

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

В.П. Чипулис

ИАПУ ДВО РАН

Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио 5

E-mail: chipulis@vira.dvo.ru

Р.С. Кузнецов

ИАПУ ДВО РАН

Россия, 690041, Владивосток, ул. Радио 5

E-mail: kuznetsov@dvo.ru

Ключевые слова: энергосбережение, теплосчетчик, энергоэффективность, теплоснабжение, информационно-аналитическая система

Аннотация: Предлагаются методы качественной и количественной оценки эффективности регулирования теплоснабжения с использованием регрессионной модели объекта. Информационной базой для решения задачи являются результаты измерений основных параметров, аккумулируемые в архивах тепловычислителей приборов учета тепловой энергии.

1. Введение

Одной из стратегических задач в настоящее время является повышение эффективности производства, передачи и потребления энергоресурсов, в частности, тепловой энергии и теплоносителей. В последние годы наблюдается прогрессирующий процесс установки систем тепловой автоматики, обеспечивающей регулирование, направленное на экономию тепловой энергии и/или горячей воды.

Отметим, что выделяют два принципиально различных способа регулирования теплоснабжения – количественный и качественный. В России (и ранее в СССР) принят качественный способ регулирования в системах централизованного теплоснабжения. Суть его заключается в том, что количество потребляемой теплоты регулируется на теплоисточнике (ТЭЦ, котельная) путем изменения температуры теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха. При этом расход теплоносителя в тепловом узле каждого потребителя должен оставаться постоянным в течение всего отопительного сезона. На Западе реализуется другой, количественный способ регулирования. При этом способе температура теплоносителя поддерживается постоянной, а количество потребляемой теплоты дозируется за счет изменения расхода теплоносителя (в соот-

ветствии с температурой наружного воздуха) с использованием регулирующего оборудования у потребителей.

Практика учета тепловой энергии в России показывает, что качественный способ регулирования нередко осуществляется со значительными отклонениями от нормы, что связано как с занижением температуры теплоносителя в холодное время года, так и с ее превышением в периоды межсезонья. Поэтому потребители зачастую решают свои проблемы за счет установки регулирующего оборудования в тепловом узле и/или на отопительных приборах внутри помещений [1].

2. Оценка эффективности регулирования

2.1. Схема автоматизации теплового узла

Эффективность приборного учета и энергосбережение напрямую зависит от системы автоматического регулирования (САР) теплоснабжения. Помимо теплосчетчика тепловой узел с САР оборудован регулирующим клапаном, циркуляционными насосами и контроллером для регулирования температуры в системе отопления, на который подключены контрольные датчики температуры наружного воздуха и температуры теплоносителя (рис. 1). Регулирование осуществляется путем изменения коэффициента смешения при помощи клапана с электроприводом, установленного на подающем трубопроводе. Регулирующий клапан (задвижка с электроприводом) принимает сигналы от контроллера на открытие или закрытие. При повышении температуры наружного воздуха регулирующий клапан отрабатывает на прикрытие задвижки и расход теплоносителя из теплосети уменьшается, что приводит к сокращению теплопотребления здания. При похолодании происходит обратный процесс. Циркуляционные насосы поддерживают необходимый расход во внутреннем контуре системы отопления даже при полном закрытии регулирующего клапана. Контроллер осуществляет управление процессом и поддерживает температуру в системе отопления после узла смешения в соответствии с заданным температурным графиком от температуры наружного воздуха. Настройка температурного графика и коэффициентов регулирования осуществляется индивидуально для каждого объекта теплоснабжения. Оптимальная настройка системы автоматического регулирования позволяет получить наилучший эффект и обеспечить комфортный для жильцов тепловой режим при максимальном энергосбережении.

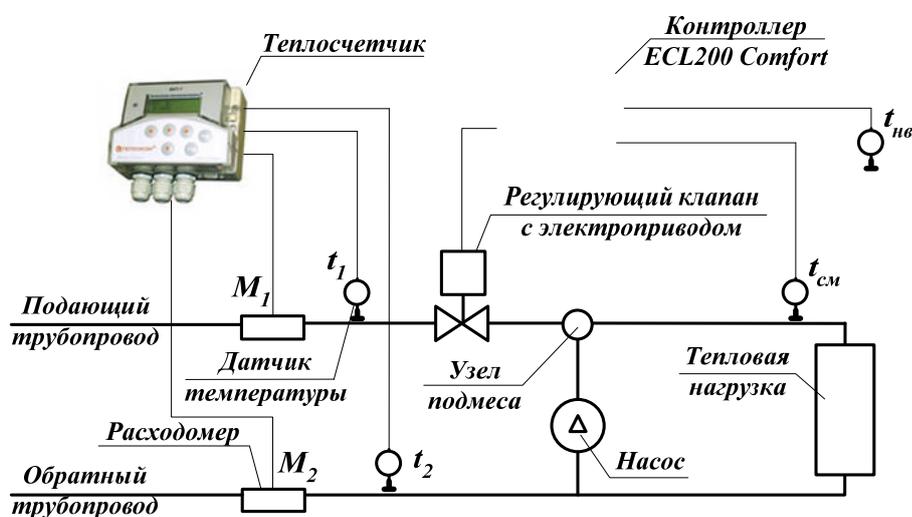


Рис. 1. Схема приборного учета и регулирования теплоснабжения.

2.2. Качественная оценка эффективности регулирования

Рассмотрим объект (ООО «Радиоприбор», К06, г. Владивосток), в тепловом узле которого для регулирования теплоснабжения установлен регулятор температуры. Регулятор поддерживает (за счет изменения расхода теплоносителя) температуру в подающем трубопроводе после узла смешения $t_{см}$ в соответствии с установленным графиком зависимости $t_{см}$ от температуры наружного воздуха $t_{нв}$. M_1 , M_2 – массовые расходы теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах t_1 , t_2 – температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах. Заметим, что значения параметров M_1 , M_2 , t_1 , t_2 , $t_{нв}$ измеряются соответствующими датчиками и доступны для анализа. Для последующего анализа взяты две выборки данных архива тепловычислителя с 18.01.09 г. по 28.02.09 г. (выборка А) и 4.03.09 г. по 1.04.09 г. (выборка В). В архиве аккумулируются среднечасовые значения измеряемых параметров, которые в дальнейшем отображаются на графиках.

Проанализируем эффективность регулирования теплоснабжения объекта, принимая во внимание, что регулирование осуществляется как на источнике теплоты (качественное), так и у потребителя (количественное). Отметим, что на практике нередки случаи, когда регулирование у потребителя, несмотря на установленное регулирующее оборудование, вообще не выполняется. Поэтому целесообразно вначале получить качественную оценку способов регулирования (имеет место или отсутствует), а затем, в случае необходимости, уточнить ее на количественном уровне.

Начнем с визуальной оценки эффективности применения регулятора температуры в тепловом узле рассматриваемого объекта. Здесь и в дальнейшем для иллюстрации результатов измерений и их обработки используется информационно-аналитическая система СКУТЕР [2]. На рис. 2 представлены графики изменения потребляемой тепловой энергии Q , расхода M_1 и температуры наружного воздуха $t_{нв}$ по часам суток для выборки А, а на рис. 3 – для выборки В. Очевидно, что график на рис. 2 соответствует ситуации, при которой отсутствует количественное регулирование за счет изменения расхода теплоносителя (отсутствует корреляция Q от M_1 и, следовательно, можно сделать вывод о том, что регулятор не работает), а график на рис.3 показывает, что регулятор, безусловно, выполняет свои функции. Эти выводы подтверждаются графиками на рис. 4, отображающими тенденции зависимости Q от T_1 и M_1 для выборки А, а так же графиками на рис.5, отображающими эти же зависимости для выборки В (рис.4,б). Действительно, на графиках рис.4 прослеживается очевидная зависимость Q от t_1 (значение критерия Пирсона, определяющего достоверность аппроксимации результатов измерений $R^2=0,92$) при отсутствии зависимости Q от M_1 ($R^2=0,056$). Такие зависимости характерны для достаточно эффективного качественного регулирования теплоснабжения при отсутствии регулирования количественного. На рис.5 наблюдается иная картина, свидетельствующая о преобладающем эффекте количественного регулирования.

Совершенно очевидно, что в первом случае (выборка А) автоматика не работала, а во втором (выборка В) функционировала достаточно эффективно, поскольку отчетливо прослеживается связь между расходом теплоносителя и температурой наружного воздуха, а так же зависимость теплоснабжения от расхода теплоносителя (графики теплоснабжения и расхода близки друг к другу).

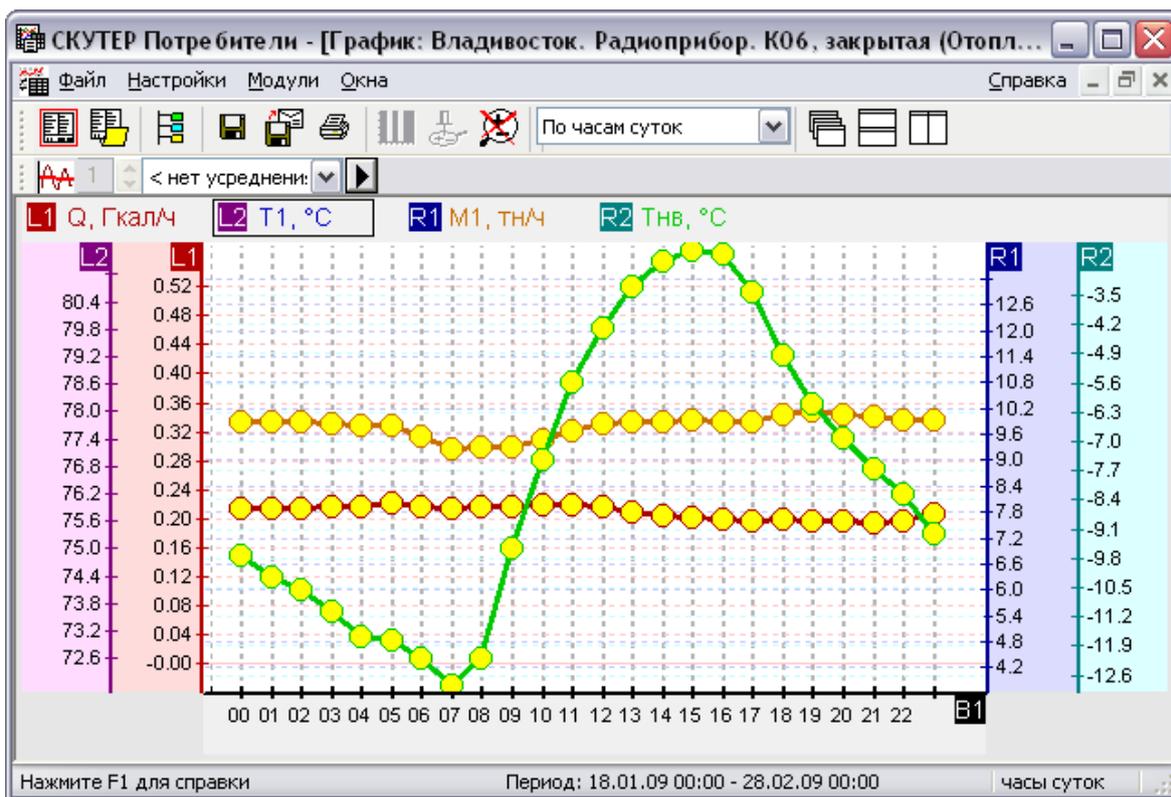


Рис. 2. Графики температуры наружного воздуха, расхода теплоносителя в подающем трубопроводе и теплотребления объекта (количественное регулирование отсутствует).

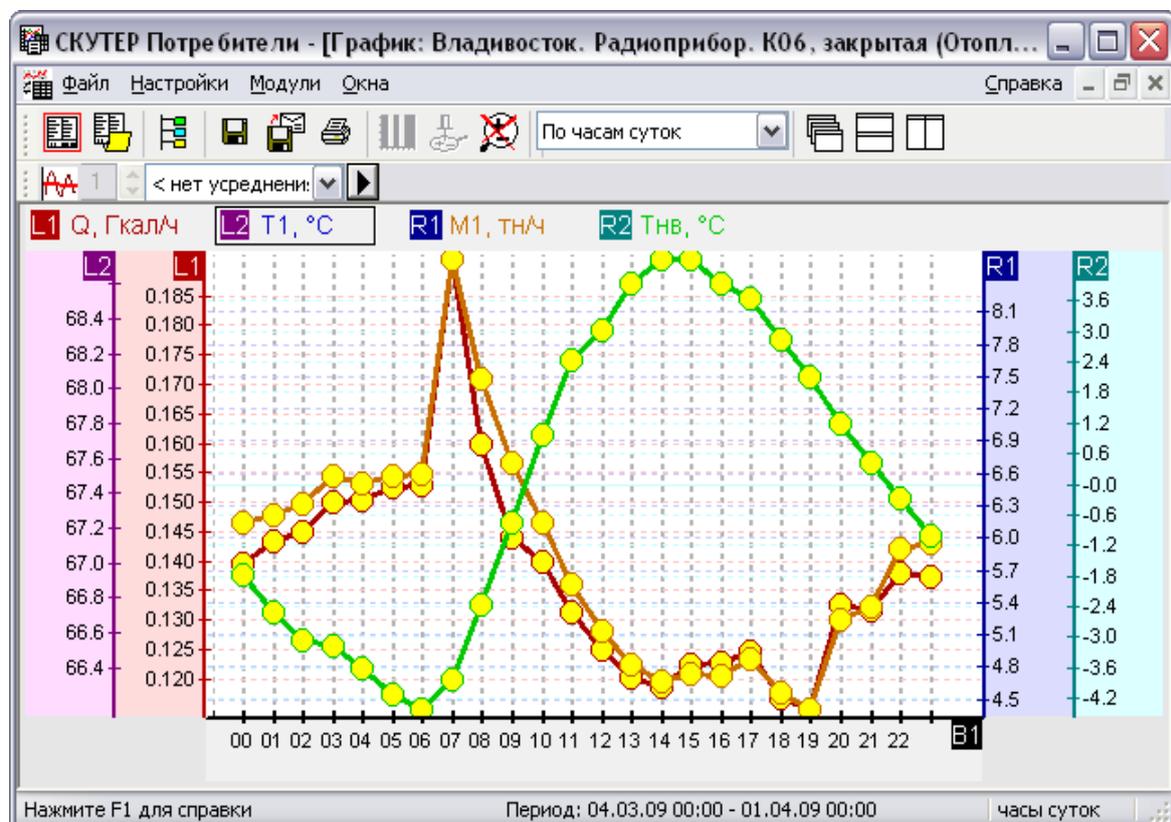


Рис. 3. Графики температуры наружного воздуха, расхода теплоносителя в подающем трубопроводе и теплотребления объекта (количественное регулирование).

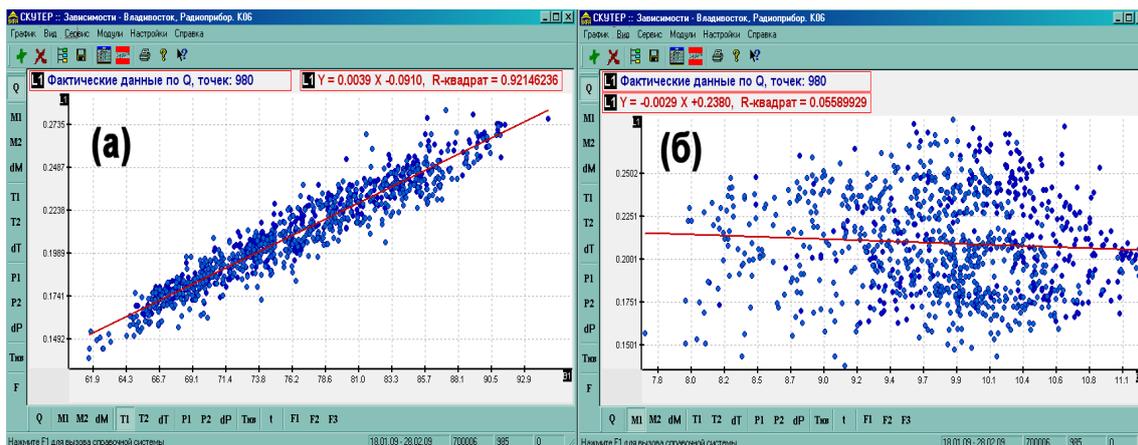


Рис. 4. (а) $Q(T_1)$ и (б) $Q(M_1)$ для выборки А.

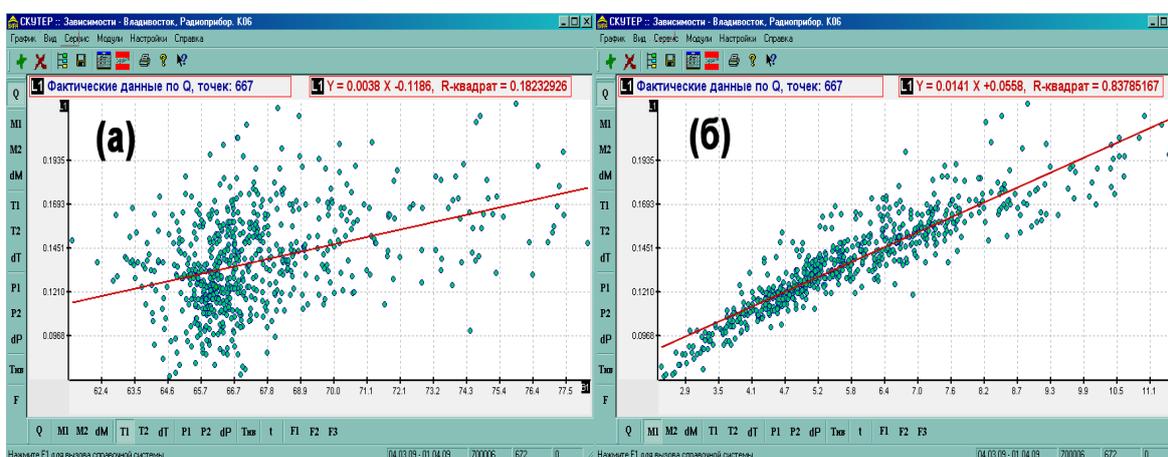


Рис. 5. (а) $Q(T_1)$ и (б) $Q(M_1)$ для выборки В.

Далее перейдем к количественной оценке эффективности регулирования.

2.3. Количественная оценка эффективности регулирования

Выборочный анализ результатов измерений параметров тепловых узлов с установленной на них автоматикой, предназначенной для регулирования теплопотребления, показывает, что автоматика без должного сервисного обслуживания зачастую либо мало эффективна, либо вообще не выполняет свои функции. Качественная оценка эффективности регулирования не представляет собой проблемы при соответствующих средствах анализа архивной информации тепловычислителей. Естественно, что потребителя тепла интересует в первую очередь экономический эффект, для того чтобы понять, как быстро окупаются затраты на установку регулирующего оборудования и принять адекватное решение относительно его установки. Однако получение количественной оценки экономической эффективности регулирования является не тривиальной задачей.

Экономическая эффективность регулирования теплопотребления может быть определена путем сравнения двух величин – $Q_{рег}$ и Q , где $Q_{рег}$ – количество тепловой энергии, потребленной объектом с установленным на нем регулирующим оборудованием, а Q – база для сравнения, определяемая как количество тепловой энергии, потребленной объектом без регулирующего оборудования. И если понятно, что в качестве $Q_{рег}$ следует принимать количество измеренной тепловой энергии на регулируемом объекте (объ-

екте $P_{рег}$), то не очевидно, что следует понимать под базой для сравнения Q (объекта без регулирования P). В идеальном случае для решения задачи необходимо иметь две копии объекта, находящихся в абсолютно одинаковых условиях, один из которых снабжен регулирующим оборудованием, а другой нет. Однако реальность такого варианта практически исключается.

Информационной базой для решения задачи являются результаты измерений основных параметров, аккумулируемые в архивах тепловычислителей приборов учета тепловой энергии. Предположим, что в нашем распоряжении имеются результаты измерений основных параметров теплопотребления за отопительный период, предшествующий установке регулирующего оборудования. Предположим так же, что за анализируемый период, то есть тот период, для которого необходимо определить экономическую эффективность регулирования, объект эксплуатировался в том же гидравлическом режиме, что и в прошлом периоде, но без регулирующего оборудования. Тогда в качестве базы для сравнения естественно принять некий виртуальный (модельный) объект P_B без регулирующего оборудования с гидравлическим режимом прошлого отопительного сезона и тепловым режимом анализируемого периода. В этом случае мы сможем узнать, каково было бы теплопотребление объекта, если бы в анализируемый период не было регулирования, а расход теплоносителя поддерживался таким же, как в предыдущий отопительный сезон.

Определим величину Q_B теплопотребления для такого виртуального объекта P_B . Для этого построим регрессионную модель системы теплопотребления, отражающую связь параметров гидравлического и теплового режима. (Для простоты ограничимся рассмотрением закрытой системы, то есть такой системы, из которой не осуществляется отбор теплоносителя для нужд горячего водоснабжения). По этой модели определим температуру теплоносителя в обратном трубопроводе $t_{обр}^B$ для объекта P_B и далее вычислим его теплопотребление

$$(1) \quad Q_B = M_{nod}^B \cdot (t_{nod}^B - t_{обр}^B),$$

где M_{nod}^B – расход теплоносителя в подающем трубопроводе в предыдущем периоде, t_{nod}^B – температура теплоносителя в подающем трубопроводе анализируемого периода.

В качестве регрессионной модели системы теплопотребления воспользуемся функцией (назовем ее эталонной):

$$(2) \quad t_{обр} = f \cdot (M_{nod}, t_{nod}),$$

отражающей зависимость температуры $t_{обр}$ теплоносителя в обратном трубопроводе от расхода M_{nod} и температуры t_{nod} теплоносителя в подающем трубопроводе [3] (Если система теплопотребления является открытой, то для формирования эталонной функции, и далее для определения количества потребленной тепловой энергии Q_B , необходимо так же учитывать значения расхода в обратном трубопроводе).

Поясним физический смысл этой зависимости. Не обладая специальными знаниями в теплофизике, можно прийти к заключению, что (при прочих равных условиях) $t_{обр}$ растет с увеличением t_{nod} и M_{nod} . Зависимость $t_{обр}$ от t_{nod} следует из температурного графика отопления. Зависимость $t_{обр}$ от M_{nod} подтверждается простым рассуждением. Чем больше расход, тем меньше охлаждается теплоноситель и тем выше температура в обратном трубопроводе. С уменьшением расхода больше тепловой энергии отдается потребителю и, следовательно, больше охлаждается теплоноситель.

Для формирования эталонной выборки, служащей для определения эталонной функции (2), будем использовать часовые архивы тепловычислителей. Результаты измерений, характеризующие поведение объекта на выборке, используемой для определения эталонной функции, а так же сам объект и режимы его эксплуатации должны отве-

чать следующим условиям, выполнение которых необходимо для качественного решения задачи:

- результаты измерений на эталонной выборке должны быть выполнены с погрешностью, не превышающей допустимое значение;
- в объекте не должно быть физических дефектов;
- режимы функционирования должны быть нормативными, то есть на эталонной выборке должны отсутствовать поведенческие дефекты [3].

Выборка данных, соответствующих этим требованиям, не является трудноразрешимой проблемой, особенно на этапе после установки новых, либо поверенных средств измерений. Однако для того, чтобы использование эталонной выборки позволило в дальнейшем получить приемлемый результат, необходимо обеспечить выполнение таких нормативных режимов эксплуатации объекта, на которых параметры изменялись бы в широких пределах, желательно в пределах всего рабочего диапазона измерений.

Предположим, что между рассматриваемыми параметрами объекта существует линейная зависимость. В таком случае, интерпретируя результаты измерений $t_{обр}$ в качестве набора значений эталонной функции, а M_{nod} и t_{nod} – наборов значений аргументов этой функции, можно определить с помощью аппарата регрессионного анализа линейную функцию:

$$(3) \quad t_{обр} = a \cdot M_{nod} + b \cdot t_{nod} + c,$$

аппроксимирующую результаты измерений, и достоверность аппроксимации по критерию Пирсона R^2 [4]. Известно, что зависимость (2) не является линейной. Более того, $t_{обр}$ зависит и от других параметров, которые могут быть не представлены в архиве тепловычислителя, например, от $t_{нв}$ – температуры наружного воздуха. Однако, при высокой степени достоверности аппроксимации, возможно успешное использование линейной функции (3) при решении практических задач.

2.4. Практическое применение

Рассмотрим методику оценки экономической эффективности регулирования теплоснабжения на конкретном примере. Для анализа взята выборка архивных данных системы учета тепловой энергии, установленной в тепловом узле корпуса № 2 завода «Радиоприбор», г. Владивосток в октябре 2006 года. Для рассматриваемого объекта в период до 25.11.07 г. осуществлялось только качественное централизованное регулирование путем изменения температуры теплоносителя в соответствие с температурой наружного воздуха в тепловой сети (в это время система автоматического регулирования на объекте отсутствовала). В качестве эталонной выборки, удовлетворяющей приведенным выше условиям, взяты отображенные на рис. 6 результаты измерений параметров M_{nod} (верхний график) и t_{nod} , $t_{обр}$ (два нижних графика) за период с 01.02.07 г. по 15.02.07 г. Линейная зависимость (эталонная функция), полученная с использованием выборки данных этого периода, выглядит следующим образом:

$$(4) \quad t_{обр} = 2,2087 \cdot M_{nod} + 0,4749 \cdot t_{nod} - 0,62; R^2 = 0,9789.$$

На рис. 7 представлены результаты измерений и вычислений по эталонной функции (4) параметра $t_{обр}$ на эталонной выборке данных. Из рисунка видно, что графики этих функций фактически совпадают, то есть результаты измерений параметров M_{nod} , t_{nod} , $t_{обр}$ хорошо аппроксимируются линейной функцией выражения (3), что подтверждает значение критерия Пирсона.

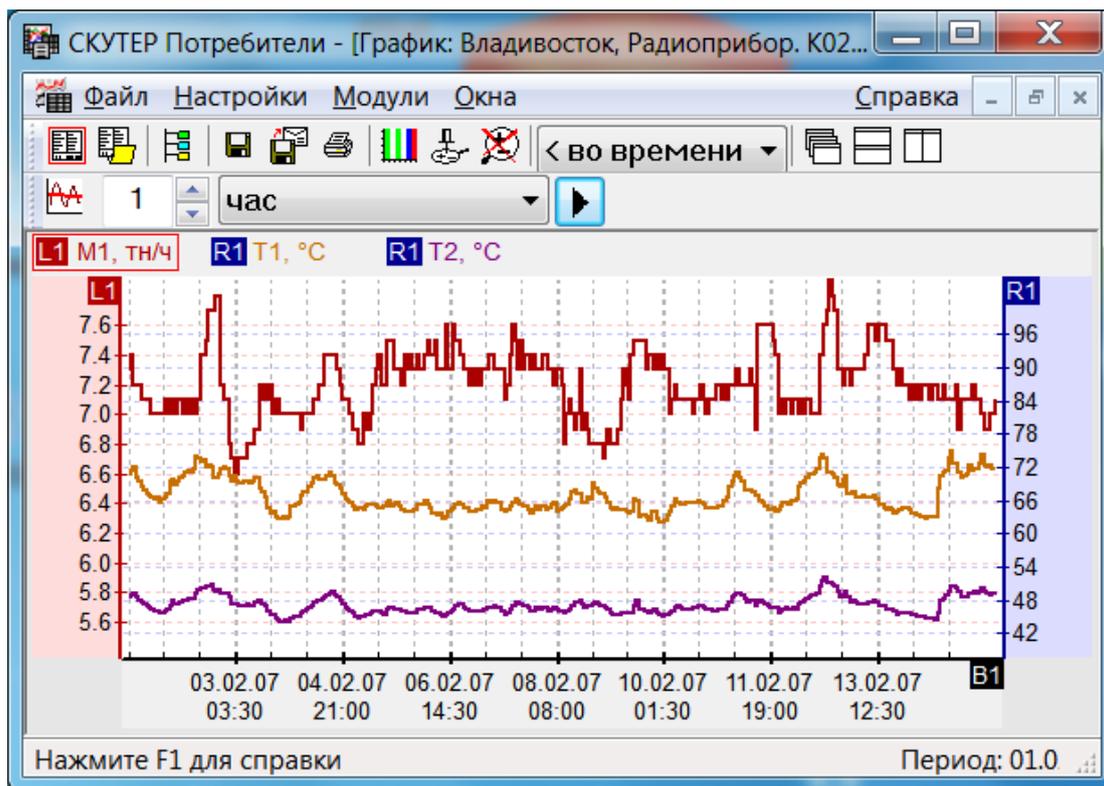


Рис. 6. Графики параметров $M_{под}$, $t_{под}$ и $t_{обр}$ для эталонной выборки.



Рис. 7. Графики измерений и вычислений по эталонной функции параметра $t_{обр}$ на эталонной выборке результатов измерений.

Далее для оценки экономической эффективности регулирования необходимо смоделировать теплотребление Q_B виртуального объекта P_B для измеренных значений температуры в подающем трубопроводе за анализируемый период (при функциони-

рующей системе автоматического регулирования) и значений расхода теплоносителя в подающем трубопроводе за аналогичный период прошлого года (без регулирования). Для этого вначале определим значения $t_{обp}^B$ с использованием эталонной функции, подставив в выражение (4) измеренные значения t_{nod} анализируемого периода и измеренные значения M_{nod} аналогичного периода прошлого года. Затем, воспользовавшись выражением (1), вычислим значение теплотребления виртуального объекта за анализируемый период и сравним его с теплотреблением фактическим, измеренным. В качестве анализируемого периода примем интервал времени с 25.11.07 г. (дата установки регулирующего оборудования) по 27.03.08 г. Соответственно значения расхода теплоносителя в подающем трубопроводе при подстановке в выражение (1) будем брать из архива тепловычислителя за период с 25.11.06 г. по 27.03.07 г.

На рис. 8 приведены графики M_{nod} за два периода времени – анализируемый (базовый – нижний график) и аналогичный период прошлого года (нижний график). Нетрудно заметить, что регулирование устойчиво осуществлялось с 20.12.07 г., а до этого времени настройки регулятора были не оптимальны.

На рис. 9 представлены графики значений теплотребления $Q_{рег}$ и Q_M для объекта с регулированием и модельного (виртуального) объекта за период с 25.11.07 г. по 27.03.08 г.

Эффективность $k_{эф}$ применения тепловой автоматики будем определять как относительную разность между Q_M и $Q_{рег}$, выраженную в процентах:

$$k_{эф} = \frac{(Q_M - Q_{рег})}{Q_M} \cdot 100\% .$$

Усредненное значение эффективности регулирования за анализируемый период для рассматриваемого объекта равно 24%.

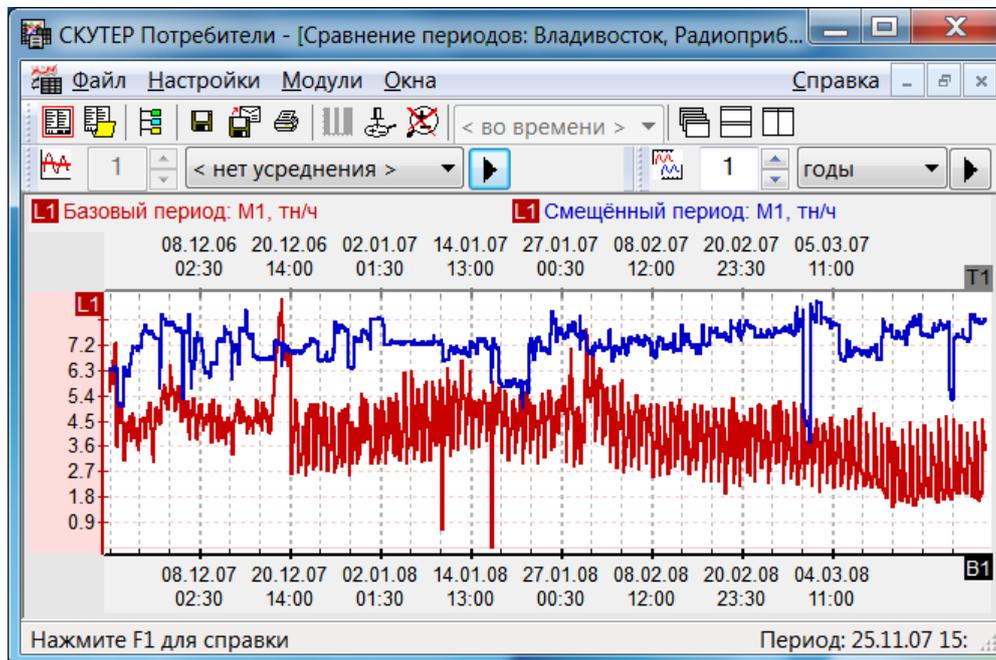


Рис. 8. Графики M_{nod} за два периода времени – анализируемый (с работающей автоматикой) и аналогичный период прошлого года.

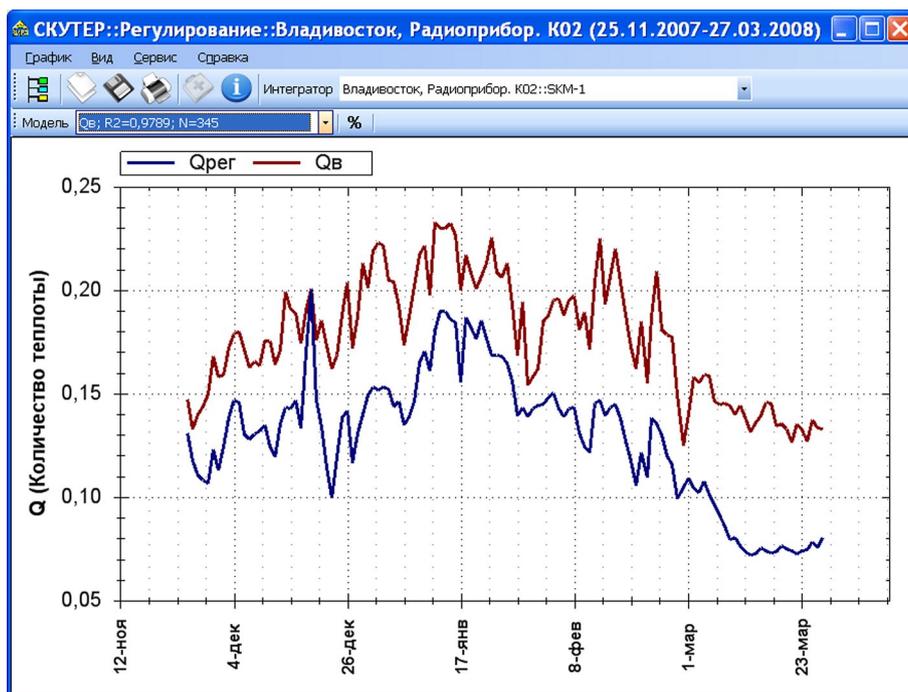


Рис. 9. Графики теплопотребления $Q_{рег}$ и $Q_{в}$ для объекта с регулированием и модельного (виртуального) объекта.

Сотрудниками ИАПУ ДВО РАН совместно с инжиниринговой компанией ИНФОВИРА выполнена разработка системы мониторинга и автоматического регулирования теплоснабжения (СМАРТ) завода «Радиоприбор» [5]. На территории завода находятся здания различного назначения (складские, административные, производственные), они объединены протяженной теплосетью, замыкающейся на узле гидравлической защиты, на котором ведется коммерческий учет. Помимо традиционных задач учета для отдельных тепловых узлов заказчиком были поставлены другие, специфичные для обычного объекта теплоснабжения задачи: мониторинг эксплуатационных режимов в едином диспетчерском пункте; анализ баланса расходов и потребляемой энергии; энергосбережение за счет регулирования и оценка эффективности работы автоматики.

Экономический эффект от установки систем автоматического регулирования определялся по выше описанной методике путем сравнения фактического (измеренного) теплопотребления с тем теплопотреблением (расчетным), которое соответствует гидравлическому режиму отопительного сезона до установки регуляторов, и погодным условиям и температурному графику источника теплоты отопительного сезона после установки регуляторов. На диаграмме рис. 10 представлены значения показателя характеризующего относительную экономию (в процентах) теплопотребления за счет установки системы регулирования. Экономия, полученная за счет автоматического регулирования теплоснабжения, составляет порядка 30%, или (в абсолютном выражении) 2818 Гкал за отопительный сезон. Наименьшая экономия наблюдается на корпусах № 6 16,5% и №1 14,4%. Столь низкий процент экономии объясняется тем, что здесь проводились ремонтные работы внутренней системы отопления, в связи с этим тепловая автоматика была отключена. Наибольшая экономия достигнута на крупных корпусах, на долю которых приходится 70% от всей экономии по регулируемым корпусам.

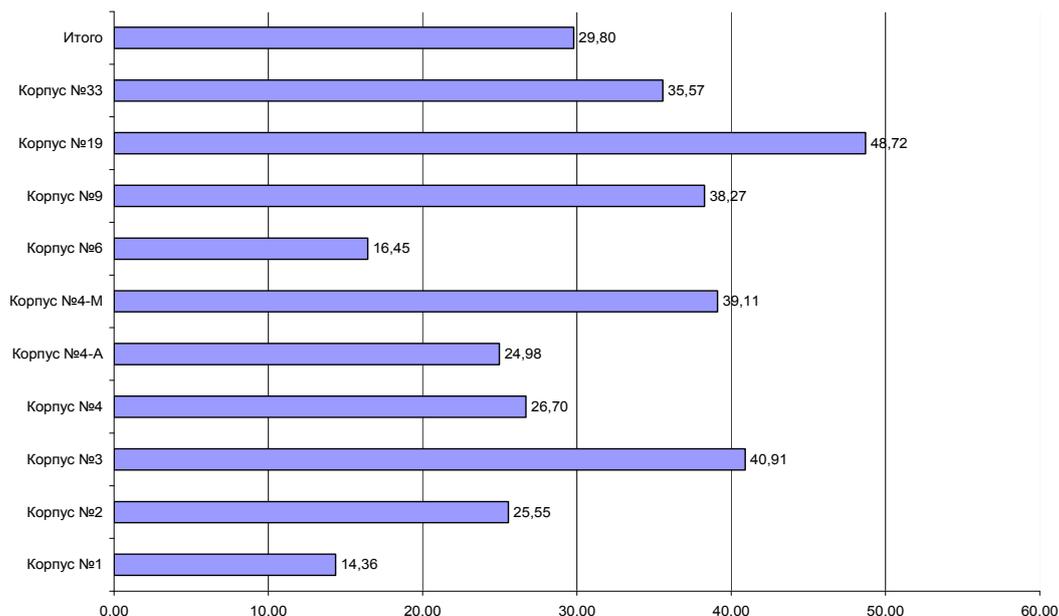


Рис. 10. Графики теплотребления $Q_{рег}$ и $Q_{в}$ для объекта с регулированием и модельного (виртуального) объекта.

3. Заключение

Достоверность количественной оценки эффекта, получаемого при регулировании теплотребления, весьма важна, поскольку в зависимости от величины эффекта зачастую принимаются те или иные, существенно отличающиеся друг от друга, инженерные решения, связанные с повышением энергоэффективности. Обычно для конкретного регулирующего оборудования приводятся интервальные оценки ожидаемого эффекта. При этом они основаны, как правило, на сравнении тепловой энергии, потребляемой объектом с регулирующим оборудованием и без него, для различных периодов времени и, как следствие, для различных погодных условий и температурного графика источника теплоты. Подход, предложенный в данной работе, ориентирован на сопоставлении объектов, находящихся в одинаковых условиях. За счет этого можно ожидать значительного повышения адекватности получаемых оценок.

Список литературы

1. Виноградов А.Н., Чипулис В.П. Анализ эффективности процессов регулирования теплотребления // Датчики и системы. 2006. № 3. С. 18-23.
2. Бабенко В.Н., Даниельян С.А., Кузнецов Р.С., Раздобудько В.В., Чипулис В.П. Платформа для проектирования информационно-аналитических систем мониторинга и анализа объектов теплоэнергетики // Коммерческий учет энергоносителей: материалы 25-й Международной научно-практической конференции. СПб.: Борей-Арт, 2007. С. 280-292.
3. Чипулис В.П. Оценка достоверности результатов измерений в теплоэнергетике // Измерительная техника. 2005. № 5. С. 53-58.
4. Kuznetsov R., Chipulis V. Regression Analysis in Energy Systems //Advanced Materials Research. 2013. Vol. 740. P. 772-777.
5. Даниельян С.А., Кузнецов Р.С., Раздобудько В.В., Чипулис В.П. Система мониторинга и автоматического регулирования теплоснабжения // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта CAD/CAM/PDM '2010: труды 10-й Международной конференции. М.: ИПУ РАН, 2010. С. 234-237.