

УДК 697.922

Н.И. Муслимова, Д.Н. Ушарова, А.В. Егоров, С.В. Купреков, А.В. Пуговкин

Автоматизированная система поквартирного учета тепловой энергии

С применением уравнений теплового баланса рассмотрены задачи внутреннего энергоаудита помещения, с учетом его индивидуальных особенностей, а также задача учета тепловой энергии, потребляемой отдельными помещениями. Измерения в помещении средних температур воздуха, ограждающих конструкций, отопительного прибора и внешней среды позволили найти тепловые параметры, описывающие температурный режим помещения. Рассмотрены вопросы создания аппаратной и программной частей автоматизированной системы поквартирного учета тепловой энергии.

Ключевые слова: энергосбережение, теплоснабжение помещений, система нелинейных дифференциальных уравнений, компьютерная модель, учет тепловой энергии, эксперимент, аппаратно-программный комплекс.

Задача энергосбережения приобретает все большее значение в области систем жизнеобеспечения зданий и помещений. Экономии тепловой энергии можно достичь как за счет совершенствования источников тепла, так и за счет улучшения характеристик отапливаемых объектов (ограждающие конструкции зданий и сооружений, конструкция окон и т.д.). Для этого необходимо знать реальные параметры и индивидуальные особенности помещения, а также учитывать динамические изменения системы (суточные и сезонные изменения параметров внешней среды, изменения состояния систем энергоснабжения в процессе работы и др.).

Начальным этапом энергосбережения является *внутренний энергоаудит помещения*, позволяющий провести поиск нерационального использования энергетических ресурсов и определение параметров повышения энергоэффективности.

Для того чтобы грамотно и оперативно производить учет тепловой энергии, потребляемой как отдельными помещениями, так и зданием в целом, необходимо располагать достаточными аппаратно-программными средствами с применением автоматизированных систем управления и телекоммуникационных технологий. Автоматизированная система поквартирного учета тепловой энергии основана на двух режимах: 1) измерение температур в помещении и вычисление тепловых параметров; 2) регулирование теплового режима.

Сосредоточим внимание на измерительной части.

Учсть характеристики тепловых режимов помещения и его индивидуальные особенности (тип и состояние отопительных приборов, реальное состояние ограждающих конструкций, наличие в помещении мебели и других предметов, а также людей и энергетически активных приборов) возможно с помощью проведения энергоаудита на основании измерения внутренних температур помещения.

Рассмотрим помещение в жилом комплексе, содержащее один отопительный прибор, внешнюю стену с окном и ограждения (в которые входят стены помещения, перекрытия, пол и потолок). Температурные датчики были установлены на стенах и перекрытиях в нескольких местах с тем, чтобы можно было потом получить усредненный интегральный коэффициент, связанный с теплоемкостью стен и перекрытий. Также датчики размещались в воздухе, на отопительном приборе и во внешней среде.

Для проведения внутреннего энергоаудита данного помещения нужно определить значения тепловых параметров, таких как коэффициент теплопередачи отопительного прибора и коэффициенты теплопередачи внешнего и внутреннего ограждений. Нахождение тепловой энергии, потребляемой помещением, позволит производить тепловой учет.

Поведение тепловых процессов в помещениях можно описать с помощью математической модели (1). В основу математического моделирования положен метод дифференциальных балансных уравнений [1]. В качестве зависимых переменных для составления баланса используется тепловая энергия того или иного объема.

Прирост тепловой энергии происходит за счет отопительных приборов, а ее убыль – за счет поглощения стен, теплообмена со смежными помещениями (коридор, лестница, тамбур), излучения во внешнюю среду через окно и внешнюю стену. Кроме того, необходимо учитывать перенос воздушных масс за счет неорганизованной вентиляции, щелей в оконных рамах и дверях (так называемой инфильтрации).

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} = \frac{R_{\text{ист}} \cdot (T_{\text{ист}} - T_1)}{C_1 \cdot \rho_1 \cdot V} - \frac{R_k \cdot (T_1 - T_2)}{C_1 \cdot \rho_1 \cdot V} - \frac{R_{\text{внеш}} \cdot (T_1 - T_{\text{внеш}})}{C_1 \cdot \rho_1 \cdot V}, \\ \frac{dT_2}{dt} = \frac{R_k \cdot (T_1 - T_2)}{C_2 \cdot \rho_2 \cdot V_2} - \frac{R_{\text{см}} \cdot (T_2 - T_{\text{см}})}{C_2 \cdot \rho_2 \cdot V_2}, \end{cases} \quad (1)$$

где T_1 – температура воздуха в помещении [K]; $R_{\text{ист}}$ – коэффициент теплопередачи отопительного прибора, учитывающий долю тепловой энергии, передаваемой от отопительного прибора в воздух помещения, и определяющий индивидуальные особенности отопительных приборов [Вт/К]; $T_{\text{ист}}$ – средняя температура отопительного прибора [K]; R_k – коэффициент теплопередачи внутреннего ограждения, учитывающий долю тепловой энергии, передаваемой от воздуха помещения в его стены и перекрытия [Вт/К]; T_2 – температура ограждения [K]; $R_{\text{внеш}}$ – коэффициент теплопередачи внешнего ограждения, учитывающий явления теплопроводности, конвекции и теплового излучения [Вт/К]; $T_{\text{внеш}}$ – температура внешней среды [K]; $R_{\text{см}}$ – сопротивление излучения в соседнее помещение [Вт/К]; $T_{\text{см}}$ – температура воздуха смежного помещения [K]; C_1, C_2 – удельные теплоемкости воздуха и ограждений соответственно [кДж/(кг·K)]; ρ_1, ρ_2 – плотности воздуха и ограждения соответственно [кг/м³]; V_1, V_2 – объемы помещения и ограждений соответственно [м³].

Первое уравнение системы описывает изменение тепловой энергии воздушной массы Q_1 , заключенной в комнате объемом V_1 :

$$Q_1 = T_1 \cdot C_1 \cdot \rho_1 \cdot V_1.$$

Второе уравнение показывает распределение тепловой энергии Q_2 в единицу времени для системы, в которую входят внутренние ограждения и смежные помещения:

$$Q_2 = T_2 \cdot C_2 \cdot \rho_2 \cdot V_2.$$

Здесь следует заметить, что коэффициенты, входящие в уравнения, носят интегральный характер и могут быть найдены экспериментальным путем.

Коэффициент теплопередачи отопительного прибора $R_{\text{ист}}$ является постоянным параметром системы. Значение коэффициента $R_{\text{ист}}$ находится согласно справочнику [2], а также подтверждается проведенными нами экспериментами и составляет 27 Вт/К в диапазоне температур воздуха 15–25 °С.

Для получения температурных зависимостей, нахождения параметров помещения и изучения тепловых режимов были проведены эксперименты в помещении объемом 19,5 м³ с чугунным радиатором М-140-АО в качестве отопительного прибора. В основу экспериментов положен принцип измерения температур отопительного прибора, воздуха и ограждений помещения как функций времени с помощью вышеописанной системы температурных датчиков. Полученные в результате экспериментов температурные зависимости (рис. 1) совместно с предложенной математической моделью (1) позволят найти значения тепловых параметров помещения: R_k и $R_{\text{внеш}}$.

Вычисление данных параметров можно произвести двумя путями. Первый путь – это нахождение коэффициентов из стационарного режима, второй путь – нахождение коэффициентов из динамического режима, учитывающего влияние различных параметров на тепловой режим помещения. Под стационарным режимом понимается ситуация в помещении, когда соблюдается баланс между поступающей тепловой энергией и отдаваемой помещением во внешнюю среду. В общем случае стационарный режим является одной из возможных ситуаций. Любой теплообмен носит динамический характер и для его описания одного стационарного режима недостаточно [3].

Вычисление коэффициентов из стационарного режима. Стационарный режим интересен тем, что при нахождении параметров мы можем полагать $\frac{dT}{dt} = 0$ в системе уравнений (1), что значительно упрощает расчет и позволяет не учитывать неизвестную величину $\rho \cdot C \cdot V$.

Для нахождения коэффициентов теплопередачи внутреннего и внешнего ограждений R_k и $R_{\text{внеш}}$ воспользуемся первым уравнением системы (1), описывающим изменение температуры воздуха в помещении.

Составим систему из двух уравнений для разных стационарных режимов с неизвестными параметрами R_k и $R_{внеш}$:

$$\begin{cases} R_{ист} \cdot (T_{ист} - T_1)_1 - R_k \cdot (T_1 - T_2)_1 - R_{внеш} \cdot (T_1 - T_{внеш})_1 = 0; \\ R_{ист} \cdot (T_{ист} - T_1)_2 - R_k \cdot (T_1 - T_2)_2 - R_{внеш} \cdot (T_1 - T_{внеш})_2 = 0. \end{cases}$$

Зная температуры отопительного прибора, воздуха, ограждений помещения и внешней среды из эксперимента, а также величину $R_{ист}$, найдем нужные параметры.

Для большей надежности проводилась серия экспериментов с последующим усреднением по ансамблю. Разброс расчетных значений тепловых параметров помещения в стационарных режимах для разных дней эксперимента составляет:

$$R_k: 141,21 - 410,18 \text{ Вт/К}; R_{k \text{ сред}} = 293,61 \text{ Вт/К};$$

$$R_{внеш}: 10,14 - 17,54 \text{ Вт/К}; R_{внеш \text{ сред}} = 14,57 \text{ Вт/К}.$$

Вычисление коэффициентов из динамического режима. При проведении эксперимента воздух и стены помещения охлаждались за счет притока холодного воздуха из внешней среды (открытие створки окна). При этом за счет инерционности ограждений охлаждение стен было меньше, чем охлаждение воздуха. Затем система помещения приводилась в естественное состояние, и происходило нагревание объема воздуха и стен за счет притока тепла от отопительных источников. Этот процесс нагревания фиксировался с помощью системы температурных датчиков. Полученные типичные экспериментальные зависимости приведены на рис. 1.

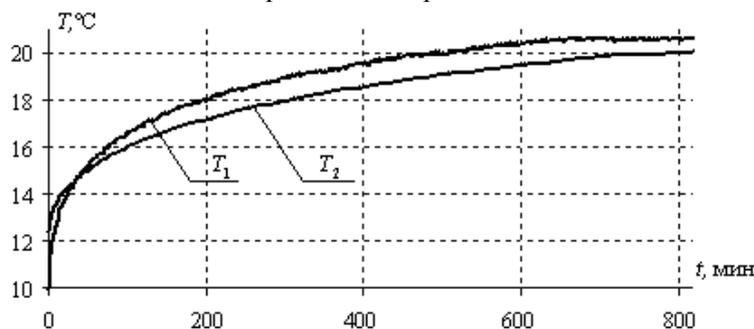


Рис. 1. Экспериментальные зависимости температуры воздуха T_1 (°C) и температуры ограждений T_2 (°C) от времени (мин)

Поведение температур воздуха и ограждений (см. рис. 1) характеризуется фазой нарастания и фазой насыщения, то есть приходом температур воздуха и ограждений в стационарное состояние. Также здесь имеется характерная точка — точка пересечения температурных зависимостей. В этот момент времени температуры воздуха T_1 и ограждений T_2 имеют одинаковое значение, что позволяет исключить коэффициент R_k и упрощает расчет.

Но возникают некоторые трудности, такие как неизвестность параметра $\rho \cdot C \cdot V$. Так как в помещении расположены различные предметы (шкаф, диван, стол, электрические приборы и т.д.), они тем или иным способом влияют на теплоемкость объема помещения, поэтому данный параметр может быть найден только экспериментальным путем и будет являться индивидуальным для каждого помещения. Неопределенность данного параметра не позволяет вычислить истинные значения коэффициентов.

Для расчета коэффициентов $R_{внеш}$, R_k зададим моменты времени в ключевых точках на экспериментальных кривых, для которых определим соответствующие температуры T_1 и T_2 , а также температуры внешней среды $T_{внеш}$ и отопительного прибора $T_{ист}$. При этом подбираются участки графиков, приближенно считающиеся линейными.

Подставляя заданные значения температур в первое уравнение системы (1) и находя приращение температуры воздуха по времени $\frac{dT_1}{dt}$ так же известные в левой части уравнений, мы получили

$$\text{систему алгебраических уравнений для параметров } R'_{ист} = \frac{R_{ист}}{\rho \cdot C \cdot V}, R'_k = \frac{R_k}{\rho \cdot C \cdot V}, R'_{внеш} = \frac{R_{внеш}}{\rho \cdot C \cdot V}.$$

Для того чтобы найти истинные значения коэффициентов R_k и $R_{\text{внеш}}$, необходимо определить параметр $\rho \cdot C \cdot V$. Это не составит труда при известном значении $R_{\text{ист}} = 27$ Вт/К и рассчитанном $R'_{\text{ист}}$.

Вычисленные коэффициенты с учетом значений параметра $\rho \cdot C \cdot V$ для каждого дня экспериментов приведены в таблице.

Разброс значений коэффициентов объясняется изменением внешних погодных условий, влияющих на значения температур воздуха и ограждающих конструкций помещения. Так как обычно тепловой режим помещения находится в стационарном состоянии, то следует опираться на первый расчет.

Подводя итоги, можно сказать, что нахождение тепловых параметров $R_{\text{ист}}$, R_k и $R_{\text{внеш}}$ непосредственно из эксперимента, позволяет провести внутренний энергоаудит помещения с учетом индивидуальных особенностей исследуемого помещения.

При этом мы установили, что коэффициент $R_{\text{внеш}}$ изменяется под влиянием внешних температур, инфильтрации и ветра. На значение коэффициента R_k влияет множитель $(T_1 - T_2)$ в системе уравнений (1), так как при измерении возникает погрешность температуры ограждений T_2 . Эта погрешность вызвана тем, что при проведении эксперимента измерялась температура лишь поверхности стены помещения, а теплообмен зависит от прогрева всей толщины стены.

Несмотря на то, что основной задачей перед нами стояло проведение внутреннего энергоаудита, найденные тепловые параметры позволили произвести расчет тепловой мощности, потребляемой помещением:

$$P_{\text{тепл}} = R_{\text{ист}} \cdot (T_{\text{ист}} - T_1).$$

Вычисленные значения тепловой мощности, потребляемой помещением, позволяют осуществить индивидуальный учет тепловой энергии.

В настоящее время информационные системы являются ключевым инструментом, позволяющим выявить реальные потери тепла при доставке потребителю, адекватно оценить уровень потребления и осуществлять адресные выплаты. Для решения вышеперечисленных задач нами был спроектирован и частично реализован программно-аппаратный комплекс. Основной функцией комплекса является автоматическое снятие показаний квартирных теплосчетчиков, передача снятых показаний в центр обработки (управляющую компанию, ТСЖ) с последующим обобщением результатов и представлением их в виде счёта-квитанции на оплату коммунальных услуг.

Программная часть комплекса – это распределенная система сбора, учета и управления данными с измерительных модулей в режиме реального времени. Программное обеспечение архитектурно также может быть разделено на 2 составляющие: серверное программное обеспечение и клиентское. В состав серверного программного обеспечения (рис. 2) входит система управления базой данных PostgreSQL и программное обеспечение, реализующее поквартирный расчет тепла, основанный на вышеописанной математической модели. Клиентская часть программного обеспечения может быть представлена любым стандартным Web-браузером.

Аппаратная часть комплекса имеет двухуровневую структуру. На нижнем уровне аппаратная часть представлена измерительным модулем (теплосчетчик) и шлюзом, отвечающим за передачу данных на

Расчетные значения тепловых параметров помещения в динамическом режиме

День эксперимента	R_k , Вт/К	$R_{\text{внеш}}$, Вт/К
28.11.2010 г.	143,699	15,525
24.12.2010 г.	225,030	11,992
16.02.2011 г.	142,501	18,143

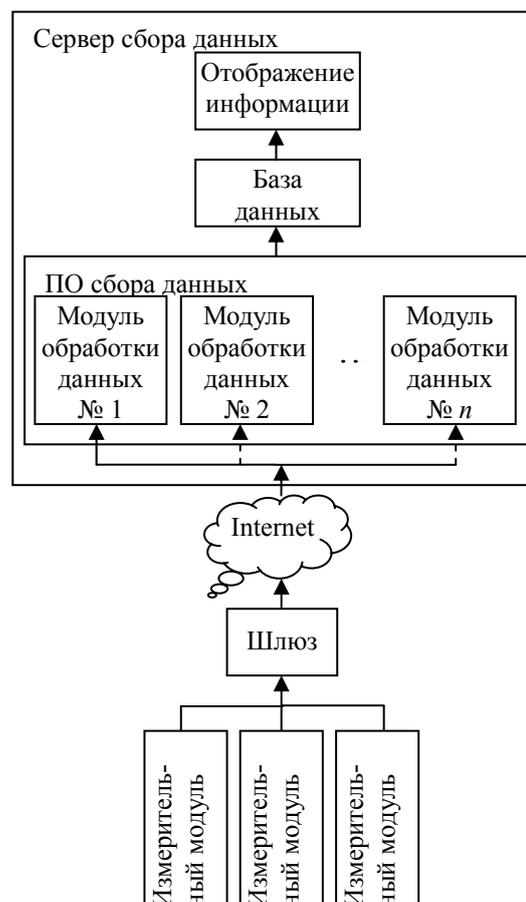


Рис. 2. Обобщенная структура серверного программного обеспечения

верхний уровень системы – сервер, осуществляющий контроль за объемами расходования ресурсов, за возникновением внештатных и аварийных ситуаций, а также допускающий регулирование подаваемой тепловой энергии. Измерительный модуль представляет собой 3 датчика температуры и контроллер для опроса датчиков.

Исполнение разработки возможно двумя вариантами среды передачи данных – проводной и беспроводной. Для того чтобы упростить процесс установки системы в жилом здании, было принято решение использовать беспроводную связь. Беспроводные технологии обладают выгодными отличиями от кабельных технологий по следующим показателям: стоимость, удаленность, мобильность, сроки, защита инвестиций, легкость в обслуживании, гибкость конфигурации, высокая производительность, надежность, общедоступность. Диапазон 2,4 ГГц, используемый разрабатываемым устройством, не требует получения разрешения ГКРЧ, так как специально выделен для применения внутридомовыми сетями передачи данных.

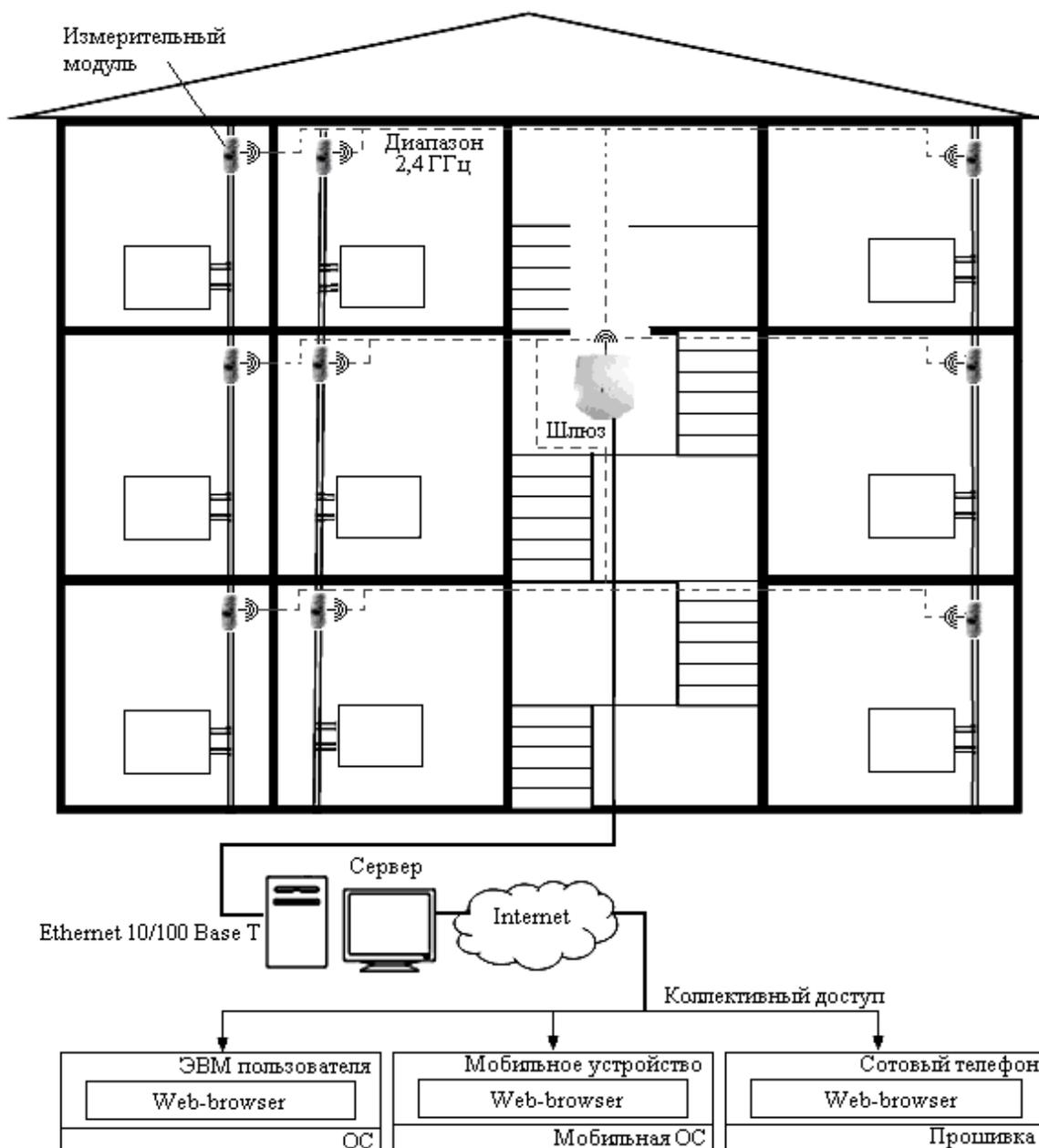


Рис. 3. Схема размещения основных узлов системы поквартирного учета тепловой энергии в жилом здании

В целом работа системы выглядит следующим образом (рис. 3): в квартире на отопительные приборы устанавливаются измерительные модули. В подъезде на каждом этаже устанавливается

шлюз для проводного или беспроводного снятия данных. Шлюзы объединяются в сеть посредством Ethernet. Затем устройство сбора и передачи данных отправляет информацию на сервер. Серверное программное обеспечение опрашивает счетчики и записывает измеренные данные в базу данных, затем, используя полученные измерения, производит вычисления поквартирного расхода тепла. В конечном результате программное обеспечение формирует отчеты, платежи.

Разрабатываемая система позволит производить поквартирный учет тепловой энергии в жилых зданиях как с горизонтальной, так и с вертикальной разводкой системы отопления, экономия потребляемого тепла и внутренний энергоаудит помещений.

Литература

1. Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения / А.В. Пуговкин, С.В. Купреков, Д.В. Абушкин и др. // Доклады ТУСУРа. – 2010. – №2 (22). – С. 293–298.
2. Каменев П.Н. Отопление и вентиляция / П.Н. Каменев, А.Н. Сканави, В.Н. Богословский. – М.: Стройиздат, 1975. – 483 с.
3. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. – М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.

Муслимова Надежда Игоревна

Инженер каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа

Тел.: 8-952-886-69-95

Эл. почта: n.muslimova@mail.ru

Ушарова Дарья Николаевна

Техник 1 категории каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа

Тел.: 8-901-617-98-71

Эл. почта: udn@sibmail.com

Егоров Александр Владимирович

Аспирант каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа

Тел.: 8-913-859-22-01

Эл. почта: leon9088@yandex.ru

Купреков Степан Владимирович

Директор ООО «Центр сервисного обслуживания», г. Томск

Тел.: 8-903-914-01-00

Эл. почта: kuprekov@mail.ru

Пуговкин Алексей Викторович

Д-р техн. наук, профессор каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа

Тел.: 8-913-822-95-60

Эл. почта: PugovkinAV@tor.tusur.ru

Muslimova N.I., Usharova D.N., Egorov A.V., Kuprekov S.V., Pugovkin A.V.

Automated system of registration of thermal energy for every apartment

With the application of heat balance equations, we consider the problems of internal energy audit of the premises, taking into account its individual characteristics and we consider the problem of calculation of thermal energy consumed by an individual apartment. The measurements of indoor average air temperature, the heater and walls have allowed to find the parameters that describe the thermal conditions of the premises. We studied the questions of the development of hardware and software for automated system of registration of thermal energy for every apartment.

Keywords: power savings, heat supply facilities, system of nonlinear differential equations, computer model, thermal energy registration, experiment, hardware-software solution.