

*Показаны особенности управления энергоносителем распределенного комплекса зданий в условиях функционирования автоматизированной системы управления различными типами энергосистем с учетом применения на нижнем её уровне современных систем контроля и учета потребления энергоресурсов, энергоэффективного оборудования и современных технологий автоматизации.*

**УДК 696/697:681.5**

**А.Н. Потапенко**, к.т. н, доц.,  
**А.С. Солдатенков**,  
**А.О. Яковлев**.  
*Белгородский государственный  
 технологический университет  
 им. В.Г. Шухова*

## **ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ ЗДАНИЙ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Многоуровневая автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ) комплекса зданий БГТУ им. В.Г. Шухова – основа демонстрационной зоны, входящая в состав региональных центров энергосбережения Минобразования и науки РФ [1]. Нижний уровень АСДУ включает распределенные энергосистемы зданий в виде автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов (ИТП), приточно-вентиляционных установок (ПВУ) и др. Этот уровень предназначен для автоматического регулирования процесса теплоснабжения систем зданий, формирования первичной информации о потреблённой электрической энергии (на базе электросчётчиков трёхфазных электронных типа Меркурий 230 ART), теплотребления (на базе теплосчетчиков типа КМ-5М), о количестве холодной воды (на базе тахометрических водосчетчиков, подключаемых к теплосчетчикам КМ-5М) и другим данным, передающимся на верхний уровень системы управления. На этом уровне системы управления осуществляется контроль и учет потребления энергоресурсов, а также замыкаются самые «короткие» контуры управления системами отопления, горячего водоснабжения, вентиляции и другими инженерными системами зданий с помощью локальных регуляторов (контроллеров). На среднем уровне находятся универсальные контроллеры. Особенность этого уровня АСДУ заключается в том, что он предназначен для передачи команд управления с верхнего уровня на нижний, а также для передачи информации на верхний уровень с регуляторов нижнего уровня, датчиков, электро- и теплосчетчиков и других счетчиков и измерительных приборов. Верхний уровень АСДУ предназначен для наблюдения, регулирования, получения информации и архивирования данных по процессам, протекающим в распределенных энергосистемах зданий. Практика показала, что автоматизированные ИТП и другие инженерные системы зданий в составе современных АСДУ позволяют существенно снизить потребление энергоресурсов [2, 3].

**1. Основные особенности многоуровневой АСДУ.** Исследование особенностей управления процессом энергоснабжения зданий с возможностью имитационного моделирования рассмотрим на примере БГТУ им. В.Г. Шухова с учетом схемы, представленной на рис. 1. Обозначения на схеме следующие: А<sub>1</sub> – общежитие №4; А<sub>2</sub> – здание Белгородского инженерно-экономического института; А<sub>3</sub> – здание службы главного энергетика; А<sub>4</sub> – учебные мастерские; А<sub>5</sub> и А<sub>6</sub> – студенческие общежития №2 и №1; А<sub>7</sub> – комбинат питания; А<sub>8</sub> – научно-техническая библиотека; А<sub>9</sub> – хозяйственное здание; А<sub>10</sub> – хозяйственный блок; А<sub>11</sub> – гаражи и мастерские; А<sub>12</sub> – овощехранилище; А<sub>13</sub> – службы управления; А<sub>14</sub> – спортивные залы №1 и 2; А<sub>15</sub> – центр непрерывного профессионального образования; А<sub>16</sub> – механический корпус; А<sub>17</sub> – культурно-воспитательный центр (КВЦ); А<sub>18</sub> – главный корпус; А<sub>19</sub> – аудиторный корпус; А<sub>20</sub> – лабораторный корпус.

В последние годы в вузе разумно сочетается как централизованное, так и децентрализованное теплоснабжение зданий вуза на базе 2-х котельных установок типа ТКУ. Представленный материал основан на исследованиях централизованного теплоснабжения зданий вуза, т.е. без учета введенных в эксплуатацию котельных установок.

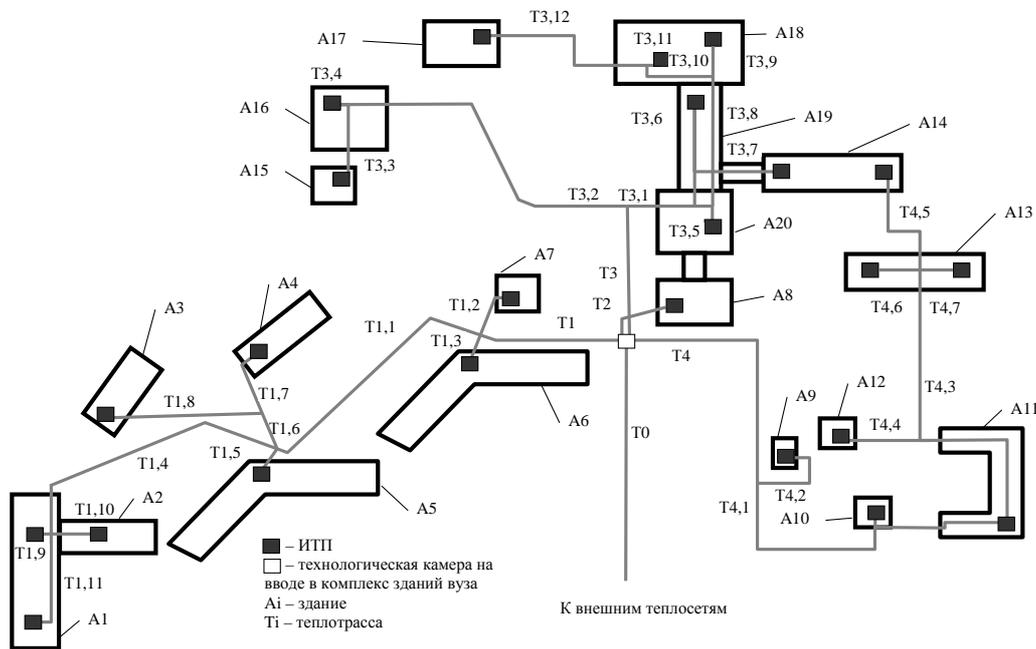


Рис. 1. Схема централизованного теплоснабжения вуза

В системе централизованного теплоснабжения вуза применяется зависимое присоединение систем отопления, приточно-вентиляционных установок (ПВУ) и тепловых завес (ТЗ) к тепловым сетям (ПВУ и ТЗ зданий на схеме не обозначены).

Схема типового автоматизированного ИТП на базе систем автоматического регулирования (САР) с узлом учета теплотребления (УУТ) для открытой системы централизованного теплоснабжения [4] показана на рис. 2.

САР отопления здания содержит следующие приборы и оборудование:

- регулятор перепада давления прямого действия РС1 с клапаном К3 и узлом регулирования;
- моноблок циркуляционных насосов Н1 и Н2 с соответствующими электроприводами М1 и М2;
- специализированный контроллер ТК1 для регулирования температуры в системе отопления и ГВС;
- регулирующий клапан К1 с исполнительным механизмом М3;
- погружные датчики температуры теплоносителя ТЕ1 в подающем трубопроводе системы отопления и ТЕ2 в обратном трубопроводе Т2, датчики температуры наружного ТЕ3 и внутреннего ТЕ4 воздуха здания;
- обратный клапан КО1, расположенный на перемычке между подающим и обратным трубопроводами системы отопления.

САР горячего водоснабжения (ГВС) содержит следующие приборы и оборудование:

- трехходовой регулирующий клапан К4 с исполнительным механизмом М4;
- обратный клапан КО2;
- погружной датчик температуры ТЕ5;
- термостатный клапан-ограничитель ТС1 по температуре теплоносителя с узлом регулирования, клапаном К5 и датчиком температуры ТЕ6.

К контроллеру ТК1 подключены:

- датчики температуры ТЕ1 – ТЕ5 соответственно к аналоговым входам (X<sub>1</sub>–X<sub>5</sub>);

- электроприводы М1 и М2 моноблока насосов и исполнительные механизмы М3 и М4 системы отопления и ГВС соответственно к выходам (Y1 – Y4).

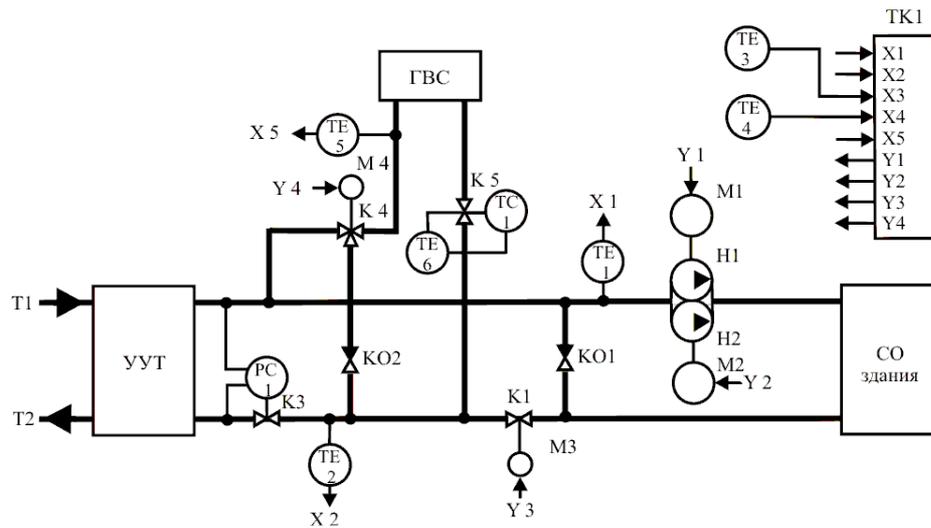


Рис. 2. Блок-схема автоматизированного ИТП для открытой системы теплоснабжения здания

В качестве примера рассмотрим особенности функционирования локальной САР горячего водоснабжения здания, которая стабилизирует заданную температуру в открытой системе теплоснабжения путем изменения соотношения расходов горячей воды из подающего T1 и обратного T2 трубопроводов с помощью трехходового регулирующего клапана K4 с исполнительным механизмом M4. В этом случае по одному из независимых каналов контроллера ТК1 формируется управляющая команда с учетом пропорционального закона регулирования при возникновении отклонения  $\Delta_{t3}$ , как результата сравнения значения от задатчика контроллера ТК1 и данных от погружного датчика температуры TE5, установленного в трубопроводе системы ГВС после трехходового регулирующего клапана K4. Затем команда от контроллера ТК1 преобразуется в электрический сигнал, поступающий на исполнительный механизм M4, перемещающий шток регулирующего клапана K4, и при этом изменяется соотношения расходов горячей воды из подающего T1 и обратного T2 трубопроводов до тех пор пока температура  $T_{гвс}$  не станет равной заданной. Для охлаждения горячей воды до требуемой температуры перед возвратом ее в систему централизованного теплоснабжения в схеме применяется термостатный клапан-ограничитель ТС1 в виде регулятора температуры прямого действия.

Следует отметить, что в открытой системе централизованного теплоснабжения можно регулировать температуру горячей воды в пределах от минимального до максимального значений, которые определяются соответственно температурой горячей воды в обратном и в подающем трубопроводах на вводе в ИТП.

**2. Исследование процессов управления энергоносителем распределенного комплекса зданий.** Обобщенная схема системы управления отоплением здания (рис. 3) содержит: M<sub>2</sub>, K<sub>1</sub> – исполнительный механизм с регулирующим клапаном; M<sub>1</sub>, Н<sub>1</sub> – электропривод с циркуляционным насосом; СО – система отопления; G<sub>i</sub>, T<sub>i</sub> – параметры системы. Узел регулирующий температуру (УРТ) в системе отопления – это регулирующий клапан с исполнительным механизмом и с учетом переключки с обратным клапаном КО<sub>1</sub>, связывающей подающий и обратный трубопроводы СО. Теплоноситель из тепловых сетей с температурой T<sub>1</sub> и расходом G<sub>1</sub> через клапан K<sub>1</sub> поступает к переключке и смешивается с теплоносителем с параметрами G<sub>ок</sub> и T<sub>о</sub>. После смешивания теплоноситель с температурой T<sub>со</sub> и расходом G<sub>со</sub> поступает в ветви системы отопления, а из них через стояки с отопительными приборами в об-

ратный трубопровод с температурой  $T_o$ , причем теплоноситель обратного трубопровода возвращается частично на участок смешивания и в тепловую сеть ( $T_2 = T_o$ ).

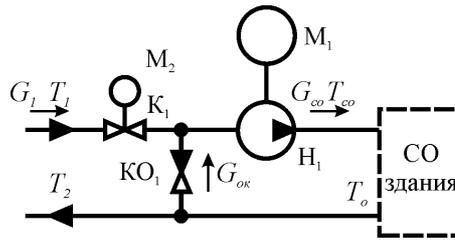


Рис. 3. Схема системы отопления ИТП зданий вуза

Для исследования особенностей функционирования АСДУ на базе автоматизированных ИТП и ПВУ была использована математическая модель управления процессом теплоснабжения распределенного комплекса зданий на основе имитационного моделирования в среде Simulink [5], за основу которой, исходя из экспериментальных исследований, принимается математическая модель [6], предложенная для системы отопления одного здания для зависимой схемы присоединения системы отопления к тепловым сетям.

Процесс отопления здания описывается следующей системой уравнений, включающей нелинейное уравнение, описывающее смешивание теплоносителей в узле регулирования температуры:

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

Последнее уравнение системы (1) описывает динамические процессы в системе отопления и представлено в виде апериодического звена второго порядка, причем выходная величина –  $T_o(t)$ , а входная –  $T_{co}(t)$ ;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $k$  – соответственно постоянные времени системы отопления и коэффициент передачи, которые определяются при параметрической идентификации системы отопления (СО) здания.

Математическая модель управления процессом отопления распределенного комплекса зданий учитывает структуру связей СО зданий и включает математические модели процесса отопления для каждого здания в виде системы (1), в основе которых математические модели СО, законы сохранения массы и количества теплоты, причем каждая из систем уравнений учитывает нелинейный участок смешивания теплоносителей из подающего трубопровода теплосетей и обратного трубопровода системы отопления здания. В разработанной модели, в отличие от известных,  $T_o(t)$  является одним из регулируемых параметров. Разработанная математическая модель позволяет исследовать алгоритмы управления АСДУ, обеспечивающие энергосбережение.

Учитывая результаты моделирования [5], имитационное моделирование управления процессом теплоснабжения распределенных объектов выполнялось в рамках статических режимов работы системы. В рассматриваемом варианте имитационного моделирования исследовался процесс перераспределения энергоносителя между объектами, возникающий при управлении процессом теплоснабжения комплекса зданий с учетом следующих допущений:

- моделирование системы управления выполняется без учета потребления горячей воды из подающих трубопроводов исследуемых объектов, что характерно для вечерних и ночных режимов работы локальных САР, например, для зданий учебных заведений;

- часть зданий  $A_6, A_5, A_1, A_7, A_{16}, A_{17}, A_{18}, A_{19}$  и  $A_{20}$  (рис. 1) имеют локальные САР отопления и ПВУ;
- остальная часть зданий условно считаем, что имеют ИТП с нерегулируемыми элеваторными узлами, причем эти здания по трубопроводам  $T_{1,6}; T_{3,7}$  и  $T_4$  заменяются некоторыми гидравлическими сопротивлениями (например, расчет по методике [7]);
- считаем, что максимальный расход теплоносителя в технологической камере на вводе в вуз был равен  $G_{om} = 149,0 \text{ м}^3/\text{ч}$  при некоторой температуре  $T_m$  наружного воздуха и при этом регулируемые клапаны в зданиях  $A_6, A_5, A_1, A_7, A_{16}, A_{17}, A_{18}, A_{19}$  и  $A_{20}$  были полностью открыты и их суммарный расход составлял  $G_{a1}=104,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- принимаем, что с повышением температуры наружного воздуха до значения  $T_n$  общий расход теплоносителя в технологической камере снизился и стал равным  $127,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ , т.е. регулируемые клапаны в зданиях  $A_6, A_5, A_1, A_7, A_{16}, A_{17}, A_{18}, A_{19}$  и  $A_{20}$  частично прикрылись.

При имитационном моделировании управления процессом теплоснабжения с учетом температуры наружного воздуха  $T_n$  был определен расход теплоносителя в подающих трубопроводах на вводах зданий  $A_6, A_5, A_1, A_7, A_{16}, A_{17}, A_{18}, A_{19}$  и  $A_{20}$  (табл.1). По остальным зданиям с нерегулируемыми элеваторными узлами суммарный расход составил величину  $G_{a2} = 55,27 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Таблица 1

Обозначение здания	Расход, $G_j, \text{ м}^3/\text{ч}$
$A_6$	9,85
$A_5$	8,85
$A_1$ (ИТП <sub>1</sub> , ИТП <sub>2</sub> )	3,90 (ИТП <sub>1</sub> ), 3,80 (ИТП <sub>2</sub> )
$A_7$	2,62
$A_{16}$	7,21
$A_{17}$	6,25
$A_{18}$ (ИТП <sub>1</sub> , ИТП <sub>2</sub> )	7,60 (ИТП <sub>1</sub> ), 8,55 (ИТП <sub>2</sub> )
$A_{19}$	4,90
$A_{20}$	8,20

Анализ сравнения полученных результатов показал следующее:

- при температуре наружного воздуха  $T_m$  исследуемые здания  $A_6, A_5, A_1, A_7, A_{16}, A_{17}, A_{18}, A_{19}$  и  $A_{20}$  потребляют суммарный относительный расход теплоносителя порядка 70,0 %, а остальные здания комплекса – 30,0 %;
- при увеличении температуры наружного воздуха до некоторой величины  $T_n$  по сравнению с  $T_m$  в исследуемых зданиях  $A_6, A_5, A_1, A_7, A_{16}, A_{17}, A_{18}, A_{19}$  и  $A_{20}$  потребляемый суммарный относительный расход теплоносителя снизился до величины порядка 56,5 %, а по остальным зданиям комплекса (условно принятыми в расчетной модели как системы с нерегулируемыми элеваторными узлами) относительный расход теплоносителя при этом увеличился до величины порядка 43,5 %.

Важно отметить, что существующие подходы для интеллектуальных зданий, а также для автоматизированных ИТП здания или ЦТП зданий, разработанные специалистами на Западе, дают положительные результаты по экономии энергоресурсов для этих объектов, но в случае применения этих подходов для распределенного комплекса зданий, связанных через общую технологическую камеру (например, как на схеме рис. 1), или для теплоснабжения микрорайонов города эти подходы могут привести к отрицательным результатам в целом по комплексам зданий.

В заключение необходимо отметить, что на основе имитационного моделирования управления теплоносителем распределенного комплекса зданий в условиях централизованного теплоснабжения показано, что при частичной автоматизации систем теплоснабжения комплекса зданий, ИТП которых через общую технологическую камеру связаны с внешними

тепловыми сетями, возможно при определенных условиях функционирования АСДУ перераспределение теплоносителя внутри этого комплекса, которое может привести к существенному снижению экономии энергоносителя. Для исследования такого типа эффектов необходимо в структуре АСДУ предусматривать применение имитационного моделирования управления процессом теплоснабжения распределенного комплекса зданий с последующим выходом на оптимизацию энергопотребления по всему комплексу зданий.

#### Литература

1. Балыхин, Г.А. Энергосбережение в системе Министерства образования РФ. Итоги и перспективы/ Г.А. Балыхин, С.К. Сергеев // Энергоэффективность: Опыт, проблемы, решения. – 2003. - №3. – С. 54-57. Опыт внедрения современных энергоэффективных технологий на основе автоматизации распределенных энергосистем зданий вуза/ А.М. Гридчин, А.Н. Потапенко, В.С. Лесовик, А.В. Белоусов Е.А. Потапенко // Строительные материалы. Приложение «Строительные материалы: бизнес». № 4. – М.: 2005. – №2. – С. 2-5.
1. Ливчак, В.И. За оптимальное сочетание автоматизации регулирования подачи и учета тепла/ В.И. Ливчак // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). – 1998. №4. – С. 36-38.
2. Потапенко, А. Н. Основы автоматизации процесса централизованного теплоснабжения зданий: учебное пособие/А.Н.Потапенко. – Белгород.: Издательство БГТУ, 2006. – 206с.
3. Потапенко, А.Н. Исследование процесса отопления зданий с применением теплообменников и с возможностью фасадного автоматического регулирования / А.Н. Потапенко, С.В. Костриков Е.А. Потапенко // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2006 – № 7-8. – С. 63-74.
4. Потапенко, А.Н. О математической модели управления процессом отопления распределенного комплекса зданий для автоматизированных диспетчерских систем / А.Н. Потапенко, Е.А. Потапенко, А.О.Яковлев // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2006. – Прил. к №3. – С. 23-33.
5. Зингер, Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1986.– 320 с.

### ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНИМ КОМПЛЕКСОМ БУДИНКІВ З МОЖЛИВІСТЮ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев.

*Показано особливості керування енергоносієм розподіленого комплексу будинків в умовах функціонування автоматизованої системи керування різними типами енергосистем з урахуванням застосування на нижньому її рівні сучасних систем контролю й обліку споживання енергоресурсів, енергоефективного устаткування та сучасних технологій автоматизації.*

### DISTRIBUTION COMPLEX CONTROL IN BUILDING AS PART OF ENERGYSAVING

A.N. Potapenko, A.S. Soldatenkov, A.O. Yakovlev

*Peculiarities are shown by power system of the portioned complex of the buildings in condition of the operation automated managerial system by different types of the power systems using on lower modern systems level and account of the consumption power resource, energy – effective equipment and modern automations technology.*