

На правах рукописи

Файда Евгений Леонидович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
КОМПЛЕКСОВ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ С ЕДИНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ  
ВВОДОМ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2007

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промустановок» государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Южно-Уральский государственный университет.

Научный руководитель – доктор технических наук,  
доцент Лохов Сергей Прокопьевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Казаринов Лев Сергеевич;  
доктор технических наук,  
профессор Изаков Феликс Яковлевич.

Ведущее предприятие – ОАО «Инженерный центр энергетики Урала»  
(ФИЛИАЛ «УралВТИ-Челябэнергосетьпроект»),  
г. Челябинск.

Защита состоится 15 марта 2007 г., в 12 часов, в ауд.1001 на заседании диссертационного совета Д212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76, ЮУрГУ.  
Факс: (351)267-90-83. e-mail: [khokhlov@energo.susu.ac.ru](mailto:khokhlov@energo.susu.ac.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Ю.С.Усынин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В ряде районов страны с дорогим привозным топливом, в курортных зонах, где особенно важно поддержание чистоты воздушного бассейна, в некоторых южных районах, а также на Крайнем Севере для отопления и горячего водоснабжения зданий нередко используется электричество. Электричество является весьма дорогостоящим энергоносителем, поэтому вопросы расширения границ его экономически оправданного использования тесно связаны с оптимизацией систем электроснабжения и внедрением высокоэффективных средств автоматизации. Легко подсчитать, что необоснованное увеличение температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  увеличивает затраты электроэнергии до 5 %. Учитывая большую тепловую инерционность объектов регулирования, можно одновременно с регулированием температурного режима решать и задачи выравнивания графика нагрузки энергосистемы, путем включения электронагревательных приборов в часы его провалов и отключения - в часы максимума. Благодаря этому на генерирующих электростанциях уменьшается перерасход топлива во вне пиковые часы. Все эти организационные вопросы (вопросы диспетчеризации) достаточно широко и подробно освещены в работах многих ученых: Цигельман И.Е., Тульчин И.К., Нудлер Г.И, Гордеев В.И. и др.

Однако до сих пор не разработаны эффективные способы регулирования максимума нагрузки жилых зданий с электротеплоснабжением, а также оставлены без должного внимания способы управления нагревательными приборами, позволяющие оптимизировать системы электроснабжения и режимы электропотребления. Отсутствуют простые в реализации и доступные для широкого круга специалистов математические модели конвективных потоков воздуха в обогреваемых помещениях, что необходимо для повышения точности расчетов тепловых процессов и разработки эффективных способов управления нагревательными приборами. Нет общедоступных недорогих и наглядных средств контроля направления и скорости движения слабых конвективных потоков воздуха, что крайне важно при выполнении экспериментальных исследований и определения динамических параметров обогреваемых помещений.

Все поставленные вопросы являются весьма актуальными, и возможные пути их эффективного решения рассматриваются в данной работе. Основное внимание уделено оптимизации систем электроснабжения и режимов электропотребления при сохранении тепловых условий жилых помещений.

**Цель работы** – повышение эффективности электротехнических комплексов жилых зданий с единым энергетическим вводом за счет регулирования максимума нагрузки внутренних электрических сетей и повышения качества регулирования электрической мощностью нагревательных приборов.

**Идея работы.** Учитывая тепловую инерционность обогреваемых помещений можно снижать мощность электронагревательных приборов в периоды пиковых нагрузок бытовых электроприемников, что позволяет оптимизировать систему электроснабжения здания.

### **Решаемые задачи**

1. Разработка алгоритмов управления электрической мощностью нагревательных приборов при регулировании максимума нагрузки квартирных вводов и этажных стояков.

2. Разработка способов регулирования электрической мощности нагревательных приборов, обеспечивающих повышение качества регулируемого параметра.

3. Создание быстродействующей компьютерной модели системы управления электронагревательными приборам, включая объект регулирования – обогреваемое помещение.

**Объект и методы исследований.** Объектом исследований являются электротехнические комплексы жилых зданий с бытовыми электроприемниками и электронагревательными приборами, системы управления электрической мощностью нагревательных приборов, компьютерные модели объекта с системой регулирования. Используются численные методы решения систем дифференциальных уравнений на ЭВМ, математическое моделирование, макетирование разработанных предложений.

### **Научные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Для ограничения максимума нагрузки квартирных вводов и этажных стояков управление электрической мощностью нагревательных приборов предлагается осуществлять на основе анализа температурных состояний обогреваемых помещений.

2. Закон адаптации системы регулирования электрической мощностью нагревательных приборов, обеспечивающий инвариантность системы к возмущающим воздействиям и повышения качества ее регулирования.

3. Компьютерное моделирование движения конвективных потоков воздуха, описываемых линейной системой дифференциальных уравнений, и его применение для сравнения качества регулирования различных систем управления электрической мощностью нагревательных приборов.

4. Методика определения вектора скорости конвективных потоков воздуха по математической модели цепной линии и воздействию потока на датчик.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждаются аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ электротехники, корректным использованием математического аппарата, удовлетворительным результатом совпадения аналитических исследований с экспериментальными данными.

**Значение работы.** Научное значение работы заключается в том, что – сформулированы принципы регулирования максимума электрической нагрузки квартирных вводов и этажных стояков, осуществляемые только за счет управления мощностью электронагревательных приборов;

– разработан адаптивный метод регулирования электрической мощности нагревательного прибора, обеспечивающий повышение качества регулирования двухпозиционных регуляторов температуры;

– разработана компьютерная модель конвективных потоков воздуха в обогреваемом помещении, пригодная для исследования параметров объектов регулирования и анализа работы систем управления.

**Практическое значение работы** заключается в следующем:

– впервые разработана методика определения расчетного и среднеквадратичного значения электрических нагрузок при предложенных способах регулирования максимума нагрузок квартирных вводов и этажных стояков;

– предложен способ измерения параметров движения конвективных потоков воздуха с помощью легкого подвижного предмета, соединенного гибкой весомой связью с неподвижным предметом;

– предложены, исследованы и внедрены системы регулирования максимума электрических нагрузок квартирных вводов с одновременным регулированием температурных режимов помещений, позволившие снизить расчетные мощности комплексов электроснабжения жилых домов с единым энергетическим вводом.

**Реализация результатов работы:**

– разработаны и внедрены в пяти и семнадцатизэтажном жилых экспериментальных домах с электротеплоснабжением системы регулирования максимума нагрузки квартирных вводов с одновременным управлением температурным режимом помещений, что позволило снизить расчетную мощность квартирных вводов на 38%, этажных стояков на 31% и 26%, питающих линий на 15% и 11,5% и трансформаторных подстанций на 15% и 11,5%;

– начато мелкосерийное производство разработанных систем регулирования на предприятии «Прибор» г. Челябинска.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на научно-технической конференции «Электроснабжение, электрооборудование, энергосбережение». (Новомосковск, 2002 г.); ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (2003–2006 гг.); втором Всероссийском школе–семинаре молодых ученых и специалистов «Энергосбережение – теория и практика». (Москва, МЭИ, 2004 г.); Всероссийской конференции – конкурсного отбора инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы «Энергетика и энергосбережение». (Томск, Томский политехн. ун-т, 2006 г).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, включая 3 патента на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 119 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков, 8 таблиц, список используемой литературы из 107 наименований и 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во Введении** обосновывается актуальность работы, сформулированы цель, основная идея и научные положения, выносимые на защиту, отмечены научная значимость и практическая ценность работы.

**Первая глава** посвящена анализу состояния вопроса и основным решаемым задачам. В настоящее время до 35% энергетических ресурсов России тратится на отопление, а из них около 30% - это прямые потери. Большие потери связаны и со значительным износом трубопроводов, который по стране сегодня составляет до 70%, а также с отсутствием у производителей и потребителей мотивации к экономии тепла. При технико-экономическом обосновании одним из путей решения проблем отопления может стать переход от централизованного водяного отопления к автономному электроотоплению. Электрическое отопление имеет самые широкие возможности по рациональному и экономичному управлению, расход электричества легко поддается учету.

Однако электричество является весьма дорогим энергоносителем, поэтому вопросы его экономически оправданного использования тесно связаны с оптимизацией режимов электропотребления и систем электроснабжения. Успешное решение этих вопросов не может быть достигнуто без широкомасштабного внедрения высокоэффективных средств автоматизации, а также разработки общедоступных методов расчета параметров движения и средств контроля тепловых конвективных потоков воздуха в обогреваемых помещениях, необходимых для правильного выбора установленной мощности нагревательных приборов на стадии проектирования, и экспериментальной проверки полученных результатов.

**Вторая глава** посвящена разработке оптимальных алгоритмов управления электронагревательными приборами при регулировании максимума нагрузки, начиная от квартирного ввода или индивидуального дома и заканчивая сетью трансформаторной подстанции, питающей многоквартирный дом или группу индивидуальных домов. Здесь же дана методика определения расчетного и среднеквадратичного значения нагрузки при регулировании максимума нагрузки квартирных вводов и этажных стояков.

Следует различать основные цели регулирования максимума нагрузки промышленных сетей и предлагаемых в данной работе бытовых сетей жилых домов с электротеплоснабжением.

В настоящее время в основу построения взаимоотношений всех энергосистем и промышленных потребителей положены получасовые максимумы мощности предприятий. Регулирование максимума нагрузки на промышленных предприятиях осуществляется только в часы максимума нагрузки энергосистемы с целью снижения пиковой нагрузки на энергосистему для сохранения ее устойчивости. На промышленных предприятиях в часы максимума нагрузки энергосистемы предприятие снижает потребляемую мощность до установленного лимита за счет отключения части электроприемников, как правило, не связанных с основным технологическим

процессом.

Вне часов максимальных нагрузок энергосистемы промышленным предприятиям разрешается электропотребление в пределах заявленного суточного потребления электроэнергии.

В жилых домах с электротеплоснабжением регулирование максимума нагрузки предлагается осуществлять не только в часы максимума нагрузки энергосистемы, а на протяжении всего времени суток, что обеспечит выравнивание графика нагрузки и тем самым минимизирует ее расчетное значение, а также потери электроэнергии. Графики нагрузки бытовых электрических сетей, как правило, являются резкопеременными и имеют ярко выраженные максимумы и минимумы. Наличие в домах с электротеплоснабжением большого числа инерционных электроприемников, к которым относятся электронагревательные приборы отопления и горячего водоснабжения, позволяет при регулировании температуры внутри помещений одновременно решать и вопросы регулирования максимума нагрузки квартирных вводов и этажных стояков.

При регулировании максимума нагрузки квартирного ввода, как правило, приходится в периоды пиковых нагрузок бытовых электроприемников снижать суммарную мощность электронагревательных приборов. Так как в каждом обогреваемом помещении квартиры, находится электронагревательный прибор, то возникает вопрос: в каких помещениях целесообразно отключить электронагревательные приборы, чтобы снизить суммарную мощность, а в каких помещениях оставить включенными? Предлагается два способа управления электронагревательными приборами. Первый способ – регулирование по отклонению температуры, что направлено на выравнивание в помещениях отклонений температур от заданных значений. В этом случае при регулировании максимума нагрузки квартирного ввода в первую очередь отключаются электронагревательные приборы, находящихся в помещениях с минимальными отклонениями температуры от заданных значений. Второй способ – регулирование по приоритетности помещений, что обеспечивает наименьшее отклонение температуры от заданного значения в помещениях с более высоким приоритетом или с более высоким требованием к качеству теплового состояния. В этом случае при регулировании максимума нагрузки квартирного ввода в первую очередь отключаются электронагревательные приборы, находящиеся в помещениях с более низкими требованиями к качеству теплового состояния. Например, в детской комнате предъявляются более высокие требования к качеству теплового состояния, чем на кухне. В обоих способах регулирование максимума нагрузок квартирного ввода осуществляется с учетом допустимой температуре его нагрева.

Приведено описание способа управления электронагревательными приборами отопления в помещениях, при регулировании по отклонению температуры. Рассмотрен пример, когда допустимое энергопотребление  $w_T$  ограничивается на интервале времени  $T$ , равным, например, трем постоянным времени нагрева линии ввода квартирной сети.

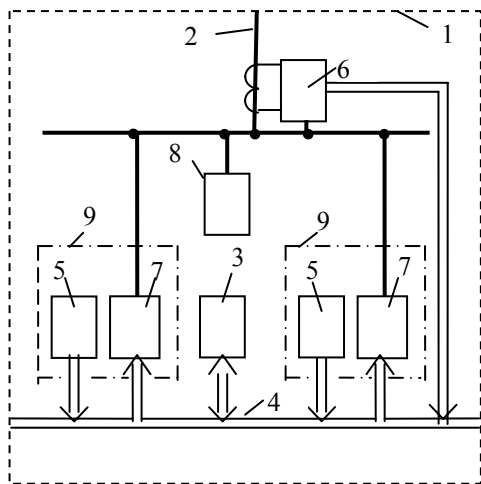


Рис.1. Функциональная схема системы регулирования максимума нагрузки квартирного ввода при регулировании по отклонению температуры внутри помещений

Для технической реализации данного способа в квартире 1 (рис.1), имеющей сеть электроснабжения 1, установлен локальный блок управления 3, который через линию связи 4 соединен с датчиками температуры 5 и мощности 6. К сети электроснабжения подключены электронагревательные (регулируемые) приборы 7 и прочие (нерегулируемые) бытовые электроприемники 8.

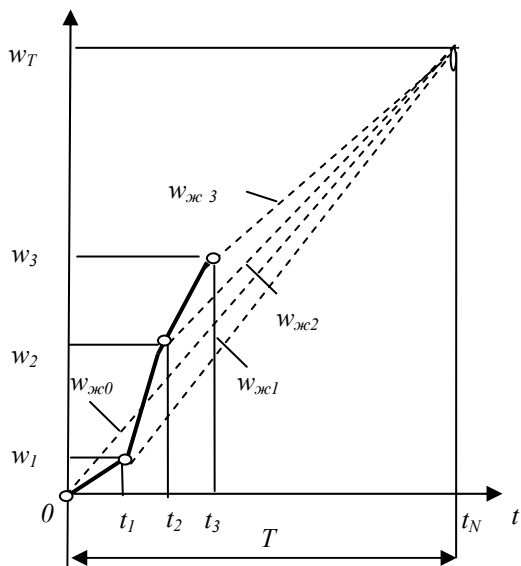


Рис. 2. График электропотребления на контролируемом интервале времени

Электронагревательные приборы и датчики температуры размещены непосредственно в тех помещениях 9, на температуру которых осуществляется воздействие.

В контрольные моменты времени  $t_i$ , где  $i=0,1,2, \dots, N$  (рис.2), производится отключение электронагревательных приборов в помещениях, где температура выше или равна заданному значению, и измерение нагрузки  $p_i$  квартирного ввода. Определяется фактическое электропотребление  $w(t_i)$  за промежуток времени  $[0, t_i]$ , желательное (допустимое) энергопотребление  $w_{жс}(t_i)$  и по его величине рассчитывается желательное значение нагрузки  $p_{жсi}$  квартирного ввода на оставшемся промежутке времени  $[t_i, T]$ :

$$w_{жс}(t_i) = w_T - w(t_i); \quad (1)$$

$$p_{жсi} = w_{жс}(t_i) / (T - t_i). \quad (2)$$

Здесь под желательной нагрузкой понимается такая постоянная по величине на промежутке времени  $[t_i, T]$  мощность, потребление которой в течение этого промежутка времени обеспечивает на момент окончания контролируемого интервала совпадение фактического энергопотребления (на фиг. 2 показано пунктиром) с допустимым значением  $w_T$ . Сравнивается измеренное значение нагрузки  $p_i$  с желательным значением  $p_{жсi}$ . Если  $p_i > p_{жсi}$ , то за счет



отключения в первую очередь электронагревательных приборов, находящихся в помещениях с минимальными отклонениями температуры от заданного значения, снижается общая нагрузка  $p_i$  квартирной сети до ближайшего значения, не превосходящего  $p_{жсi}$ . Данный способ регулирования направлен на выравнивание температурных отклонений в группе обогреваемых помещений.

При регулировании по приоритетности каждому помещению присваивается порядковый номер, в соответствии с которым помещение с более высокими требованиями к уровню теплового состояния имеет, например, меньший порядковый номер. При необходимости порядковые номера помещений в течение суток могут изменяться. В отличие от способа регулирования по отклонению температуры, где контроль энергопотребления осуществлялся на определенном интервале времени, здесь реализуется более простой вариант, когда контроль энергопотребления осуществляется только по величине нагрузки. Управление электронагревательными приборами производится таким образом, чтобы в любой контрольный момент времени значение нагрузки квартирного ввода не превышало допустимого по каким-либо условиям лимита мощности

$$p_{л} = w_T / T. \quad (3)$$

Приведен способ регулирования максимума нагрузки этажного стояка (группы квартир).

При регулировании максимума нагрузки этажного стояка (многоквартирного дома) за счет разновременности максимумов нагрузок квартирных вводов появляется возможность увеличить максимум нагрузки каждого квартирного ввода.

В основу группового регулирования положено то, что максимум нагрузки каждого квартирного ввода, не может быть ниже, чем при индивидуальном (поквартирном) регулировании. Если установлен лимит мощности  $P_{л}$  многоквартирного дома, например, исходя из условий оптимизации системы энергоснабжения, то для каждой  $j$ -ой квартиры устанавливается долевое участия в этом максимуме, именуемое в дальнейшем индивидуальным максимумом нагрузки  $p_{mj}$  квартирного ввода. Если через  $K$  обозначить число квартир в доме, то

$$P_{л} = \sum_{j=1}^K p_{mj}. \quad (4)$$

Если для поддержания заданных температурных режимов в помещениях в одной или нескольких квартир требуется мощность, превосходящая их индивидуальный максимум нагрузки, то это допустимо лишь при условии, что фактическая нагрузка  $P$  всего дома будет меньше установленного лимита:  $P < P_{л}$ . При этом разрешение на увеличение мощности сверх индивидуального максимума нагрузки в первую очередь дается квартире, имеющей помещение с наибольшим отклонением температуры от заданного значения.

Приведены основные показатели графиков электрической нагрузки жилых домов с электротеплоснабжением.

Разработана методика определения расчетного и среднеквадратичного значения нагрузки при регулировании максимума нагрузки квартирных вводов

и этажных стояков.

Из справочной литературы расчетное  $P_p$  и среднее  $M[P]$  значения нагрузки квартирного ввода при электротеплоснабжении можно определить так:

$$P_p = P_{pэ} + 0,9P_{po}; \quad M[P] = 0,11P_{pэ} + 0,68P_{po}, \quad (5)$$

где  $P_{pэ}$  и  $P_{po}$  – расчетные нагрузки бытовых электроприемников и электронагревательных приборов отопления квартиры.

Для нормального закона распределения нагрузок

$$P_p = M[P] + \lambda\sigma[P], \quad (6)$$

где  $\lambda$  – нормированное отклонение с заданной вероятностью. Для внутренних сетей жилых домов с малым сечением проводов и относительно малой постоянной времени нагрева принимают  $\lambda = 3$  (вероятность 99,7%), а для наружных сетей  $\lambda = 2$  (вероятность 95%);  $\sigma[P]$  – среднеквадратичное отклонение

С учетом выражений (5) и (6) среднеквадратичные отклонения нагрузок квартирного ввода

$$\sigma[P] = (0,89P_{pэ} + 0,22P_{po})/\lambda. \quad (7)$$

При регулировании максимума нагрузки квартирного ввода за счет снижения мощности электронагревательных приборов в периоды пиковых нагрузок квартирного ввода, осуществляется сглаживание графика нагрузки. Если среднее значение нагрузки электронагревательных приборов отопления  $M[P_o] \leq 0,89P_{pэ}$ , то расчетное значение нагрузок квартирного ввода может быть снижено до значения

$$P_p = P_{pэ}, \quad (8)$$

а среднеквадратичное отклонение нагрузок квартирного ввода будет равно

$$\sigma[P] = (0,89P_{pэ} - 0,68P_{po})/\lambda. \quad (9)$$

В этом случае использование для обогрева электричества не увеличивает расчетную нагрузку квартирного ввода. Однако, нужно учитывать, что среднее значение нагрузки квартирного ввода увеличивается, что, как будет показано ниже, влечет увеличение расчетной мощности этажных стояков и питающих здание линий.

Если  $M[P_o] > 0,89P_{pэ}$ , то при регулировании максимума нагрузок квартирного ввода результирующий график может быть предельно сглажен, а расчетное значение и среднеквадратичное отклонение нагрузки будут

$$P_p = M[P_p] + M[P_o]; \quad \sigma[P] = 0. \quad (10)$$

Расчетные значения нагрузок этажных стояков и питающей сети здания могут быть теперь легко определены на основании выражений, полученных для квартирных вводов и формул теории вероятностей для суммы и среднеквадратичного отклонения суммы случайных величин.

Снижение расчетного и среднеквадратичного значения нагрузки квартирного ввода за счет регулирования максимума нагрузок при  $M[P_o] \leq 0,89P_{pэ}$  и  $\lambda=3$ :

$$\Delta P_p = 0,9 P_{po}; \quad \Delta M[P^2] = 0,1 P_{po} (1,78P_{pэ} - 0,46 P_{po}), \quad (11)$$

а при  $M[P_o] > 0,89 P_{pэ}$  равно

$$\Delta P_p = 0,89P_{pэ} + 0,22P_{po}; \quad \Delta M[P^2] = (0,89P_{pэ} + 0,22 P_{po})^2/9. \quad (12)$$

**Третья глава** посвящена разработке адаптивной системы управления электрической мощностью нагревательных приборов, добавка которой к двухпозиционному регулятору температуры, обеспечивает повышение качества регулирования температурного режима.

Проанализированы достоинства и недостатки разомкнутых и замкнутых системы автоматического регулирования применительно для регулирования тепловых параметров помещений.

Выполнен аналитический обзор регуляторов, применяемых для регулирования температуры. Регуляторы, реализующие простые законы регулирования, например двухпозиционные, не обеспечивают требуемого качества регулирования температурного режима помещений. Регуляторы, реализующие более сложные законы регулирования, например ПИД - регуляторы, хотя и позволяют получить высокое качество регулирования, но чрезвычайно сложны в настройке для объектов управления с большой инерционностью. Кроме того, они мало эффективны в случае, если параметры объекта регулирования изменяются в процессе эксплуатации, что характерно для обогреваемых помещений.

Дано обоснование принципа построения разработанной адаптивной системы управления, функциональная схема которой представлена на рис.3.

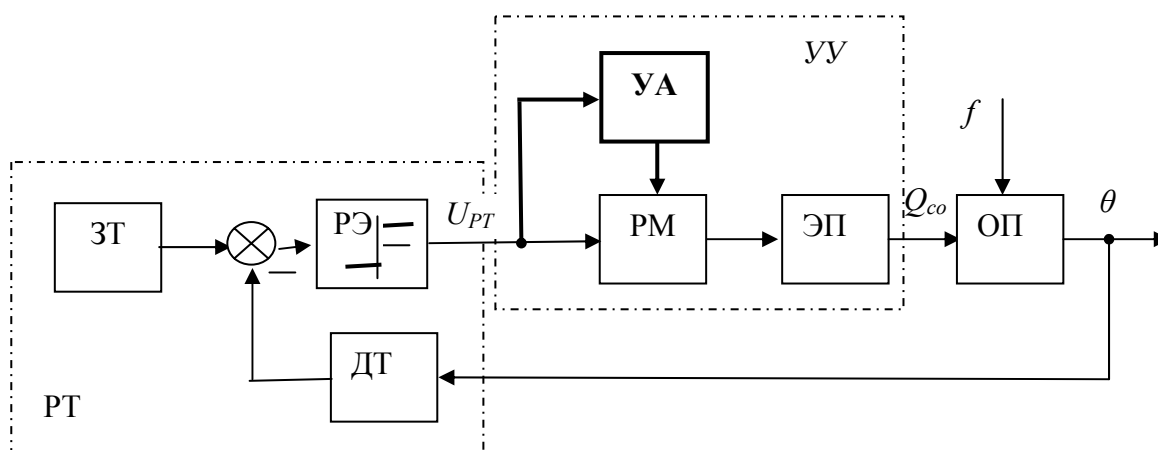


Рис. 3. Функциональная схема адаптивной системы управления электрической мощностью нагревательного прибора

Она содержит регулятор температуры (РТ), с задатчиком температуры (ЗТ) на входе, релейным элементом (РЭ) на выходе и датчиком температуры (ДТ) в обратной связи, управляющее устройство (УУ), состоящее из устройства адаптации (УА), регулятора мощности (РМ) и исполнительного устройства – электронагревательного прибора (ЭП).

Основной закон адаптации системы

$$p(t) = p_{cp.} [t_{(i-2)}, t_i] - \text{sgn}(\Delta \theta) p_n(t - t_i), \quad (13)$$

где  $p$  – мощность электронагревательного прибора;  $p_{cp.} [t_{i-2}, t_i]$  – среднее значение мощности электронагревательного прибора в предыдущем цикле,  $p_{cp.} [t_{i-2}, t_i] = p_{max}$  при  $i=1$ ,  $p_{cp.} [t_{i-2}, t_i] = 0$  при  $i=2$ ,  $p_{max}$  – максимальная мощность электронагревательного прибора;  $I$  – порядковый номер такта;  $t_i$  – момент

времени начала  $i$  – го такта,  $\Delta\theta$  – отклонение температуры от заданного значения,  $p_n(t - t_i)$  – поправка мощности.

Закон изменения поправки представляет возрастающую функцию. За счет вводимой поправки мощности система регулирования способна при незначительных колебаниях регулируемой величины компенсировать возмущения, находящиеся во всем диапазоне изменения управляющего воздействия.

На основе компьютерного моделирования проведено сравнение качества регулирования двухпозиционного регулятора микроклимата здания (рис. 4, а), параметры которого, приведенные в статьях профессора ЮУрГУ Панферова В.И., описываются апериодическим звеном 2-го порядка с запаздыванием, и добавленной к нему разработанной адаптивной системы управления исполнительным устройством (рис. 4, б).

Как видно из представленных диаграмм, при двухпозиционном регуляторе (см. рис. 4, а) наблюдаются значительные колебания температуры. При дополнении его разработанной адаптивной системой управления (см. рис. 4, б) колебания температуры в квазистатическом режиме получаются значительно меньше.

Рекомендуется регулирование мощности электронагревательных приборов осуществлять импульсной модуляцией на низкой частоте. При данной модуляции и групповом применении электронагревательных приборов возможно, во-первых, значительно повысить результирующие энергетические показатели группы путем поочередно последовательных включений, когда в момент отключения одного электронагревательного прибора включается другой электронагревательный прибор, и, во-вторых, компенсировать в общей сети колебания мощности прочих бытовых электроприемников.

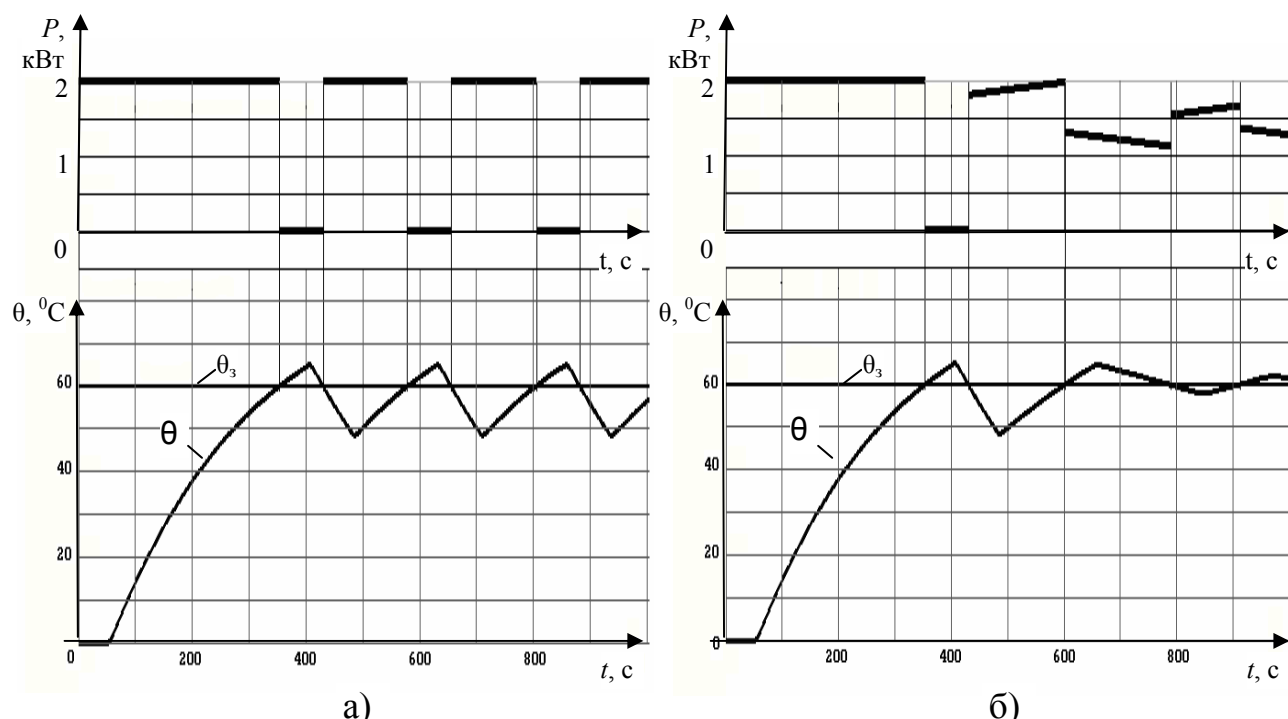


Рис. 4. Диаграммы работы двухпозиционной системы регулирования (а), адаптивной системы управления с линейно нарастающими поправками (б)

**Четвертая глава** посвящена компьютерному моделированию адаптивной системы управления электрической мощностью нагревательного прибора с учетом конвективных потоков воздуха в обогреваемом помещении. Расчет конвективного теплообмена в помещении может быть выполнен на основе решения уравнений Навье-Стокса – системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих движение и теплопередачу текучих сред. Численное решение уравнений представляет значительные трудности вычислительного характера: требуется очень большой объем памяти ЭВМ и значительные затраты времени. Поэтому возникла необходимость разработки инженерных методов расчета конвективных потоков воздуха в ограниченных пространствах.

В диссертации конвективные процессы упрощены до перемещения по помещению фиксированного числа (единицы тысяч) попарно взаимодействующих: отталкивающихся, вязущихся, обменивающихся температурой условных молекул воздуха. Рассмотрены различные законы описания этого взаимодействия, а также различные методы численного решения систем дифференциальных уравнений. Минимальное время вычислений получено при линейной функции интенсивности взаимодействия условных молекул  $G(R_{\text{вз}}-R)$ . Здесь  $R_{\text{вз}}$  – максимальный радиус взаимодействия,  $R$  – текущее расстояние между частицами,  $G$  – эмпирический коэффициент. Расстояние между 1-ой и 2-ой частицами  $R^2=R_x^2+R_y^2+R_z^2$  вычисляется через их горизонтальные  $R_x=X_1-X_2$ ,  $R_z=Z_1-Z_2$  и вертикальную  $R_y=Y_1-Y_2$  координаты. Исключаются из расчета пары, расстояние между которыми превышает радиус взаимодействия  $R^2>R_{\text{вз}}^2$ . Система дифференциальных уравнений для первой частицы имеет вид:

$$d^2X_1/dt^2=(R_{\text{вз}}-R)[G_mR_x/R+G_{mv}(dX_2/dt-dX_1/dt)]; \quad (14, \text{ а})$$

$$d^2Z_1/dt^2=(R_{\text{вз}}-R)[G_mR_z/R+G_{mv}(dZ_2/dt-dZ_1/dt)]; \quad (14, \text{ б})$$

$$d^2Y_1/dt^2=(R_{\text{вз}}-R)[G_mR_y/RG_{mv}+(dY_2/dt-dY_1/dt)]+G_{m\theta}(\theta_1-\theta_c); \quad (14, \text{ в})$$

$$d\theta_1/dt=G_{\theta}(R_{\text{вз}}-R)(\theta_2-\theta_1). \quad (14, \text{ г})$$

Размерные коэффициенты  $G_m$ ,  $G_{mv}$ ,  $G_{m\theta}$ ,  $G_{\theta}$  характеризуют интенсивность процессов отталкивания, вязкости, «теплоподъема», теплообмена;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – температуры 1-й и 2-й частицы,  $\theta_c$  – средняя температура всех частиц в замкнутом объеме комнаты. Последняя величина легко рассчитывается на компьютере, но не имеет себе физической аналогии. Поэтому система уравнений (14, а) – (14, г) является системой уравнений «черного ящика». Но именно ускорение «теплоподъема» позволило увеличить быстродействие расчетов на порядки и уменьшить необходимое число условных молекул.

Проведенные исследования модели, представленной системой уравнений (14, а...г) без слагаемого ускорения «теплоподъема»  $G_{m\theta}(\theta_1-\theta_c)$ , показали, что такая модель конвективных процессов при небольшом числе условных молекул порядка нескольких десятков тысяч не позволяет получить результаты, отражающие конвективные потоки реальных газов. Увеличение же числа условных молекул связано с увеличением времени расчетов, что является

неприемлемым для решения поставленной задачи.

Получены визуально совпадающие картины конвективных потоков с картинами, полученными другими авторами при решении уравнений Навье–Стокса и экспериментально.

С использованием метода условных молекул произведено моделирование разработанной адаптивной системы регулирования электрической мощности нагревательного прибора. Результаты, снятые с экрана монитора, представлены на рис. 4. Размеры условных молекул характеризуют температуру.

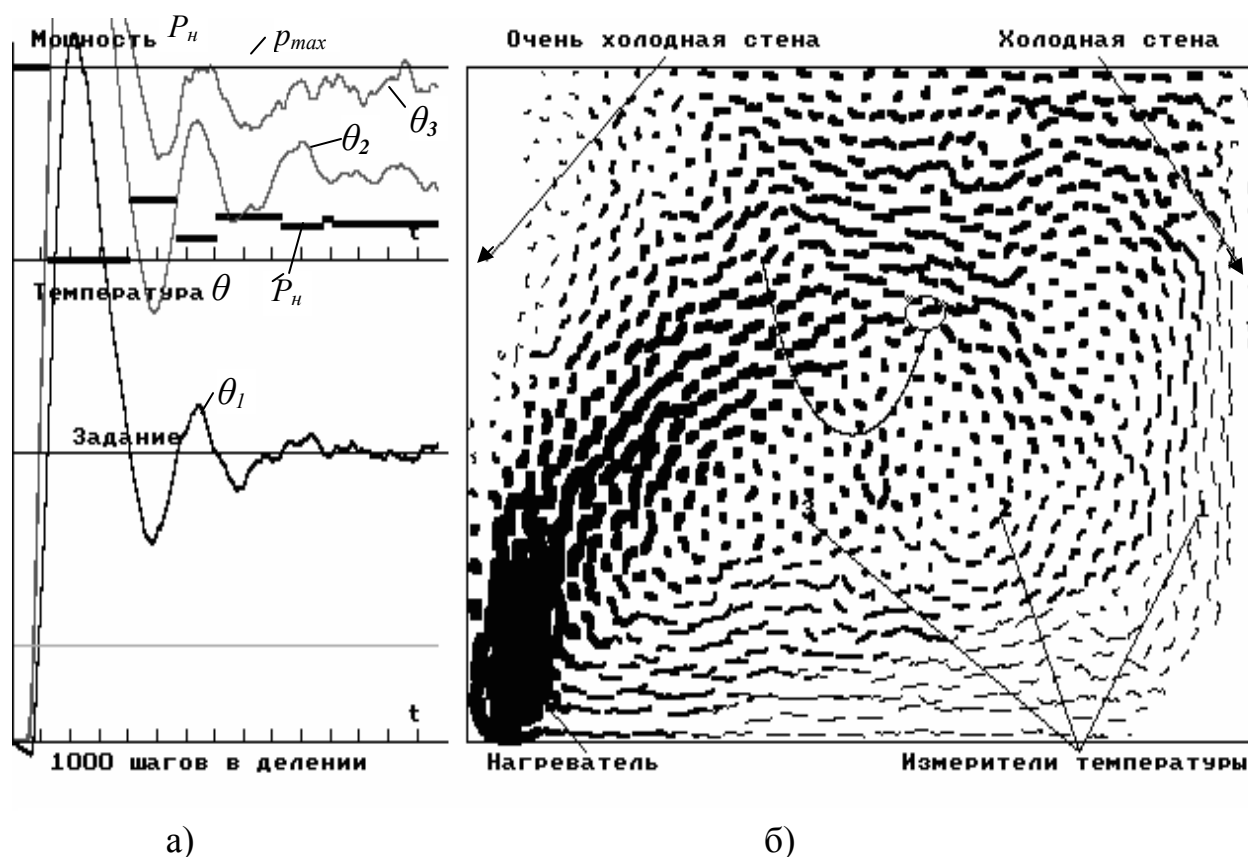


Рис.4. Результаты моделирования: диаграммы мощности  $p$  нагревательного прибора и температур  $\theta$  в трех точках измерения (а), треки условных молекул в помещении (б)

Выполнено сравнение различных систем регулирования температуры в равных условиях. На рис. 5 приведены диаграммы моделирования адаптивной системы и настроенного ПИ – регулятора. В переходном режиме отклонения регулируемой величины при адаптивной системе несколько больше, чем при тщательно настроенном ПИ – регуляторе, в установившемся режиме обе системы работают одинаково. Исследовалось изменение параметров объекта регулирования и резкое изменение возмущающих воздействий. На рис. 6 показано изменение возмущающего воздействия: включение в помещении дополнительного источника тепла – лампочки. Адаптивная система во всех случаях успешно перенастраивалась и устойчиво работала.

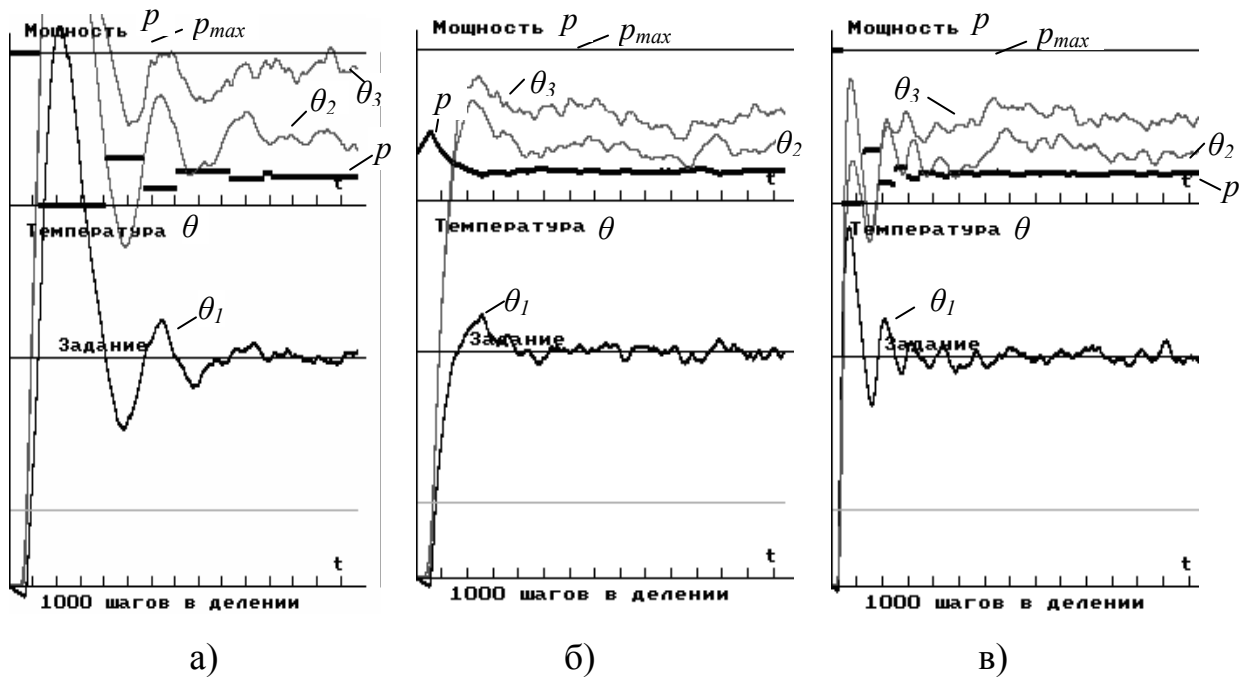


Рис.5. Диаграммы мощности  $p$  электронагревательного прибора и температур  $\theta$  при адаптивной системе управления (а), при ПИ – регуляторе (б), при адаптивной системе управления и постоянной времени электронагревательного прибора, уменьшенной в 100 раз (в)

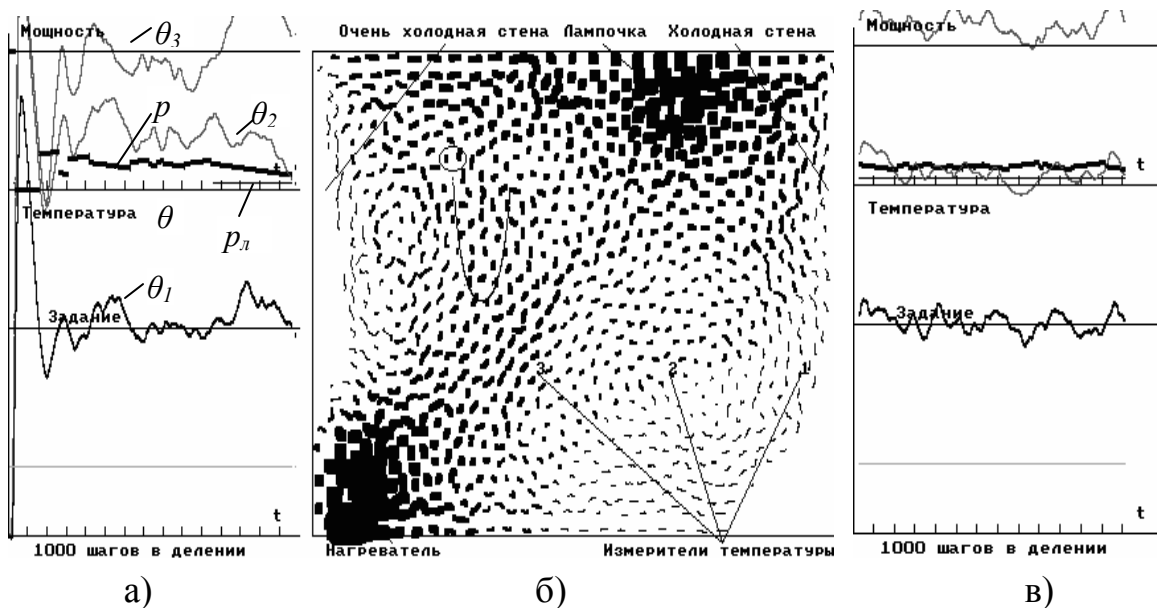


Рис. 6. Диаграммы мощности  $p$  – нагревательного прибора,  $p_l$  – лампочки и температуры в трех точках измерения при адаптивной системе управления (а), (в) и процессы в помещении (б)

Диаграммы на рис.6, в продолжают диаграммы на рис.6, а.

Для экспериментальной проверки величины скорости и направления слабых конвективных потоков в помещении разработан простой и наглядный способ измерения. Измерения осуществляются с помощью легкого воздушного шара (наполненного гелием) и гибкой весомой связи (ювелирной цепочки).

Сущность предложения состоит в том, что удельный вес и длина связи должны быть такими, чтобы образовался провес, как показано на рис. 7. Сила действия связи на шар легко рассчитывается по координатам привязи точки  $C$  и вершины провеса точки  $B$ . По законам аэродинамики определяются силы действия потока на шар и вектор скорости потока. На способ измерения подана заявка на изобретение.

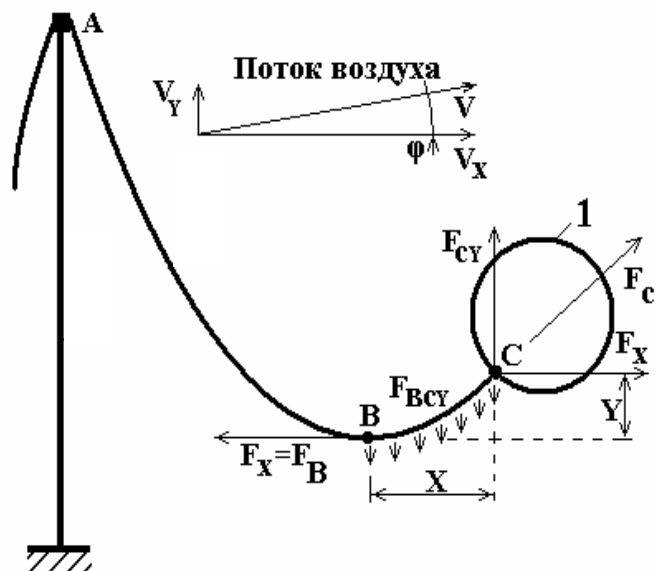


Рис. 7. Шар в потоке на цепной линии

**Пятая глава** посвящена технической реализации и экспериментальным исследованиям. Приведены общая характеристика экспериментальных зданий с единым энергетическим вводом и схемы электроснабжения. Показано, что при действующих тарифах на энергоносители для населения среднегодовая оплата за электроэнергию при едином энергетическом вводе не превышает платы за энергоносители при централизованном теплоснабжении.

В табл. 1 приведены технико-экономические показатели внедрения автоматических систем регулирования максимума нагрузки квартирных сетей в жилых домах г. Челябинска, находящихся по адресу: ул. Красная, дом 63 и ул. Энгельса, дом 77

Таблица 1

Технико-экономические показатели внедрения автоматических систем управления электронагревательными приборами отопления квартир

№	Снижение расчетных нагрузок	17-ти этажный дом по ул. Энгельса, 77	5-ти этажный дом по ул. Красной, 63
1	Квартирных вводов на, кВт	<b>6,9 (38%)</b>	<b>6,9 (38%)</b>
2	Этажных стояков на, кВт	<b>17,15 (26%)</b>	<b>12,11 (31%)</b>
3	Питающих линий на, кВт	<b>56,83 (11,5%)</b>	<b>48,05 (15%)</b>
4	Трансформат. подстанции на, кВт	<b>56,83 (11,5%)</b>	<b>48,05 (15%)</b>

Описаны экспериментальные исследования, проведенные в жилом помещении, которые полностью подтвердили полученные теоретические выводы и результаты.

**Приложения к диссертационной работе.** В приложении 1 представлен акт внедрения, в приложении 2 приведена программа моделирования тепловых процессов внутри обогреваемого помещения.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научно-технической задачи – повышения эффективности электротехнических комплексов жилых домов с единым энергетическим вводом. Итоги работы позволяют сформулировать следующие основные результаты, выводы и рекомендации:

1. Разработаны алгоритмы управления электрической мощностью нагревательных приборов, определяющие порядок отключения их при пиковых нагрузках квартирных вводов и этажных стояков.

2. Разработана методика определения расчетных и среднеквадратичных значений электрических нагрузок квартирных вводов и этажных стояков при предложенных алгоритмах управления мощностью нагревательных приборов. Данная методика учитывает зависимость режима электропотребления нагревательных приборов от величины нагрузок бытовых электроприемников квартиры, что повышает точность расчетов параметров элементов электрических сетей здания.

3. Предложен принцип построения адаптивных систем управления электрической мощностью нагревательных приборов, согласно которому мощность электронагревательного прибора в каждом такте регулирования определяется средним значением мощности предыдущего цикла регулирования. При дополнении двухпозиционного регулятора температуры адаптивной системой обеспечивается повышение качества регулирования. Адаптивная система проста в реализации и не требует настройки параметров на объекте регулирования.

4. Разработана упрощенная компьютерная модель конвективных потоков воздуха, представленного ограниченным числом условных (больших) молекул. В основу их взаимодействия положены как физические явления: вязкость, взаимное отталкивание, теплообмен, так и абстрактная вертикальная сила «теплоподъема». Данный подход позволяет резко сократить используемый объем памяти и время вычислений, получить визуально совпадающие картины конвективных потоков с картинками, полученными экспериментально другими авторами.

5. Основные результаты диссертации подтверждены экспериментами, внедрением и компьютерным моделированием. Системы регулирования максимума нагрузки жилых домов и температуры обогреваемых помещений установлены в двух экспериментальных многоэтажных жилых домах г. Челябинска, готовится к сдаче в эксплуатацию третий дом, поступили запросы из других регионов России. По материалам главы 2 получено два патента, по материалам главы 3 – один патент.

## **Научные публикации по теме диссертации в ведущих рецензируемых научных журналах ВАК**

1. Лохов, С.П. Оптимизация систем энергоснабжения и режимов энергопотребления экспериментальных жилых домов / С.П. Лохов, Л.Ф. Файда, Е.Л. Файда // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2002. – №7(16). – С. 14–15.
2. Лохов, С.П. Моделирование конвективных тепловых процессов методом условных (больших) молекул / С.П. Лохов, Е.Л. Файда. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – Вып. 5. – 2004. – №4(33). – С.76–78.
3. Лохов, С.П. Резидентное управление энергопотреблением инерционных объектов / С.П. Лохов, Л.Ф. Файда, Е.Л. Файда // Электрика. – 2003. – № 2. – С. 38.
4. Лохов, С.П. Определение направления и скорости конвективных потоков воздуха с помощью воздушного шара на цепи / С.П. Лохов, Е.Л. Файда, В.В. Варганов. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2005. – №9. – С.66–69.
5. Файда, Е.Л. Регулирование максимума нагрузки в электрических сетях жилых домов с электротеплоснабжением / Е.Л. Файда, В.В.Варганов. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2005. – №9. – С.62–65.

### **Другие публикации по теме диссертационной работы**

1. Файда, Е.Л. Повышение эффективности автоматических систем управления электротеплоснабжением жилых зданий / Е.Л. Файда // Всероссийской конференции – конкурсного отбора инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы «Энергетика и энергосбережение». Томск: Изд-во Томского политехнического университета, – 2006.– С. 260–267.
2. Лохов, С.П. Резидентное управление энергопотреблением инерционных объектов / С.П. Лохов, Л.Ф. Файда, Е.Л. Файда // Электроснабжение, электрооборудование, энергосбережение. Тез. докл. науч.-техн. конференции. Новомосковск: Изд-во МЭИ, 2002. – С.114–116.
3. Лохов, С.П. Многоквартирные дома-термосы с единым энергетическим вводом / С.П. Лохов, Е.Л. Файда, Л.Ф. Файда // Энергосбережение – теория и практика. Вторая Всероссийская школа-семинар молодых ученых и специалистов. – М.: Изд-во МЭИ, – 2004. – С.153.
4. Пат. 2259022 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Н 05 В 1/02, Н 02 J 13/00, G 05 D 23/19. Способ управления группой электронагревательных устройств / Л.Ф. Файда, С.А.Соболев, Е.Л.Файда – № 2004107224; заявл. 10.03.04; опубл. 20.08.05, Бюл. № 23.
5. Пат. 2249287 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Н 02 J 13/00, G 05 D 23/19. Способ управления группой электронагревательных устройств / Л.Ф. Файда, С.А. Соболев, Е.Л. Файда. – № 2003115996; заявл. 28.05.03; опубл. 20.08.03, Бюл. № 9.
6. Пат. 2287886 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Н 02 J 13/00, G 05 D 23/19. Способ управления электронагревательным устройством / Л.Ф. Файда, С.А. Соболев, Е.Л. Файда, В.В. Варганов. – № 2005155665; заяв. 23.05.05; опуб. 20.11.06, Бюл. № 32.