

УДК 681.513

## Исследование адаптивных свойств систем теплоснабжения при реализации методов нечёткого управления

А.М. Прохоренков<sup>1</sup>, Н.М. Качала<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Политехнический факультет МГТУ, кафедра автоматики и вычислительной техники

<sup>2</sup> Институт экономики, управления и международных отношений МГТУ, кафедра информационных систем и прикладной математики

**Аннотация.** В работе исследованы вопросы управления теплоснабжением микрорайона жилой зоны города с учетом характеристик потребителей энергии, при этом предполагается, что управление теплоснабжением потребителей на уровне домов осуществляется с помощью индивидуальных тепловых пунктов. Приведены результаты моделирования совместной работы источника теплоснабжения (отопительной котельной), участков передачи тепловой энергии (центральные тепловые пункты) и потребителей. Предложена реализация алгоритмов ситуационного управления объектами системы теплоснабжения в классе "ситуация – стратегия – действие", на базе методов нечеткого управления.

**Abstract.** Heat supply control for a local district within a town living zone taking into account power consumer characteristics has been proposed. It is assumed that heat supply control for houses is realized via individual heat points. Simulation results of joint operation of heat supply source (heating boiler), stations for transmission of thermal power (central heat points) and consumers have been presented. It has been proposed to apply algorithms of situational control by objects of heat supply system within the class "situation – strategy – action" basing on fuzzy control methods.

**Ключевые слова:** тепловой пункт, система теплоснабжения, моделирование, ситуационное управление, нечёткое управление  
**Key words:** heat point, heat supply system, modeling, situational control, fuzzy control

### 1. Введение

В настоящее время, при существующей системе управления теплоснабжением с центральными тепловыми пунктами (ЦТП), предпочтение отдаётся не удовлетворению потребностей жильцов, а удобству деятельности теплоснабжающих и эксплуатирующих организаций. Санитарные нормы требуют обеспечения температуры воздуха в квартирах в пределах допустимого уровня (18-20 °С) (Наладка..., 1979). Централизованное управление не учитывает теплопроводности зданий, фактических внутренних тепловыделений, поступлений с солнечной радиацией, поэтому оказывается неэффективным с точки зрения оптимального энергопотребления.

В настоящей работе предложена модель управления теплоснабжением микрорайона с учетом характеристик потребителей энергии, с предположением, что управление теплоснабжением потребителей на уровне домов осуществляется с помощью индивидуальных тепловых пунктов (ИТП). Результаты моделирования совместной работы источника теплоснабжения, участков передачи тепловой энергии ЦТП и потребителей, с учетом как дней недели, так и времени максимального отбора, позволили определить стратегию управления в трехуровневой координирующей системе, в которой осуществляется передача вариантов работы потребителей тепловой энергии на уровне ИТП и ЦТП. На основании полученных вариантов центр формирует программу управления теплоснабжением, оптимальным для всей системы. Авторами, в отличие от традиционного подхода, где главным элементом принятия решений является множество альтернатив и множество ограничений, предложена реализация алгоритмов ситуационного управления объектами системы теплоснабжения в классе "ситуация – стратегия – действие", которые реализуются на базе нечетких регуляторов.

### 2. Постановка задачи управления теплоснабжением жилых зон города

Город Мурманск расположен в особой климатической зоне, характеризующейся резким изменением температуры, направления и скорости ветра даже в течение суток (рис. 1). Показательны данные meteocenter.net относительно одного дня 22.01.2012 г.: диапазон изменения скорости ветра составил от 2 м/с (в 3 ч ночи) до 6 м/с (в 9 ч утра).

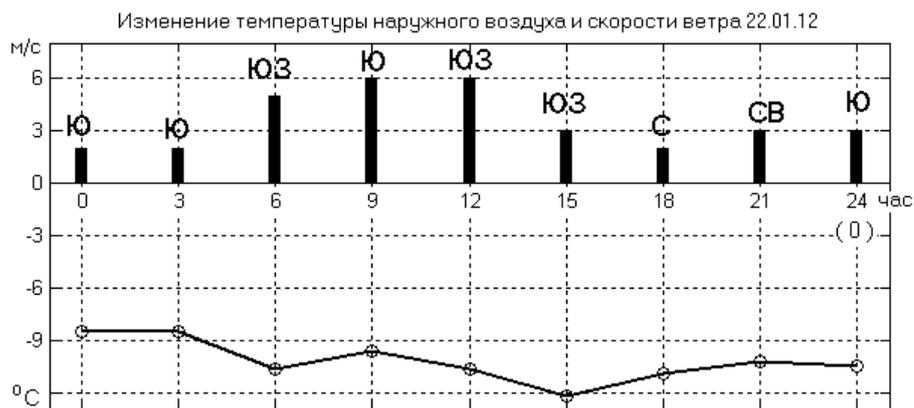


Рис. 1. Изменение направления, скорости ветра и температуры в г. Мурманске 22.01.2012 г.

В работе тепловых сетей Мурманска приходится учитывать и другую особенность города: он расположен на холмистой местности, минимальная высотная отметка – 10 м, максимальная – 150 м. Ввиду неоднородности ландшафта практически каждый дом имеет особенное местоположение, а следовательно, – свои индивидуальные показатели по солнечной радиации и ветровой нагрузке. Как результат – однотипные здания имеют различные характеристики потребления тепловой энергии.

В этой связи сформулируем основные задачи систем управления теплоснабжением жилых зон города:

- обеспечение комфортных условий в отапливаемых и вентилируемых помещениях зданий;
- экономия топливно-энергетических ресурсов;
- повышение маневренности и надежности системы.

Регулирование отпуска теплоты в системе теплоснабжения предусматривает:

- центральное регулирование (на тепловом источнике);
- групповое регулирование (в ЦТП);
- местное регулирование (в ИТП, МТП);
- индивидуальное регулирование (нагревательные приборы в помещениях).

Для оперативного контроля состояния удаленных объектов и управления оборудованием, находящимся на контролируемых пунктах, сотрудниками научно-исследовательского сектора кафедры автоматики и вычислительной техники (А и ВТ) МГТУ были разработаны и внедрены аппаратно-программные средства автоматизированной системы диспетчерского контроля и управления центральными тепловыми пунктами и насосными станциями (АСДК и У ЦТП и НС) города Мурманска. Основой построения системы АСДКиУ является программно-технический комплекс ДЕКОНТ. В АСДКиУ решаются задачи управления технологическим оборудованием (теплообменниками и насосами) в соответствии с принятыми критериями качества управления при наличии возмущений, имеющих случайный характер, таких как метеоусловия и изменение во времени нагрузки котельной и тепловых пунктов, определяемой характером потребления тепловой энергии пользователями (Прохоренков, 2010).

Контролируемые пункты (КП), на которых в процессе реконструкционных работ установлено оборудование телемеханики, расположены на удалении до 20 км от Государственного областного унитарного теплоэнергетического предприятия (ГОУТП) "ТЭКОС". Связь с оборудованием телемеханики на КП осуществляется по выделенной телефонной линии связи. Центральные бойлерные (ЦТП) и насосные станции представляют из себя отдельно стоящие здания, в которых установлено технологическое оборудование. Данные с КП поступают на диспетчерский пункт (в ПК АРМ диспетчера), находящийся на территории тепловой станции (ТС) "Северная" предприятия "ТЭКОС", и в сервер ТС, после чего становятся доступными пользователям локальной вычислительной сети предприятия для решения своих производственных задач.

### 3. Принципы перехода к использованию индивидуальных тепловых пунктов

Рациональным режимом регулирования отпуска теплоты зданию в ИТП следует считать режим, при котором здание получает требуемое при данных метеоусловиях количество теплоты, обеспечивающее комфортную температуру воздуха. Наиболее полно удовлетворяет этим требованиям регулирование отпуска теплоты на отопление помещений каждого здания в зависимости от температуры наружного воздуха с коррекцией по усредненной внутренней температуре. Контроллер отопления производит анализ данных, полученных от датчиков наружной и внутренней температуры и, с учётом ограничения на расход квартальной воды, выдаёт управляющее воздействие на заслонку, которая, в свою очередь, регулирует подачу теплоносителя дому.

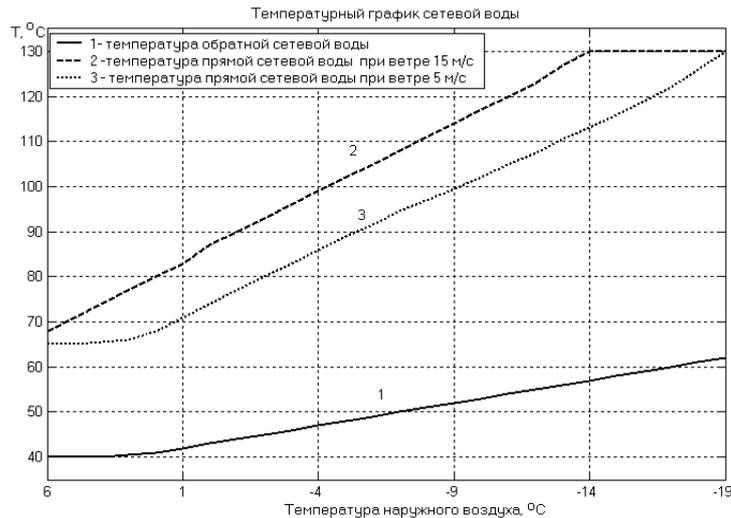


Рис. 2. Температурный график сетевой воды для котельной "Северная"

При этом регулирование "по возмущению" следует реализовать заданием регулятору линейного или нелинейного графика температуры воды на отопление, наиболее близкого к графику 95/70 °C или 105/70 °C (в зависимости от расчетных параметров системы отопления), построенного по известным таблицам (Наладка..., 1979). Наличие в регуляторах коррекции по внутренней температуре обеспечит максимальное приближение фактического графика температур воды – к требуемому, учитывающему усредненное значение внутренних теплоступлений. В данном случае следует применять регулирование "по возмущению" с использованием регулирующего прибора, обеспечивающего поддержание нелинейного графика температур воды, достаточно близкого к требуемому графику на всем диапазоне наружных температур. При этом необходимо контролировать обратную температуру воды из системы отопления или внутреннюю температуру в помещениях и сравнивать их с табличными или комфортными значениями (Prokhorenkov et al., 2009).

#### 4. Особенности функционирования системы централизованного теплоснабжения города Мурманска

В системах централизованного теплоснабжения регулирование подачи теплоносителя потребителям осуществляется по температурному графику, отражающему в статике зависимость между температурой наружного воздуха  $T_{и}$  и температурами прямой  $T_{кп}$  и обратной  $T_{ко}$  сетевой воды. Температурный график сетевой воды для отопительной котельной "Северная" города Мурманска приведен на рис. 2.

Из опыта эксплуатации систем теплоснабжения известно, что на практике не удается обеспечить полного выполнения отопительного графика. Это объясняется рядом причин, в том числе, случайным характером потребления горячей воды пользователями (Prokhorenkov, 2010), что проиллюстрировано графиками изменения давления (рис. 3) и температуры (рис. 4) горячей воды для ЦТП № 1, взятыми из архива системы диспетчерского контроля и управления ЦТП и насосными станциями г. Мурманска.

Особенностью систем теплоснабжения Мурманска является резкое различие динамических характеристик по тракту передачи давления (изменения расхода) и тракту передачи температуры. Исследования характера процессов, протекающих в системах теплоснабжения, показали, что процессы изменения давления (рис. 3) можно считать стационарными. Тогда как процессы изменения температуры (рис. 4) являются или нестационарными по математическому ожиданию (например, изменение прямой и обратной температур котельной и квартальной воды), или нестационарными по дисперсии – температура воды на горячее водоснабжение (Prokhorenkov et al., 2009).

Рассмотрим типичные графики потребления холодной воды (рис. 5) и горячей воды (рис. 6), полученные путем усреднения фактических данных за несколько недель зимнего периода и нормированных к диапазону от 0 до 1. Так, в течение суток можно отметить увеличение разбора горячей воды утром и вечером, наряду со спадом в течение дня и ночи. Заметны различия в потреблении воды в рабочие и выходные дни. Наблюдается почти полное прекращение расхода холодной воды в ночные часы. Анализ характера потребления горячей и холодной воды (рис. 4 и 5) позволяет сделать вывод, о том, что он имеет существенное различие в течение суток. В этом есть и доля технологических особенностей системы централизованного теплоснабжения – приходится много в позднее и раннее время "спускать" горячей воды, чтобы получить воду желаемой температуры.

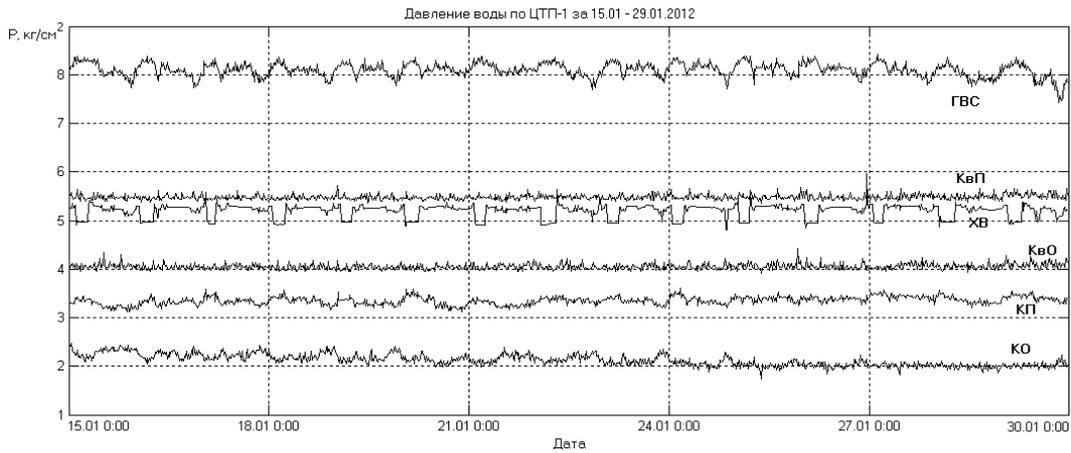


Рис. 3. График изменения давления воды в ЦТП № 1 за период 15.01 – 29.01.2012 г. (ГВС – горячее водоснабжение, КвП – квартальная прямая вода, КвО – квартальная обратная вода, КП – котельная прямая вода, КО – котельная обратная вода, ХВ – холодная вода)

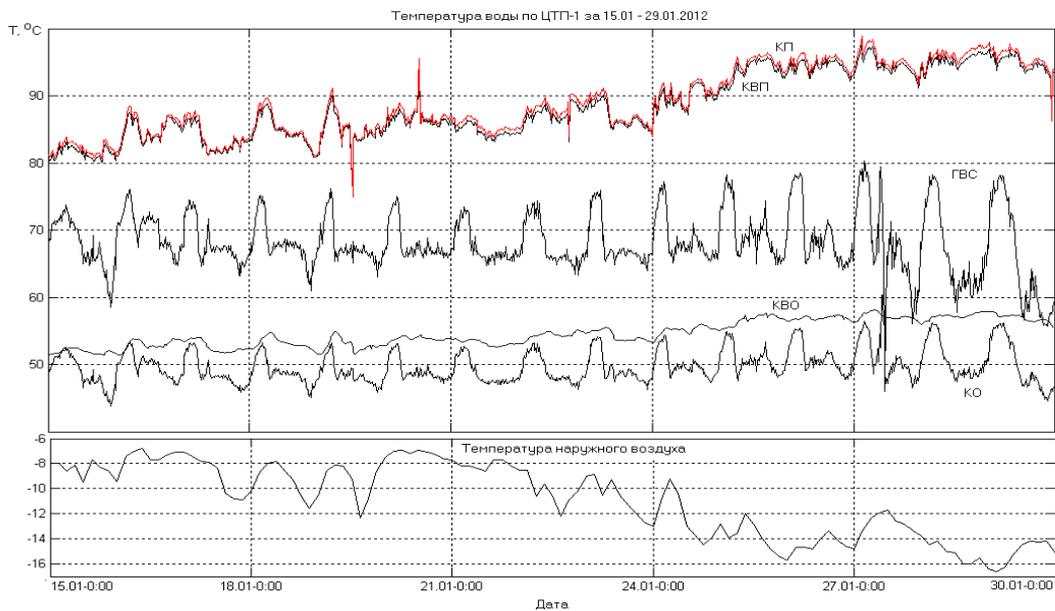


Рис. 4. График изменения температуры воды в ЦТП № 1 за период 15.01 – 29.01.2012 г.

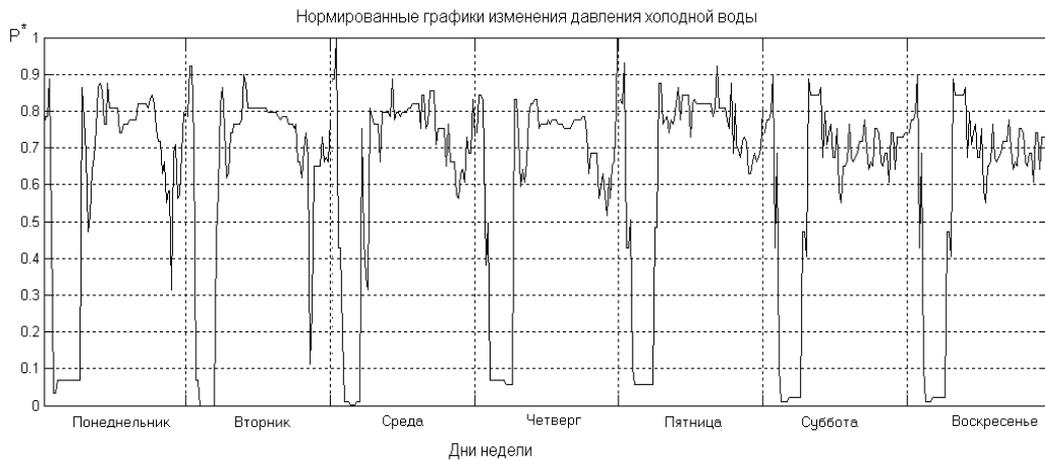


Рис. 5. Нормированный график потребления холодной воды в микрорайоне ЦТП № 1 за период 15.01 – 29.01.2012 г.



Рис. 6. Нормированный график потребления горячей воды в микрорайоне ЦТП № 1 за период 15.01 – 29.01.2012 г.

Наиболее значимой причиной невыполнения температурного графика является влияние нагрузки по горячему водоснабжению на температуру обратной сетевой воды (Наладка..., 1979). Существующие проблемы увязки графиков подачи и использования теплоты, нестационарный характер изменения метеоусловий и нагрузки потребителя, различные тепловые режимы у потребителей, необходимость упреждающего управления отпуска тепла с учетом метеоусловий при ограничениях на энергоресурсы определяют интеллектуализацию систем управления теплоснабжением (Прохоренков, 2000).

### 5. Обоснование выбора критерия и структуры системы управления

Случайный характер задающих и возмущающих воздействий, которым подвержены объекты систем теплоснабжения, функционирующие в составе автоматизированных технологических процессов, требует реализации стратегии управления с учетом вероятностных характеристик измеряемых величин.

Качество работы любой системы управления определяется величиной ошибки, равной разности между заданным  $g(t)$  и текущим  $x(t)$  значениями регулируемой величины:

$$e(t) = g(t) - x(t). \quad (1)$$

Ошибка системы, определяемая выражением (1), является также случайной величиной. В подобных системах точность управления характеризуется математическим ожиданием квадрата ошибки, и условие оптимальности системы записывается в виде:

$$\eta = M[e^2(t)] = \min. \quad (2)$$

Величина  $\eta$ , как начальный момент второго порядка ошибки системы, может быть выражена через математическое ожидание и дисперсию ошибки. Обобщением критерия (2) является критерий экстремума заданной функции математического ожидания и дисперсии ошибки (Прохоренков и др., 1992):

$$f(M(e), D(e)) = \text{extremum}. \quad (3)$$

В системах стабилизации параметров необходимо обеспечить регулирование по минимуму математического ожидания и дисперсии ошибки, следовательно, требуется обеспечить минимум функции (3). В этом случае математическое ожидание ошибки можно представить в следующем виде:

$$M[e(t)] = M[g'(t) - x(t)] = M[g(t) + \zeta(t)] - M[x(t)] = g(t) - m[x(t)] = M_3(t) - M_T(t), \quad (4)$$

где  $\zeta(t)$  – стационарная помеха с нулевым математическим ожиданием,  $g(t) = \text{const}$ ,  $M_3(t)$ ,  $M_T(t)$  – заданное и текущее значения математического ожидания регулируемого параметра.

Выражение (4) есть смещение регулируемого параметра по математическому ожиданию, которое должно стремиться к минимально допустимому значению:

$$\varepsilon_m(t) = M_3(t) - M_T(t) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Смещение регулируемого параметра по дисперсии определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\sigma^2}(t) = \sigma_3^2(t) - \sigma_T^2(t) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $\sigma_3^2(t)$ ,  $\sigma_T^2(t)$  – заданное и текущее значения дисперсии регулируемого параметра.

Принимая во внимание возможность оценки качества по величине смещения математического ожидания  $\varepsilon_m(t)$  и дисперсии  $\varepsilon_{\sigma^2}(t)$ , обеспечивающих достижение заданных показателей качества процесса

управления (величина перерегулирования, время регулирования, коэффициент успокоения), будем минимизировать следующий функционал (Прохоренков и др., 1992):

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_{m_i}^2 + \beta \varepsilon_{\sigma_i^2}) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $\beta$  – весовой коэффициент.

Сформулированный критерий качества позволяет осуществить структурный синтез системы управления, с помощью которой возможно реализовать автоматическую настройку параметров регуляторов, функционирующих в условиях случайных возмущений. Задачу структурного синтеза системы управления сформулируем следующим образом. Для объекта, заданного своей математической моделью (8-10), найти управление  $u(t) = f(x(t), g(t), V(t))$  как функцию от величины задания  $g(t)$ , регулируемой величины  $x(t)$  и возмущения  $V(t)$ , т.е. управление, обеспечивающее движение замкнутой системы в соответствии с критерием качества (7).

В качестве объекта управления будем рассматривать теплообменный аппарат. Исходя из уравнений закона сохранения энергии, динамика водо-водяного теплообменного аппарата описывается системой из трех одномерных, линейных дифференциальных уравнений в частных производных.

$$\begin{cases} dT^I(x, t)/dt + V^I dT^I(x, t)/dx = 1/\tau^I (T_{cm}(x, t) - T^I(x, t)), & (8) \\ dT_{cm}(x, t)/dt = C_1(T^I(x, t) - T_{cm}(x, t)) - C_2(T_{cm}(x, t) - T^{II}(x, t)), & (9) \\ dT^{II}(x, t)/dt + V^{II} dT^{II}(x, t)/dx = 1/\tau^{II} (T_{cm}(x, t) - T^{II}(x, t)). & (10) \end{cases}$$

Первое уравнение описывает горячий контур, второе – моделирует поверхность теплообмена, третье уравнение соответствует холодному контуру.

В данных уравнениях приняты следующие обозначения:

$T^I(x, t)$  – температура движущейся в первичном контуре греющей воды в сечении аппарата  $x$  в момент времени  $t$ .

$T^{II}(x, t)$  – температура движущейся во вторичном контуре нагреваемой воды в сечении аппарата  $x$  в момент времени  $t$ .

$T_{cm}(x, t)$  – температура стенки поверхности, через которую осуществляется теплообмен между водой первичного и вторичного контуров, в сечении аппарата  $x$  в момент времени  $t$ .

Коэффициенты  $V^I, V^{II}$  – это линейные скорости, греющей в первичном контуре и нагреваемой во вторичном контуре воды, соответственно, определяемые по формулам:

$$V^I = G^I / (S^I_{сеч} \rho_B) \text{ [м/с]},$$

$$V^{II} = G^{II} / (S^{II}_{сеч} \rho_B) \text{ [м/с]},$$

где  $G^I, G^{II}$  – массовый расход соответственно греющей в первичном контуре и нагреваемой во вторичном контуре воды, кг/с;  $\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $S^I_{сеч}, S^{II}_{сеч}$  – площадь поперечного сечения одного хода теплообменника соответственно со стороны I и II контуров, м<sup>2</sup>. Коэффициенты  $\tau^I, \tau^{II}$  имеют размерность времени. Блоки, обозначенные цифрами на рис. 7, описываются соответствующими уравнениями системы (8-10).

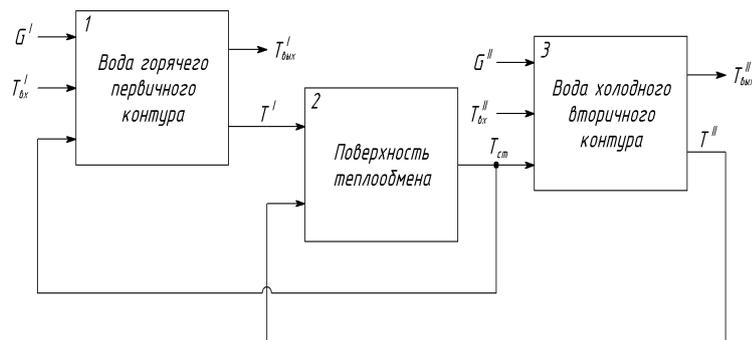


Рис. 7. Структурная схема модели теплообменника

В общем случае объект характеризуется структурной и параметрической неопределенностью. В условиях действия заранее неизвестных случайных возмущающих воздействий и изменяющихся с течением времени характеристик объекта для достижения цели управления САУ должна быть в классе адаптивных.

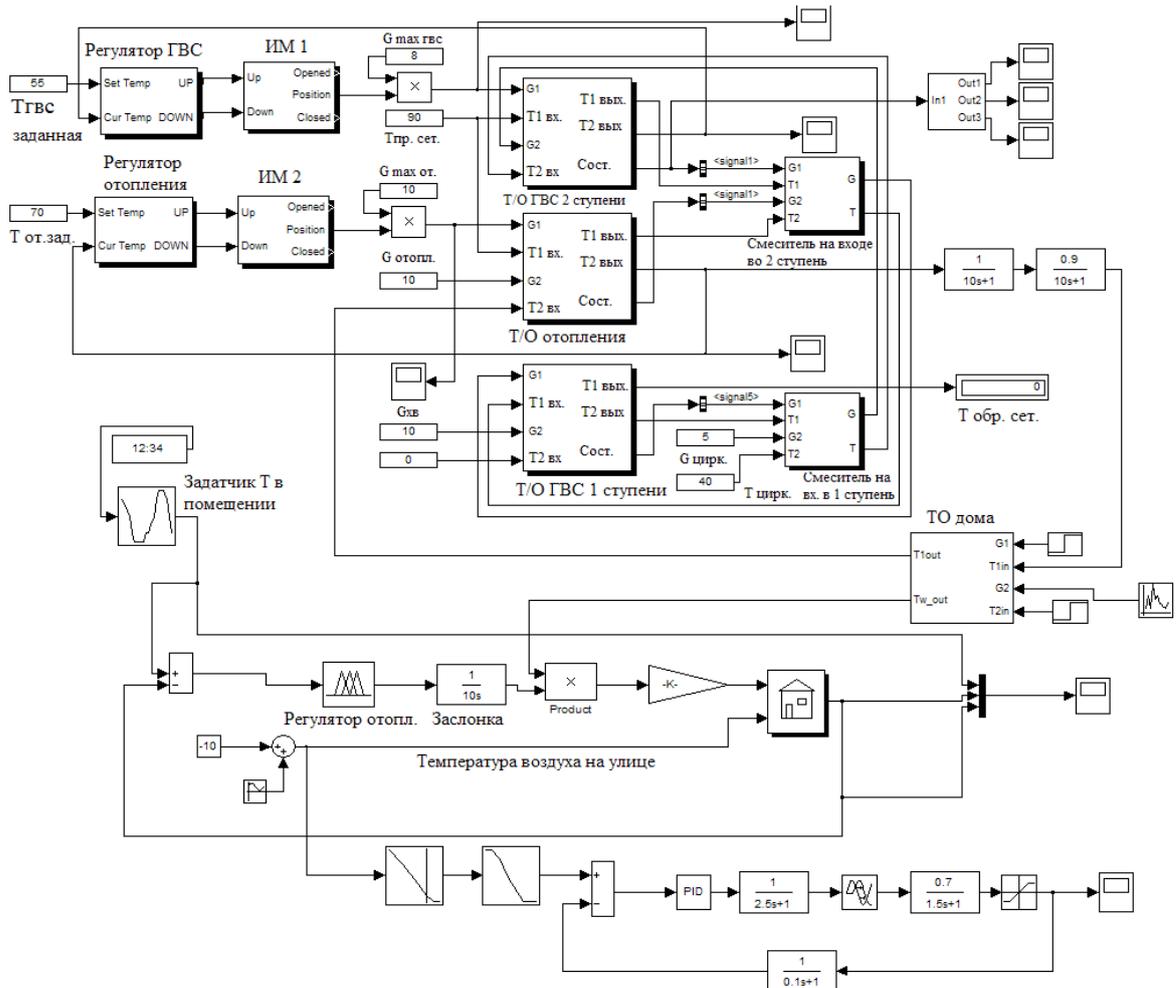


Рис. 8. Схема моделирования ЦТП и ИТП

Таким образом, возникает задача разработки с учетом принятых выше допущений адаптивного алгоритма управления, который использует измеряемые величины и обеспечивает достижение заданной цели управления. Задача управления состоит в обеспечении с заданной точностью, согласно (5) и (6), значений регулируемой величины (Прохоренков и др., 1992).

### 6. Работа нечёткого регулятора в контуре поддержания внутренней температуры

Исходя из структурной схемы математических моделей (8-10) и с помощью разработанной полномасштабной модели теплообменного аппарата, в пакете Matlab была реализована схема движения теплоносителя от ЦТП к ИТП. Структура разработанной системы предусматривает подачу в ИТП теплоносителя с учётом заданного графика температуры в помещении. Схема, с помощью которой производилось моделирование, представлена на рис. 8. Задатчик в контуре регулирования внутренней температуры ( $T_{вн}$ ) устанавливает график изменения её в течение дня с учётом соблюдения комфортных условий во время нахождения людей в отапливаемом помещении и экономии тепловой энергии, когда в помещении никого нет. Регулятор, осуществляющий управление заслонкой, реализован на базе нечёткой логики (Коломейцева, Хо, 2002). Был разработан набор правил, который описывает, каким должно быть управляющее воздействие  $U$ .

Имитационная модель объекта, формализованная в виде правил, имеет вид (при прочих постоянных условиях):

- если уменьшить подачу теплоносителя, то  $T_{вн}$  будет убывать;
- если увеличить подачу теплоносителя, то  $T_{вн}$  будет возрастать.

Регулирование  $T_{вн}$  осуществляется с помощью контроллера нечеткой логики.

На основании экспериментальных данных и экспертных оценок сделано заключение, что значение температуры  $T_{вн}(t)$  в момент времени  $t$  определяется набором лингвистических переменных: "высокая", "нормальная", "низкая". Функции принадлежности  $\mu(T_{вн})$  нечетким множествам "высокая", "нормальная", "низкая" определяются линейными уравнениями вида  $y = kx + b$ .

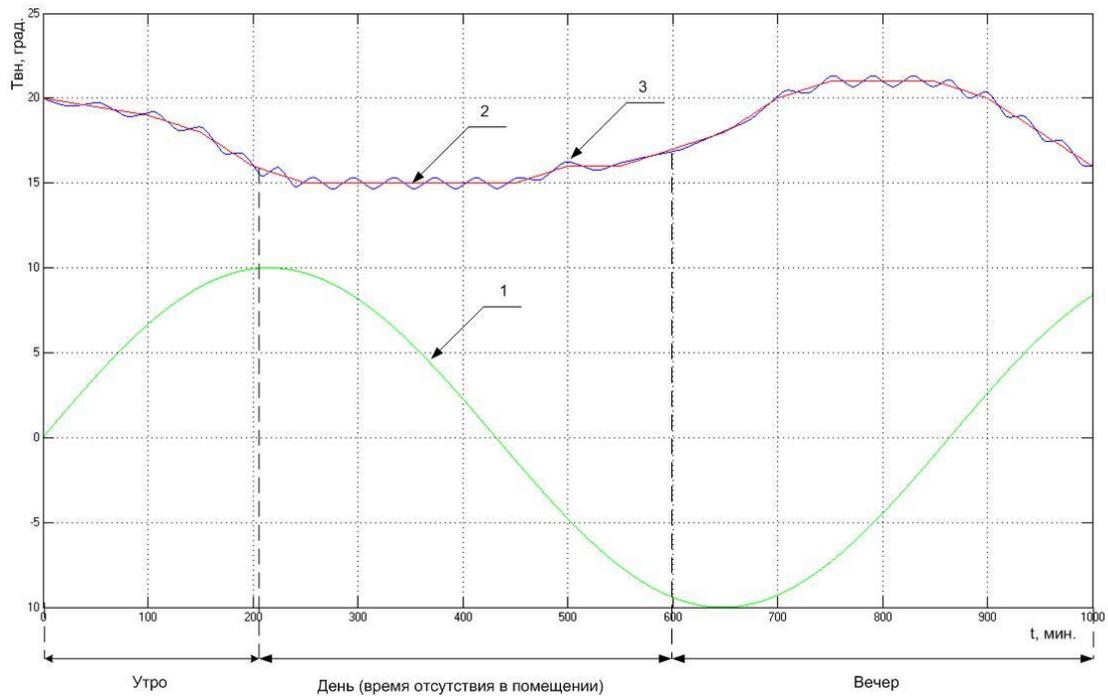


Рис. 9. Графики изменения температуры, где изображены: 1 – температура наружная (окружающая среда жилой зоны), 2 – график задания температуры, 3 – фактическая внутренняя температура

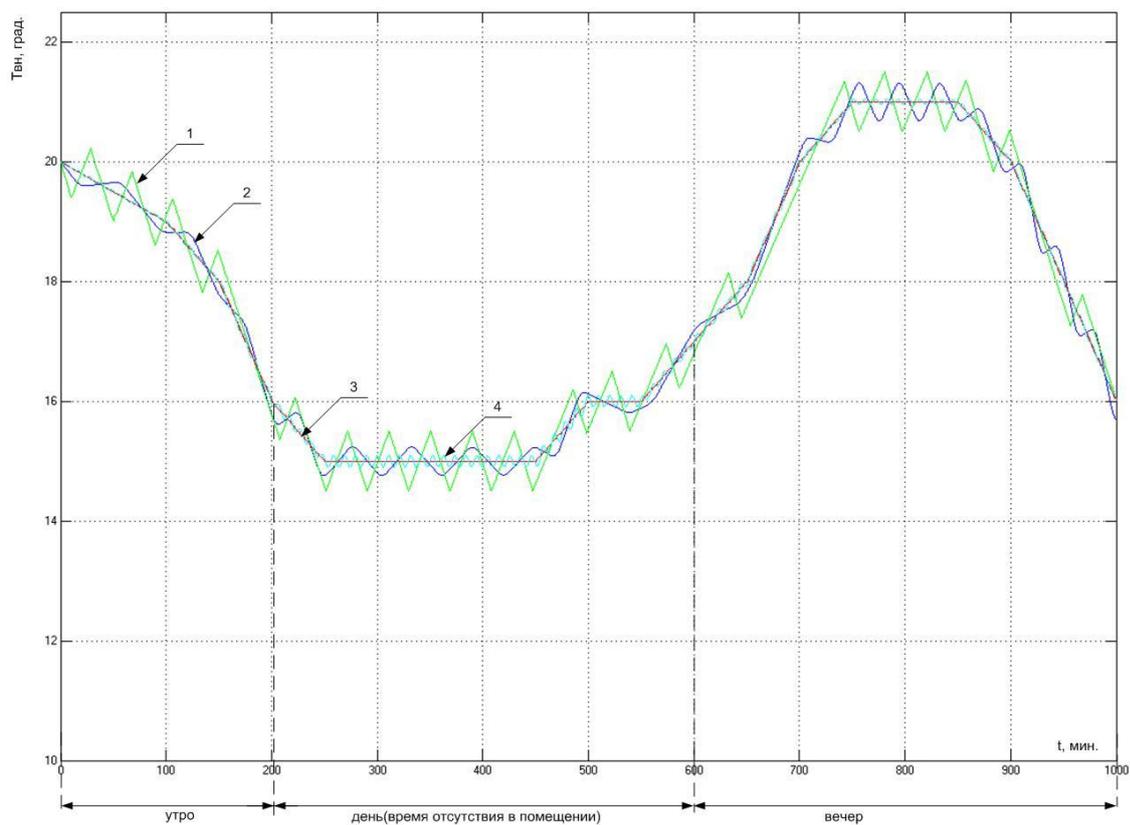


Рис. 10. График изменения температуры в помещении согласно заданному температурному режиму при различных структурах регуляторов, где изображены: 1 – двухпозиционный переключатель, 2 – нечеткий регулятор, 3 – график изменения заданной температуры, 4 – нечеткий ПИД-регулятор

Процесс фазификации состоит в определении соответствия между измеренными значениями  $T_{\text{вн}}(t)$  и нечеткими множествами  $\mu(T_{\text{вн}})$ , т.е. в вычислении соответствующих коэффициентов принадлежности.

Для величины управления  $U(t)$  в момент времени  $t$  определяются лингвистические переменные "открыть", "закрыть", "сохранить положение".

Процесс нечеткого вывода заключается в определении соответствующих нечетких множеств для  $U(t)$  (коэффициентов принадлежности) при известных  $\mu(T_{\text{вн}})$ .

Алгоритм управления формализуется в виде правил:

- если  $T_{\text{вн}}$  – "низкая", то  $U$  – "открыть";
- если  $T_{\text{вн}}$  – "нормальная", то  $U$  – "сохранить положение";
- если  $T_{\text{вн}}$  – "высокая", то  $U$  – "закрыть".

Набор правил составляет базу правил контроллера.

Результаты, полученные при работе нечеткого регулятора в контуре регулирования внутренней температуры, изображены на рис. 9.

На рис. 9 видно, что регулятор на базе нечеткой логики справляется с поставленной задачей. Максимальное несоответствие установленной и фактической температуры не превышает 0,5 град.

Кривые переходных процессов, характеризующие изменение регулируемой величины при формировании нового значения задающего воздействия для различных моделируемых структур регуляторов, представлены на рис. 10.

## 7. Заключение

Климатические условия Заполярья, а также специфика местности, где расположен Мурманск, определяют особенности теплоснабжения домов. Находящиеся в различных точках холмистого ландшафта города строения приобретают индивидуальные характеристики – как по солнечной радиации, так и по ветровой нагрузке. Как следствие, однотипные здания имеют различные показатели по потреблению тепловой энергии.

Использование индивидуальных тепловых пунктов в контурах систем теплоснабжения домов, с реализацией в них управления в классе "ситуация – стратегия – действие" и применением методов нечеткого управления, позволяют весьма эффективно поддерживать в жилых помещениях заданный температурный режим.

Результаты, полученные авторами после проведенного моделирования, подтверждают целесообразность такого подхода. Качество работы САУ с нечеткими структурами регуляторов выше по сравнению с использованием других структур регуляторов. Переходный процесс при данной структуре регулятора показывает наименьшее время регулирования и величину перерегулирования. Оснащение отопительных приборов (радиаторов) в жилых помещениях индивидуальными автоматическими регуляторами теплового потока (термостатами) позволяет уменьшить расход тепловой энергии на отопление на 10-20 % – за счет снижения непроизводительных затрат теплоты (перетоп) и за счет учета фактических теплопоступлений с солнечной радиацией, фактических внутренних тепловыделений. Применение регулируемой системы отопления обеспечивает существенное повышение тепловой эффективности зданий, экономию энергии, способствует улучшению комфортности помещения.

## Литература

- Prokhorenkov A.M., Saburov I.V., Sovlukov A.S.** Data maintenance for processes of decision-making under industrial control. *Вестник: науч.-техн. журнал. Спецвыпуск. Черкасск, ЧГТУ*, с.89-91, 2009.
- Коломейцева М.Б., Хо Д.Л.** Адаптивные системы управления динамическими объектами на базе нечетких регуляторов. *М., Спутник*, 217 с., 2002.
- Наладка систем централизованного теплоснабжения. Справочное пособие. *Под ред. И.М. Сорокина и др. М., Стройиздат*, 224 с., 1979.
- Прохоренков А.М.** Методы построения автоматизированной системы распределенного управления теплоснабжением города. *Науч.-техн. ведомости СПбГПУ (Сер. "Наука и образование")*, № 1(95), с.233-244, 2010.
- Прохоренков А.М.** Реконструкция отопительных котельных на базе информационно-управляющих комплексов. *"Наука – производству"*, № 2, с.51-54, 2000.
- Прохоренков А.М., Солодов В.С., Татьянченко Ю.Г.** Судовая автоматика. *М., Колос*, 448 с., 1992.