

УДК 62-5

Л.А. Мыльников, В.В. Носков, А.А. СидоровПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия;**ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
ЕЁ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА И ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ**

При переходе к сетям теплоснабжения 4-го поколения, предполагающих использование остаточной или выделяющейся в результате других видов деятельности тепловой энергии, повышаются требования к системам управления в сетях теплоснабжения и качеству таких решений. В статье рассмотрены вопросы выбора температурных режимов работы системы теплоснабжения при совместном использовании нагретого в котельной пара для поддержания технологического процесса и отопления группы зданий. Целью статьи является построение модели, позволяющей принимать решения об объемах выработки тепловой энергии, и схемы подачи в систему теплоснабжения группы зданий при паровом отоплении и в условиях параллельного использования этой энергии в производственном процессе. Для достижения поставленной цели были построены характеристическая кривая для системы теплоснабжения и алгоритм принятия управленческих решений на ее основе, позволяющие минимизировать отклонение температуры теплоносителя от нормативной в условиях изменения температуры уличной среды. Характеристическая кривая была получена на основе статистических данных. Использование предложенного в статье подхода позволило не только минимизировать отклонение значения температуры теплоносителя от целевого, но и показало при проверке на ретроспективных данных экономию тепловой энергии в объеме не менее 30 Гкал в среднем за отопительный период, а также при использовании данных прогноза уличной температуры позволило добиться плавного изменения режима работы оборудования, что даст дополнительную экономию и снизит его износ. Предложенный в статье подход не накладывает ограничений на тип используемого оборудования и структуру системы теплоснабжения.

Ключевые слова: статистическая модель, котельная, тепловая энергия, управление, характеристическая кривая, алгоритм.

L.A. Mylnikov, V.V. Noskov, A.A. Sidorov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE IMPROVEMENT OF CONTROL PERFORMANCE
OVER STEAM HEAT SUPPLY THAT CONCURRENTLY
PROVIDES TECHNOLOGICAL PROCESS
AND THE HEATING OF BUILDINGS**

The change-over to the 4th generation heat supply networks, according to which residual heat or the heat that is given out as a result of other activities is used, places high requirements to control systems in heat supply networks and to the quality of decisions. The paper considers the issues of selecting temperature rates for heat supply operation by the joint use of boiler plant steam for technological process and the heating of a group of buildings. The paper is aimed at building a model that allows to make decisions about the capacity of heat production and energy feed scheme for heat supply in a group of buildings by steam heating and in the conditions of parallel use of this energy in production process. In order for the set goal to be achieved, a performance curve has been built for heat supply system and the algorithm for managerial decision making has been worked out, correspondingly, which allow to minimize heat-transfer agent temperature deviations from target temperature in the conditions of changed ambience temperature. The performance curve was obtained on the base of statistical data. The use of the suggested approach helped not only minimize the deviations of heat-transfer agent temperature value from the target one, but also after being verified on the base of retrospective data demonstrated the average saving of energy of no less than 30 Gcal/heating period. Besides, the use of ambience temperature forecast data helped obtain a smooth change in equipment performance mode that will provide additional saving and will reduce the wearing of equipment. The proposed approach does not place restrictions on the type of equipment used and the structure of heat supply system.

Keywords: model, boiler plant, heating, control, performance diagram, algorithm.

Введение. Эффективное использование энергетических ресурсов является важной задачей в связи с использованием в подавляющем большинстве случаев невозобновляемых энергоресурсов (около 90 % используемых энергоресурсов составляют невозобновляемые источники). Их применение обусловлено высоким энергетическим потенциалом и относительной доступностью, однако их количество сокращается, что ведет к увеличению их стоимости. Особенно остро данная проблема стоит у крупных предприятий, в производственной деятельности которых расходуется большое количество тепловой энергии.

В целях экономии энергетических ресурсов разрабатываются методы перехода на новые способы генерации энергии (термальная энергия, энергия ветра), на использование вторичных ресурсов для генерации энергии (отходы, побочные и промежуточные продукты технологических установок, которые используются полностью или частично

для энергоснабжения других потребителей), на использование остаточной тепловой энергии от других видов производства (которая появляется как дополнительный эффект от определенных видов деятельности), на использование объединения разрозненных систем центрального теплоснабжения в единую сеть со многими источниками тепловой генерации и т.д. Такие подходы к экономии тепловой энергии лежат в основе концепции системы теплоснабжения 4.0 [1] и требуют новых принципов управления генерирующими тепловую энергию мощностями и системой распределения тепловой энергии.

Для выбора режимов работы и управления системами теплоснабжения в настоящее время применяют такие механизмы управления, как управление по отклонению, программно-целевое управление.

Система центрального теплоснабжения рассматривается как совокупность теплообменных устройств, функционально объединенных в единую систему генерации, транспорта, распределения и потребления теплоты. При использовании аналитического подхода модель формализуется в виде дифференциальных уравнений, описывающих процессы нестационарного теплообмена между ними. Процесс изучения динамических свойств элементов системы связан с использованием преобразования Лапласа и аппроксимации полученных выражений более простыми дробно-рациональными функциями. Задача управления связана с использованием теории линейных систем автоматического регулирования, что позволяет определять режимы наибольшего влияния центрального теплоснабжения на систему в целом [2], искать особенности моделей и определять на моделях способы улучшения управления процессами системы теплоснабжения [3], а также решать другие задачи управления.

Широкое распространение получили модели, основанные на формализациях, опирающихся на использование принципа подобия процессов (например, электроанalogии и гидроанalogии), которые особенно удобны для расчета отдельных элементов систем теплоснабжения. Однако применение их в условиях АСУ ТП часто вызывает трудности, связанные с реализацией комплексной модели системы, так как реализация АСУ ТП предполагает единый подход ко всем элементам системы управления, который должен быть реализован на цифровых и управляющих машинах.

Очевидно, что получаемые модели должны быть адекватны и при этом максимально просты для их реализации и использования. Однако многие возмущающие воздействия, которые наблюдаются в системах теплоснабжения, носят вероятностный характер за счет стохастической природы некоторых тепловых возмущений (см., например, анализ теплотребления зданий по данным узлов учета, приведенный в [4]). Поэтому в данной области нашли применение и вероятностно-статистические методы, использование которых сводится к рассмотрению нестационарных факторов как параметров аналитических моделей, формализованных часто в виде линейных дифференциальных уравнений [4].

Упомянутые подходы предполагают относительную неизменность характеристик элементов системы управления. Но так как любая функционирующая система находится в той или иной мере в процессе развития и реконструкции, а некоторые свойства объекта управления за счет старения, износа, зарастания трубопроводов и т.д. с течением времени меняются, возникает необходимость корректировки модели в процессе эксплуатации.

Таким образом, часто оказывается недостаточно построить модель, ее необходимо подстраивать к конкретному текущему состоянию объекта управления. Такой подход может быть реализован с помощью методов адаптивного управления и статистических моделей.

Динамические свойства некоторых элементов систем теплоснабжения определяются факторами, доступными прямому измерению (температура, давление и т.п.). Если известно, как должен настраиваться регулятор в зависимости от этих факторов, можно применять прямой метод настройки или адаптацию по разомкнутому циклу. В этой схеме адаптации сигналы обратной связи, идущие от замкнутого контура управления к регулятору, отсутствуют, а механизм управления сводится к ситуационному управлению [5], что позволяет решать в том числе и такие задачи, как компенсация возмущения для температурного режима зданий за счет изменения температуры наружного воздуха [6], а также задачу экономии энергоресурсов [7].

Сложившийся к настоящему времени подход к управлению такими системами – это управление на основе ПИД-регулятора, который управляет регулированием подачи объема тепловой энергии на основе обработки данных обратной связи (температуры в помещении и воды

в системе ГВС). Недостатком такого подхода в условиях холодных зим является запаздывание реакции системы на изменение температуры и, как следствие, повышенный расход энергии для восстановления целевого значения температуры [8]. Существуют системы пытающиеся учитывать инертность на базе использования регуляторов [9].

В связи с этим в настоящее время предпринимаются попытки использования интеллектуальных технологий для разработки систем управления. Например, в статье [10] рассматривается принцип построения модели регулирования тепловыми технологическими процессами, которые являются нелинейными, с запаздыванием по времени и наличием инерционности звеньев регулирования. Объект управления описывается упрощенной моделью в виде нелинейных дифференциальных уравнений, а неполнота данных и неточности характеристик, связанные с нестабильностью параметров системы, вынуждают авторов применять принципы нечеткого управления. В этом случае для разработки закона регулирования используется нечеткий логический регулятор.

Использование нейрорегуляторов ставит проблему обучения. В статье [11] рассматривается обучение регулятора методом Нелдера – Мида и показано, что применение нейронных ПИД-регуляторов может являться эффективным способом управления в некоторых задачах. Однако при использовании таких алгоритмов существует проблема переобучения и недообучения, что в условиях постоянного появления новых данных становится проблемой, приводящей к тому, что система управления становится невосприимчивой к новым данным или, наоборот, чрезмерно чувствительной.

В отдельных случаях находит применение метод имитационного моделирования, при использовании которого для каждого элемента системы строится своя модель, а также концепция мультиагентных систем (MAS) [12]. Использование данных подходов позволяет исследовать свойства системы путем многократного моделирования (на основе метода Монте–Карло) и получать решения, учитывая вероятностную природу отдельных явлений [13].

При дискретном управлении хороших результатов можно достичь при использовании методов машинного обучения для построения моделей системы [14]. При этом использование таких статистических моделей теоретически не обосновывается, а аналитические модели обладают высокой сложностью и громоздкостью, что затрудняет их

применение на практике. В связи с этим пытаются применить комбинированные модели. Структура модели при этом определяется на основе аналитических соображений, а значения коэффициентов – на основе статистического подхода. Такой принцип совмещения подходов позволяет реализовывать принцип предиктивного управления [15] в пределах скользящего горизонта прогнозирования при заданном графике изменения температуры во времени на основе критерия оптимальности [16], а также при условии, что модель уточняется в процессе поступления новых статистических данных, накапливаемых в процессе работы, и согласно требованиям ко времени проведения расчетов (оно должно быть меньше, чем время, необходимое для принятия решения).

1. Описание объекта управления и постановка задачи управления. Большое количество производственных процессов требует использования пара. В целях экономии тепловой энергии на многих предприятиях его используют для отопления производственных помещений и производственных бюро. К таким помещениям применяются те же нормативы по отоплению, что и к жилым помещениям. Поэтому прямого использования остаточного тепла может быть или недостаточно, или оно может быть избыточным. Тогда задача состоит в том, чтобы определить объем избыточного тепла, который может быть использован для других нужд или утилизирован, или же объем теплоты, который необходимо выработать дополнительно для достижения нормативных значений. Одним из примеров таких производств является производство строительных конструкций из бетона. Технологический процесс требует использования пара, который при использовании в качестве теплоносителя распространяется по системе теплоснабжения намного быстрее воды. Эффектом инерции при доставке тепла в этом случае можно пренебречь. Энергоемкости пара может быть достаточно для отопления зданий и производства теплой воды для бытовых нужд. Для этого нужно поддерживать его энергообеспеченность на необходимом уровне, который зависит от температуры окружающей среды. Таким образом, указанный способ дополнительного использования пара требует наличия дополнительного источника тепла для компенсации недостатков тепловой энергии и алгоритма определения этого уровня.

Рассмотрим систему теплоснабжения одного из предприятий, обладающую указанными свойствами (рис. 1).

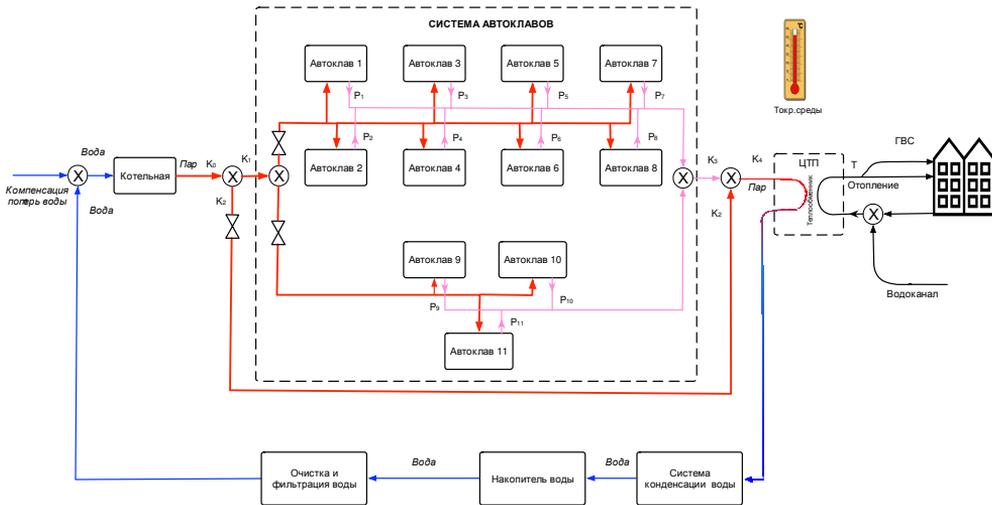


Рис. 1. Схема системы теплоснабжения офисных зданий и потребления пара технологическим процессом: P_1, P_2, \dots, P_{11} – объем вторичной тепловой энергии на выходе каждого автоклава (Гкал), K_1 – объем тепловой энергии, который направляется на вход группы автоклав (Гкал), K_2 – объем тепловой энергии, которая является подпиткой (Гкал), K_3 – объем тепловой энергии на выходе автоклавов (Гкал), K_4 – объем тепловой энергии, которая направляется в теплообменник (Гкал), K_0 – общий объем тепловой энергии, поступающий в систему (Гкал), T – температура теплоносителя в системе отопления и ГВС ($^{\circ}\text{C}$)

Получаемая тепловая энергия для решения задачи отопления и снабжения теплой водой является побочной тепловой продукцией производственного процесса. Особенностью технологического процесса является его сменный цикл работы, который зависит от производственного плана. План определяет требуемое количество выпускаемой продукции. Поэтому в зависимости от «загрузки» объекта возникают проблемы эффективного распределения и регулирования тепловой энергии, отходящей к потребителям. В тех случаях, когда производство «загружено», объект производит тепла больше. Также нередки случаи, когда на производстве наблюдается «затишье», и потребитель получает меньше тепла, чем требуется. Тогда нехватка тепловой энергии восполняется прямой подпиткой пара от котельной (K_2).

Учитывая, что скорость распространения пара выше, чем воды, а инертность его температуры ниже, можно принять, что $K_1 = K_3$.

Таким образом, искомой величиной станет значение K_2 , приводящее к целевому значению K_4 и величины вырабатываемого объема

тепловой энергии K_0 в зависимости от температуры $T_{\text{окр.среды}}$ и загрузки технологического процесса, характеризуемого величиной K_1 .

2. Методология решения задачи. На рис. 2, *а* показана зависимость температуры окружающей среды от целевой температуры теплоносителя в системе теплоснабжения, а в журналах учета собрана информация об объемах вырабатываемой тепловой энергии, о температуре на улице и температуре теплоносителя. Наличие статистических данных позволяет определить особенности протекающих в системе теплоснабжения процессов (например, на рис. 2, *б* приведена зависимость объемов вырабатываемой энергии от температуры окружающей среды).

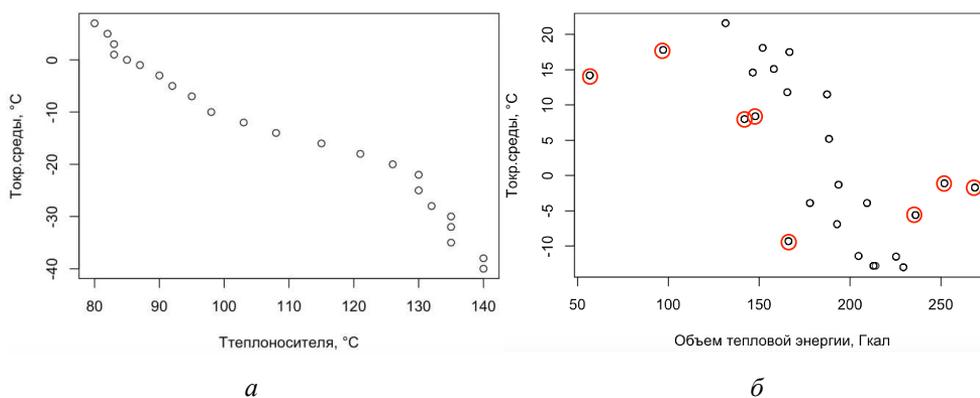


Рис. 2. Целевые значения температуры теплоносителя в зависимости от температуры окружающей среды (*а*) и пример статистических данных, показывающий зависимость количества вырабатываемой теплоты от температуры окружающей среды (*б*)

Статистические данные собираются постоянно (не только во время отопительного сезона), кроме этого, известно, что периодически для работы котельной выбираются режимы с избыточным значением вырабатываемой теплоты или недостаточным режимом вырабатываемой теплоты. Тогда, зная целевые значения теплоносителя для отопления зданий, можно идентифицировать значения, которые примем как недостоверные (значения, обведенные красными точками, очевидно, дают слишком холодные или слишком горячие режимы работы, так как сильно отстоят от основного скопления значений), и построить характеристические кривые на основе остальных значений (имеющих наибольшую «кучность» для исследуемых тепловых режимов) методом регрессии [17].

Получение характеристических кривых статистическими методами позволяет учитывать особенности протекающих процессов и струк-

туры системы теплоснабжения. Учитывая особенности объекта управления: использование тепловой энергии, передающейся с помощью пара (его быстрое распространение); фиксированное значение давления в системе; выработку именно необходимого количества энергии в контуре подпитки (передающем количество теплоты K_2), можно использовать релейное управление. В этом случае алгоритм управления процессом теплоснабжения будет выглядеть, как приведено на рис. 3.

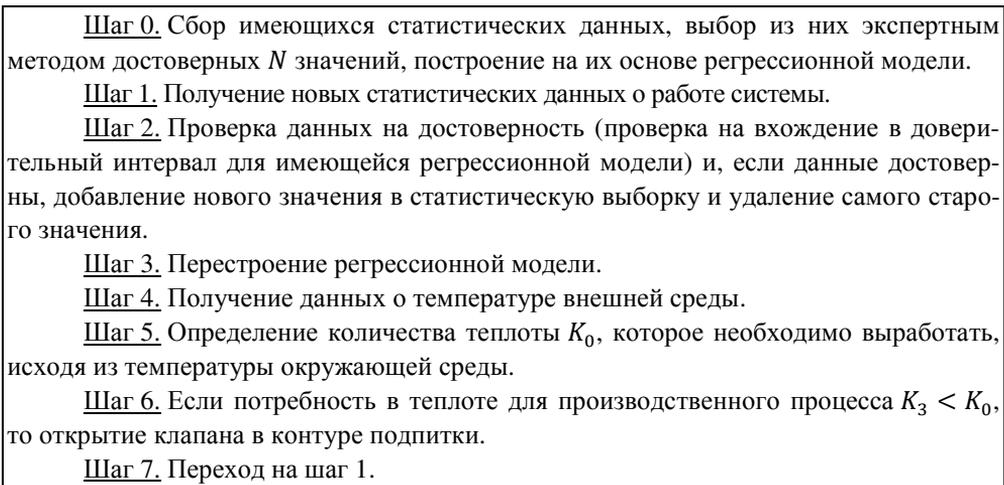


Рис. 3. Алгоритм определения управления теплоснабжением офисных помещений по схеме, приведенной на рис. 1

Применение приведенного алгоритма позволит собирать данные о реакции системы в режимах, близких к оптимальным. В связи с этим количество статистических данных, близко расположенных к построенным характеристическим кривым, увеличится и алгоритм (рис. 3) будет повышать точность описания характеристических зависимостей и точность своей работы. При этом возникает другая задача, связанная с определением количества используемых статистических значений N (или интервала времени в прошлое, или количества значений для каждого сочетания значений параметров) для построения модели. От количества этих значений будет зависеть то, насколько быстро будет меняться характеристическая кривая (модель будет переобучаться) в случае появления новых данных и изменения характера поведения системы (например, после ремонта или замены технологического оборудования).

Процесс управления сводится к определению количества вырабатываемой тепловой энергии в зависимости от целевой температуры

теплоносителя, которая, в свою очередь, зависит от температуры окружающей среды (см. рис. 2, а). На основе характера распределения статистических данных выдвинем гипотезу, что зависимость температуры теплоносителя от объема вырабатываемой тепловой энергии будет описываться S-образной кривой [18]. На рис. 4 показаны кривые Перла и Гомперца, построенные на основе имеющихся статистических данных.

Кривые были получены при смещении начала координат в точку $T_{\text{теплоносителя}} = 80$, объем тепловой энергии = 140, и приняли следующий вид:

- кривая Перла: $y = \frac{60}{1 + 131,77623341 \cdot e^{0,06490475 \cdot x}}$;
- кривая Гомперца: $y = 60 \cdot e^{-17,5553716 \cdot e^{-0,0436332}}$.

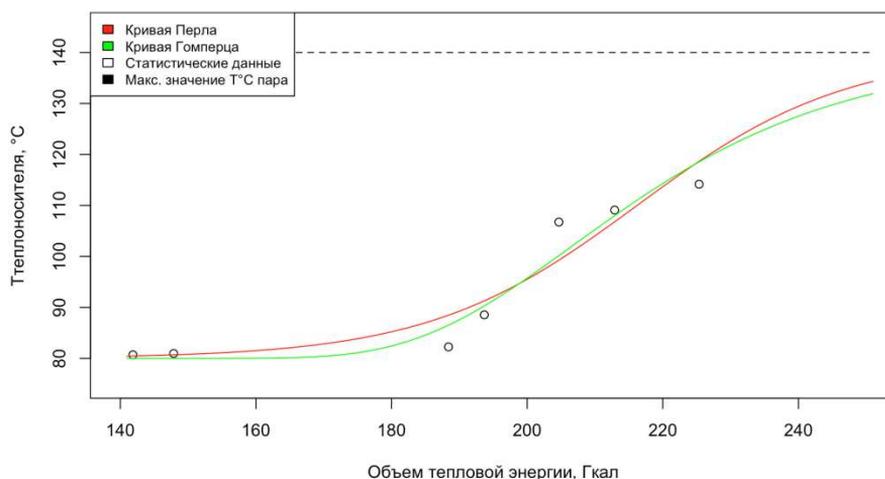


Рис. 4. Характеристическая кривая выработки тепловой энергии

Для проверки значимости моделей будем производить сравнение результатов прогнозирования, определяемых с помощью полученных характеристических кривых со статистическими значениями. Для этого использование качественных критериев согласия не эффективно, так как они дают отрицательный результат при большом количестве данных. Поэтому необходимо использование параметрических критериев, дающих численную оценку значимости гипотезы, оценку точности (ассигасу) или ROC-кривую [19]. Рассмотрим сравнение гипотез на основе критерия Фишера. Для его вычисления найдем значения:

$$F = \frac{S_y^2}{S_{y^*}^2} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^* - \bar{y}^*)^2},$$

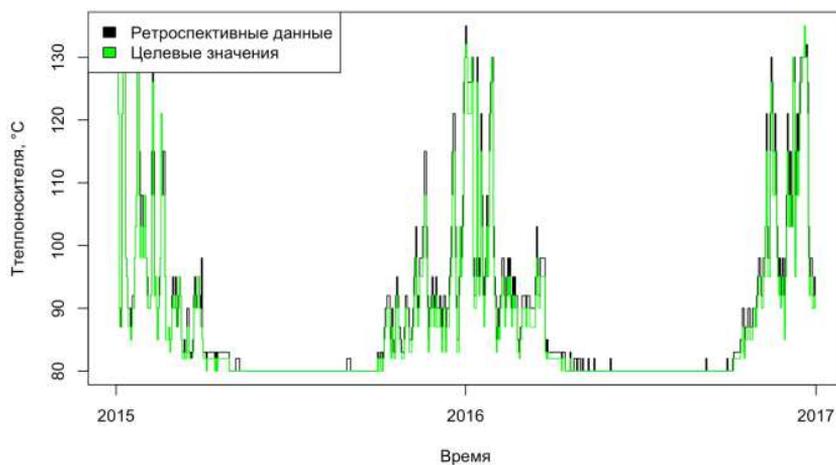
где n – количество точек в сопоставляемых выборках, y_i – значения, получаемые с помощью полученных функциональных описаний, y_i^* – статистические значения. По значению F и количеству степеней свободы $(n - 1)$ определим значение вероятности принятия гипотезы (p) и сделаем вывод о значимости гипотезы. Для этого необходимо, чтобы $p > 0,5$.

Полученные кривые проходят проверку по критерию Фишера со значениями для $p = 0,5786$ для кривой Перла и $p = 0,5582$ для кривой Гомперца. Тогда в качестве рабочей гипотезы для функционального описания для построения характеристической кривой возьмем кривую Перла. Задача управления сведется к уточнению значений их коэффициентов и определению величины вырабатываемой тепловой энергии на основе значений прогнозов уличной температуры с упреждением времени, необходимым для изменения режима работы котельной.

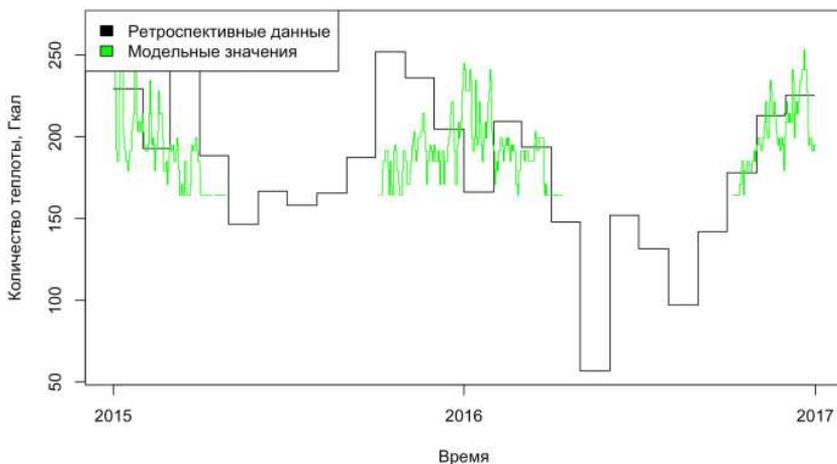
Таким образом, для обеспечения работы системы теплоснабжения будут реализованы принципы адаптивности и предиктивного управления на основе дискретного управления системой теплоснабжения.

3. Результаты и дискуссия. На рис. 5, а показана разница между целевой температурой и ретроспективными данными. Визуальный анализ показывает, что наблюдаются отклонения фактических значений как в большую, так и меньшую сторону. Если при отклонении значений в большую сторону значение температуры может быть скорректировано в ЦТП, то при отклонении в меньшую сторону температура в отапливаемых помещениях будет ниже комфортной. Используя целевые значения температуры, можно определить на основе характеристической кривой целевые значения для объемов вырабатываемой теплоты (рис. 5, б) во время отопительного сезона.

Посчитав средние значения отклонений объемов вырабатываемой тепловой энергии в отопительные периоды, получим, что при анализе имеющихся статистических данных во время первого отопительного сезона было выработано избыточно 101,015 Гкал, во время второго отопительного сезона 36,19647 Гкал, и во время третьего 31,98221 Гкал. Если принять стоимость Гкал согласно рыночной цене = 1200 руб/Гкал (на самом деле котельная несет затраты только по ее производству, которые складываются из затрат газа, воды и обслуживания оборудования), то экономический эффект от использования предложенного подхода к управлению по сезонам соответственно: 121217 руб. 90 коп., 43435 руб. 76 коп., 38378 руб. 65 коп.



а



б

Рис. 5. Сравнение результатов управления: а – разница между целевой температурой и ретроспективными данными, б – среднемесячные значения выработки теплоты и модельные значения, позволяющие достичь целевого значения температуры

Этот дополнительный эффект наблюдается без оптимизации работы котельной только за счет экономии на выработке тепловой энергии. При этом мы видим, что колебания значения температуры становятся менее резкими (см. рис. 5, а), а учитывая, что мы за счет использования прогнозов уличной температуры начинаем производить повышение или понижение объемов вырабатываемой теплоты заранее, то мы еще и избегаем резких колебаний в работе оборудования, что должно давать дополнительную экономию и меньше сокращать ресурс его работы.

Выводы. В статье показано, каким образом может быть построена система управления на основе данных прогнозирования и статистических моделей на основе принципа предиктивного управления по уличной температуре. В научной литературе есть данные, что такие модели в системах с инертностью дают больший эффект, чем широко используемый подход на основе ПИД-регулирования [7]. При этом в таких системах, как в системе, рассматриваемой в статье, использование принципа управления по отклонению неэффективно в связи с тем, что это будет оказывать негативное влияние на производственный процесс за счет большого количества колебаний значений температуры пара.

Реализация описанного подхода основана на использовании модели и алгоритма на ее основе, которая может быть представлена как в виде системы, реализованной на ЭВМ [18], которую запускает оператор для определения необходимых значений по выработке тепла с периодом, равным периоду инертности, и последующей их установкой на используемых котлах либо реализации на основе программируемых контроллеров, использующих промышленные ОС и подключенных к ним элементам автоматики.

Несмотря на то, что предложенный подход позволяет учитывать специфику системы и может использоваться в системах управления, в отличие от моделей и систем, позволяющих изучать процессы теплообмена, основанные на физических принципах, его недостатком является непригодность для проектирования новых систем и предварительной оценки влияния на протекающие процессы изменений, вносимых в конфигурацию системы теплоснабжения и котельной [20].

Библиографический список

1. Volkova A., Mašatin V., Siirde A. Methodology for evaluating the transition process dynamics towards 4th generation district heating networks // Energy. – 2018. – (150). – P. 253–261.

2. Карев Д.С., Мельников В.М. Математическое моделирование тепловых сетей закрытых систем централизованного теплоснабжения // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 444–451.

3. Денисенко Ю.Н., Панферов В.И. К теории моделирования систем отопления // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер. Строительство и архитектура. – 2008. – № 12(112). – С. 43–48.

4. Исследование нестационарных тепловых режимов отопления зданий и сооружений / В.В. Афанасьев [и др.] // Вестник Чуваш. ун-та. – 2015. – № 1. – С. 20–28.

5. Похоренков А.М., Качала Н.М. Исследование адаптивных свойств систем теплоснабжения при реализации методом нечеткого управления // Вестник Мурман. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 1(16). – С. 157–165.

6. Панферов С.В., Панферов В.И. Адаптивное управление отоплением зданий // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – № 5(149).

7. Савин Д.В., Дроздов В.Г. Современный подход к системам автоматического управления отопления зданий // Технические науки – от теории к практике. – 2014. – № 30. – С. 51–56.

8. Использование динамических предиктивных моделей для управления техническими системами с инертностью / Л.А. Мыльников [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 26. – С. 77–91.

9. Федоров С.С. Автоматизация процесса управления системой теплоснабжения зданий при зависимом присоединении к тепловым сетям // Научный Альманах. – 2015. – № 9(11). – С. 870–874.

10. Соловьев В.А., Черный С.П. Оптимизация распределения функций принадлежности при синтезе нечеткого регулятора для систем управления тепловыми процессами // Информатика и системы управления. – 2003. – № 1(5). – С. 73–82.

11. Дунаев М.П., Куцый Н.Н. Параметрическая оптимизация автоматической системы регулирования автоклава с двумя ПИД-нейро-регуляторами // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. – 2017. – № 4(123) (21). – С. 67–74.

12. Wooldridge M.J. An introduction to multiagent systems. – New York: J. Wiley, 2002. – 348 p.

13. Moghaddam K.S. Supplier selection and order allocation in closed-loop supply chain systems using hybrid Monte Carlo simulation and goal programming // International Journal of Production Research. – 2015. – № 20(53). – P. 6320–6338.

14. Top 10 algorithms in data mining / X. Wu [и др.] // Knowledge and Information Systems. – 2008. – № 1(14). – P. 1–37.

15. Model Predictive Control applied for building thermal control // Proceedings of Int Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) / G. Neculoiu [и др.] // Int Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) / Int Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION). – 2015. – P. 363–368.

16. Тверской М.М., Румянцев Д.В. Управление тепловым режимом зданий при комбинированной системе отопления // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – № 4(13). – С. 4–15.

17. Mylnikov L.A., Kulikov M.V., Krause B. The selection of optimal control of the operation modes of heterogeneous duplicating equipment based on statistical models with learning // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – № 9(9). – P. 1516–1526.

18. Мыльников Л.А. Поддержка принятия решений при управлении инновационными проектами. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2011. – 145 с.

19. Comparison of Different Classification Algorithms for the Detection of User's Interaction with Windows in Office Buildings / R. Markovic [и др.] // Energy Procedia. – 2017. – (122). – P. 337–342.

20. A comparative study of two simulation tools for the technical feasibility in terms of modeling district heating systems: An optimization case study / A. Dahash [и др.] // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2019. – (91). – P. 48–68.

References

1. Volkova A., Mašatin V., Siirde A. Methodology for evaluating the transition process dynamics towards 4th generation district heating networks. *Energy*, 2018, (150), pp. 253-261.

2. Karev D.S., Mel'nikov V.M. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh setej zakrytykh sistem cen-tralizovannogo teplosnabzhenija [Mathematical modeling of heat networks of closed centralized heat supply systems]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*, 2011, no. 7, pp. 444-451.

3. Denisenko Iu.N., Panferov V.I. K teorii modelirovaniia sistem otopeniia [To the theory of modeling of heating systems]. *Vestnik Iuzhno-*

Ural'skogo gosudarstvennogo universitetata. Stroitel'stvo i arkhitektura, 2008, no. 12(112), pp. 43-48.

4. Afanas'ev V.V. et al. Issledovanie nestatsionarnykh teplovykh rezhimov otopleniia zdanii i sooruzhenii [Study of non-stationary thermal conditions of heating of buildings and structures]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 20-28.

5. Pokhorenkov A.M., Kachala N.M. Issledovanie adaptivnykh svoystv sistem teplosnabzheniia pri realizatsii metodom nechetkogo upravleniia [Study adaptive properties heating systems in implementing the method of fuzzy control]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 1(16), pp. 157-165.

6. Panferov S.V., Panferov V.I. Adaptivnoe upravlenie otopleniem zdanii [Adaptive building heating control]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie*, 2014, no. 5(149).

7. Savin D.V., Drozdov V.G. Sovremennyi podkhod k sistemam avtomaticheskogo upravleniia otopleniia zdanii [A modern approach to building automatic heating control systems]. *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike*, 2014, no. 30, pp. 51-56.

8. Myl'nikov L.A. et al. Ispol'zovanie dinamicheskikh prediktivnykh modelei dlia upravleniia tekhnicheskimi sistemami s inertnost'iu [Using dynamic predictive models for controlling inertness technical systems]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 26, pp. 77-91.

9. Fedorov S.S. Avtomatizatsiia protsessa upravleniia sistemoi teplosnabzheniia zdanii pri zavisimom prisoedinenii k teplovym setiam [Automation of the process of managing the heat supply system of buildings with a dependent connection to the heat network]. *Nauchnyi Al'manakh*, 2015, no. 9(11), pp. 870-874.

10. Solov'ev V.A., Chernyi S.P. Optimizatsiia raspredeleniia funktsii prinadlezhnosti pri sinteze nechetkogo regulatora dlia sistem upravleniia teplovymi protsessami [Optimization of the distribution of membership functions in the synthesis of a fuzzy controller for thermal process control systems]. *Informatika i sistemy upravleniia*, 2003, no. 1(5), pp. 73-82.

11. Dunaev M.P., Kutsyi N.N. Parametricheskaia optimizatsiia avtomaticheskoi sistemy regulirovaniia avtoklavom s dvumia PID-neiroregulatorami [Parametric optimization of an automatic control system by auto-

clave with two PID neuro-regulators]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 4 (123), pp. 67-74.

12. Wooldridge M.J. An introduction to multiagent systems. New York: J. Wiley, 2002. 348 p.

13. Moghaddam K.S. Supplier selection and order allocation in closed-loop supply chain systems using hybrid Monte Carlo simulation and goal programming. *International Journal of Production Research*, 2015, no. 20(53), pp. 6320-6338.

14. Wu X. et al. Top 10 algorithms in data mining. *Knowledge and Information Systems*, 2008, no. 1(14), pp. 1-37.

15. Neculoiu G. et al. Model Predictive Control applied for building thermal control // Proceedings of Int Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) // Int Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) / Int Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION), 2015, pp. 363-368.

16. Tverskoi M.M., Rumiantsev D.V. Upravlenie teplovym rezhimom zdaniia pri kombinirovannoi sisteme otopeniia [Thermal management of buildings with a combined heating system]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Komp'iuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*, 2013, no. 4(13), pp. 4-15.

17. Mylnikov L.A., Kulikov M.V., Krause B. The selection of optimal control of the operation modes of heterogeneous duplicating equipment based on statistical models with learning. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, no. 9(9), pp. 1516-1526.

18. Myl'nikov L.A. Podderzhka priniatiia reshenii pri upravlenii innovatsionnymi proektami [Decision support in the management of innovative projects]. Perm: Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011. 145 p.

19. Markovic R. et al. Comparison of Different Classification Algorithms for the Detection of User's Interaction with Windows in Office Buildings. *Energy Procedia*, 2017, (122), C. 337-342.

20. Dahash A. et al. A comparative study of two simulation tools for the technical feasibility in terms of modeling district heating systems: An optimization case study. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2019, (91), pp. 48-68.

Сведения об авторах

Мыльников Леонид Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: leonid.mylnikov@pstu.ru).

Носков Владислав Викторович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: noskov_v_v_@mail.ru).

Сидоров Антон Андреевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sidorov_aa@bk.ru).

About the authors

Mylnikov Leonid Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Science, Associated Professor of Microprocessor Automation Means Department, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: leonid.mylnikov@pstu.ru).

Noskov Vladislav Viktorovich (Perm, Russian Federation) is a Master Student at Microprocessor Automation Means Department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: noskov_v_v_@mail.ru).

Sidorov Anton Andreevich (Perm, Russian Federation) is a Master Student at Microprocessor Automation Means Department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: sidorov_aa@bk.ru).

Получено 15.04.2019