

## Автоматизированные системы и комплексы 2007. №2(14)

1. *Воротницкий В.Э., Заслонов С.В., Калинкина М.А.* Программа расчета технических потерь мощности и электроэнергии в распределительных сетях 6-10 кВ // Электрические станции. – 1999. – № 8. – С. 38-42.
2. *Степанов А.С., Ермолаев А.Ю.* Программное обеспечение АСДУ РЭС // Электрические станции. – 1998. – № 7. – С. 47-50.
3. *Васильев П.А., Кравченко В.Ф., Хлебников В.К.* Программно-информационный комплекс «Сеть» // Сборник докладов семинара «Информационные технологии в энергетике Северного Кавказа». – Пятигорск: РП «Южэнерготехнадзор», 2001.
4. *Кононов Ал.Ю., Кононов Ан.Ю., Кононов Ю.Г.* Расчеты технических потерь электроэнергии в электрических сетях и разработка мероприятий по их снижению на базе комплекса программ RERSPC // Нормирование, анализ и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях – 2002. Информационные материалы. – М.: ЭНАС, 2002.
5. *Воротницкий В.Э., Заслонов С.В., Калинкина М.А.* Комплекс программ для расчета балансов электроэнергии в распределительных электрических сетях // Науч. конф.: «Энергосистема: управление, качество, безопасность». – Екатеринбург, 2001. – С. 431-434.
6. *Кононов Ю.Г., Гринь А.И.* Создание государственной системы мониторинга и управления уровнем потерь – один из путей перехода от нормирования к рыночным механизмам экономического стимулирования // Доклады V науч.-техн. семинара «Нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях». – М.: Диалогэлектро, 2007. – С. 58-61.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Д. Плутенко.*

УДК 681.518.5

© 2007 г. **Р.С. Кузнецов**

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

### **ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОКРУГЛЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА АРХИВНОЙ ИНФОРМАЦИИ ТЕПЛОВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ УЧЕТА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

Рассматривается методика, позволяющая уменьшить влияние погрешности округления на результаты анализа архивной информации тепловычислителей в задачах учета тепловой энергии, проанализированная и проверенная на реальных данных функционирования объектов теплоснабжения.

#### **Введение**

При коммерческом и технологическом учете тепла и теплоносителя необходимо решать задачи, связанные с контролем метрологических ха-

рактических измерительного оборудования. Особенно остро ввиду реалий эксплуатации измерительного оборудования на тепловых узлах потребителей и магистральных трубопроводах источников тепла стоит проблема соблюдения требуемых метрологических характеристик расходомеров, как наиболее чувствительных к агрессивному воздействию внешней среды средств измерения. Некачественный теплоноситель и другие факторы приводят к необходимости периодической поверки расходомеров на специальном проливочном стенде. Однако зачастую погрешность измерения расходомера выходит за допустимый диапазон в межповерочный период. В подобной ситуации показания тепловычислителя, выполняющего функции первичной обработки и архивирования результатов измерений, не могут быть использованы для расчета с теплоснабжающей организацией, что приводит к оплате по расчету, выставленному последней. Процесс же внеочередной поверки расходомеров сопряжен с серьезными временными и финансовыми затратами, а порой приводит к замене измерительного оборудования.

Для решения задач своевременного диагностирования измерительного оборудования становится актуальным анализ результатов измерений, выполняемый на основе архивной информации тепловычислителей. Следует отметить, что большинство из эксплуатируемых в России тепловычислителей предусматривают возможность получения подобной информации с разным периодом времени: текущие результаты измерений на данный момент времени, часовые, суточные, месячные и годовые. Наиболее востребованными, с точки зрения их последующего анализа, являются часовые архивы тепловычислителя. Как правило, архивы содержат среднечасовые значения расходов (объемных и массовых). Однако для решения задачи коммерческого учета используются также тепловычислители, в архивах которых хранятся только накопительные значения расхода (количества) теплоносителя. К их числу относятся семейство тепловычислителей Multical R и Multical CDE, запоминающих с периодом 1 час суммарное значение объемного количества теплоносителя в соответствующем трубопроводе. При этом запятая, отделяющая целые величины от их десятичных долей, фиксируется перед последним справа разрядом. Таким образом, цена младшего разряда (после запятой) равна 100 литрам при единице измерения 1 кубометр. Естественно, что значения среднечасовых расходов могут быть определены лишь одним способом – как разность между соседними во времени значениями количества теплоносителя. Получаемая при этом погрешность округления в 50 литров представляется слишком большой, учитывая допустимую относительную погрешность измерения расхода 2%. Например, если измеряемый расход реально изменяется в пределах от  $1\text{ м}^3$  до  $5\text{ м}^3$ , то максимальная относительная погрешность округления составит 5% - 1%. Еще более пессимистичной выглядит ситуация при косвенных измерениях разности расходов. Так, при разности расходов, не

превышающей 100 литров, относительная погрешность округления может достичь 100% (по 50% на каждый канал измерения).

В связи с этим представляет интерес на фактическом материале составить представление о том, насколько значимо влияние погрешности округления на результаты решения задач анализа архивной информации тепловычислителей.

### Постановка задачи

Рассмотрим влияние погрешности округления на решение задачи прогнозирования относительной погрешности измерения разности расходов в закрытой системе теплоснабжения в зависимости от величины расхода. Под закрытой системой теплоснабжения понимается система, из которой не осуществляется (в исправном ее техническом состоянии) водозабор. Очевидно, что в такой системе должен соблюдаться баланс потоков теплоносителя. С учетом допустимой относительной погрешности приборов измерения массового расхода теплоносителя (согласно существующей нормативной базе относительная погрешность расходомера не должна превышать 2%) условие соблюдения баланса выглядит следующим образом:

$$|M_1 - M_2| \leq 0,02 \cdot (M_1 + M_2), \quad (1)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – измеренные значения массовых расходов в подающем и обратном трубопроводах системы.

При невыполнении неравенства (1) мы можем утверждать, что результаты измерения недостоверны в том смысле, что погрешность по крайней мере одного измерительного прибора превышает допустимое значение. (Заметим, что это утверждение справедливо лишь в предположении отсутствия утечек в системе, которые также могут нарушить баланс потоков).

Данное обстоятельство положено в основу широко применяемого на практике метода прогнозирования относительной погрешности измерения разности расходов [1], в котором в качестве исходных данных используется ретроспективная информация (архивы тепловычислителей). Метод реализуется в два этапа. На первом определяется (на некоторой выборке архивной информации) базовая линейная функция  $M_{2лин} = a \cdot M_1 + b$ , аппроксимирующая зависимость расхода в обратном трубопроводе от расхода в прямом, и коэффициент  $R^2$ , показывающий достоверность аппроксимации (рис. 1).

На втором этапе определяется собственно прогнозная функция (рис. 2), которая показывает зависимость относительной погрешности измерения разности расходов от величины расхода в подающем трубопроводе  $M_1$ .

$$\partial M_{лин} = 2 \cdot (M_1 - M_{2лин}) / (M_1 + M_{2лин}) \cdot 100\%.$$

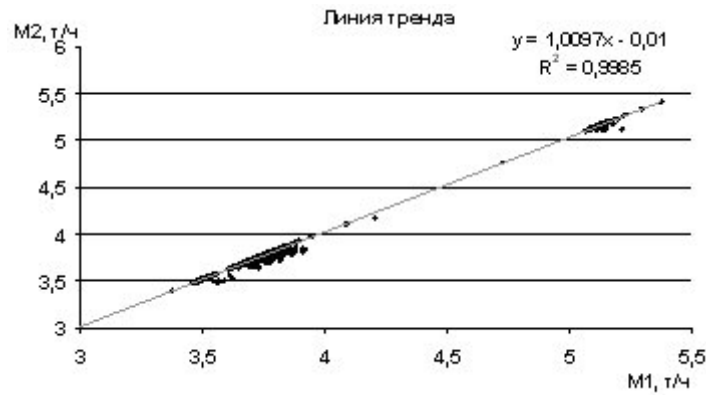


Рис. 1.

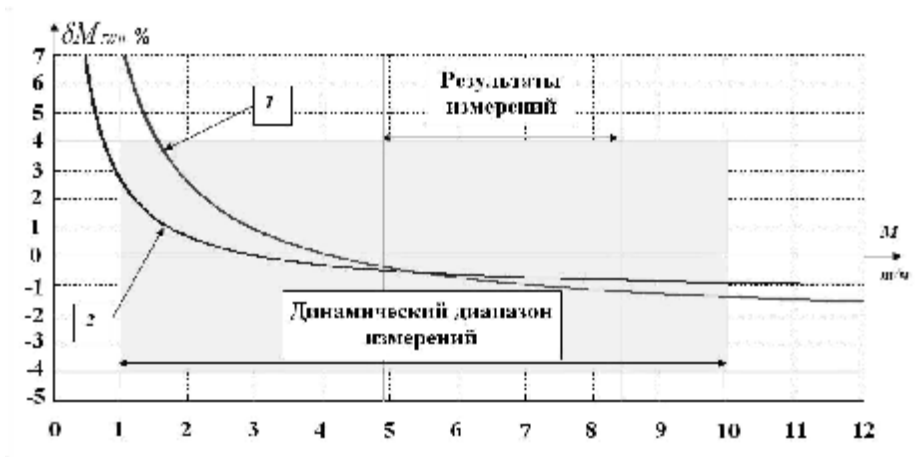


Рис. 2.

С использованием прогнозной функции  $dM_{\text{лин}}$  осуществляется отбраковка приборов учета (точнее, их частей – расходомеров). Если значение прогнозной функции для некоторого интервала значений расхода из динамического диапазона измерений (д.д.и.), на котором должна обеспечиваться требуемая точность измерений, превышает по модулю 4%, пара расходомеров признается неисправной и подлежит ремонту или замене. При такой процедуре аудита предполагается, что если величина критерия  $R^2$  для базовой функции  $M_{2\text{лин}}$  близка к единице (а для большинства случаев это условие соблюдается на практике), то и вероятность удачного прогноза по функции  $dM_{\text{лин}}$  достаточно велика.

График прогнозной функции, приведенный на рис. 1 и помеченный цифрой 1, заключенной в квадрат, соответствует паре расходомеров, которая будет признана неисправной, так как значение  $dM_{\text{лин}}$  превышает 4% в левой части д.д.и. и достигает величины 7,9% на нижней его границе. Для сравнения на том же рисунке (рис. 2) приведен другой график прогнозной функции (помечен цифрой 2). Поскольку все точки этого графика, расположенные в пределах д.д.и., содержатся в горизонтальном коридоре  $\pm 4\%$ , пару расходомеров следует признать исправной.

Проведем исследование степени влияния погрешности округления на результат прогноза. Целью исследования является повышение достоверности и расширение области применения технологии аудита приборного учета тепловой энергии за счет уменьшения влияния ошибки округления при косвенных измерениях параметров функционирования объектов теплоэнергетики.

План исследования содержит три этапа. На первом этапе для сформированной выборки строится прогнозная функция погрешности измерения на основе метода линейного регрессионного анализа, при этом используются реально измеренные (среднечасовые) значения расхода без округления. На втором этапе производится моделирование погрешности округления прибора учета: рассчитываются (исходя из среднечасовых) накопительные значения расхода и проводится округление с заданной точностью (до определенного разряда после запятой). Для вновь сформированной выборки строится прогнозная функция погрешности измерения разности расходов. На третьем этапе рассчитываются значения погрешности округления как разность между реальными значениями массового расхода и полученными после округления и проводится ее статистический анализ.

### Решение поставленной задачи

В качестве объекта исследования выбран узел учета тепловой энергии, установленный в тепловом пункте здания политехникума во Владивостоке. Этот объект имеет закрытую систему теплоснабжения. Учет теплоснабжения ведется электромагнитным тепловычислителем SA-94. Отличительная особенность данного типа прибора – то, что в архивах запоминаются не накопительные результаты измерений значения расхода, а среднечасовые. Для анализа часовых архивов был выбран интервал с 01.01.02 по 10.03.02 г. Схема узла учета представлена на рис. 3, здесь интегратор – это тепловычислитель. Схема типовая для потребителей тепловой энергии и позволяет измерять расход и температуру теплоносителя в прямом и обратном трубопроводах.

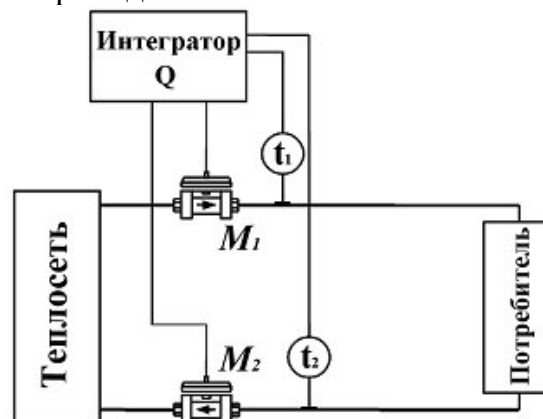


Рис. 3.

Как видно из табл. 1, регрессионная модель, полученная на основе измеренных значений расхода без округления, отражает явную линейную зависимость между расходом в подающем и обратном трубопроводах. При этом значение критерия Пирсона  $R^2$ , который отражает близость линии тренда к фактическим данным, приблизительно равно единице, что свидетельствует о “хорошей” корреляции с моделью (различие между фактическими и оценочными значениями расхода незначительно).

Таблица 1

| № | Погрешность округления, т/ч | Вес младшего разряда, % | Коэффициент |         |        |
|---|-----------------------------|-------------------------|-------------|---------|--------|
|   |                             |                         | a           | b       | $R^2$  |
| 1 | Без округления              | -                       | 1,0097      | -0,01   | 0,9985 |
| 2 | до 0,0001                   | 0,003                   | 1,0097      | -0,01   | 0,9985 |
| 3 | до 0,001                    | 0,03                    | 1,0097      | -0,01   | 0,9985 |
| 4 | до 0,01                     | 0,3                     | 1,0096      | -0,0097 | 0,9983 |
| 5 | до 0,1                      | 3                       | 1,0024      | 0,018   | 0,9829 |
| 6 | до 1                        | 30                      | 0,504       | 1,9375  | 0,2555 |

Из табл. 1 следует, что при округлении накопительных значений массового расхода точность аппроксимации снижается. Это обусловлено тем, что получаемые среднечасовые значения массовых расходов (рассчитанные на основе накопительных значений с округлением) могут отличаться от реальных на величину не больше чем значение младшего разряда, до которого проводится округление. Однако снижение точности, соответствующее первым трем строкам таблицы, весьма незначительно и существенно проявляется лишь при увеличении веса младшего разряда до единиц процента.

Проведем статистический анализ погрешности округления. В начале рассчитаем значения погрешности округления: разность между измеренными и полученными в результате округления значениями. Результаты статистического анализа (по погрешности округления) представлены в табл. 2

Таблица 2

| № | Погрешность округления, т/ч | Значения погрешности округления |             |         |
|---|-----------------------------|---------------------------------|-------------|---------|
|   |                             | Максимальное                    | Минимальное | Среднее |
| 2 | 0,0001                      | 0,00009846                      | -0,00009778 | 9,4E-10 |
| 3 | 0,001                       | 0,00097947                      | -0,00095826 | 6,4E-08 |
| 4 | 0,01                        | 0,00979037                      | -0,00980628 | 6,4E-08 |
| 5 | 0,1                         | 0,0972991                       | -0,09234394 | 6,4E-06 |
| 6 | 1                           | 0,90699307                      | -0,92734516 | 6,9E-05 |

На рис. 4 отображена гистограмма, показывающая распределение значений погрешности округления. В общем случае, при анализе выборок данных, полученных при округлении значений массового расхода с различной точностью, было выявлено, что закон распределения значений по-

грешности округления близок к нормальному. Хотя вид распределения индивидуален для каждой выборки.

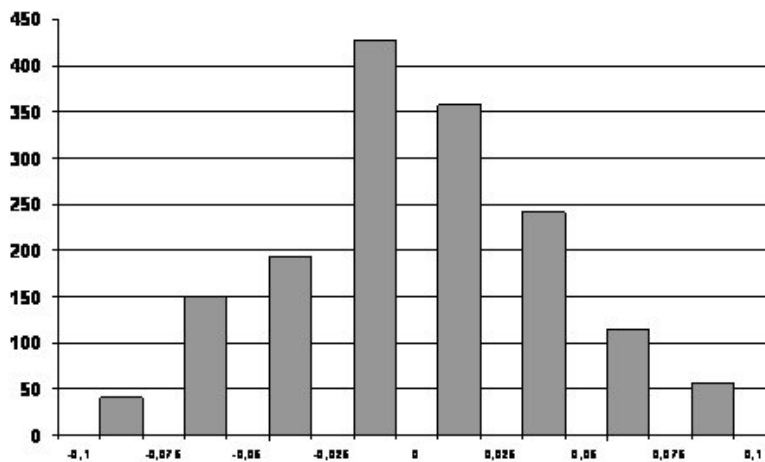


Рис. 4.

Математическое ожидание ошибки округления близко к нулю, – следовательно, можно сделать предположение о возможности уменьшения негативного влияния погрешности округления, используя усреднение значений массового расхода. Введем понятие «период усреднения». Данный термин в нашем случае будет означать временной интервал, на котором производится усреднение значений массового расхода.

Процесс усреднения можно описать следующим образом:

на первом этапе выбирается конкретное значение интервала усреднения (например, день, неделя или месяц);

вся выборка данных разбивается на определенное количество интервалов усреднения, в зависимости от размера выборки;

на каждом интервале усреднения рассчитывается среднестатистическое значение массового расхода;

на основе средних значений формируется новая выборка данных;

на новой выборке выполняется прогнозирование.

Какие отличия будут между исходной выборкой данных (до усреднения) и после проведения вышеописанного предварительного преобразования? Очевидно, что, заменяя набор данных об измерении массового расхода на некотором временном интервале средним значением массового расхода, получаем не только сглаживание пиковых значений массового расхода, но и устранение негативного влияния ошибки округления.

### Пример

Проиллюстрируем на одном из примеров возможность применения данной методики на практике. Рассмотрим выборку данных почасового архива (с 5.12.00г. по 20.03.01г.) двухканального теплосчетчика Multical III UF (с двумя расходомерами Ultraflow Dn40 и интегратором Multical R),

установленного в детском саду г. Владивостока. На рис.5 приведены графики среднечасовых значений массовых расходов  $M_1$  и  $M_2$  (левая ось) и относительной погрешности массовых расходов  $M_1 - M_2$  (правая ось).

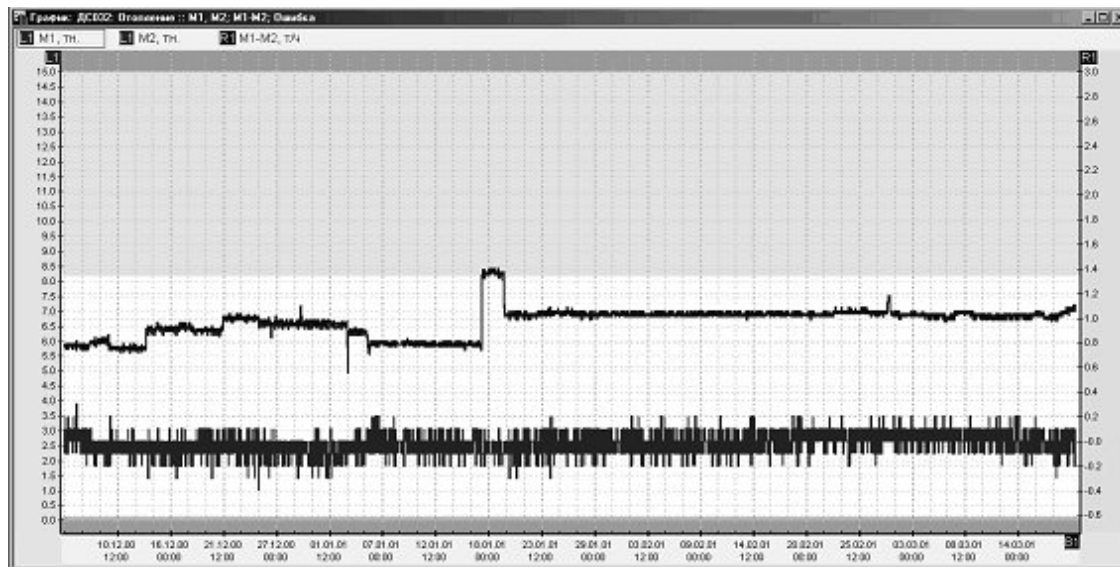


Рис. 5.

На рис. 6 и 7 представлены результаты реализации первого этапа решения задачи прогнозирования для периодов усреднения 1 час и 24 часа. Вычисления проведены с использованием последней версии информационно-аналитической системы мониторинга и анализа ретроспективной информации теплоэнергетических объектов [2].

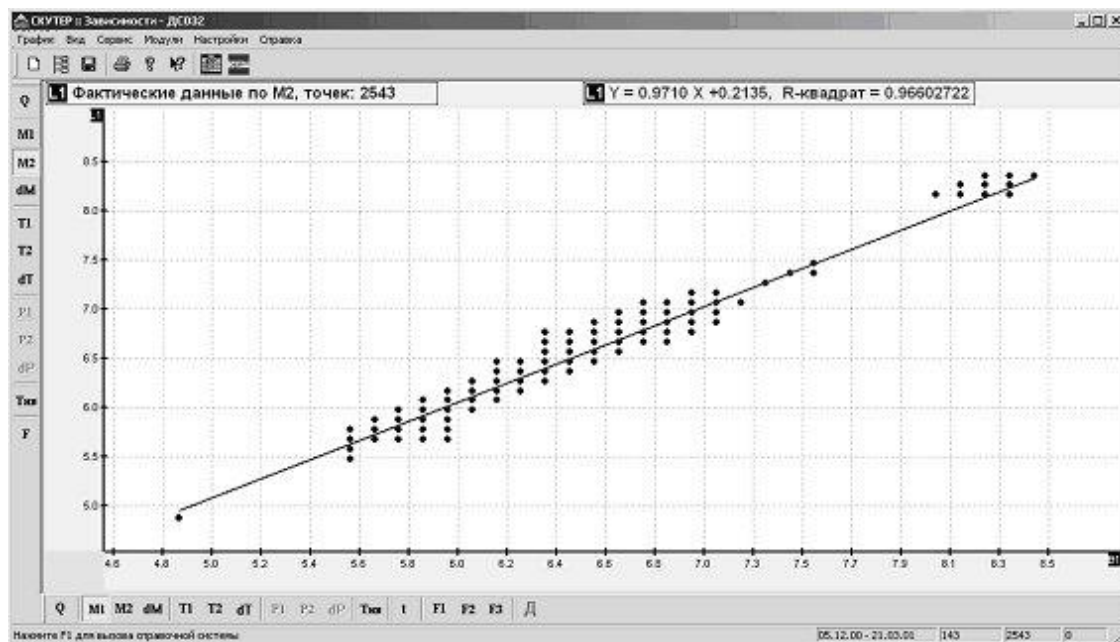


Рис. 6.



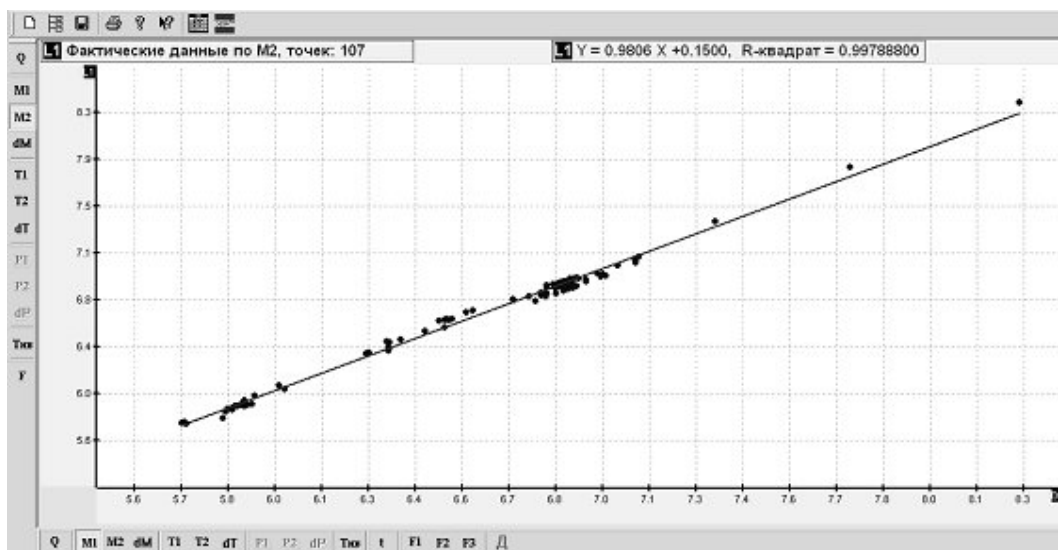


Рис. 7.

В табл. 3 представлены результаты вычислений зависимости коэффициентов модели от значения периода усреднения.

Таблица 3

| № | Период усреднения, час. | Коэффициент |        |                |
|---|-------------------------|-------------|--------|----------------|
|   |                         | a           | b      | R <sup>2</sup> |
| 1 | 1                       | 0,971       | 0,2135 | 0,9609         |
| 2 | 2                       | 0,9786      | 0,1632 | 0,9848         |
| 3 | 6                       | 0,9814      | 0,1443 | 0,9924         |
| 4 | 24                      | 0,9806      | 0,15   | 0,9979         |

По таблице можно проследить, что с увеличением периода усреднения и, как следствие, уменьшением влияния погрешности округления достоверность аппроксимирующей функции  $M_{2,лин}$  растет (незначительно, но постоянно), а значения коэффициентов  $a$  и  $b$  этой функции изменяются, но также незначительно ( $a$  в пределах второго знака после запятой,  $b$  – также в пределах второго знака, за исключением первой строки). При этом величина  $a$ , определяющая относительное рассогласование каналов измерения  $M_1$  и  $M_2$ , меньше единицы для всех периодов усреднения (т.е. относительная погрешность рассогласования положительна и колеблется в пределах от 1,86% до 3,15%), а величина  $b$ , определяющая среднее абсолютное рассогласование, всегда положительна.

На рис.8 приведены графики, отражающие зависимости относительной погрешности измерения разности расходов  $\Delta M_{лин}$  от величины расхода для функций  $M_{2,лин}$ , отраженных в таблице. Графики достаточно близки друг к другу (на рисунке три из них почти сливаются), что свидетельствует о компактности области прогнозирования. Несколько особняком стоит лишь график, соответствующий первой строке таблицы. Наименьшие раз-

личия наблюдаются в верхней части динамического диапазона расходомеров. Здесь ситуация с погрешностью измерения разности расходов выглядит вполне благополучной. Однако в области малых расходов (меньше примерно 2,5 т/час) погрешность превышает 4%.

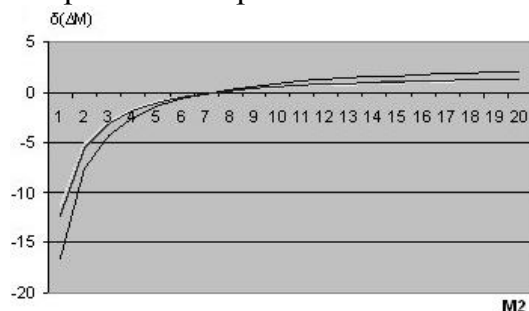


Рис. 8.

Картина, близкая к приведенной выше, наблюдается при анализе архивов десяти других теплосчетчиков с интегратором Multical R, установленных на закрытых системах теплоснабжения. Исходя из данной выборки объектов, можно отметить, что при увеличении периода усреднения и, как следствие, уменьшении относительной погрешности округления выполняется следующее:

- достоверность аппроксимации функции  $M_{2лин}$  растет;
- коэффициенты  $a$  и  $b$  функции  $M_{2лин}$  изменяются незначительно;
- знаки относительной и средней абсолютной погрешностей рассогласования каналов измерения сохраняются.

А вот как выглядит изменение функции относительной погрешности измерения разности расходов от разности температур [3] при изменении периода усреднения (рис. 9 и 10).

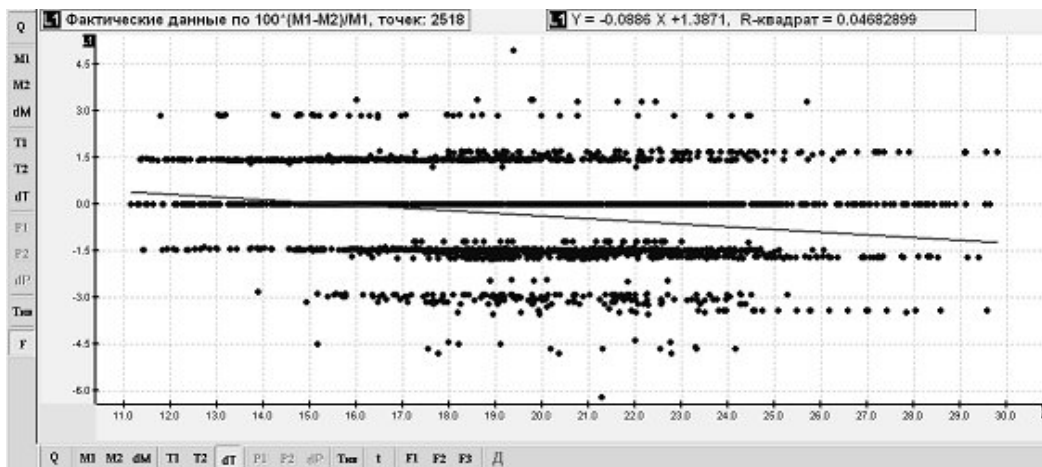


Рис. 9.

Здесь взяты два периода усреднения – час и день. Отчетливо видно, что негативное влияние ошибки округления уменьшается с увеличением периода усреднения, при этом достоверность аппроксимации растет, и

весьма значительно. Многослойность распределения точек на рис. 9 объясняется именно погрешностью округления. Здесь также можно заметить, что значения относительной погрешности при периоде округления 1 час находятся в интервале от -5,88 до +5%, а при периоде 1 день в более плотном коридоре – от -1,45% до +0,79%.

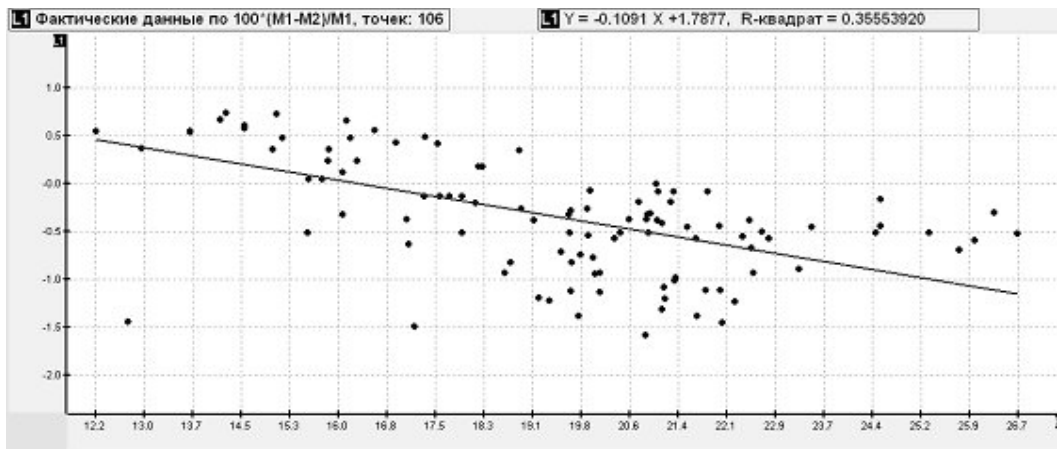


Рис. 10.

### Заключение

Эксперименты по анализу архивной информации конкретных объектов (тепловых узлов школ и детских садов г. Владивостока) показывают, что существуют возможности уменьшить степень негативного влияния погрешности округления и, как следствие, адаптацию принятой технологии аудита для ранее не исследуемого класса объектов.

В результате проведенной работы получена существенно модифицированная методика (и реализующие ее программные средства) прогнозирования метрологических дефектов, являющаяся базовой для аудита приборного учета тепловой энергии. Как показали исследования, методика оказалась практически приемлемой для класса измерительных приборов с большой погрешностью округления измеряемых параметров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Лупей А.Г.* О метрологической целесообразности непосредственных измерений водоразбора из системы теплоснабжения // Труды 13-й междунар. науч.-практ. конф. «Коммерческий учет энергоносителей». – СПб., 2001.
2. *Бабенко В.Н., Кузнецов Р.С., Орлов С.И., Чипулис В.П.* Функциональные возможности и опыт эксплуатации информационно-аналитической системы оперативного наблюдения и анализа режимов функционирования объектов теплоэнергетики // Информатика и системы управления. – 2005. – №1(9). – С.151-161.
3. *Лупей А.Г.* О влиянии температуры на погрешность измерений расхода теплоносителя // Труды 13-й междунар. науч.-практ. конф. «Коммерческий учет энергоносителей». – СПб., 2001.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии О.В. Абрамовым.*