

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ИНДИВИДУАЛЬНЫМ ТЕПЛОВЫМ ПУНКТОМ С ТИПОВЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

© 2012 Е.А. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.Н. Потапенко, С.Н. Глаголев

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Поступила в редакцию 25.03.2012

Показаны возможности математического моделирования управления автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом (ИТП) здания с известными типовыми регуляторами. Исследованы законы регулирования 2-х типов: пропорционально-интегральный и интегральный, формируемые блоком регулирования контроллера с учётом применения исполнительного механизма. Показаны возможности использования И-регулятора для процесса отопления в автоматизированном ИТП здания.

Ключевые слова: *индивидуальный тепловой пункт, автоматическое регулирование, математическое моделирование*

Создание автоматизированных систем управления теплоснабжением зданий позволяет частично приблизить их к «интеллектуальным» [1, 2]. Внедрение инновационных технологий на основе автоматизированного индивидуального теплового пункта (ИТП) здания даёт возможность получить экономию тепловой энергии в переходные периоды отопительного сезона. Один из основных «интеллектуальных» приборов автоматизированного ИТП здания – контроллер, как правило, специализированного вида [3], позволяющий выполнять количественное регулирование теплоносителя, поддерживающий коммуникационные протоколы, как фирм производителей, так и стандартные, с возможностью реализации решений по диспетчеризации, предназначенный для обеспечения теплопотребления здания или сооружения с минимальными энергетическими затратами и др. Для автоматизированных ИТП зданий предлагаются, например, контроллеры типа ECL Comfort (Danfoss, Дания) различных модификаций [4], контроллеры типа TRM32 и его модификация TRM132 (ОВЕН, Москва) [5], причём в отличие от ECL Comfort эти контроллеры не имеют основных блоков управления электроприводами насосов в системах отопления (СО) и горячего водоснабжения.

В [6] с помощью математического моделирования процессов отопления комплекса зданий при различных схемах теплопотребления было установлено, что при одновременном применении

автоматизированных ИТП и элеваторных узлов может наблюдаться отрицательный эффект, т.е. отсутствовать экономия тепловой энергии. Этот факт экспериментально был зафиксирован в [7]. В [8] на базе разработанной модели [6] были исследованы с помощью математического моделирования особенности управления автоматизированным ИТП с применением различных типов исполнительных механизмов (ИМ), входящих в состав регулятора системы автоматизации объекта управления (ОУ). При этом было показано, например, что при одних и тех же параметрах контроллера, но с увеличением быстродействия ИМ на базе применения АМЕ 30 (Danfoss) в сравнении с АМЕ 20, возникает режим частого переключения электродвигателя ИМ. В целом это недопустимо, так как приводит к преждевременному выходу из строя электродвигателя ИМ, поэтому это явление должно исключаться путем коррекции параметров контроллера.

Постановка задачи. Исследуются с помощью математического моделирования особенности управления автоматизированным ИТП с известными типовыми регуляторами. За основу математического моделирования исследуемых процессов принят подход [6, 8].

Особенности схем моделирования. Структура типового автоматизированного ИТП для зависимой системы отопления, показанная на рис. 1, содержит технологический контроллер ТК1, блок циркуляционных насосов Н1 и Н2 с электроприводами М1 и М2, регулирующий клапан К1 с исполнительным механизмом ИМ1, обратный клапан КО1, регулятор перепада давления прямого действия РД1 с клапаном К2, датчик температуры наружного воздуха ДТ1, датчики температуры теплоносителя ДТ2 и ДТ3, датчики давления ДД1 и ДД2, а также узел учета тепловой энергии, например, теплосчетчик с комплектом датчиков температуры, расхода и давления.

Потапенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, профессор кафедры организации и безопасности движения. E-mail: potapenko1@intbel.ru

Солдатенков Алексей Сергеевич, старший преподаватель кафедры электротехники и автоматики. E-mail: aser@pisem.net

Потапенко Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электротехники и автоматики. E-mail: potapenko@intbel.ru

Глаголев Сергей Николаевич, доктор экономических наук, профессор. E-mail: sergeyglagolev@yandex.ru

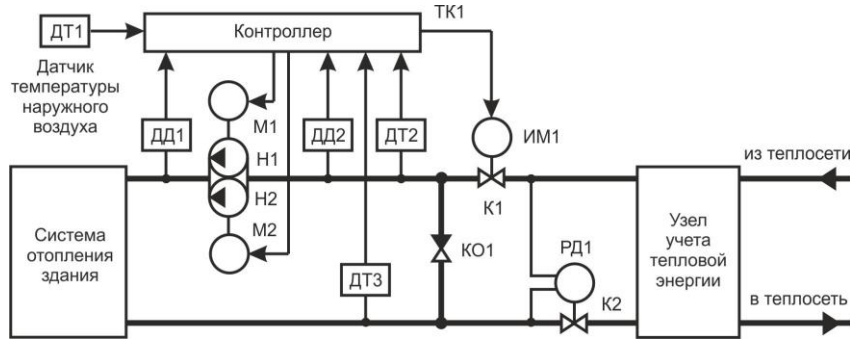


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного ИТП здания

Обобщенная функциональная схема системы отопления автоматизированного ИТП здания показана на рис. 2. Состав элементов схемы следующий: блок регулятора по возмущению P1 (погодная компенсация); двухконтурный блок регулятора P2 по отклонению технологической величины; П1 – П3 элементы-преобразователи выходных величин датчиков температуры Д1 – Д3 в измеряемые ими физические величины; исполнительный механизм ИМ; регулирующий орган РО в виде седельного клапана; узел смешивания теплоносителей УС (см. рис. 1) от присоединяемых тепловых сетей и от обратного трубопровода системы отопления здания через переключку с обратным клапаном; объект управления ОУ, представляющий собой СО здания.

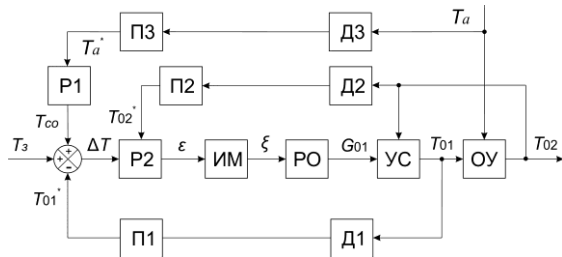


Рис. 2. Функциональная схема автоматизированного ИТП здания

Обозначения основных величин функциональной схемы следующие: T_a^* – исходная температура наружного воздуха; T_a – температура наружного воздуха на входе в блок P1; T_{co} – требуемая в соответствии с принципом погодной компенсации расчетная температура теплоносителя в подающем трубопроводе СО здания после переключки с обратным клапаном (см. рис. 1); T_s – расчетное отклонение температуры теплоносителя в подающем трубопроводе СО здания, заданное диспетчером с целью коррекции T_{co} ; ΔT – отклонение по температуре регулируемой величины T_{o1} ; ε – приведенный управляющий сигнал регулятора P2; ξ – приведенная величина перемещения РО; G_{o1} – расход теплоносителя после РО, т.е. перед переключкой с обратным клапаном; T_{o1} – температура теплоносителя в подающем трубопроводе внутреннего контура СО здания; T_{o1}^* – измеренная температура теплоносителя в СО здания; T_{o2} – температура теплоносителя в

обратном трубопроводе СО здания; T_{o2}^* – измеренная температура теплоносителя на входе в P2.

Система уравнений математического моделирования. Математическая модель СО здания на основе автоматизированного ИТП в соответствии с функциональной схемой и с учетом структур регуляторов P1 и P2 (в целях упрощения схемы на рис. 2 их структуры не раскрыты) представлена в виде системы уравнений (1).

$$\left\{ \begin{aligned} &\tau_{da} \frac{dT_a^*(t)}{dt} + T_a^*(t) = k_{da} T_a(t), \\ &\tau_{d1} \frac{dT_{o1}^*(t)}{dt} + T_{o1}^*(t) = k_{d1} T_{o1}(t), \\ &T_{co}(t) = f_1(T_a^*), \\ &\Delta T(t) = T_{co}(t) + T_s(t) - T_{o1}^*(t), \\ &x_1(\Delta T) = \begin{cases} 0, & -X_d \leq \Delta T(t) \leq X_d, \\ k_1 \Delta T(t), & |\Delta T(t)| > X_d, \end{cases} \\ &\varepsilon(t) = \frac{k_m}{X_p} \left[x_1(\Delta T) T_u + \frac{dx_1(\Delta T)}{dt} \right], \\ &x_2(t) = \begin{cases} k_2 \varepsilon(t), & -k_m \leq \varepsilon(t) \leq k_m, \\ k_m, & |\varepsilon(t)| > k_m, \end{cases} \\ &\frac{d\xi(t)}{dt} = \frac{k_u}{\tau_u} x_2(t), \\ &G_{o1}(t) = G_1 k_\xi e^{k_2 \xi(t)}, \\ &T_1 G_{o1}(t) + T_{o2}(t)(G_{co} - G_{o1}(t)) = G_{co} T_{o1}(t), \\ &\tau_1 \tau_2 \frac{d^2 T_{o2}(t)}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dT_{o2}(t)}{dt} + T_{o2}(t) = k T_{o1}(t), \\ &\tau_{d2} \frac{dT_{o2}^*(t)}{dt} + T_{o2}^*(t) = k_{d2} T_{o2}(t), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Система (1) включает следующие уравнения: уравнения движения датчиков температуры Д3 и Д1; уравнения для регуляторов P1 и P2 (уравнение отопительного графика для вычисления расчетной температуры теплоносителя в подающем трубопроводе СО здания T_{co} ; уравнение связи для определения ΔT ; нелинейное уравнение зоны нечувствительности регулятора; уравнение регулятора P2 для управления в системах теплоснабжения, например, по аналогии со специализированными контроллерами типа ECL Comfort; нелинейное уравнение зоны ограничения);

уравнение исполнительного механизма (считается интегрирующим звеном); уравнение РО относительно выходной величины G_{01} ; уравнение связи для УС; уравнение движения ОУ по каналу регулирования «температура теплоносителя T_{02} - температура теплоносителя T_{01} »; уравнение движения датчика температуры Д2.

Дополнительные обозначения в системе уравнений (1) следующие: τ_{di} и k_{di} – соответственно постоянная времени и коэффициент передачи i -го датчика температуры; G_{co} – расход теплоносителя во внутреннем контуре СО здания, определяемый циркуляционным насосом (см. рис. 1); G_1 – номинальный расход теплоносителя на входе РО; T_1 – температура теплоносителя в подающем трубопроводе на входе в ИТП; $x_1(\Delta T)$ – выходная величина нелинейной зоны нечувствительности регулятора P2; $x_2(t)$ – выходная величина нелинейной зоны ограничения (насыщения) в регуляторе P2; k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности соответственно нелинейных зон нечувствительности и ограничения регулятора P2; X_d – зона нечувствительности регулятора P2; X_p – зона пропорциональности регулятора P2; T_u – постоянная регулятора P2.

Основные результаты расчётов. На основе математической модели СО здания (см. систему уравнений (1)) с помощью имитационного моделирования в среде Simulink исследуем законы регулирования 2-х типов: пропорционально-интегрального и интегрального, формируемые блоком регулирования P2 контроллера с применением определённого типа исполнительного механизма. Уравнение для определения величины тепловой мощности $W(t)$ в здании с учётом применения автоматизированного ИТП следующее:

$$W(t) = G_{01}(t)T_1(t) - G_{02}(t)T_{02}(t). \quad (2)$$

Параметры моделирования. Считаем, что в начальный момент времени $t=0$ выполняется переход автоматизированного ИТП здания в режим пониженного теплопотребления за счет уменьшения T_3 на 5°C . В итоге температура теплоносителя T_{co} также уменьшается на 5°C . Исходные параметры для имитационного моделирования в среде Simulink представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные параметры для моделирования

Наименование параметра, его обозначение	Величина, размерность
коэффициент преобразования объекта управления, k	0,807
постоянная времени объекта управления, τ_1	1337 с
постоянная времени объекта управления, τ_2	759 с
начальная температура теплоносителя в системе, T_2	$48,2^\circ\text{C}$
максимальный расход на входе в ИТП, G_1	$14,7 \text{ м}^3/\text{ч}$
максимальный расход в СО здания, G_{co}	$16 \text{ м}^3/\text{ч}$
температура наружного воздуха, T_a	$-1,0^\circ\text{C}$
начальное положение штока клапана ИМ	74,6%
параметр регулятора P2, k_m	100%
параметр регулятора P2, X_d	0°C

Учитывая, что исследуются контроллеры типа ECL Comfort (Danfoss), поэтому и остальные элементы автоматизации объекта управления (ОУ) принимаем этой же фирмы. Основные характеристики датчиков времени представлены в табл. 2.

Таблица 2. Постоянные времени датчиков температуры

Тип датчика	Назначение и условное обозначение	Величина, размерность
ESMU-100	Погружной медный датчик температуры теплоносителя в гильзе, τ_{d1}	32 с
ESMT	Датчик температуры наружного воздуха, τ_{da}	900 с

Основные характеристики регулирующего клапана РО типа VB2 фирмы Danfoss, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики регулирующего клапана типа VB2

Наименование параметра, его обозначение	Величина, размерность
диаметр, D_v	40 мм
коэффициент, k_{kvs}	$25 \text{ м}^3/\text{ч}$
условное давление, P_v	2,5 МПа
температура, T_{min}	5°C
температура, T_{max}	150°C
ход штока, h	10 мм

Технические характеристики исполнительного механизма типа АМЕ 20 фирмы Danfoss для работы с регулирующим клапаном VB2 представлены в табл. 4.

Таблица 4. Характеристики исполнительного механизма АМЕ 20

Наименование параметра	Величина, размерность
напряжение	24 В
частота	50/60 Гц
потребляемая мощность	4 Вт
тип управляющего сигнала	аналоговый
развиваемое усилие	450 Н
ход штока	10 мм
время перемещения штока на 1 мм	15 с/мм
входной сигнал 1	0 – 10 В; $R_f = 24 \text{ кОм}$
входной сигнал 2	0–20 мА; $R_f = 500 \text{ кОм}$
выходной сигнал	0(2) – 10 В
наличие возвратной пружины	нет
минимальная температура окружающей среды	0 °С
максимальная температура окружающей среды	55 °С

Результаты моделирования. Регулятор автоматизированной системы для ОУ [9] включает контроллер с блоком регулирования Р2 и исполнительный механизм ИМ (см. рис. 2), их уравнения движения представлены в системе уравнений (1). В отличие от [8] в этой работе на основе применения ИМ типа АМЕ 20 (см. табл. 2) изменяются параметры блока регулирования контроллера и вид закона, который он формирует с учётом исследуемого типа регулятора. Длительность моделирования при исследованиях во всех случаях 1 час 45 мин.

Вариант 1. Исследуется пропорционально-интегральный закон регулирования (ПИ-регулятор), формируемый блоком регулирования Р2 контроллера с применением ИМ типа АМЕ 20. Уравнение движения блока регулирования Р2, имеет вид (см. систему уравнений (1)):

$$\varepsilon(t) = \frac{k_m}{X_p} \left[x_1(\Delta T)T_u + \frac{dx_1(\Delta T)}{dt} \right], \quad (3)$$

где X_p 80°С, $T_u=10$ с. Исходное уравнение (3) в ПИ-регуляторе затем интегрируется ИМ. Это важная особенность рассматриваемого контроллера. Результаты имитационного моделирования с учётом данных X_p , и T_u по этому варианту исследований показаны на рис. 3.

Анализ исследуемых динамических характеристик в виде изменений температуры теплоносителя T_{01} на вводе в СО здания в увеличенном масштабе времени (см. рис. 3а) и температуры теплоносителя T_{02} в обратном трубопроводе на выходе из СО здания (см. рис. 3б) показывает, что они имеют вид аperiodических переходных процессов. В этом случае расчетное теплотребление здания составляет величину порядка 1,08502 ГДж. Увеличим в уравнении (2) время, т.е. принимаем его как $T_u=60$ с. Результаты имитационного моделирования показаны на рис. 4.

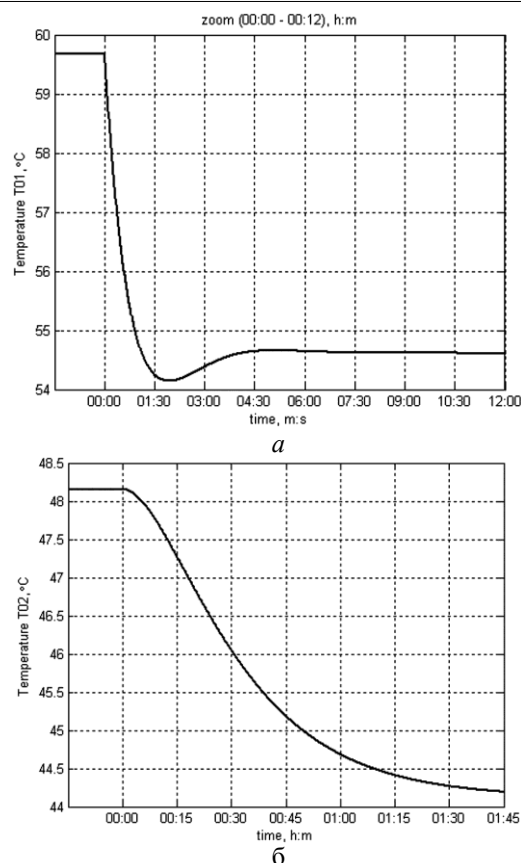


Рис. 3. Зависимости изменений T_{01} на вводе в СО здания (а) и T_{02} в обратном трубопроводе на выходе из СО здания (б)

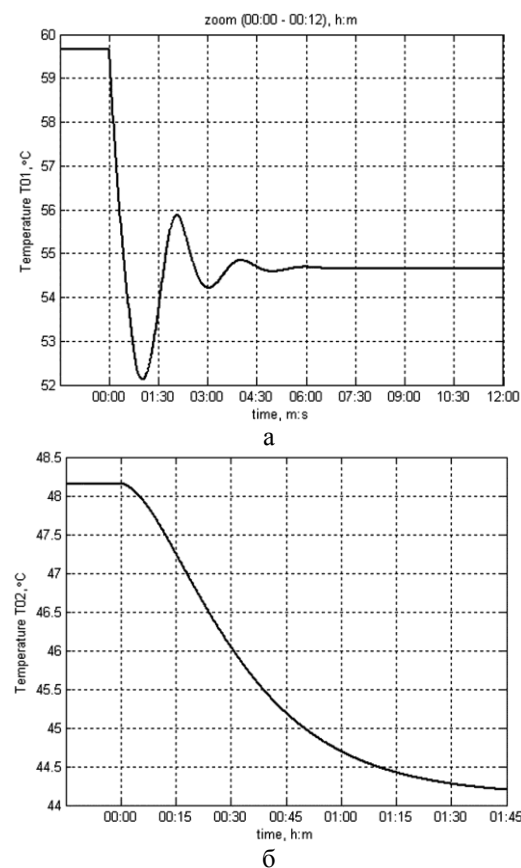


Рис. 4. Зависимости изменений T_{01} (а) и T_{02} (б) СО здания

Анализ исследуемых динамических характеристик в виде изменений T_{01} на вводе в СО здания в увеличенном масштабе времени (см. рис. 4а) и температуры теплоносителя T_{02} в обратном трубопроводе на выходе из СО здания (см. рис. 4б) показывает, что наблюдается для T_{01} переходный процесс колебательного вида. Расчетное теплотребление порядка 1,08858 ГДж.

Вариант 2. Исследуется интегральный закон регулирования (И-регулятор), формируемый блоком регулирования Р2 контроллера с применением аналогичного ИМ. В связи с этим уравнение движения блока регулирования Р2 заменяется в системе уравнений (1) на уравнение вида:

$$\varepsilon(t) = \frac{k_m}{X_p} [x_1(\Delta T)T_u], \quad (4)$$

где $X_p=80^\circ\text{C}$, $T_u=60$ с. Исходное уравнение (4) в И-регуляторе затем интегрируется ИМ. Результаты имитационного моделирования для этого варианта показаны на рис. 5.

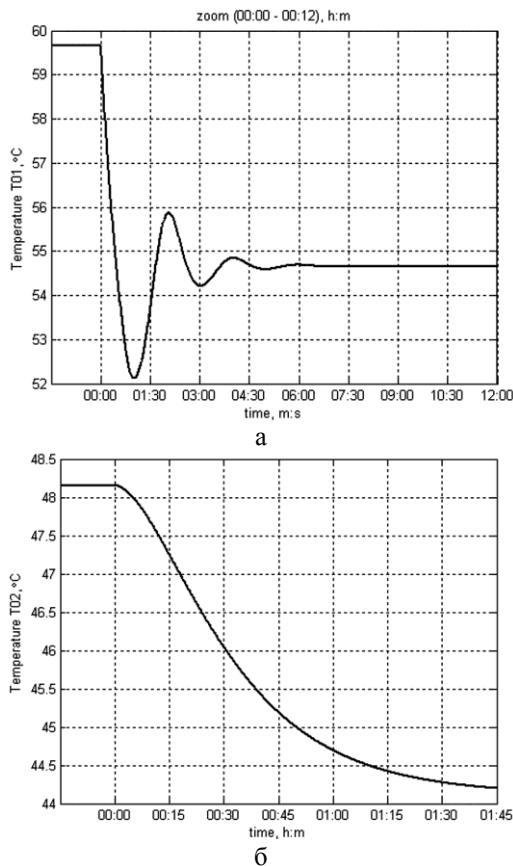


Рис. 5. Зависимости изменений T_{01} (а) и T_{02} (б) СО здания

Анализ исследуемых динамических характеристик в виде изменений температуры теплоносителя T_{01} на вводе в СО здания в увеличенном масштабе времени (см. рис. 5а) и температуры теплоносителя T_{02} в обратном трубопроводе на выходе из СО здания (см. рис. 5б) показывает, что наблюдается для T_{01} переходный процесс колебательного вида. Расчетное

теплотребление здания в исследуемом случае порядка 1,08535 ГДж.

В уравнении (3) принимаем следующие значения параметров: $X_p=100^\circ\text{C}$, $T_u=1$ с. При проведении всех исследований выбирались значения $T_u=\text{const}$ с учётом того, что T_u больше или меньше времени перемещения штока клапана с помощью ИМ (см. табл. 4). Результаты имитационного моделирования с учётом выбранных значений X_p и T_u показаны на рис. 6.

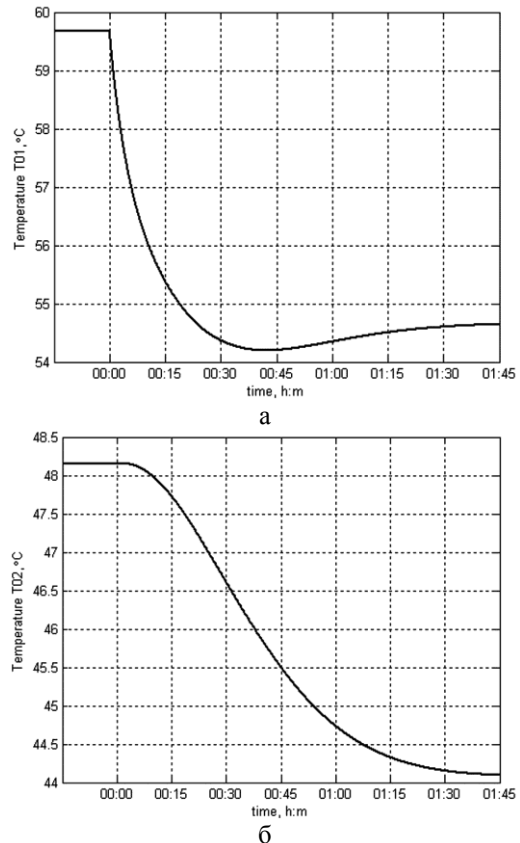


Рис. 6. Зависимости изменений T_{01} (а) и T_{02} (б) СО здания

Анализ исследуемых динамических характеристик в виде изменений T_{01} на вводе в СО здания в увеличенном масштабе времени (см. рис. 6а) и температуры теплоносителя T_{02} в обратном трубопроводе на выходе из СО здания (см. рис. 6б) показывает, что они имеют вид аperiodических переходных процессов. Как и следовало ожидать, расчетное теплотребление здания уменьшилось до величины 1,08456 ГДж.

Сравнительный анализ полученных результатов для исследуемых 2-х законов регулирования, формируемых блоком регулирования Р2 контроллера с применения ИМ типа АМЕ 20 при различных параметрах блока контроллера, показал следующее:

- 1) для ПИ-регулятора расчетное теплотребление здания незначительно увеличивается с 1,08502 ГДж до 1,08858 ГДж при возникновении колебательного переходного процесса;
- 2) для И-регулятора расчетное теплотребление здания находится на уровне аналогичном как для ПИ-регулятора и незначительно увеличивается

при колебательном переходном процессе с 1,08456 ГДж до 1,08535 ГДж.

Переходные процессы колебательного вида для ИМ должны быть исключены, так как они приводят к преждевременному выходу из строя электродвигателя ИМ. Для устранения колебательных процессов, появившихся в автоматической системе регулирования автоматизированного ИТП при исследуемых процессах, необходимо изменить настроечные параметры регулятора с учётом заданного времени перемещения штока с помощью ИМ.

Выводы:

1. Представлены возможности математического моделирования управления автоматизированным ИТП здания с известными типовыми регуляторами. С помощью имитационного моделирования в среде Simulink исследованы и выявлены особенности автоматизированного ИТП на базе применения ПИ- и И-регуляторов.

2. В инновационных технологиях, внедряемых при создании автоматизированных ИТП зданий, необходимо учитывать полученные результаты, которые показали, что теплопотребление здания при типовых законах регулирования находится приблизительно на одном и том же уровне и поэтому для регулирования процесса отопления здания имеется возможность практического применения И-регулятора, так как он проще в реализации и в настройке.

3. Анализ переходного процесса с учётом температуры теплоносителя T_{02} в обратном трубопроводе здания показывает, что ОУ является низкочастотным фильтром по отношению к существенным колебаниям на его вводе (в подающем трубопроводе).

4. В отличие от известных методик определения параметров блока регулирования контроллера на основе расчётной переходной характеристики последовательного соединения ОУ и датчика температуры с помощью разработанной математической модели имеется возможность

определять не только оптимальные параметры настройки блока регулирования, но прежде всего параметры теплоносителя при возможных изменениях как в структуре элементов автоматизированного ИТП, так и в СО здания или сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Hartman, T.* Индустрия комфорта: возможности XXI века / *T. Hartman* // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2001. №3. С. 16-20.
2. *Табунщиков, Ю.А.* Энергоэффективные здания / *Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н.В. Шилкин.* – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.
3. *Ицкович, Э.Л.* Классификация современных контроллеров и их сетевых комплексов // *Оборудование.* 2004. № 7. С. 36-41.
4. *Электронные регуляторы и электрические средства управления.* Каталог RC.08.E3.50 – М.: ООО «Данфосс», 2009. 115 с.
5. *Оборудование для автоматизации.* Каталог продукции 2010 – М.: ООО «ОВЕН», 2010. 384 с.
6. *Потапенко, А.Н.* Математическое моделирование процессов отопления распределенного комплекса зданий при различных схемах теплопотребления / *А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, Е.А. Потапенко* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т13, №4(4). С. 998-1002.
7. *Потапенко, А.Н.* Автоматизированное управление процессом централизованного теплоснабжения распределенного комплекса зданий с учетом моделирования этих процессов / *А.Н. Потапенко, Е.А. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев* // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2007. № 7-8. С. 120-134.
8. *Солдатенков, А.С.* Разработка и исследование математической модели управления автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом / *А.С. Солдатенков, А.Н. Потапенко, С.Н. Глаголев* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. №1. С. 41-48.
9. *Клюев, А.С.* *Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: справочное пособие* / *А.С. Клюев и др.*; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 368 с.

RESEARCH THE MATHEMATICAL MODEL OF AUTOMATED INDIVIDUAL THERMAL POINT MANAGEMENT WITH STANDARD CONTROLLERS

© 2012 E.A. Potapenko, A.S. Soldatenkov, A.N. Potapenko, S.N. Glagolev
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Possibilities of mathematical modeling of automated individual thermal point management (ITP) of a building with known standard controllers are shown. Laws of regulation of two types are investigated: proportional and integral and integral, regulations of the controller formed by the block taking into account application of operating mechanism. Possibilities of using the I-controller for heating process in automated ITP of a building are shown.

Key words: *individual thermal point, automatic control, mathematical modeling*

Evgeniy Potapenko, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Traffic Management and Road Safety. E-mail: potapenkoI@intbel.ru; Aleksey Soldatenkov, Senior Teacher at the Department of Electrotechnics and Automation. E-mail: aser@pisem.net; Anatoliy Potapenko, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Electrotechnics and Automation. E-mail: potapenko@intbel.ru; Sergey Glagolev, Doctor of Economy, Professor. E-mail: sergeyglagolev@yandex.ru