервизирование программного обеспечения предыдущего уровня.

5. Уровень принятия решений и предоставления их оператору.

Конечным продуктом обработки и анализа данных в рамках обозначенной логики работы системы являются правила и факторы. Поскольку факторы могут увеличиваться экспоненциально в зависимости от потребностей аналитиков данных, то необходимо разработать дополнительную методику комплексной оценки уровня информативности минимального элемента. Данная дополнительная методика ориентируется на тесное взаимодействие с системой автоматизированного сбора и обработки данных минимальных элементов системы теплоснабжения.

Минимальные элементы в рамках данной логики упрощаются до уровня элемента, выполняющего единое элементарное действие и прикрепленное к данному действию нормативное требование (закрепленное на уровне локальной нормативно-технической документации).

Расчет уровня информативности минимального элемента включает ограничения:

1. Ни один из элементов системы в объеме выдаваемой информации не должен превышать общий объем выдаваемой информации всей системой.

2. Формирование потока данных носит перманентный характер.

3. Объем данных от минимального элемента не должен выходить за границы, формируемые в п. 1.

4. Расчетная формула должна обладать необходимыми метриками для обучения нейронной сети.

Данный показатель выражается в виде аддитивной свертки частных, количественных метрик текущих показателей:

$$U(\vec{D}) = \sum_{v=n}^N a_v \vec{D}_v > 0, \text{ при } \vec{D}_v > 0, \quad (2)$$

где v – объем данных, поступающих от минимального элемента структуры, ранжированный по величине; a_v – весовые коэффициенты приоритетности; \vec{D}_v – показатель информативности.

Показатель информативности определяется как \vec{D} с учетом коэффициента запаса и количественных метрик нормативно-технической документации:

$$\vec{D}_v = K_{\text{зап}} \sum_{1 \rightarrow n} (O_{di} - O_i), \quad (3)$$

где $K_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса; O_{di} – нормативно допустимый уровень информативности минимального элемента; O_i – фактический уровень информативности минимального элемента.

Так, для системы теплоснабжения Норильского промышленного района значения показателей \vec{D} варьируются по районам в пределах 0,2 ... 0,8, причем ключевое влияние показывает фактор O_i , в зависимости от плотности/количества датчиков на квадратный метр системы теплоснабжения.

Весовые коэффициенты определяются в рамках производственного эксперимента, индивидуально для каждой комплексной структуры, уровни информативности по каждому минимальному элементу высчитываются в соответствии с методикой Шеннона и могут изменяться динамически исходя из собранных данных ИВК.

Применение данной дополнительной методики позволит визуализировать информативную нагруженность каждого элемента в рам-

ках одной системы теплоснабжения. Тем самым выбирается наиболее оптимальное решение для формирования потока передачи данных. Это сводит инженерную задачу к классической задаче теории графов и линейного моделирования.

Выразим физико-математические модели однофазных и многофазных потоков в виде непрерывной модели. Представим, что данные процессы происходят по времени и являются конечномерными элементами/наборами, обладающими определенной взаимосвязью.

1. Комплексная структура образует метрический граф, в котором вершина является элементом исходного положения векторов управления $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}, \dots, \vec{N}$, которые ограничиваются при этом M . Ребро такого графа также имеет ограничения, но уже в векторном пространстве $\vec{A}(t), \vec{B}(t), \vec{C}(t), \dots, \vec{N}(t)$ и ограничивается, соответственно, $M(t)$.

2. При понимании ограничений появляется возможность описать функцию-состояние для каждой точки метрического графа.

3. Понимание возможности состояний позволяет описать условия склейки в вершинах графа.

4. В результате корректируется обобщенный метрический граф для получения итоговой модели процессов.

Таким образом, пусть в системе/ве M присутствует n – количество конечномерных элементов, в которых обнаружено m – количество связей; связи между элементами ограничены по времени/реактивности.

В этом случае вершиной метрического графа будет являться исходное состояние / исходный конечномерный элемент системы, а сам граф будет иметь n вершин и m ребер. Длина каждого m ребра зависит от скорости протекания/времени/реактивности процесса.

Пронумеруем все вершины. В этом случае появляется возможность разделения функций-состояний на внутренние и ближайшие. Внутренние позволяют определить зависимость изменения состояния конечномерного элемента от скорости протекания/времени/реактивности процесса.

Следовательно, возможно моделирование исходной задачи по графическому определению как системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial y_i(\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}, \dots, \vec{N})}{\partial t} = f_i\left(\frac{\partial y_i(\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}, \dots, \vec{N})}{\partial(m, n)}, y_i(\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}, \dots, \vec{N})\right). \quad (4)$$

Склейка между вершинами графа для обеспечения возможности дальнейшего тестирования данных состояний взаимосвязей между

конечными элементами может быть замещена непрерывной моделью движения импульса между фазами потоков, основанной на модели Фитц Хью – Нагумо:

$$\begin{cases} \dot{u} = -au + (a + 1)u^2 - u^3 - y + I, \\ \dot{y} = bu - gy, \end{cases} \quad (5)$$

где \dot{u} и \dot{y} описывают $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}, \dots, \vec{N}$ в $M(t)$. a, g, y являются обуславливаемыми базой знаний по протекающему процессу константами, а I – потенциальный параметр внешнего возбуждения, формирующий управляющее воздействие для начала процесса. Совместим (4) и (5):

$$\begin{cases} \frac{\partial u_A(\vec{A})}{\partial t} = D \frac{\partial u_A(\vec{A})}{\partial(m, n)} - au_A + \\ + (a + 1)u_A^2 - u_A^3 - y_A, \\ \frac{\partial y_A(\vec{A})}{\partial t} = bu_A - gy_A, \\ \frac{\partial u_B(\vec{B})}{\partial t} = D \frac{\partial u_B(\vec{B})}{\partial(m, n)} - au_B + \\ + (a + 1)u_B^2 - u_B^3 - y_B, \\ \frac{\partial y_B(\vec{B})}{\partial t} = bu_B - gy_B, \\ \frac{\partial u_C(\vec{C})}{\partial t} = D \frac{\partial u_C(\vec{C})}{\partial(m, n)} - au_C + \\ + (a + 1)u_C^2 - u_C^3 - y_C, \\ \frac{\partial y_C(\vec{C})}{\partial t} = bu_C - gy_C, \\ \dots \\ \frac{\partial u_N(\vec{N})}{\partial t} = D \frac{\partial u_N(\vec{N})}{\partial(m, n)} - au_N + \\ + (a + 1)u_N^2 - u_N^3 - y_N, \\ \frac{\partial y_N(\vec{N})}{\partial t} = bu_N - gy_N, \end{cases} \quad (6)$$

где D – параметр, соответствующий скорости протекания/времени/реактивности процесса.

Данные фазы внутри рассматриваемого потока связаны. Для численного решения (6) вводим условия Неймана (при рассмотрении одной фазы потока):

$$\begin{cases} \frac{\partial u_A(\vec{A})}{\partial t} - D \frac{\partial u_A(\vec{A})}{\partial(m, n)} = f(u_A) - y_A, \\ \frac{\partial u_A(\vec{A})}{\partial t} = bu_A - gy_A, \\ \frac{\partial u_A(\vec{A})}{\partial t}(t, 0) = 0, \frac{\partial y_A(\vec{A})}{\partial t}(t, 0) = 0, \\ \frac{\partial u_A(\vec{A})}{\partial t}(t, \vec{D}_v) = 0, \frac{\partial y_A(\vec{A})}{\partial t}(t, \vec{D}_v) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

На данном этапе числового моделирования метода можно осуществить прямое взаимодействие между степенью информативности вектора управления и динамикой процесса, а именно разбить отрезок $[t, \vec{D}_v]$ на равные отрезки по числу ребер или вершин. Число ребер и вершин, как несложно догадаться, также привязано к показателю \vec{D} и на практике выдает расчеты в диапазонах от 211 и 422 ... 24 649 и 313 вершин

и ребер соответственно, подобный способ моделирования дает возможность повысить точность учета количественных метрик каждой фазы и общую динамику системы. Также определится, являются ли графы полно- и неполно связанными, а значит, корректны ли или дублируются показатели ряда измерительных датчиков.

Аналогичные решения можно получить по каждой фазе потока и, как следствие, сделать привязку к каждому из конечномерных элементов или управленческих векторов. Данная схема была реализована на языке MATLAB, что позволило произвести детальный анализ протекания процесса и рассмотреть каждый его этап. В перспективе это означает появление дополнительного инструмента аналитики данных ИВК системы теплоснабжения.

Также при обратном представлении использования данного инструмента появляется возможность формирования точечных/корректирующих управленческих сигналов на исполнительные механизмы системы теплоснабжения, что позволяет сокращать общую скорость износа не только путем предотвращения аварий, но и путем ресурсосбережения точечных зон/элементов системы.

При составлении имитационной модели подобного математического аппарата с помощью

MATLAB необходимо учитывать изменение ребер графа за счет хронологического поступления информационных массивов о текущем состоянии комплексной структуры в формате количественных метрик и частотных характеристик минимального элемента. Для оптимизации их обработки используем метод SSPRK (Strong Stability Preserved Runge-Kutta), а для визуализации динамики изменения графа используем метод GFORCE с ограничителем minmod. Результат представлен на рис. 3. Здесь 1 – база знаний / информационные массивы; 2 – имитационная модель однофазного/многофазного потока (термодинамические характеристики); 3 – имитационная модель однофазного/многофазного потока (аэро- и гидродинамических характеристики); 4 – комплексная структура, имитирующая систему теплоснабжения; 5 – имитационная модель, регулирующая скорость протекания/времени/реактивности процесса; 6 – имитационная модель взаимодействия элементов системы теплоснабжения с внешней средой; 7, 13 – коммутаторы информационных массивов; 8, 12 – математический аппарат (6); 9, 11 – лимитер/ограничитель; 10 – блок визуализации полученных данных.

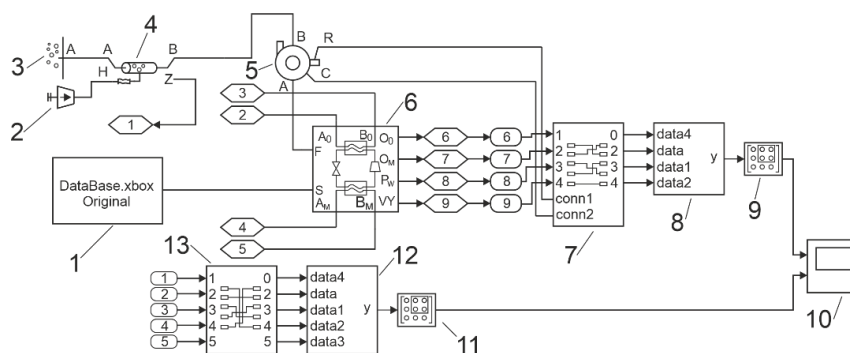


Рис. 3. Имитационная модель автоматической системы управления

Fig. 3. Simulation model of the automatic control system

Имитационная модель (рис. 3) работает по принципу анализа получаемых данных, прогностического моделирования дальнейшего поведения системы (с учетом особенностей физико-химического взаимодействия потоков рабочего тела внутри трубопровода системы теплоснабжения) и формирования экспертного умозаключения.

Имитационные модели 2 и 3 (рис. 3) описывают поведение рабочего тела внутри системы трубопровода. Логично, что в один период времени не могут использоваться обе имитационные модели, так как их внутренние свойства

противоречат друг другу, поэтому оператор сам принимает решения, какую из двух моделей выбрать. Результат моделирования элемента 2 или 3 направляется на элемент комплексной структуры, имитирующей систему теплоснабжения 4, и на данном этапе происходит основной расчет. Элемент 4 в свою очередь направляет сигнал на 5 и 6, где модель дополняется характеристиками поведения внешней среды и текущего состояния системы (данные с ИВК).

На элементах 7 и 13 происходит накопление полученных данных и непосредственная обработка их с помощью программного обеспечения

8 и 12. Лимитеры 9 и 11 ограничивают поток данных в соответствии с границами, обозначенными в IM и $M(t)$. Ограничители представляют собой модули $\min\text{mod}$ и являются носителями функции корректировки приходящих данных по минимуму и максимуму возможных сигналов соответственно. Затем на элементе 10 происходит визуализация данных для оператора.

Для оценки разности показателей и определения величины отклонений, проведем сравнение поступающих количественных метрик и их динамику, заложив тем самым возможность перепроверки данных на адекватность. Представим поступающий измерительный сигнал с ряда датчиков (для наглядности были выбраны 8 случайных датчиков) в виде относительных единиц и произведем сравнение с величиной имитационного сигнала, выраженного в относительных единицах (рис. 4).

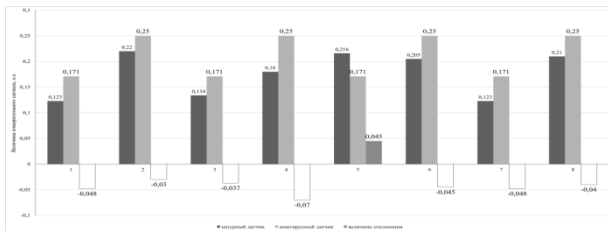


Рис. 4. Сравнение измерительных сигналов натуральных и имитационных датчиков

Fig. 4. Comparison of measurement signals from field and simulation sensors

Для инженерных и физических имитационных моделей существует методология проверки точности моделирования через количественные метрики. Проведем проверку разработанной модели двумя способами:

1) через тест валидации NAFEMS (National Agency for Finite Element Method sand Standards);

2) путем сравнения с экспериментальными данными.

Начнем с проверки путем сравнения с экспериментальными данными. Как можно видеть на рис. 4, средняя величина отклонения между имитируемым и натурным сигналом составляет $-0,03$ о.е., что указывает на корректность и точность разработанной имитационной модели. В последующих работах будет исследована связь типа датчиков с размерностью отклонения.

Тест валидации NAFEMS сводится к сравнению получаемых данных с имитационной модели к эталонному решению. За эталонное решение принимаются формулы (1)–(7). Оценим относительную погрешность, используя (8):

$$\delta = \left| \frac{\sigma_{\text{МКЭ}} - \sigma_{\text{аналит}}}{\sigma_{\text{аналит}}} \right|, \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{МКЭ}}$ – показатель, полученный методом конечных элементов, то есть расчеты имитационной модели; $\sigma_{\text{аналит}}$ – эталонный показатель.

Средняя величина отклонения, между имитируемым и эталонным сигналом также составила $0,03$ о.е., или 3% , что соответствует приемлемой погрешности, указанной в NAFEMS (5%). Следовательно, можно утверждать, что разработанная имитационная модель прошла обе сторонние проверки на точность моделирования.

Подобная процедура приоритетна для исследования ввиду способности системы расширяться (в систему могут вноситься изменения – дополнительные блоки и базы знаний), поэтому отсутствие вышеуказанной корректировки может привести к конфликту поступающих данных и вызвать аномалии в массивах.

Заключение

В данной работе рассмотрен метод создания автоматической системы управления теплоснабжением промышленного района с использованием имитационных моделей однофазных и многофазных потоков на основе построения метрического графа. Научной новизной данного метода является возможность непрерывного описания через функции-состояния на ребрах графа в виде дифференциальных уравнений. Подобный подход с использованием уравнений Фитц Хью – Нагумо позволяет представить работу системы управления как непрерывный поток управляющих воздействий, которые могут быть рассмотрены в хронологии скорости протекания/времени/ реактивности процесса. Иными словами, данный метод предоставляет возможность моделировать/собирать информацию не с точки зрения вершины графа (конечномерного элемента), а с точки зрения его ребер (взаимосвязи между конечномерными элементами системы).

Для данного метода была построена и описана имитационная модель в MATLAB. Также подробно расписан метод ее интегрирования в систему теплоснабжения и прогонки на различных аппроксимациях, что позволяет разработать способы бесшовного применения данного метода в текущих процессах автоматического управления широкого спектра производств.

Библиографические ссылки

1. Проблемы моделирования автоматизированных систем теплоснабжения норильского промышленного района / А. М. Петров, И. С. Беляев, А. Н. Попов, О. Н. Кузяков. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2024. 182 с. ISBN 978-5-9961-3327-7.

2. Петров А. М., Попов А. Н. Лабораторные испытания измерительно-вычислительного комплекса для диагностики термодинамических процессов одно-

фазных потоков // Инновации и инвестиции. 2022. № 7. С. 81–85.

3. Разработка программного обеспечения моделирования процессов теплопереноса при многофазном потоке / А. М. Петров, А. Н. Попов, Д. В. Мозгунов и др. // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, № 1 (54). С. 40–48. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-1-40-48.

4. Майоров Г. С. Автоматизация построения вычислительной подсистемы цифрового двойника интегрированной энергосистемы // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2024. № 2. С. 70–85. DOI 10.31857/S0002331024020052.

5. Тихомиров С. А., Тихомирова Е. Г. Оптимизация мультиагентной архитектуры для цифровых двойников систем теплоснабжения при обеспечении их живучести // Сантехника, Отопление, Кондиционирование (С.О.К.). 2025. № 12. С. 40–45.

6. Концепция модификации существующих автоматизированных систем управления технологическими процессами общепромышленного назначения при построении цифровых двойников технологических процессов и цифровых фабрик // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2025. С. 48–56. Б. а.

7. Разработка средств повышения эффективности обработки и передачи данных в системах автоматического управления процессами теплоснабжения / А. М. Петров, С. Х. Шигалугов, А. Н. Попов, Д. А. Попов // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2024. № 4(609). С. 37–43.

8. Игнатов Д. В. Автоматизированные системы управления технологическими процессами при эксплуатации сетей газораспределения // Инновации в строительстве-2023 : материалы конференции. 2023. С. 144–146.

9. Петров А. М., Володина К. А., Беляева Т. А. Роль психофизиологических особенностей человека в его профессиональном развитии // Образование и саморазвитие. 2019. Т. 14, № 4. С. 63–71. DOI 10.26907/esd14.4.06.

10. Лапшин И. П., Петров А. М. Система воздушного отопления животноводческого помещения на базе воздушной теплонасосной установки // Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья. 2013. № 4 (23). С. 69–74.

11. Петров А. М. Применение тепловых насосов для обогрева животноводческих помещений // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2012. № 3 (19). С. 122–125.

12. Coordinated control system modeling of ultrasupercritical unit based on a new fuzzy neural network / D. Wu, H. Niu, Y. Shen et al. // Energy. 2021. Vol. 234. Article 121231. DOI 10.1016/j.energy.2021.121231.

13. Бородин Н. К., Кулагин В. А. Совершенствование технологического процесса на тепловых пунктах в системах теплоснабжения // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2025. Т. 18, № 3. С. 300–324.

14. Economic Nonlinear Model Predictive Control of Prosumer District Heating Networks / F. Holtorf,

T. Lickleder, L. S. P. S. Silva et al. // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2025. Vol. 33, No. 5. P. 1879–1894. DOI 10.1109/TCST.2025.3556789.

15. Load Prediction of Regional Heat Exchange Station Based on Fuzzy Clustering Based on Fourier Distance and Convolutional Neural Network–Bidirectional Long Short-Term Memory Network / Y. You, Z. Wang, Z. Liu et al. // Energies. 2024. Vol. 17, No. 16. Article 4190. DOI 10.3390/en17164190.

16. Digital twin for CIP-washing station with SCADA system / V. S. Artemyev // News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2025. Vol. 27, No. 4. P. 11–23.

References

1. Petrov A.M., Belyaev I.S., Popov A.N., Kuzyakov O.N. *Problemy modelirovaniya avtomatizirovannykh sistem teplosnabzheniya noril'skogo promyshlennogo raiona* [Problems of modeling automated heat supply systems of the Norilsk industrial region]. Tyumen', Tyumenskiy industrial'ny universitet, 2024, 182 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9961-3327-7.

2. Petrov A.M., Popov A.N. [Laboratory tests of measuring and computing complex for diagnostics of thermodynamic processes of single-phase flows]. *Innovatsii i investitsii*, 2022, no. 7, pp. 81–85. (in Russ.).

3. Petrov A.M., Popov A.N., Mozgunov D.V. et al. [Software development for modeling heat and mass transfer processes in multiphase flow]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*, 2024, vol. 71, no. 1, pp. 40–48 (in Russ.). DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-1-40-48.

4. Mayorov G.S. [Automation of computational subsystem construction for digital twin of integrated energy system]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, 2024, no. 2, pp. 70–85 (in Russ.). DOI 10.31857/S0002331024020052.

5. Tikhomirov S.A., Tikhomirova E.G. [Optimization of multi-agent architecture for digital twins of heat supply systems ensuring their survivability]. *Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (S.O.K.)*, 2025, no. 12, pp. 40–45 (in Russ.).

6. [Concept of modification of existing automated process control systems for general industrial purposes in construction of digital twins of technological processes and digital factories]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2025, pp. 48–56 (in Russ.).

7. Petrov A.M., Shigalugov S.Kh., Popov A.N., Popov D.A. [Development of tools for improving data processing and transmission efficiency in automatic control systems of heat supply processes]. *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK*, 2024, no. 4, pp. 37–43 (in Russ.).

8. Ignatov D.V. [Automated process control systems during operation of gas distribution networks]. *Innovatsii v stroitel'stve-2023*, 2023, pp. 144–146 (in Russ.).

9. Petrov A.M., Volodina K.A., Belyaeva T.A. [The role of psychophysiological characteristics of a person in his professional development]. *Obrazovanie i samorazvitiye*, 2019, vol. 14, no. 4, pp. 63–71. (in Russ.). DOI 10.26907/esd14.4.06.

10. Lapshin I.P., Petrov A.M. [Air heating system for livestock premises based on air heat pump unit]. *Vestnik Gosudarstvennogo agrarnogo universiteta Severnogo Zaural'ya*, 2013, no. 4(23), pp. 69-74 (in Russ.).

11. Petrov A.M. [Application of heat pumps for heating livestock buildings]. *Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2012, no. 3(19), pp. 122-125 (in Russ.).

12. Wu D., Niu H., Shen Y. et al. Coordinated control system modeling of ultra-supercritical unit based on a new fuzzy neural network. *Energy*, 2021, vol. 234, article 121231. DOI 10.1016/j.energy.2021.121231.

13. Borodin N.K., Kulagin V.A. [Improvement of technological process at heating points in heat supply systems]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, 2025, vol. 18, no. 3, pp. 300-324 (in Russ.).

14. Holtorf F., Lickleder T., Silva L.S.P.S. et al. Economic Nonlinear Model Predictive Control of Prosumer District Heating Networks. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2025, vol. 33, no. 5, pp. 1879-1894. DOI 10.1109/TCST.2025.3556789.

15. You Y., Wang Z., Liu Z. et al. Load Prediction of Regional Heat Exchange Station Based on Fuzzy Clustering Based on Fourier Distance and Convolutional Neural Network–Bidirectional Long Short-Term Memory Network. *Energies*, 2024, vol. 17, no. 16, article 4190. DOI 10.3390/en17164190.

16. Artemyev V.S. Digital twin for CIP-washing station with SCADA system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2025, vol. 27, no. 4, pp. 11-23.

* * *

Method of Creating an Automatic Heat Supply Control System Using Simulation Models

A. M. Petrov, PhD in Engineering, Associate Professor, Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia

I. S. Belyaev, PhD in Economics, Associate Professor, Fedorovsky Polar State University, Norilsk, Russia

A. N. Popov, Associate Professor, University of Tyumen, Tyumen, Russia

Increasing the intellectualization of heat supply systems is a key task in the development of urban infrastructure. Existing automation approaches often fail to account for the complex interdependence between thermodynamic and hydraulic processes in pipelines, as well as the human factor leading to data noise. The aim of this study is to develop a method for creating an automatic control system for heat supply that utilizes simulation modeling for testing and parameter tuning, considering structural changes and environmental impacts. Materials and Methods. The method is based on representing the heat supply system as a complex structure described using a metric graph. Fuzzy neural networks are proposed for processing hard-to-formalize conditions and noisy data. The physics of processes (single-phase and multi-phase flows) is described by a system of partial differential equations, while the interaction between system elements is modeled based on a modified FitzHugh–Nagumo model. The developed simulation model is implemented in MATLAB using SSPRK and GFORCE numerical methods for optimizing and visualizing system dynamics. To assess the information content of each element, an additive indicator is introduced, calculated using safety factors and Shannon's formula. Results. The authors propose a method for the continuous description of an automatic heat supply control system through state functions, which constitutes the scientific novelty. A system of differential equations is derived, describing the dynamics of control vectors and their interrelations in the state space. A simulation model has been developed, including blocks for physical flow modeling, environmental interaction, and a neural network module. The reliability of the results is ensured by the use of proven mathematical methods (graph theory, partial differential equations) and numerical schemes. The model allows not only for predicting system behavior but also for identifying data anomalies by comparing different information flows.

Keywords: automatic control system, simulation modeling, fuzzy neural networks, metric graph, heat supply, single-phase flows, multiphase flows, principle of multidimensionality, FitzHugh–Nagumo model, MATLAB, digital twin, data analysis.

Получено: 10.03.26

Образец цитирования

Петров А. М., Беляев И. С., Попов А. Н. Метод создания автоматической системы управления теплоснабжением с использованием имитационных моделей // Интеллектуальные системы в производстве. 2026. Т. 24, № 2. С. 100–108. DOI: 10.22213/2410-9304-2026-2-100-108.

For Citation

Petrov A.M., Belyaev I.S., Popov A.N. [Method of Creating an Automatic Heat Supply Control System Using Simulation Models]. *Intellektual'nyesistemy v proizvodstve*. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 100-108 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2026-2-100-108.