

УДК 681.3

**Сергей Константинович Улыбышев**ФГБОУВО «Костромской государственной университет», аспирант, Россия, Кострома,  
e-mail: ulybyshev@outlook.com**Борис Александрович Староверов**

ФГБОУВО «Костромской государственной университет», доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и микропроцессорной техники, Россия, Кострома, e-mail: sba44@mail.ru

## Имитационная модель перераспределения тепловых потоков в системе управления отоплением в здании

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Внедрение автоматических систем регулирования отопления позволяет снизить потребление тепловой энергии в жилом секторе до 10 %, в административных и учебных зданиях до 40 %. На текущий момент существуют системы управления отоплением, однако они применимы только к одноуровневой двухтрубной системе отопления. Разработка имитационной модели перераспределения потоков теплоносителя необходима для синтеза системы взаимосвязанного динамического управления отоплением здания.

**Материалы и методы.** В отличие от существующих решений, данная разработка учитывает проблему разбалансировки потоков теплоносителя в многоуровневой иерархической системе отопления. Расчет конвективного теплообмена в помещении производится исходя из предположения, что температура воздуха в каждый момент времени одинакова во всем объеме помещения. При определении теплообмена через наружные ограждения предполагается, что ограждение или его характерная часть имеет одинаковую температуру в плоскостях, перпендикулярных направлению потока воздуха. В этом случае процесс теплообмена описывается одномерным уравнением теплообмена.

**Результаты.** Разработана имитационная модель системы управления отоплением, позволяющая быстро подключать модули автоматического управления, вносить изменения в алгоритмы управления на этапе компиляции и в состояние системы во время процесса моделирования. По сравнению с возможными аналогами, построенными на базе систем моделирования AnyLogic или ANSYS, она функционирует как модель объекта управления, легко объединяется с моделями блоков автоматического управления и учитывает проблему разбалансировки тепловых потоков. Рассмотрен пример функциональной схемы локальной системы температурного контроля в зоне одной батареи отопления.

**Выводы.** Использование разработанной имитационной модели позволяет создать новый уровень контроля качества технологических процессов производства и потребления энергоресурсов с применением современных информационных технологий при синтезе системы взаимосвязанного динамического управления отоплением. Возможности такого моделирования ориентированы на построение системы бесперебойного и качественного теплоснабжения, поддержание энергоэффективных режимов работы, а также достижение реального экономического эффекта. Рассматриваемая модель позволяет имитировать перераспределение тепловых потоков в различных режимах работы системы отопления.

**Ключевые слова:** имитационная модель, тепловой поток, автоматическое управление, микроклимат

**Sergey Konstantinovich Ulybyshev**

Kostroma State University, Postgraduate Student, Russia, Kostroma, e-mail: ulybyshev@outlook.com

**Boris Alexandrovich Staroverov**

Kostroma State University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Automation and Microprocessor Technology Department, Russia, Kostroma, e-mail: sba44@mail.ru

## Imitation model of heat flows distribution in building heating control system

### Abstract

**Background.** Implementation of automatic heating control systems allows us to reduce heat consumption by 10% in residential areas and 40% in office and educational buildings. Currently, there are heating control

systems, however, they are applied only to a single-level two-pipe heating system. Development of an imitation model of heat flows redistribution is necessary to synthesize the system of interconnected dynamic heating control of a building.

**Materials and methods.** Unlike existing solutions, this research work considers the problem of unbalanced heat flow in a multi-level hierarchical heating system. Calculation of convective heat transfer in the room assumes that the air temperature at any given time is the same throughout the entire room. When we determine heat transfer through walling, it is assumed that the walling or its part has the same temperature of the planes perpendicular to the direction of air flow. In this case, the heat transfer process is described by a one-dimensional heat transfer equation.

**Results.** The developed model of heating control systems allows us to connect the automatic control modules, change control algorithms at the compilation stage and in the system state during the simulation process. In comparison with possible analogue models based on AnyLogic or ANSYS modeling systems, the presented model is the model of controlled object. It is easily combined with models of automatic control units and considers the problem of imbalance of heat flows. An example of the functional scheme of the local temperature control system around one battery is considered.

**Conclusions.** Implementation of developed imitation model makes it possible to ensure a new level of quality control of technological processes of production and consumption of power energy resources by using modern information technologies and synthesizing a system of interconnected dynamic heating control. Possibilities of such modeling are focused on development of the uninterrupted and high-quality heat supply system, maintaining energy-efficient operating modes, as well as actual economic effect. The model under consideration allows us to simulate redistribution of heat flows in different operating modes of the heating system.

**Key words:** imitation model, heat flow, automatic control, microclimate

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2021.2.070-079

**Введение.** В настоящее время 35–40 % общего потребления энергии и около 30 % общих выбросов парниковых газов производится в жилых, офисных и промышленных зданиях [1].

В связи с этим разработка внутренних систем управления микроклиматом, обеспечивающих комфортные условия жизни и работы при минимальном энергопотреблении, действительно актуальна в настоящее время [2, 3]. Одним из основных направлений развития энергосберегающих технологий, так называемого «умного дома», является обеспечение микроклимата с помощью энергосберегающего оборудования, технологий и социализированных подсистем управления [4]. При этом каждая из подсистем должна быть способна функционировать как во взаимосвязанном, так и в полностью автономном режиме [5, 6]. Таким образом, подсистемы автоматического мониторинга и управления должны оптимизировать функционирование климатического оборудования и быть легко интегрированы в систему диспетчеризации [7, 8].

Большой вклад в энергосбережение вносит система автоматического управления отоплением и горячим водоснабжением [9]. Например, установка системы автоматического регулирования на индивидуальном тепловом узле может снизить потребление тепла в административном

здании на 40 % и более в континентальных климатических условиях [10, 11]. Это связано, прежде всего, с графиком ежедневного и еженедельного использования площадей в административных зданиях. Когда такие помещения не используются, температура может понизиться до точки росы. Таким образом, это требует не только централизованного управления всем зданием, но и индивидуального динамического контроля температуры в каждом помещении в зависимости от графика его использования [8].

При централизованном управлении в индивидуальных тепловых узлах в основном регулируются два типа тепловой нагрузки: горячая вода и отопление. Для обоих типов тепловой нагрузки автоматическая система управления должна поддерживать заданные значения температуры горячей воды и воздуха в отапливаемых помещениях без изменений.

Отличительной особенностью управления отоплением является высокая тепловая инертность, в то время как инертность системы горячего водоснабжения значительно ниже [12, 13]. В связи с этим задача стабилизации температуры воздуха в отапливаемых помещениях значительно сложнее, чем задача стабилизации температуры горячей воды в системе горячего водоснабжения.

Основными возмущающими воздействиями являются внешние погодные условия: температура наружного воздуха, ветер, солнечная радиация.

Существуют следующие принципиально возможные схемы управления [14]:

- управление отклонением внутренней температуры помещений от заданного значения воздействием на поток воды, поступающей в систему отопления;

- контроль в зависимости от возмущения внешних параметров, приводящего к отклонению внутренней температуры от заданного значения;

- контроль в зависимости от изменения внешней и внутренней температуры (возмущения и отклонения).

При создании системы динамического отопления здания необходима разработка многоуровневой системы управления перераспределением потоков теплоносителя, что требует применения методов имитационного моделирования. Такая модель перераспределения потоков, имитирующая динамическую работу системы отопления, должна иметь возможность включения в эту модель динамических процессов изменения температуры отапливаемых помещений и функциональных блоков распределенной системы управления потоками теплоносителя и температурой помещений [14].

**Методы исследования.** При описании технологических процессов теплоснабжения используются расчетные схемы статики, описывающие начальные условия, и расчетные схемы динамики, описывающие переходные режимы. Расчетные схемы системы теплоснабжения определяют связи между входными и выходными воздействиями на объект регулирования при основных внутренних и внешних возмущениях.

Современное здание представляет собой сложную теплоэнергетическую систему, поэтому для описания температурного режима здания вводятся упрощающие допущения [15, 16]. Для высотных гражданских зданий существует локализация части здания, для которой выполняются расчеты. По мере изменения температурного режима в здании в зависимости от этажа, горизонтальной планировки помещений, вычисление температурного режима выполняется для одного или нескольких наиболее удачно расположенных помещений. Расчет конвективного теплообмена в помещении производится исходя из предположения,

что температура воздуха в каждый момент времени одинакова во всем объеме помещения. При определении теплообмена через наружные ограждения предполагается, что ограждение или его характерная часть имеют одинаковую температуру в плоскостях, перпендикулярных направлению потока воздуха. В этом случае процесс теплообмена через наружные ограждения описывается одномерным уравнением теплообмена.

Расчет теплообмена в помещении также позволяет сделать несколько упрощений [17]:

- воздух в помещении считается теплопроводящей средой;

- пренебрегается повторное отражение лучистых потоков от поверхностей;

- заменяются сложные геометрические формы на более простые.

При оценке параметров наружного климата необходимо учитывать следующее:

- если рассчитать температурный режим помещений при экстремальных значениях возможного наружного климата в данной местности, то тепловая защита стен здания и мощность системы управления микроклиматом обеспечат поддержание заданных условий;

- если будут приняты более мягкие требования, то в определенный момент времени в помещении будут наблюдаться отклонения от расчетных условий.

Продолжительность и инертность переходных процессов нагревания и охлаждения воздуха в элементах систем поддержания микроклимата оказывает существенное влияние на задержку температуры воздуха в помещении. Этот факт необходимо учитывать при проектировании алгоритмов автоматизированных систем управления микроклиматом. Зависимости переходных процессов в исследуемых элементах систем микроклимата в относительных значениях имеют характерный, не случайный вид и практически симметричны при нагреве и охлаждении воздуха [18]. Благодаря этому можно использовать регрессионный анализ экспериментальных данных для выявления функциональных зависимостей между различными параметрами. В свою очередь, это позволит реализовать следующий шаг построения системы управления – разработать специальную математическую модель того или иного исследуемого элемента системы поддержания микроклимата [19].

Основой для разработки имитационной модели перераспределения потоков теплоносителя является представление системы теплоснабжения здания в виде трехуровневой функциональной схемы (рис. 1), где  $X_{вх}$ ,  $X_{вых}$  – входные и выходные потоки от тепловой станции;  $Y_{вх}$ ,  $Y_{вых}$  – входные и выходные потоки во внутреннюю сеть от тепловой станции;  $Z_{вхi}$ ,  $Z_{выхi}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) – входные и выходные потоки к отопительным радиаторам от стояков, которые далее распределяются по потокам отдельных отопительных радиаторов.

Функциональная схема системы теплоснабжения здания подробно представлена на рис. 2.

На схеме модели показаны 3 стояка с 3 батареями, соединенными параллельно друг другу. Данная модель представляет собой упрощенное описание потоков теплоносителя от трубопровода центрального отопления к каждому отопительному радиатору на любой из трех стояков в здании. Модель масштабируется на любое количество стояков и радиаторов отопления.

В установленном режиме действуют следующие соотношения:

$$Z_{вх1} = Z_{вх11} + Z_{вх12} + Z_{вх13}; \quad (1)$$

$$Z_{вх2} = Z_{вх21} + Z_{вх22} + Z_{вх23}; \quad (2)$$

$$Z_{вх3} = Z_{вх31} + Z_{вх32} + Z_{вх33}; \quad (3)$$

$$Z_{вых1} = Z_{вых11} + Z_{вых12} + Z_{вых13}; \quad (4)$$

$$Z_{вых2} = Z_{вых21} + Z_{вых22} + Z_{вых23}; \quad (5)$$

$$Z_{вых3} = Z_{вых31} + Z_{вых32} + Z_{вых33}; \quad (6)$$

$$Y_{вх} = Z_{вх1} + Z_{вх2} + Z_{вх3}; \quad (7)$$

$$Y_{вых} = Z_{вых1} + Z_{вых2} + Z_{вых3}; \quad (8)$$

$$X_{вх} + Y_{вых} = X_{вых} + Y_{вх}. \quad (9)$$



Рис. 1. Трехуровневая функциональная схема системы теплоснабжения здания

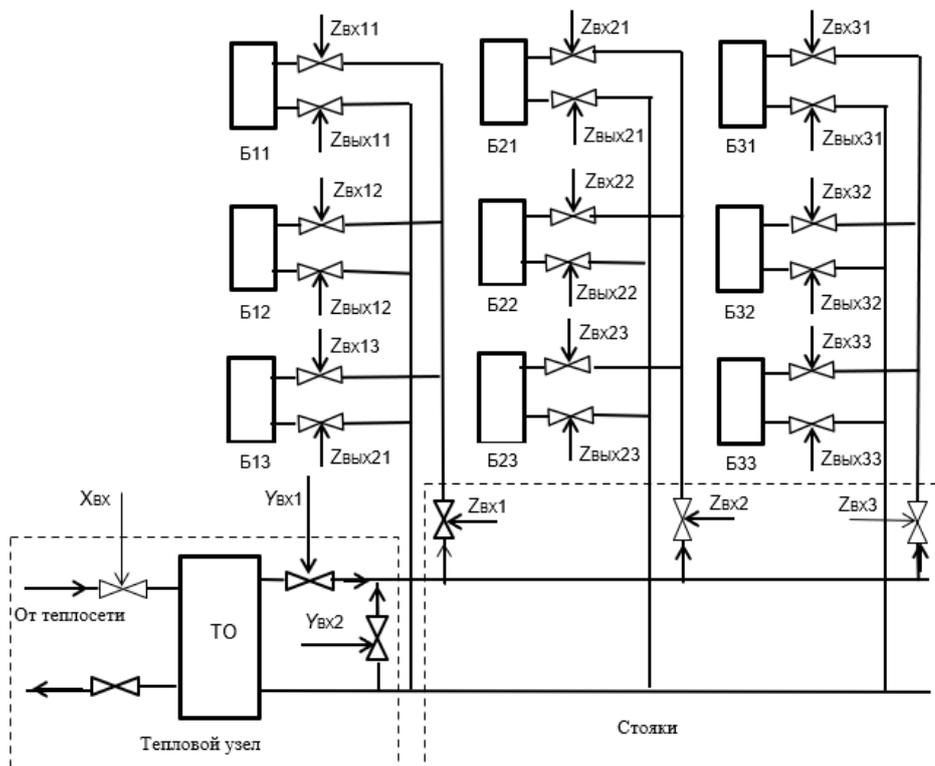


Рис. 2. Функциональная схема системы теплоснабжения здания в развернутом виде

Постоянные и переменные составляющие пропускной способности участка отопительной системы (трубопровод + батарея + запорно-регулирующая арматура – клапан) моделируются с помощью регулируемых и нерегулируемых клапанов в качестве основных параметров, например:

$$Z_{\text{вых}11} = Z_{\text{вх}11\text{с}} + Z_{\text{вх}11\text{д}} + Z_{\text{вх}11\text{в}}, \quad (10)$$

где  $Z_{\text{вх}11\text{с}}$  – постоянная составляющая, определяемая статическим сопротивлением потоку;  $Z_{\text{вх}11\text{д}}$  – переменная составляющая, определяемая динамической составляющей сопротивления потоку;  $Z_{\text{вх}11\text{в}}$  – переменная или регулируемая составляющая.

Переменные или регулируемые значения производительности клапанов определяются воздействием системы управления.

Реализация имитационной модели была выполнена на языке Delphi, что позволяет создавать потоковые модели как модели объекта управления. Это дает преимущества по сравнению с возможными аналогами, например программными системами моделирования AnyLogic или ANSYS. Разработанная модель легко комбинируется с модулями автоматического управления и позволяет вносить измене-

ния в алгоритм управления на этапе компиляции, а также в состояние системы в процессе моделирования.

В приведенном фрагменте представлены элементы теплового узла: ввод теплового потока от централизованной системы теплоснабжения, мощность теплообменника, вывод охлажденной воды обратно в централизованную систему и входной поток от стояков. Каждый элемент имеет такие характеристики, как входной и выходной потоки (пропускная способность), которые могут быть изменены «на лету», и объем теплоносителя для элементов системы теплоснабжения, которые могут его набирать.

На рис. 3 показан полный интерфейс модели отопительной системы с 3 стояками и 3 батареями, подключенными параллельно. Рядом с заданным значением каждой характеристики отображается ее текущее значение, которое изменяется вследствие динамического процесса перераспределения потоков.

Важно отметить еще раз, что модель является масштабируемой и при необходимости можно увеличить количество регулируемых элементов.

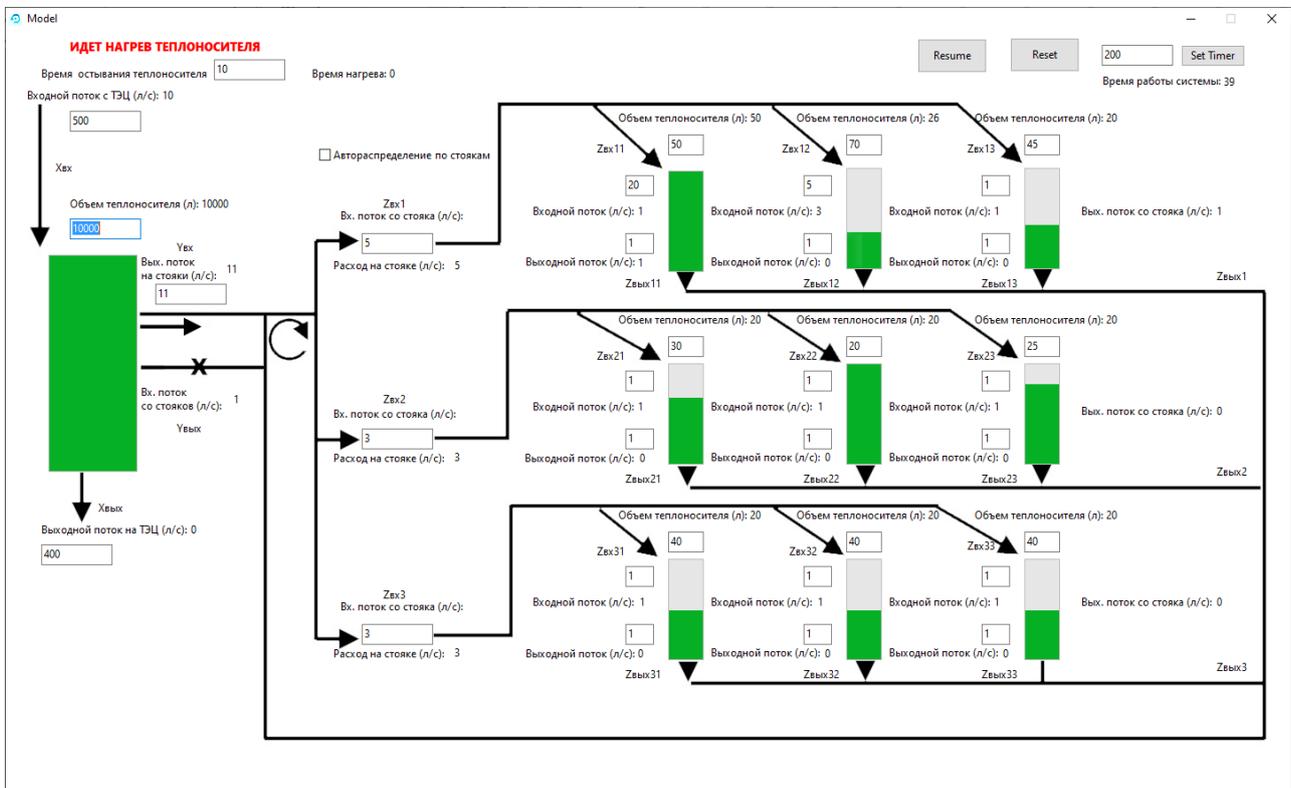


Рис. 3. Интерфейс имитационной модели перераспределения потоков теплоносителя

В верхней части экрана находятся следующие элементы: надпись «нагрев теплоносителя»/«охлаждение теплоносителя», в зависимости от процесса нагревания или охлаждения; характеристики «время охлаждения теплоносителя» (этот параметр показывает, за сколько циклов моделирования температура теплоносителя уменьшается до минимального уровня (значение динамически регулируется)) и «время нагрева» (рассчитывается автоматически, исходя из заданного объема теплоносителя в системе и мощности поступающего теплоносителя). В правом верхнем углу находится кнопка Start/Pause/Resume, которая запускает, приостанавливает и продолжает процесс моделирования. Кнопка Reset используется для сброса модели в состояние по умолчанию. Область ввода и кнопка Set Timer («Установить таймер») служат для установки времени системного цикла (по умолчанию интервал составляет 1000 мс). Ниже этого блока отображается время работы модели, измеренное в тактах.

**Результаты исследования.** Процесс имитационного моделирования происходит следующим образом. После того как система переключается в режим нагрева, таймер производит обратный отсчет. После того как система достигает нуля, она возвращается в режим охлаждения теплоносителем. Процесс заполнения определяется пропускными характеристиками стояков и радиаторов, а также мощностью радиаторов. Например, в случае превышения заданного суммарного расхода теплоносителя к радиаторам, который определяется выражением  $Z_{вх11} + Z_{вх12} + Z_{вх13}$ , скорость потока ограничивается пропускной способностью стояка.

После заполнения одного из радиаторов он переходит в режим прохождения потока теплоносителя через себя. Таким образом, поток теплоносителя для заполнения оставшихся панелей перераспределяется в зависимости от емкости оставшихся батарей. Кроме того, выходной поток от радиаторов идет на выходной поток в стояке, а затем в тепловой узел. Пока весь объем не будет заполнен теплоносителем, система будет находиться в режиме нагрева и принимать поток теплоносителя от внешней системы отопления  $X_{вх}$ .

После полного заполнения системы она переходит в режим охлаждения, время которого определено. В этот момент происходит внутренняя рециркуляция потока

теплоносителя, входной и выходной потоки стояков равны, забор и выход потока теплоносителя из резервуара теплового узла не осуществляется.

По окончании режима охлаждения система переходит в режим нагрева. Время работы этого режима определяется общим объемом теплоносителя внутри системы и характеристиками потока теплоносителя теплового узла.

На этом этапе модель начинает «забирать» нагретый теплоноситель из теплового узла и сбрасывать холодный. По окончании этого режима система возвращается в режим охлаждения и т.д.

Так как модель является динамической, то можно в любое время изменить характеристики потока и объем любого элемента системы. Эти изменения могут привести к преждевременному переходу в режим нагрева или охлаждения, что зависит от заданных характеристик. Как только баланс будет достигнут, система вернется к циклическому изменению режимов нагрева и охлаждения.

Кроме того, реализована возможность автоматического распределения потока теплоносителя по стоякам в зависимости от объема поступающего от теплового узла теплоносителя. Переключение этой функциональности реализуется с помощью переключателя «Автораспределение по стоякам». Когда система отопления полностью заполнена теплоносителем, она переключается в режим циклического нагрева/охлаждения, как описано выше.

Следует отметить, что включение автоматического перераспределения потоков по стоякам возможно в любой момент времени работы системы. В этом случае пропускная способность по водоразборным трубам изменится на оптимальную автоматически, в зависимости от текущего состояния системы.

Модель является открытой, поэтому можно ее дополнять модулями автоматического управления.

На рис. 4 представлен фрагмент модели локальной системы температурного контроля в зоне работы отопительной батареи, где  $T_z$  – сигнал задания требуемого значения температуры в зоне нагрева;  $T_k$  – комнатная температура;  $W$  – модель помещения (зоны нагрева), на которую влияет батарея и внешняя окружающая среда;  $SU$  – система управления температурой в помещении;  $Z_y$  – управляющий эффект.

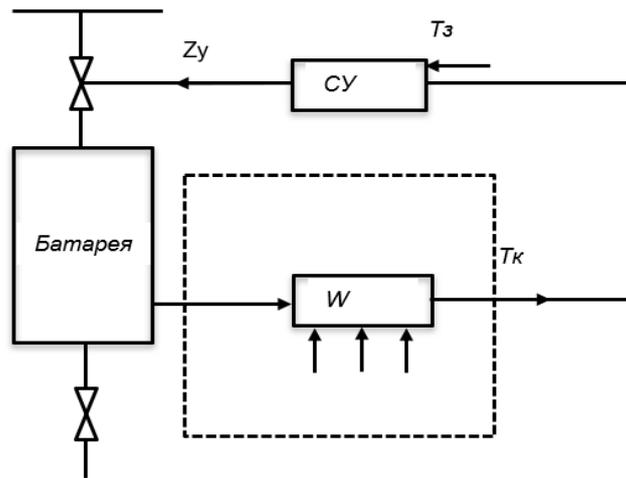


Рис. 4. Функциональная схема управления теплоснабжением в помещении

Согласно уравнениям теплового баланса для радиатора [8]:

$$T_H = \frac{(T_{ВХ} + T_{ВЫХ})}{2} - T_K; \quad (11)$$

$$P_{\text{бат}} = P_H \left( \frac{T_{\Phi}}{T_H} \right)^{1,3}. \quad (12)$$

С другой стороны,

$$Q = C m \Delta T = C V \rho (T_{ВХ} - T_{ВЫХ}); \quad (13)$$

$$P = \frac{Q}{t}. \quad (14)$$

В нашем случае можем принять

$$t = \frac{V}{Z}. \quad (15)$$

Тогда

$$P_H \left( \frac{T_{\Phi}}{T_H} \right)^{1,3} = \frac{C V \rho (T_{ВХ} - T_{ВЫХ})}{\frac{V}{Z}}; \quad (16)$$

$$P_H \left( \frac{T_{\Phi}}{T_H} \right)^{1,3} \frac{V}{Z} = C V \rho (T_{ВХ} - T_{ВЫХ}); \quad (17)$$

$$P_H \left( \frac{\frac{T_{ВХ} + T_{ВЫХ}}{2} - T_K}{T_H} \right)^{1,3} = C (T_{ВХ} - T_{ВЫХ}) Z; \quad (18)$$

$$\left( \frac{\frac{T_{ВХ} + T_{ВЫХ}}{2} - T_K}{T_H} \right)^{1,3} = K_{\text{бат}} Z (T_{ВХ} - T_{ВЫХ}). \quad (19)$$

Пусть

$$T_{\Phi} = \frac{T_{ВХ} + T_{ВЫХ}}{2}. \quad (20)$$

В результате преобразования получим зависимость

$$Z = \frac{\frac{T_{\Phi} - T_K}{T_H}}{K_{\text{бат}} (T_{ВХ} - T_{ВЫХ})}, \quad (21)$$

которую можно привести к виду

$$Z = \frac{T_{\Phi} - T_K}{K_{\text{бат}} T_H (T_{ВХ} - T_{ВЫХ})}, \quad (22)$$

где  $T_{\Phi} = (T_{ВХ} + T_{ВЫХ})/2$  – фактическая температура теплового потока;  $T_K$  – температура в помещении;  $T_H$  – номинальная температура теплоносителя;  $Z$  – мощность радиатора;  $T_{ВХ}/T_{ВЫХ}$  – входная/выходная температуры теплоносителя в батарее;  $K_{\text{бат}}$  – коэффициент батареи.

Данные зависимости позволяют моделировать процесс нагрева помещения от одной отопительной батареи.

**Выводы.** В связи с масштабностью работ по модернизации существующего технологического и измерительного оборудования, реконструкции энергетических объектов и реализации программ энергосбережения актуальность и практическая значимость моделирования систем отопления зданиями для решения задач управления значительно возрастает.

Следует также учитывать, что широкий спектр вариантов эксплуатации технических устройств отопления является предметом различных исследований, что необходимо для обобщенного представления технологических вариантов эффективного управления микроклиматом помещений.

Использование предлагаемой имитационной модели позволяет создать новый уровень исследования технологических процессов динамического управления

отоплением задания. Рассматриваемая модель позволяет имитировать перераспределение тепловых потоков в различных режимах работы системы отопления как всего здания, так и при локальном управлении температурой отдельных помещений. Отличительной особенностью модели является ее открытость, т.е. возможность оперативно изменять моделирование процессов теплопередачи и подключать функциональные блоки распределенной системы управления.

### Список литературы

1. **Распределяемая** энергия в России: Потенциал развития [Электронный ресурс] / А. Хохлов, Ю. Мельников, Ф. Веселови др. – Сколково, 2018. – 87 с. – Режим доступа: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/S EneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_DER-3.0\\_2018.02.01.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/S_EneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf) (дата посещения: 01.10.2019).
2. **Alahakoon D., Yu X.** Smart electricity meter data intelligence for future energy systems: a survey // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2016. – Vol. 12, No. 1. – P. 425–436. DOI:10.1109/TII.2015.2414355
3. **Software-defined** industrial Internet of Things in the context of Industry 4.0 / J. Wan, S. Tang, Z. Shu, et al. // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Vol. 16. – P. 7373–7380. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2565621
4. **Jayaram A.** An IIoT quality global enterprise inventory management model for automation and demand fore-casting based on cloud // Proc. Int. Conf. on Computing, Communication and Automation (ICCCA). – Greater Noida, India, 2017. – P. 1258–1263. DOI: 10.1109/CCAA.2017.8230011
5. **Mudialba P.J.** The impact of cloud technology on the automation of businesses // Proc. Int. Conf. on Platform Technology and Service (PlatCon). 2016. DOI: 10.1109/PlatCon.2016.7456831
6. **Optimal** solutions for substation automation: integrated system ASDTM/AIMSCME // Energoekspert. – 2009. – № 6. – P. 25–28.
7. **Smart** meter data analytics for distribution network connectivity verification / W. Luan, J. Peng, M. Maras // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2015. – Vol. 6, No. 4. – P. 1964–1971. DOI: 10.1109/TSG.2015.2421304
8. **Букин А.В., Тихонов Е.И.** Автоматизированная система управления и диспетчеризации объектов теплоэнергетики в Санкт-Петербурге // Отраслевой научно-технологический журнал «ISUP». – 2012. – Вып. 6(42). Имеется по адресу: <https://isup.ru/articles/3/3322/> (дата посещения: 12.05.2019).
9. **Староверов Б.А., Гнатюк Б.А.** Повышение эффективности автоматизированного коммерческого учета энергопотребления за счет внедрения функций прогнозирования // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6 – С. 10–15.
10. **Development** of a controller hardware-in-the-loop platform for microgrid distributed control applications / Y. Du, H. Tu, S. Lukic, et al. // IEEE Electronic Power Grid (eGrid). – 2018. DOI: 10.1109/eGRID.2018.8598696
11. **Староверов Б.А., Мозохин А.Е.** Структура и этапы построения автоматизированной системы управления электрическими сетями в масштабах региональной сетевой компании // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2018. – Вып. 3(84). – С. 55–62.
12. **Pongpun Urarungroj** – Low order boiler-turbine dynamic models and stress calculations in thermal power plant, January 1997. A thesis submitted to the University of New South Wales to fulfil the requirements for the degree of Master of Engineering. Available at National library of Australia, URL: <https://trove.nla.gov.au/>
13. **Chang** Chen – Dynamic modeling and control of hybrid ground source heat pump systems, May 2008. A thesis submitted to the Concordia University to fulfil the requirements for the degree of Master of Applied Science. Available at Library and Archives Canada, URL: <http://www.bac-lac.gc.ca>
14. **John Adam Dembecki.** Automatic Control of Hydro and Thermal Generation on a large Interconnected Power System (including continuous economic optimization), December 1964. A thesis submitted to the University of New South Wales to fulfil the requirements for the degree of Master of Engineering. Available at National library of Australia, URL: <https://trove.nla.gov.au/>
15. **Reference** architecture of smart grids. Version 2.0 [Electronic resource] // Microsoft Worldwide Group Power & Utilities. – 2013. – 320 p. – URL: [http://d2\\_rus.cigre.ru/doc/SERA\\_v2\\_ru\\_v2.1.pdf](http://d2_rus.cigre.ru/doc/SERA_v2_ru_v2.1.pdf) (date accessed: 01.10.2019).
16. **Automation** of substations for the construction of intelligent power [Electronic resource] // CISCO SYSTEMS, 2010. 5 p. URL: [cisco.com/web/RU/downloads/broch...po...podstancij.pdf](http://cisco.com/web/RU/downloads/broch...po...podstancij.pdf) (date accessed: 7.03.2020).
17. **Cloud** computing. Tadviser. State. Business. Information technology. – 2018. – 10 p. – URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Cloud\\_Computing](http://www.tadviser.ru/index.php/Cloud_Computing) (date accessed: 09.10.2019).
18. **Моделирование** тепловых условий эксплуатации в тепловых скважинах наземных систем теплоснабжения. Часть I: Процессы

пористого замораживания влаги в почве / Г.П. Васильев, Н.В. Песков, В.А. Личман и др. // Издательство Майк Наука/Интерпериодика (Российская Федерация). – 2015. – Вып. 62. – № 8.

19. Кузнецов Р.С., Чипулис В.П. Информационно-аналитические системы мониторинга, анализа и автоматического управления энергокомпаниями // Вестник ДВО РАН. – 2016. – Вып. 4. – С. 116–124.

## References

1. Khokhlov, A., Mel'nikov, Yu., Veselov, F., Kholkin, D., Datsko, K. *Raspredelyaemaya energiya v Rossii: Potentsial razvitiya* [Distributed Energy in Russia: Development Potential]. Skolkovo, 2018. 87 p. Available at: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_DER-3.0\\_2018.02.01.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf) (date accessed: 01.10.2019).
2. Alahakoon, D., Yu, X. Smart electricity meter data intelligence for future energy systems: a survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 425–436. DOI:10.1109/TII.2015.2414355
3. Wan, J., Tang, S., Shu, Z., Li, D., Wang, S., Imran, M., Vasilakos, A.V. Software-defined industrial Internet of Things in the context of Industry 4.0. *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, pp. 7373–7380. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2565621
4. Jayaram, A. An IIoT quality global enterprise inventory management model for automation and demand fore-casting based on cloud. *Proc. Int. Conf. on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*. Greater Noida, India, 2017, pp. 1258–1263. DOI: 10.1109/CCAA.2017.8230011
5. Mudialba, P.J. The impact of cloud technology on the automation of businesses. *Proc. Int. Conf. on Platform Technology and Service (PlatCon)*. 2016. DOI: 10.1109/PlatCon.2016.7456831
6. Optimal solutions for substation automation: integrated system ASDTM/AIMSCME. *Energoekspert*, 2009, no. 6, pp. 25–28.
7. Luan, W., Peng, J., Maras, M., Lo, J., Harapnuk, B. Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification. *IEEE Transactions on Smart Grid.*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 1964–1971. DOI: 10.1109/TSG.2015.2421304
8. Bukin, A.V., Tikhonov, E.I. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya i dispetcherizatsii ob'ektov teploenergetiki v Sankt-Peterburge* [Automated Control and Dispatching System for Thermal Power Engineering Facilities in St. Petersburg]. *Otraslevoy nauchno-tekhnologicheskij zhurnal «ISUP»*, 2012, issue 6(42). Available at URL: <https://isup.ru/articles/3/3322/> (date accessed: 12.05.2019).
9. Staroverov, B.A., Gnatyuk, B.A. Povyshenie effektivnosti avtomatizirovannogo kommercheskogo ucheta energopotrebleniya za schet vnedreniya funktsiy prognozirovaniya [Improving the efficiency of the automated commercial accounting of power consumption due to the introduction of the prediction functions]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 10–15.
10. Du, Y., Tu, H., Lukic, S., Lubkeman, D., Dubey, A., Karsai, G. Development of a controller hardware-in-the-loop platform for microgrid distributed control applications. *IEEE Electronic Power Grid (eGrid)*. 2018. DOI: 10.1109/eGRID.2018.8598696
11. Staroverov, B.A., Mozokhin, A.E. *Struktura i etapy postroeniya avtomatizirovannoy sistemy upravleniya elektricheskimi setyami v mashtabakh regional'noy setevoy kompanii* [The structure and stages of construction of the automated control system of power grids at the scale of regional network company]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, issue 3(84), pp. 55–62.
12. Pongpun Urarungroj – Low order boiler-turbine dynamic models and stress calculations in thermal power plant, January 1997. A thesis submitted to the University of New South Wales to fulfil the requirements for the degree of Master of Engineering. Available at National library of Australia URL: <https://trove.nla.gov.au/>
13. Chang Chen – Dynamic modeling and control of hybrid ground source heat pump systems, May 2008. A thesis submitted to the Concordia University to fulfil the requirements for the degree of Master of Applied Science. Available at Library and Archives Canada URL: <http://www.bac-lac.gc.ca>
14. John Adam Dembecki. *Automatic Control of Hydro and Thermal Generation on a large Interconnected Power System (including continuous economic optimization)*, December 1964. A thesis submitted to the University of New South Wales to fulfil the requirements for the degree of Master of Engineering. Available at National library of Australia URL: <https://trove.nla.gov.au/>
15. Reference architecture of smart grids. Version 2.0. Microsoft Worldwide Group Power & Utilities, 2013. 320 p. URL: [http://d2\\_rus.cigre.ru/doc/SERA\\_v2\\_ru\\_v2.1.pdf](http://d2_rus.cigre.ru/doc/SERA_v2_ru_v2.1.pdf) (date accessed: 01.10.2019).
16. Automation of substations for the construction of intelligent power. CISCO SYSTEMS, 2010. 5 p. URL: [cisco.com/web/RU/downloads/broch...po...podstancij.pdf](http://cisco.com/web/RU/downloads/broch...po...podstancij.pdf) (date accessed: 7.03.2020).
17. Cloud computing. Tadviser. State. Business. Information technology. 2018. 10 p. URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Cloud\\_Computing](http://www.tadviser.ru/index.php/Cloud_Computing) (date accessed: 09.10.2019).
18. Vasil'ev, G.P., Peskov, N.V., Lichman, V.A., Gornov, V.F., Kolesova, M.V. Modelirovanie teplovykh usloviy ekspluatatsii v teplovykh skvazhinakh nazemnykh sistem teplosnabzheniya. *Chast' I: Protsessy poristogo*

zamorazhivaniya vlagi v pochve [Simulating the thermal operating conditions in the thermal wells of ground-source heat-pump heat supply systems. Part I: Porous moisture freezing processes in soil]. *Izdatel'stvo Mayk Nauka/Interperiodika (Rossiyskaya Federatsiya)*, 2015, issue 62, no. 8.

19. Kuznetsov, R.S., Chipulis, V.P. Informatsionno-analiticheskie sistemy monitoringa, analiza i avtomaticheskogo upravleniya energokompaniyami [Information and analytical systems for monitoring, analysis and automatic control of energy utilities]. *Vestnik DVO RAN*, 2016, issue 4, pp. 116–124.