

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

potapenko@intbel.ru

В работе исследованы алгоритмы управления процессом теплоснабжения зданий и сооружений по схеме зависимого присоединения для повышения энергосбережения, а также особенности переходных характеристик и фазовых траекторий в исследуемой системе. Разработана структура регулятора на основе синтезированных алгоритмов.

Ключевые слова: система теплоснабжения, экспериментальные исследования, математическое моделирование, фазовый портрет, законы управления, автоматическое регулирование.

Теплоэнергетика является одной из важных составляющих топливно-энергетического комплекса страны, и ее развитие является одной из приоритетных задач Правительства. Важно учитывать, что расходы на тепловую энергию являются преобладающими среди статей коммунальных расходов предприятий и организаций [1]. В связи с этим важным направлением в решении проблем энергосбережения должна стать реконструкция elevatorных тепловых пунктов с созданием систем автоматического регулирования и учета тепловой энергии на базе современного энергосберегающего оборудования. При этом с целью эффективного управления распределенными энергосистемами зданий и обеспечения экономии и рационального использования энергоресурсов основной упор необходимо сделать на разработку автоматизированных систем диспетчерского управления процессами теплоснабжения зданий и сооружений, что в совокуп-

ности позволит снизить потребление тепловой энергии в среднем до 30% [2, 3].

Рассмотрим особенности процесса теплоснабжения здания или сооружения с зависимым присоединением к тепловым сетям на основе системы отопления. На рис. 1 представлена схема системы отопления здания, в которой приняты следующие обозначения: M_2 , K_1 – исполнительный механизм с регулирующим клапаном; M_1 , H_1 – электропривод с циркуляционным насосом; СО – система отопления здания; KO_1 – обратный клапан, G_1 , T_1 – соответственно расход и температура теплоносителя из теплосетей; T_2 – температура возвращаемого в теплосети теплоносителя; G_{co} , T_{co} – соответственно расход и температура теплоносителя в подающем трубопроводе СО здания; $G_{ок}$ и T_o – соответственно расход и температура теплоносителя участка смешивания.

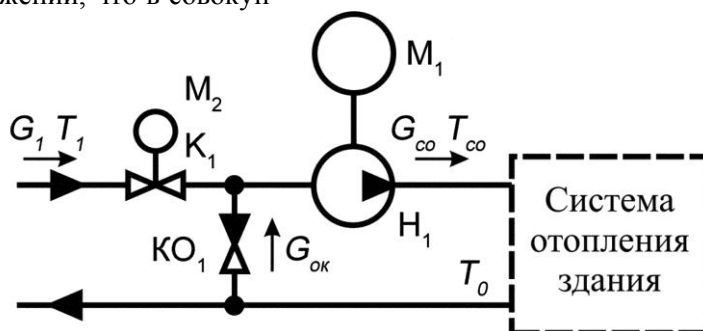


Рисунок 1. Схема системы отопления с зависимым теплоснабжением

Для оценки эффективности существующих и апробации новых методов и алгоритмов управления необходимо обладать адекватной математической моделью процесса отопления здания. В общем случае нестационарные процессы в системе отопления определяются на основе решения краевой задачи с уравнением теплопроводности с учетом вынужденной конвек-

ции [4]. Сложность данной модели обусловлена необходимостью задания существующей конфигурации системы отопления, с точным расположением ветвей, стояков и отопительных приборов, а также различных параметров, таких как: расход по ветвям и стоякам, теплопотребление отопительных приборов и т.д., причём их значения могут изменяться в процессе эксплуатации.

Исходя из вышеизложенного, целесообразно применить математическую модель, основанную на использовании результатов экспериментальных исследований объекта, представленную в [4].

Процесс отопления здания описывается следующей системой уравнений, которая включает в себя нелинейное алгебраическое уравнение, описывающее участок смешивания теплоносителя:

$$\begin{cases} T_1 G_1(t) + T_o(t) \cdot (G_{co} - G_1(t)) = G_{co} T_{co}(t), \\ G_{ок}(t) + G_1(t) = G_{co}, \\ \tau_1 \tau_2 \frac{d^2 T_o}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dT_o}{dt} + T_o(t) = k T_{co}(t). \end{cases} \quad (1)$$

Динамические процессы в системе отопления описываются аperiodическим звеном второго порядка, причем выходная величина – $T_o(t)$, а входная – $T_{co}(t)$.

После замены переменных $T_{co}(t)=x_1$, $T_o(t)=x_2$, $G_1(t)=U$, система уравнений (1) в форме пространства состояний будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{dt} = x_3, \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{k-1}{\tau_1 \tau_2} x_2 - \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{\tau_1 \tau_2} x_3 + \frac{k T_1}{\tau_1 \tau_2 G_{co}} U - \frac{k}{\tau_1 \tau_2 G_{co}} x_2 U. \end{cases} \quad (2)$$

При этом уравнения сепаратрис в фазовой плоскости следующие [4]:

$$\begin{cases} H = L_1(x_2, x_3, U) = x_3 - (x_2 + \frac{c}{a}) (\frac{b + \sqrt{b^2 + 4a}}{2}), \\ V = L_2(x_2, x_3, U) = x_3 - (x_2 + \frac{c}{a}) (\frac{b - \sqrt{b^2 + 4a}}{2}). \end{cases} \quad (3)$$

где $a = \frac{(k-1)G_{co} - kU}{\tau_1 \tau_2 G_{co}}$, $b = -\frac{(\tau_1 + \tau_2)}{\tau_1 \tau_2}$, $c = \frac{k T_1 U}{\tau_1 \tau_2 G_{co}}$

Для исследования динамики системы (2) выполним аппроксимацию производных по методу левых прямоугольников и получим си-

стему конечно-разностных уравнений, описывающих динамику системы отопления с зависимым теплоснабжением:

$$\begin{cases} x_2[n+1] = x_2[n] + \Delta t x_3, \\ x_3[n+1] = x_3[n] + \Delta t \left[\frac{(k-1)x_2[n]}{\tau_1 \tau_2} - \frac{(\tau_1 + \tau_2)x_3[n]}{\tau_1 \tau_2} + \frac{k T_1 U[n]}{\tau_1 \tau_2 G_{co}} - \frac{k x_2[n] U[n]}{\tau_1 \tau_2 G_{co}} \right]. \end{cases} \quad (4)$$

Путем изменения начальных условий $x_2[0]$, $x_3[0]$ можно получить все семейство фазовых траекторий движения системы (2), представленное на рис. 2.

При моделировании использовались следующие значения параметров объекта управления: $k=0,7$; $\tau_1=760$ с; $\tau_2=1300$ с; $T_1=100^\circ\text{C}$; $G_{co}=15$ м³/ч; $\Delta t=10$ с.

Из анализа результатов (см. рис. 2, а) можно сделать следующие выводы. На фазовой

плоскости существует два типа фазовых траекторий, различающихся по направлению движения – области 1, 2 и области 3, 4. Все траектории сходятся к установившемуся значению x_2 , которое определяется из уравнения участка смешивания при заданном значении U , а сепаратрисы V и H описывается системой уравнений (3). Точку их пересечения можно получить, приняв $x_3=0$. При этом следует, что $x_2 = -c/a = T_o$.

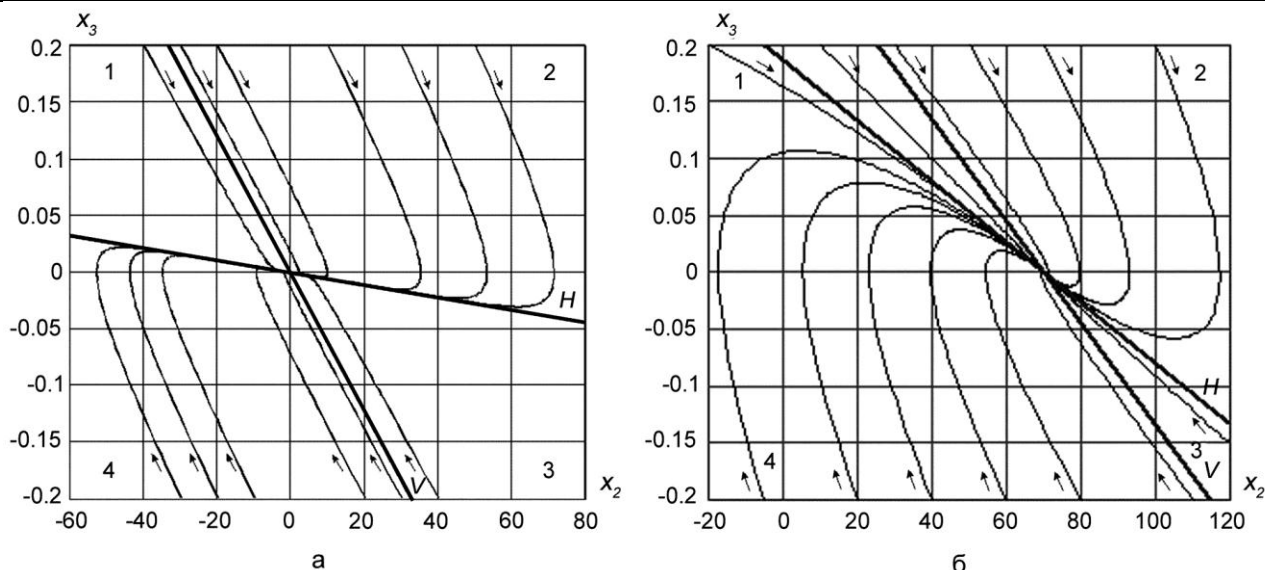


Рисунок 2. Фазовые портреты исследуемой системы:
 а – значения $U = U_{min} = 0 \text{ м}^3/\text{ч}$; б – значения $U = U_{max} = G_{co} = 15 \text{ м}^3/\text{ч}$

С точки зрения реального функционирования системы теплоснабжения, движение изображающей точки всегда должно начинаться с оси абсцисс, т.е. при $x_3=0$, что соответствует установившемуся режиму. Далее в зависимости от уровня управляющего воздействия U изображающая точка будет двигаться по соответствующей фазовой траектории в области 2 или 4 (см. рис. 2). Следует отметить, что при движении изображающей точки x_3 достигает максимума намного быстрее, чем длится переходный процесс (см. рис. 3, а), т.е. участок фазовой траектории до максимума x_3 изображающая точка (ИТ)

проходит очень быстро. Движение по траекториям областей 2 и 4 занимает одинаковое время, которое зависит от параметров объекта τ_1 и τ_2 (см. рис. 3, а). Движение ИТ по фазовым траекториям в областях 1 и 3 занимает значительно меньшее время, но попасть на них можно только с переходного режима, поскольку $x_3 \neq 0$. На рис. 3 б и 3 в приведены переходные характеристики и соответствующие им фазовые траектории при различных значениях x_3 . Движение по сепаратрисе V обеспечивает наименьшую длительность переходного процесса.

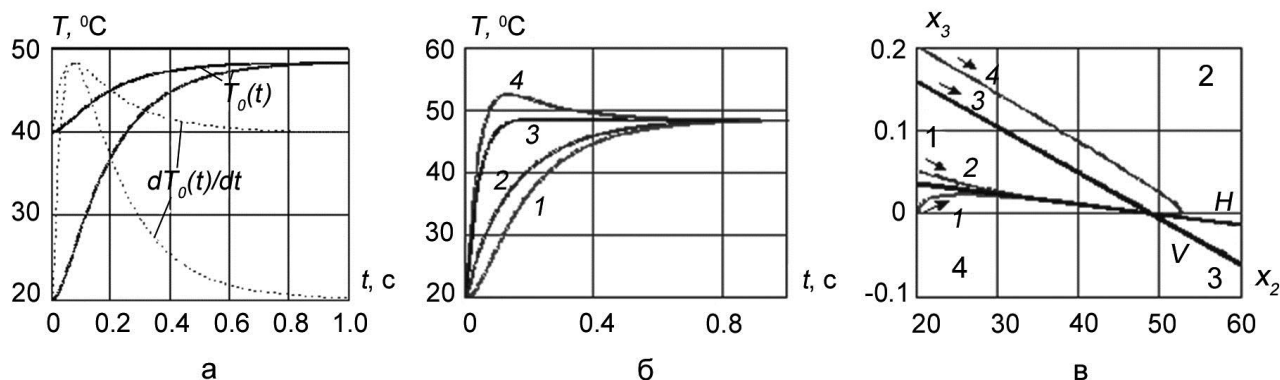


Рисунок 3. Переходные характеристики и фазовые траектории в исследуемой системе
 а – переходные характеристики исследуемой системы с учётом (рис. 2); б – переходные характеристики при различных значениях x_3 (обозначения кривых 1, 2, 3, 4); в – фазовые траектории при различных значениях x_3 (обозначения областей 1, 2, 3, 4)

Таким образом, чтобы попасть на сепаратрису V или H ИТ необходимо начинать движение при значении U большем, чем необходимо для выхода на режим теплоснабжения, например при $U=U_{max}$, а затем при достижении ИТ сепара-

трисы, переключить управление на соответствующее установившемуся значению. При этом переключение по линии H обеспечивает значительно меньшее теплотребление, а переключе-

чение по линии V обеспечивает меньшую длительность переходного процесса.

$$U = \begin{cases} U_{\max}, L_{1,2}(x_2, x_3, U_{ycm}) < 0 \\ U_{ycm}, L_{1,2}(x_2, x_3, U_{ycm}) > 0 \end{cases}, \varepsilon > 0; \quad U = \begin{cases} U_{\min}, L_{1,2}(x_2, x_3, U_{ycm}) > 0 \\ U_{ycm}, L_{1,2}(x_2, x_3, U_{ycm}) < 0 \end{cases}, \varepsilon < 0, \quad (5)$$

где $\varepsilon = (T_{co}^{def} - T_{co})$ - рассогласование; $U_{\max} = G_{co}$, $U_{\min} = 0$; U_{ycm} определяется из уравнения участка смешивания теплоносителя и имеет

$$U_{ycm} = \frac{T_{co}^{def} G_{co} (1 - k)}{(T_1 - T_{co}^{def}) k}.$$

Для оценки эффективности предложенного управления сравним его с существующим ПИ-регулируем по критериям быстродействия и энергопотребления, которое оценим по следующей формуле:

$$Q = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^N (T_1 - x_2[n]) \cdot U[n]. \quad (6)$$

В целях сравнения используем следующие законы управления:

$$U_1 = U_{ycm}; \quad (7)$$

Следовательно, энергоэффективное управление при стабилизации T_{co}^{def} будет иметь следующий вид:

$$U_2 = K_n (T_{co}^{def} - x_1(t)) + \frac{1}{T_u} \int (T_{co}^{def} - x_1(t)) dt; \quad (8)$$

$$U_3 = \begin{cases} G_{co}, L_1(x_2, x_3, U_{ycm}) < 0, \\ U_{ycm}, L_1(x_2, x_3, U_{ycm}) > 0; \end{cases} \quad (9)$$

$$U_4 = \begin{cases} G_{co}, x_3 < (x_3)_{\max}, \\ U_{ycm}, x_3 > (x_3)_{\max}; \end{cases} \quad (10)$$

$$U_5 = \begin{cases} G_{co}, L_2(x_2, x_3, U_{ycm}) < 0, \\ U_{ycm}, L_2(x_2, x_3, U_{ycm}) > 0. \end{cases} \quad (11)$$

В таблице 1 представлены основные результаты расчётов системы на основе проведенных исследований с учётом особенностей законов управления.

Таблица 1

Результаты моделирования

$T_{co}, ^\circ\text{C}$	30	40	50	60	70	80	90	100
U_{ycm}/G_{co}	0,11	0,17	0,23	0,31	0,41	0,55	0,73	1,00
$Q_1/Q_1, \%$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$Q_2/Q_1, \%$	0,91	4,75	5,79	5,51	4,55	3,20	1,64	0,00
$Q_3/Q_1, \%$	1,25	1,56	1,51	1,63	1,65	1,50	1,26	0,00
$Q_4/Q_1, \%$	35,94	11,58	14,43	9,26	5,75	3,20	1,31	0,00
$Q_5/Q_1, \%$	2,51	6,98	8,89	8,37	7,22	5,34	2,99	0,00

В результате анализа результатов, полученных при моделировании и представленных в таблице, можно сделать вывод, что при малых рассогласованиях, менее 5°C , для стабилизации T_{co} целесообразно использовать ПИ-закон регулирования с учётом пропорциональной и интегральной составляющих, описываемый уравнением (8). При больших величинах рассогласования, т.е. при переходе с ночного на дневной режим отопления следует использовать закон управления в виде уравнений (9), обеспечивающий меньшее энергопотребление, но при удовлетворительном времени регулирования или закон управления в виде уравнений (11), обеспечивающий намного меньшее время регулирования (в 3 раза по сравнению с законом управления в виде уравнений (9)) при практически одинаковом (на 1, ..., 5% больше) теплопотреблении. Кроме того, немаловажным достоин-

ством законов управления (см. ур-ния (9), (11)) является возможность, так называемого «натоп» в здании при смене режима отопления. Закон управления в виде уравнения (7) обеспечивает минимальное энергопотребление, но имеет неудовлетворительное время регулирования, кроме того, отсутствует период «натоп».

При моделировании установлено, что наклон сепаратрисы значительное влияние оказывает изменение параметров τ_1, τ_2 модели ОУ, следовательно, в реальных условиях функционирования системы управление на базе аналитического представления сепаратрисы будет неэффективным из-за дрейфа параметров объекта. Следовательно, необходимо предложить закон управления на основе уравнений (9) и (11), но момент переключения выбрать, например, при достижении максимума переменной x_3 , т.е. при законе управления в виде уравнений (10). Из

анализа результатов моделирования следует, что закон управления в виде уравнений (10), при значительных рассогласованиях, имеет быстрое действие не хуже, чем закон управления в виде уравнений (11), и при меньшем энергопотреблении, имеет период натопа и не зависит от параметров модели.

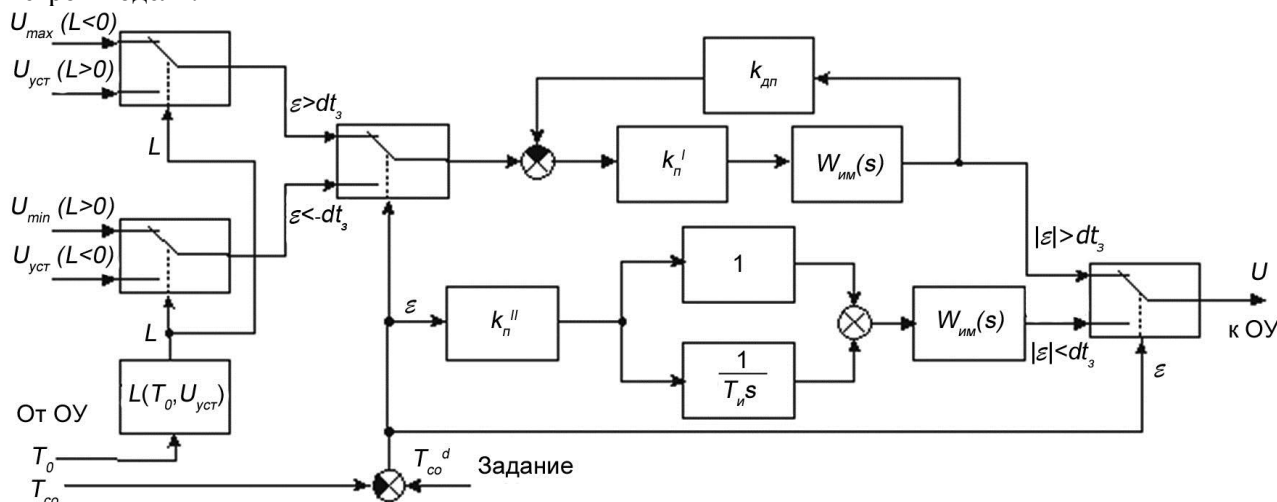


Рисунок 4. Структура регулятора системы управления процессом отопления здания

В зависимости от уровня сигнала рассогласования ε происходит воздействие на объект управления по ПИ-закону регулирования (при малых рассогласованиях) или по закону на основе синтезированных алгоритмов управления (при больших рассогласованиях). Под большими рассогласованиями понимаются режимы переключения по заданной программе, связанные с повышением или понижением температуры в помещениях здания. Момент переключения определяется по достижении температуры теплоносителя T_{co} заданного уровня $T_{co}^{def} \pm \Delta t_3$. Уровень воздействия по разработанному закону зависит от знака ε и знака соотношений (3), определяющих линию переключения в фазовой

С учётом вышеизложенного можно сконструировать автоматический регулятор с переменной структурой на основе синтезированных алгоритмов управления. Регулятор такого типа представлен на рис. 4.

плоскости, а также от значения переменной x_2 (T_o).

Кроме того, значительные изменения параметров теплоносителя возможны на источнике тепла, например, на районной котельной, которые аналогичны большим рассогласованиям в режимах переключения по заданной программе (при переходе с ночного на дневной режим отопления или обратно) в автоматизированном индивидуальном тепловом пункте (ИТП), которые также приведут, например, к изменениям температуры или расхода теплоносителя на вводе в ИТП. Процесс изменения температуры теплоносителя в трубопроводах на вводе тепловых сетей в ИТП при постоянном расходе теплоносителя представлен на рис. 5.

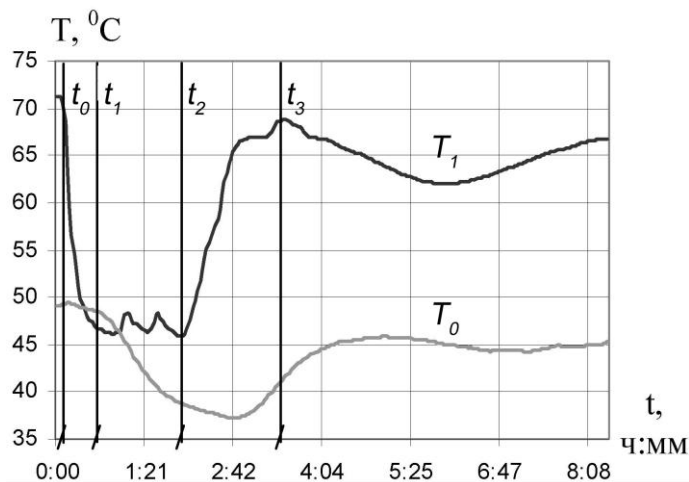


Рисунок 5. Пример, изменения температуры теплоносителя на вводе тепловых сетей в ИТП: T_1, T_o – температура теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах; по оси абсцисс – изменение времени переходного процесса в часах (ч) и минутах (м)

Для управления по разработанному закону регулирования необходимо располагать не только значением x_2 , но и значением первой производной dx_2/dt (см. рис. 3, а). Известно, что дифференцирование в условиях реального функционирования объекта - сложная задача, связанная с фильтрацией помех, воздействующих на объект и др. Однако, учитывая инерционность объекта и то, что x_2 формируется на выходе объекта, обладающего значительной постоянной времени, который сглаживает помехи, возникающие при скачкообразных изменениях давления и расхода в теплосети, то задача дифференцирования для цифрового регулятора сводится к нахождению соответствующей аппроксимации оператора дифференцирования по значениям на предыдущих шагах.

Выводы по результатам исследований следующие: целесообразно использовать сочетание различных законов управления и при этом применять регулятор с переменной структурой, который бы функционировал следующим образом. Для выхода на дневной или ночной режим теплоснабжения здания необходимо использовать законы управления в виде уравнений (9)-(10), позволяющие снизить потери при смене режима, который выполняется в соответствии с суточной или недельной программами. Вместе с тем, для осуществления погодной коррекции подачи теплоносителя и при обработке возмущений, свя-

занных как с внешними, так и с внутренними факторами необходимо использовать ПИ-закон регулирования (см. уравнение (8)).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. Министерство энергетики РФ. <http://www.mte.gov.ru/docs/32/189.html>
2. Опыт внедрения современных энергоэффективных технологий на основе автоматизации распределенных энергосистем зданий вуза / А.М. Гридчин [и др.] // Строительные материалы. Приложение «Строительные материалы: бизнес» №4. – М., 2005. – №2. – С. 2-5.
3. *Потапенко, А.Н.* Вопросы эффективности и особенности развития АСДУ распределенными энергосистемами зданий образовательного назначения / А.Н. Потапенко, А.В. Белоусов, Е.А. Потапенко // Журнал «Энергоэффективность: Опыт, проблемы, решения». – Вып. 3. – 2003. – С. 58-67.
4. Автоматизированное управление процессом централизованного теплоснабжения распределенного комплекса зданий с учетом моделирования этих процессов / А.Н. Потапенко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2007. – № 7-8. – С. 120-134.