

ТЕОРЕМА О СРЕДНЕМ

(О динамических погрешностях измерительных преобразователей)

«Средняя температура по больнице – 36,6°C»

Фольклор статистиков

К средствам измерений, используемым для учета энергоресурсов, обычно предъявляется требование обеспечения максимальной точности в максимально возможном динамическом диапазоне измерений, стабильность и воспроизводимость показаний. Динамические же свойства измерительных преобразователей, крайне важные при их использовании в системах автоматического регулирования, для целей учета обычно не рассматриваются [1]. Динамические свойства обычно интересуют изготовителей расходомеров, для которых это ограничивает область применения, в первую очередь тепловых расходомеров (калориметрических, термоанемометров и т.п.) Так для компенсации их инерционности применяют специальные методы адаптивной динамической коррекции, основанной на предсказании поведения системы по характеру изменения сигнала [2].

Динамическая погрешность средств измерений по Пиотровскому [3] определяется двояко: с одной стороны, как погрешность, вызванная динамическими свойствами средства измерений отличными от идеальных. Идеальные динамические свойства описывает ядро оператора Вольтерра в форме $k(t, t) = k \delta(t-t)$, либо в операторной форме преобразования Лапласа как передаточная функция $W_{ид}(s) = K = const$, т.е. функция, не зависящая от аргумента s . С другой стороны – это погрешность, обусловленная использованием статической процедуры градуировки средства измерений в тех случаях, когда естественной является динамическая процедура.

Рассмотрим особенности динамических свойств средств измерений для применения в целях учета энергоресурсов. Для взаиморасчетов между поставщиками и потребителями при отчуждении энергоресурсов используются информация об их средних расходах.

Среднее значение функции $f(x)$ на интервале $[b,a]$, как известно, определяется из теоремы о среднем интегрального исчисления:

$$\overline{f}_a^b = f(x) = \frac{1}{(b-a)} \cdot \int_a^b f(x) dx$$

При этом, для нашего случая, пределы определенного интеграла интерпретируются как время, подынтегральная функция как текущий расход, а интеграл - количество вещества.

Поскольку средства измерений, используемые при учете энергоресурсов, имеют ограниченное быстродействие, то при измерении параметров нестационарных процессов неизбежно возникает динамическая погрешность, т.е. разность между погрешностью средства измерений в динамическом режиме и статической погрешностью, соответствующей значению величины в данный момент времени (рис.1). Динамические погрешности связаны как с быстродействием измерительных преобразователей, так и с быстродействием каналов измерения вычислителей и корректоров. Чтобы оценить динамические свойства измерительного преобразователя необходимо провести исследования его отклика на гармонический сигнал (т.е. снять амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики) или на ступенчатое (импульсное) воздействие. Обычно передаточная функция измерительного преобразователя с достаточной точностью описывается апериодическим звеном (1), колебательным звеном (3) и транспортным запаздыванием (4) или их комбинацией (5 или 6). Только у тепловых расходомеров передаточная функция имеет более высокий порядок.

$$W_{1анеп}(s) = \frac{K}{1 + T \cdot s} \quad (1)$$

$$W_{2анеп}(s) = \frac{K}{(1 + T_1 \cdot s) \cdot (1 + T_2 \cdot s)} \quad (2)$$

$$W_{зан}(s) = e^{-t_{зан} \cdot s} \quad (4)$$

$$W_{ан-зан}(s) = W_{анер}(s) \cdot e^{-t_{зан} \cdot s} \quad (5)$$

$$W_{к-зан}(s) = W_{колеб}(s) \cdot e^{-t_{зан} \cdot s} \quad (6)$$

Учитывая, что изображение ступенчатой функции по Лапласу $h(t)=1(t) \hat{O} h(s)=1/s$, а отклик $h(s)=W(s) \cdot 1/s$, то, применив обратное преобразование Лапласа,

$$h(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} e^{st} \cdot h(s) ds$$

можно построить переходную характеристику (отклик, реакцию) динамических звеньев (1-3), соответственно на ступенчатое воздействие:

$$h_1(t) = K \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

$$h_2(t) = K \cdot (1 + a \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - b \cdot e^{-\frac{t}{T_2}})$$

$$h_3(t) = K \cdot \{1 - e^{-x \cdot \frac{t}{T}} \cdot [\cos(b \cdot t) - \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} \sin(b \cdot t)]\}$$

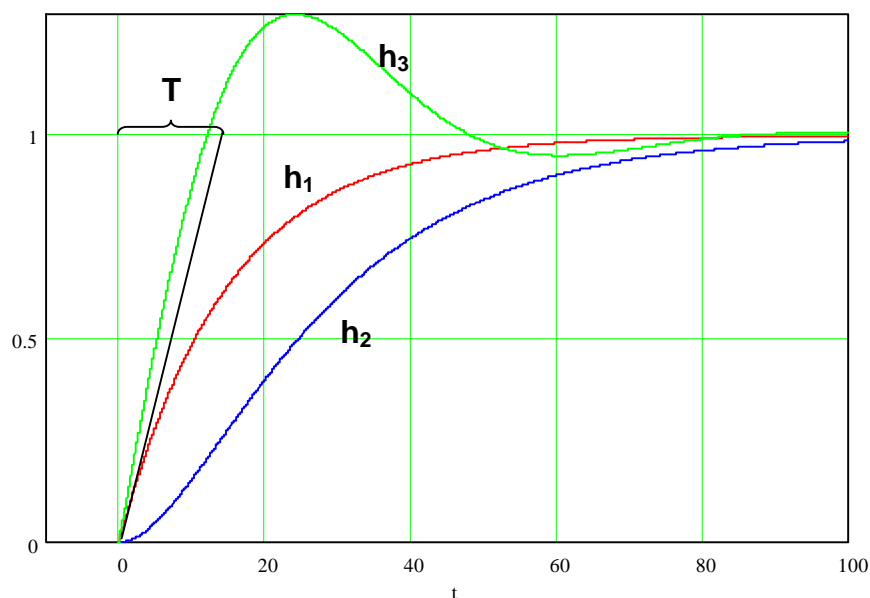


Рис.1

Временной интервал, ограниченный фигурными скобками, суть постоянная времени динамического звена.

Для стационарных процессов, а также для линейных цепей измерения наличие инерционных звеньев, создающих динамические погрешности, не приводит к ошибкам измерения количества (это важно!) К сожалению, наличие статических нелинейных цепей, процессов, которые описываются нелинейными дифференциальными уравнениями или носят случайный характер, не позволяет использовать линейные модели.

Дело в том, что часто процессы при учете энергоресурсов носят нестационарный характер, вызванные как самим характером учетной операции, например, водоразбор в системах ГВС и ХВС, так и технологическими особенностями, например, регулирование тех или иных параметров энергоносителя (давление, температура, расход и т.д.) В этом случае влияние динамических параметров на метрологические характеристики измерительных комплексов может быть решающим. В тех же случаях, когда имеется нелинейное преобразование (квадратичная зависимость между расходом и перепадом давления у расходомеров на основе сужающих устройств или разные постоянные времени разгона/торможения у турбинных расходомеров газа) возникают динамические погрешности, зависящие от спектральных характеристик расхода [4]. В измерительных комплексах, использующих косвенные измерения (массовый расход жидкости и пара, объемный расход газа, приведенный к стандартным условиям, расход тепла и т.д.) по данным, получаемым от нескольких измерительных преобразователей (объемного расхода, температуры, давления, плотности) применяются алгебраические процедуры, представляющие собой суть нелинейные операции, для которых имеет место неравенство:

$$\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x_1(t) \cdot x_2(t) \cdot \dots \cdot x_n(t) dt \neq \frac{\sum_{i=1}^N (x_{1i} \cdot x_{2i} \cdot \dots \cdot x_{ni})}{N}$$

Впервые, для целей повышения достоверности учета энергоресурсов, на это было обращено внимание Лачковым В.И. в работе [4]. На основе простейших линейных двухпараметрических функций было показано, что расчет тепловой энергии по среднечасовым значениям температуры и расхода теплоносителя приводит к существенным (десятки процентов) методическим погрешностям и для их исключения необходим алгоритм, использующий текущие значения параметров.

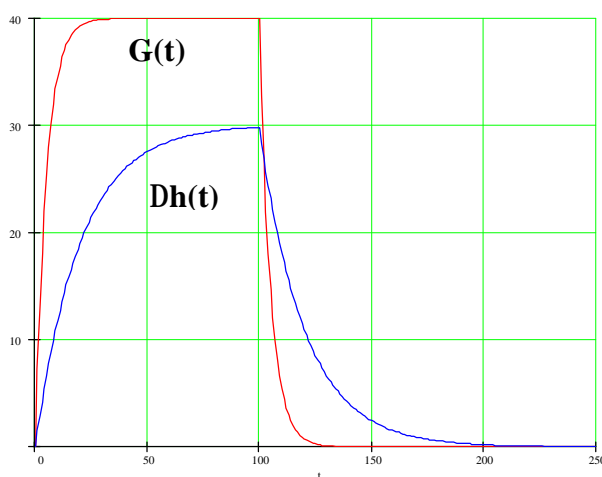


Рис.2

Рассмотрим, например, типичную ситуацию с импульсным водоразбором в горячем водоснабжении. Пусть водосчетчик обладает постоянной времени 5 с, а термометр сопротивления 20 с. Измеренные в динамическом режиме значения текущего расхода и температуры изображены на рис.2. Тогда при открывании крана на 100 с (типичный случай), из-за инерционности этих средств измерений, интегральное значение тепловой энергии (произведения расхода на разность удельных энтальпий) за 250 с будет на 17% меньше, чем истинное.

Обычно различают динамические погрешности первого и второго рода. Первые, связаны с уже рассмотренной инерционностью средств измерений, вторые - с дискретным во времени представлением измерительной информации. Динамические погрешности второго рода возникают, когда измеренная величина приписывается началу или концу цикла преобразования и действует до момента следующего измерения (это особенно характерно для средств измерений

оборудованных устройствами «выборки-хранения») или для дискретных устройств. Для их описания используется решетчатая функция $f[n\Delta t]$, значения которой отличны от нуля только в дискретных равноотстоящих друг от друга значениях переменной (времени). Период дискретизации Δt суть то же, что время и цикла измерений $T_{ц}$, а n – целое число.

Аналогом преобразования Лапласа, используемого для описания непрерывных динамических звеньев,

$$L\{x(t)\} = X(s) = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-st} dt$$

для дискретных звеньев является соответствующее дискретное преобразование Лапласа

$$L\{x(n \cdot \Delta t)\} = X^*(s) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n \cdot \Delta t) \cdot e^{-s \cdot n \cdot \Delta t}$$

при этом вместо оператора s используется оператор $z = e^{s \cdot \Delta t}$.

Спектр дискретного устройства [6], выражается формулой:

$$Y[e^{jw\Delta t}] = \frac{1}{\Delta t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Y(w - \frac{2p}{\Delta t} \cdot n)$$

При соблюдении условий теоремы Котельникова

$$\Delta t \leq \frac{1}{2 \cdot f_{max}}$$

где f_{max} – верхняя граничная частота спектра непрерывного сигнала, последний может быть восстановлен без искажений. Естественно, что чем больше период дискретизации, тем ниже должна быть частота изменения измеряемой величины.

Приведенная динамическая погрешность второго рода g может быть определена как:

$$g = \pm \frac{\Delta x}{x_m} = \frac{x' \cdot T_{ц}}{x_m}$$

где Dx - максимальное изменение измеряемой величины за время цикла T_u ;

x_m - максимальное значение измеряемой величины;

x' - средняя скорость изменения измеряемой величины;

В случае синусоидального изменения измеряемой величины частотой f максимальная приведенная динамическая погрешность второго рода будет равна

$$g = 2 \pi f T_u$$

Таким образом, динамические погрешности первого и второго рода ограничивают максимальную скорость изменения измеряемой величины.

Динамические погрешности измерений имеют следующие источники:

1. Инерционность расходомеров и счетчиков. Зачастую быстродействие расходомеров или каналов измерения расхода теплосчетчиков не нормируется, данные о динамических свойствах (постоянной времени, времени установления показаний на уровне 0,5, времени срабатывания и т.п.) в НТД отсутствуют, определение динамических свойств расходомеров при поверке не проводится. Типовая постоянная времени (период времени, за который выходной сигнал расходомера при скачкообразном изменении расхода, нарастая по экспоненте, изменится в e раз) может составлять от долей до десятков и даже сотен секунд. При этом даже расходомеры, основанные на практически безынерционных принципах действия, как электромагнитные или, в меньшей степени, ультразвуковые с автоциркуляцией импульсов и вихревые могут иметь значительные постоянные времени, связанные как с задержками в распространении сигналов, так и с их обработкой (выделением полезного сигнала на уровне шумов, осреднением и т.д.) Кроме того, ряд расходомеров, особенно ультразвуковых и вихревых с питанием от автономного источника с целью увеличения срока службы батарей при измерении текущего расхода применяется метод дискретных отсчетов, с применением устройств «выборки-хранения» и эквивалентные постоянные времени могут составлять единицы и десятки минут. Другим ограничением является использование

счетчиков с импульсным выходом низкой частоты при измерении малых расходов. Несмотря на высокую точность и высокое собственное быстродействие счетчика из-за наличия импульсного выходного сигнала с низкой частотой при малых расходах возникает значительная ошибка дискретизации, приводящая к существенной погрешности среднечасовых значений.

2. Инерционность термопреобразователей и датчиков давления. Постоянная времени термопреобразователей зависит от их массы, а, следовательно, длины, массы защитной гильзы (пенала) и теплопроводной жидкости, характера течения воды в трубопроводе. Если постоянная времени самого чувствительного элемента составляет единицы секунд, то у термопреобразователя в защитной гильзе может увеличиваться в десятки и сотни раз.

3. Быстродействие каналов измерения расхода, температуры, давления и вычисления теплоты, плотности пара/газа. Обычно быстродействие каналов измерения расхода, температуры, давления и вычисления теплоты столь велико, что задержками можно пренебречь. Однако у тепловычислителей или газовых корректоров с питанием от автономного источника с целью увеличения срока службы батарей при измерении текущих параметров расхода, температуры и давления применяется метод дискретных отсчетов, с применением устройств «выборки-хранения» и эквивалентные постоянные времени могут составлять единицы и десятки минут.

4. Нестационарные процессы. Измерение пульсирующих потоков представляет собой определенную проблему и специально оговаривается в соответствующих руководствах.

Например, для расходомеров с использованием сужающих устройств рекомендуется использование специальных гасителей пульсаций расхода, представляющих собой гидравлический эквивалент многозвенного электрического R-C фильтра и состоящий из нескольких последовательно соединенных Г-образных звеньев, включающих гидравлические сопротивления и ресиверы. Понятно, что такие

успокоители создают потери напора и искажают профиль скорости потока, влияющий на показания многих расходомеров. Пульсации расхода могут быть вызваны как работой технологического оборудования (насосы, элеваторы, струйные подогреватели и т.д.), так и наличием систем автоматического регулирования (температуры и давления теплоносителя, температуры воздуха и т.д.) У плохо отрегулированной САР, работающей в автоколебательном режиме с заходом в нелинейную область или имеющей релейный регулирующий элемент, такие пульсации могут быть весьма значительными. Способностью проводить надежные измерения пульсирующих потоков обладают, как правило, расходомеры, имеющие высокие динамические характеристики, хотя если, например, частота пульсаций станет кратной частоте срыва вихрей у вихревого расходомера, это приведет к значительным погрешностям. Проверка расходомеров производится в режиме установившихся потоков, и зачастую, фактически по объему (массе), поэтому выявить погрешности измерения нестационарных потоков не представляется возможным.

5. Сторонние источники погрешностей. Известно, что наличие нерастворенного воздуха или твердых частиц в воде или воды в паре и газе, паровая и газовая кавитация в жидкости, отложения на стенках трубопровода и измерительных преобразователях расхода драматическим образом влияют на точность измерений. Однако случайное, эпизодическое возникновение таких эксцессов может остаться незаметным для наблюдателя, но создать дополнительную погрешность измерений. Пробковое прохождение воздушного пузыря, твердой частицы, окарины, струй потока с различной проводимостью или температурой могут, например, исказить или даже блокировать на время работу расходомера, рассеивая или отклоняя ультразвуковой луч акустического расходомера, шунтируя сигнал электромагнитного расходомера или срывая устойчивое вихреобразование вихревого. Восстановление нормальной работы может занимать от единиц до

десятков секунд и зависит от устойчивости его конструкции к подобным возмущающим факторам. Наличие самодиагностики состояния расходомера и правильный алгоритм выхода из нештатной ситуации может снизить возникающую погрешность.

Несмотря на отсутствие нормативных требований, многие авторы [5], [7] сходятся во мнении, что отсчеты по каждому параметру не должны превышать 5 с, а постоянная времени - десятков секунд. Использование при коммерческом учете энергоносителей средств измерений, производящих дискретные отсчеты с периодом единицы-десятки минут, для динамических процессов недопустимо.

В настоящее время делаются попытки учесть динамические характеристики измерительных преобразователей при испытаниях с целью утверждения типа средства измерений. В проекте типовой программы испытаний для целей утверждения типа теплосчетчиков для водяных систем теплоснабжения [8] предусмотрено измерение расхода в режиме резко изменяющихся нагрузок, состоящего из повторяющихся циклов номинального и нулевого расхода, а также времени термического срабатывания термопреобразователей. Дальнейшим шагом на пути определения динамических погрешностей средств измерений должны стать методики динамических калибровки и поверок.

Учет возможных динамических погрешностей при конструировании измерительных преобразователей, проектировании измерительных комплексов на их основе для учета энергоносителей и их испытаний на соответствие нормированным динамическим характеристикам позволит и повысить точность приборного учета и снизить возникающие невязки по их балансам.

Литература

1. Гумен С.Г. и др. Основные подходы к организации водоучета и особенности измерений расхода воды в системе коммунального водоснабжения г.Санкт-

Петербурга//Совершенствование средств измерения расхода жидкости, газа и пара.
МЦЭНТ, С-Пб, 1996. С.27-33.

2. Соколов Г.А. и др. Влияние пульсаций потока на погрешность
термоконвективных расходомеров. Совершенствование измерений расхода,
регулирование и коммерческий учет энергоносителей. Борей-Арт, С-Пб, 2003. С.150-
154.

3. Я.Пиотровский. Теория измерений для инженеров. Перевод с польского: Мир, М.
1989. С.335.

4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. Л.:
Машиностроение, 1989. С.700.

5. Лачков В.И. О методической погрешности учета по средним значениям
параметров энергопотребления//сборник «Средства автоматизации коммерческого
учета энергоносителей».: СПб: МЦЭНТ, 1994. С.65-69.

6. Грановский В.А. Динамические измерения: Основы метрологического
обеспечения. -Л.: Энергоатомиздат, 1984. С.224.

7. Башкин Б.В., Милейковский Ю.С. Новые предложения для эффективного решения
проблем энергоснабжения//Энергосбережение №4, 2002. Р.32, 33.

8. Теплосчетчики для водяных систем теплоснабжения//Проект типовой программы
испытаний для целей утверждения типа. ФГУ «Ростест-Москва».

ЗАО «НПО «Тепловизор» тел./факс 730-47-44, 231-45-84

e-mail: mail@teplovizor.ru,

<http://www.teplovizor.ru>

Коптев Валерий Сергеевич, тел. сл. 730-47-44, тел. дом.170-83-87

Сычев Геннадий Иванович, тел. сл. 730-47-44, тел. дом.171-58-78