

Инженерное оборудование зданий и сооружений

УДК 681.52.01

К ЗАДАЧЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЗДАНИЙ

С.В. Панферов, В.И. Панферов

TO THE PROBLEM OF PARAMETRIC IDENTIFICATION OF A MATHEMATICAL MODEL OF A BUILDING THERMAL CONDITIONS

S.V. Panferov, V.I. Panferov

Рассматривается адаптивный алгоритм идентификации параметров математической модели теплового режима отапливаемых зданий. Используются процедуры фильтрации и помехоустойчивого дифференцирования сигналов температуры внутреннего и наружного воздуха. Приведены результаты апробации алгоритма идентификации.

Ключевые слова: алгоритм идентификации, математическая модель, тепловой режим зданий, фильтрация, помехоустойчивое дифференцирование информационных сигналов.

An adaptive algorithm for parameter identification of a mathematical model of the heated building thermal condition is considered. Filtration procedure and the noise immune differentiation of temperature signals of internal and external air are used. The results of testing the identification algorithm are given.

Keywords: identification algorithm, a mathematical model, building thermal regime, filtration, noise immune differentiation of information signals.

В нашей стране на теплоснабжение зданий расходуется более одной трети всего добываемого топлива, причем основными при этом являются затраты на отопление. В связи с этим даже относительно небольшой успех в решении проблемы энергосбережения при отоплении зданий, в силу масштабности энергозатрат, приводит к ощутимым эффектам в абсолютном выражении. Известно, что наибольшая экономия тепловой энергии в системах теплоснабжения достигается за счет их автоматизации. Поэтому разработка вопросов, связанных с автоматизацией систем отопления и их совершенствованием, является вполне актуальной проблемой. При этом следует иметь в виду, что первоочередной задачей, которую необходимо решать при разработке высококачественных систем управления, является создание соответствующего математического и программного обеспечения, в частности, динамической математической модели температурного режима зданий и алгоритмов ее параметрической идентификации. Объясняется это тем, что как сама структура системы управления, так и параметры ее настройки определяются, прежде всего, свойствами и характеристиками объекта управления, которые, в частности, и

представляются математической моделью. Вместе с тем свойства и характеристики заметно меняются, например, из-за старения здания, при накоплении влаги в ограждающих конструкциях и т. п. Поэтому вполне понятно, что необходимо своевременно отслеживать изменение этих характеристик, т.е. решать задачу идентификации математической модели, причем лучше всего это делать с помощью адаптивного алгоритма, отличающегося достаточной оперативностью.

Известно [1, 2 и др.], что тепловой режим зданий удовлетворительно может быть описан следующим дифференциальным уравнением:

$$T_B \frac{dt_B(\tau)}{d\tau} + t_B(\tau) = T_H \frac{dt_H(\tau)}{d\tau} + t_H(\tau) + k_{\Pi} W_{CO}(\tau), \quad (1)$$

где $t_B(\tau)$, $t_H(\tau)$ – соответственно температура внутреннего и наружного воздуха; T_B , T_H – соответственно постоянные времени для внутреннего и наружного воздуха; $W_{CO}(\tau)$ – мощность системы отопления; τ – время; k_{Π} – коэффициент передачи, причем $k_{\Pi} = 1/(q_V V)$. Здесь q_V – удельная тепловая характеристика здания; V – его объем.

Адекватность данной математической модели достаточно скрупулезно установлена в работах [1, 2], вместе с тем представляет интерес разработка и других (не только представленных в [1, 2]) вариантов процедуры параметрической идентификации модели. Здесь могут быть найдены некоторые предпочтительные для различных условий решения. В частности, как это уже отмечалось, интересны адаптивные алгоритмы параметрической идентификации, так как они позволяют оперативно отслеживать изменение характеристик объекта. Кроме того, из соотношения $k_{\Pi} = 1/(q_V V)$ следует, что, сконструировав адаптивный алгоритм оценки коэффициента передачи k_{Π} , мы тем самым решим и проблему определения и удельной тепловой характеристики q_V , являющейся важнейшим интегральным показателем качества теплозащитных свойств зданий, указываемым в их энергетическом паспорте. Поэтому рассмотрим адаптивный алгоритм оценки всех параметров модели (1), в том числе и параметра k_{Π} .

Задача адаптивной идентификации формулируется следующим образом. Пусть известны оценки параметров в i -й момент времени – T_{Bi} , T_{Hi} , $k_{\Pi i}$, пусть, кроме того, для $(i+1)$ -го момента времени получена новая информация с объекта управления – $\frac{dt_B(\tau_{i+1})}{d\tau}$, $t_B(\tau_{i+1})$, $\frac{dt_H(\tau_{i+1})}{d\tau}$, $t_H(\tau_{i+1})$, $W_{CO}(\tau_{i+1})$. Ставится вопрос: как, зная оценки параметров для i -го момента времени, по новой информации с объекта управления найти новые улучшенные оценки этих же параметров – $T_{B(i+1)}$, $T_{H(i+1)}$, $k_{\Pi(i+1)}$? При этом понятно, что критерий идентификации должен иметь следующий вид:

$$I_{(i+1)} = \left[T_{Bi} \frac{dt_B(\tau_{i+1})}{d\tau} + t_B(\tau_{i+1}) - T_{Hi} \frac{dt_H(\tau_{i+1})}{d\tau} - t_H(\tau_{i+1}) - k_{\Pi i} W_{CO}(\tau_{i+1}) \right]^2. \quad (2)$$

Решая задачу методом наискорейшего спуска, получаем:

$$T_{B(i+1)} = T_{Bi} - 2h \cdot \left[\frac{dt_B(\tau_{i+1})}{d\tau} \right]; \quad (3)$$

$$T_{H(i+1)} = T_{Hi} + 2h \cdot \left[\frac{dt_H(\tau_{i+1})}{d\tau} \right]; \quad (4)$$

$$k_{\Pi(i+1)} = k_{\Pi i} + 2h \cdot \left[W_{CO}(\tau_{i+1}) \right], \quad (5)$$

где под $[\cdot]$ понимаются квадратные скобки из (2) со всем своим содержимым, а шаг h определяется из условия достижения минимума критерия (2) при движении в антиградиентном направлении:

$$h = \frac{1}{2 \left\{ \left[\frac{dt_B(\tau_{i+1})}{d\tau} \right]^2 + \left[\frac{dt_H(\tau_{i+1})}{d\tau} \right]^2 + [W_{CO}(\tau_{i+1})]^2 \right\}}. \quad (6)$$

Соотношения (3)–(6) содержат производные сигналов температуры внутреннего и наружного воздуха по времени, как известно, проблема помехоустойчивого дифференцирования сигналов не является простой, здесь, очевидно, необходима определенная проработка конкретного способа реализации процедуры дифференцирования.

Конечно, можно применить самый распространенный и, на наш взгляд, самый простой способ уменьшения влияния помех при дифференцировании – это предусмотреть низкочастотный фильтр в виде инерционного звена первого порядка. Однако, как нам представляется, предпочтительнее использовать алгоритм, приведенный практически без пояснений в [3]. По нашему мнению, обоснованность данного алгоритма следующая.

Пусть средняя величина сигнала в $(i+1)$ -й момент времени определена по четырем точкам, т. е.

$$\bar{x} = (x_{i+1} + x_i + x_{i-1} + x_{i-2})/4. \quad (7)$$

Отнесем \bar{x} к середине временного интервала, на котором располагаются рассматриваемые точки, т.е. картина расположения точек будет такой, как это представлено на рис. 1.

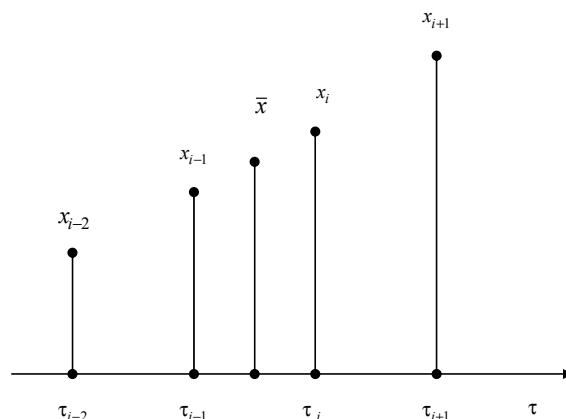


Рис. 1. Расположение точек, используемых при дифференцировании

Очевидно, что в этом случае можно пользоваться следующими четырьмя оценками производной:

$$\frac{dx(\tau_{i+1})}{d\tau} \approx \frac{x_{i+1} - \bar{x}}{1,5\Delta\tau}; \quad (8)$$

$$\frac{dx(\tau_{i+1})}{d\tau} \approx \frac{x_i - \bar{x}}{0,5\Delta\tau}; \quad (9)$$

$$\frac{dx(\tau_{i+1})}{d\tau} \approx \frac{\bar{x} - x_{i-1}}{0,5\Delta\tau}; \quad (10)$$

$$\frac{dx(\tau_{i+1})}{d\tau} \approx \frac{\bar{x} - x_{i-2}}{1,5\Delta\tau}. \quad (11)$$

Здесь $\Delta\tau$ – промежуток времени между моментами считывания сигналов $\Delta\tau = \tau_{i+1} - \tau_i, i = 0, 1, 2, \dots$

Понятно, что лучшей оценкой будет среднее арифметическое найденных величин, т. е.

$$\frac{dx(\tau_{i+1})}{d\tau} = \left[\frac{x_{i+1} - \bar{x}}{1,5\Delta\tau} + \frac{x_i - \bar{x}}{0,5\Delta\tau} + \frac{\bar{x} - x_{i-1}}{0,5\Delta\tau} + \frac{\bar{x} - x_{i-2}}{1,5\Delta\tau} \right] / 4 =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{\Delta\tau} \left[\frac{2}{3}(x_{i+1} - \bar{x}) + 2(x_i - \bar{x}) + 2(\bar{x} - x_{i-1}) + \frac{2}{3}(\bar{x} - x_{i-2}) \right] / 4 = \\
 &= \frac{1}{\Delta\tau} \left[\frac{1}{6}(x_{i+1} - \bar{x}) + \frac{1}{2}(x_i - \bar{x}) + \frac{1}{2}(\bar{x} - x_{i-1}) + \frac{1}{6}(\bar{x} - x_{i-2}) \right] = \\
 &= \frac{1}{6\Delta\tau} \left[(x_{i+1} - \bar{x}) + 3(x_i - \bar{x}) + 3(\bar{x} - x_{i-1}) + (\bar{x} - x_{i-2}) \right] = \\
 &= \frac{1}{6\Delta\tau} [x_{i+1} + 3x_i - 3x_{i-1} - x_{i-2}]. \quad (12)
 \end{aligned}$$

Данная формула для вычисления производных приводится в [3, с. 161]. Апробация алгоритма проводилась следующим образом.

Для конкретного здания с конкретной системой отопления отыскивалось решение дифференциального уравнения (1) для некоторой заданной функции $t_H(\tau)$. Далее на полученное решение накладывалась помеха, генерируемая с помощью датчика случайных чисел. Затем этот зашумленный сигнал $t_B(\tau)$ использовался для отработки приведенного адаптивного алгоритма идентификации параметров, при этом исходные численные значения идентифицируемых параметров задавались существенно отличными от тех их значений, которые содержались в решении дифференциального уравнения (1). Производные $\frac{dt_B(\tau_{i+1})}{d\tau}$,

$\frac{dt_H(\tau_{i+1})}{d\tau}$ вычислялись по формуле (12). Анализ

полученных результатов показал следующее. Алгоритм идентификации в виде соотношений (3)–(6) удовлетворительно отслеживает изменение численного значения параметра k_{Π} , численные значения постоянных времени T_B, T_H восстанавливаются значительно хуже. Вероятнее всего, причиной этого является то, что скорость восстановления различных параметров (величина коррекции параметров за один шаг), заложенная в соотношениях (3)–(6), совсем разная: для T_B, T_H

она прямо пропорциональна $2h \cdot [\cdot] \frac{dt_B(\tau_{i+1})}{d\tau}$ и $2h \cdot [\cdot] \frac{dt_H(\tau_{i+1})}{d\tau}$, а для k_{Π} – величине

$2h \cdot [\cdot] W_{CO}(\tau_{i+1})$. Очевидно, что $W_{CO} \gg \frac{dt_B}{d\tau}, \frac{dt_H}{d\tau}$.

Поэтому и имеет место данный факт. Вместе с тем необходимо иметь в виду, что для реализации концепции построения адаптивной системы необходимо оперативно отслеживать только численное значение параметра k_{Π} , что позволит корректировать величину удельной тепловой характеристики здания q_V . Для примера на рис. 2 приведены кривые, иллюстрирующие процедуру отслеживания параметра k_{Π} как при отсутствии, так и при наличии помех в исходных данных. При этом истинное значение коэффициента передачи k_{Π} , содержащееся

в неявно в решении дифференциального уравнения (1), составляло $3,103 \cdot 10^{-5}$ °C/Вт. Начальные значения параметра k_{Π} , как это видно из рис. 2, составляли $2 \cdot 10^{-5}$ и $4 \cdot 10^{-5}$ °C/Вт, причем начальное значение $k_{\Pi} = 2 \cdot 10^{-5}$ °C/Вт исправлялось как по данным без помех, так и по данным с помехами.

Как видно из рис. 2, коэффициент передачи k_{Π} исправляется с помощью адаптивного алгоритма в целом достаточно быстро, только при наличии помех в экспериментальных данных наблюдается некоторое колебание его текущего значения вблизи истинного значения $k_{\Pi} = 3,103 \cdot 10^{-5}$ °C/Вт.

Если считать допустимым отклонение температуры внутреннего воздуха от своего заданного значения в 0,5 °C, то погрешность определения параметра k_{Π} не должна превышать при мощности системы отопления $W_{CO} = 1,74 \cdot 10^6$ Вт значения $0,0287 \cdot 10^{-5}$ °C/Вт, если же допустимо отклонение в 1 °C, то погрешность оценки параметра k_{Π} может быть увеличена до $0,0574 \cdot 10^{-5}$ °C/Вт. Конечно, все это еще зависит и от уровня помех, действующих на объекте. Поэтому для большей точности оценки параметра k_{Π} в схему обработки экспериментальных данных помимо помехоустойчивого алгоритма дифференцирования (12) включили еще и предварительный алгоритм фильтрации сигнала о температуре внутреннего воздуха.

Задача фильтрации сводилась к следующей задаче оптимизации:

$$\Psi_1 (x_i - x_i^{\Phi})^2 + \Psi_2 (x_i^{\Phi} - x_{i-1}^{\Phi})^2 \rightarrow \min_{x_i^{\Phi}}, \quad (13)$$

где x_i – фактическое значение сигнала в i -й момент (отсчет); x_i^{Φ} – оценка полезного сигнала для i -го момента времени; Ψ_1 и Ψ_2 – весовые коэффициенты.

Решая данную задачу оптимизации, нашли, что оптимальная оценка полезного сигнала должна определяться по следующей формуле:

$$x_i^{\Phi} = \frac{\Psi_1 x_i + \Psi_2 x_{i-1}^{\Phi}}{\Psi_1 + \Psi_2}. \quad (14)$$

Удобно данное соотношение записать в следующем виде:

$$x_i^{\Phi} = x_{i-1}^{\Phi} + \frac{\Psi_1}{\Psi_1 + \Psi_2} (x_i - x_{i-1}^{\Phi}). \quad (15)$$

Данный алгоритм позволяет отслеживать изменение полезного сигнала во времени. Как видно из последнего уравнения, если сигнал не изменился за промежуток времени между $(i-1)$ -м и i -м моментами, то оценки x_i^{Φ} и x_{i-1}^{Φ} будут совпадать.

В условиях действия случайных помех, как известно [4], численные значения весовых коэффициентов Ψ_1 и Ψ_2 следует выбирать так, чтобы $\Psi_1 < \Psi_2$, так как при наличии помех невязка $x_i - x_i^{\Phi}$ обуславливается в основном помехами,

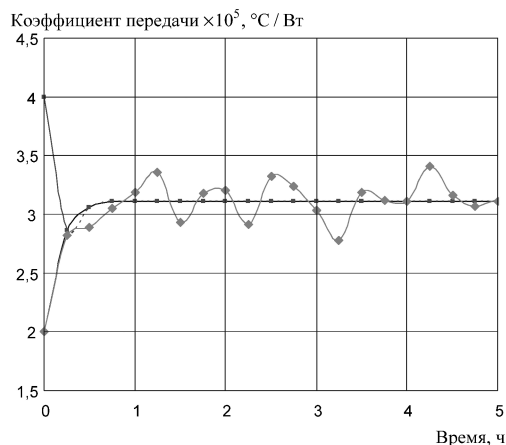


Рис. 2. Отслеживание численного значения параметра $k_{П}$

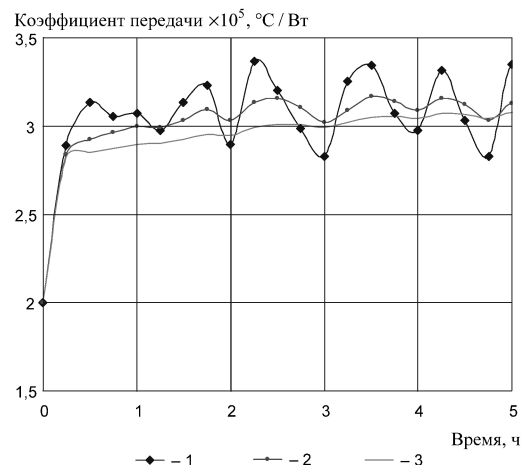


Рис. 3. Отслеживание численного значения параметра $k_{П}$ при использовании алгоритма фильтрации

накладывающимися на результаты измерения. Таким образом, нужно достаточно осторожно относиться к новой информации x_i , большее значение следует придавать прежней информации x_{i-1}^{Φ} , конкретные значения ψ_1 и ψ_2 , естественно, должны учитывать реальную статистическую ситуацию на объекте. Опыт применения данного алгоритма показал его пригодность для фильтрации сигналов. Для примера на рис. 3 приведены кривые, иллюстрирующие работу алгоритма: кривая 1 — это оценка параметра $k_{П}$ при отключенном алгоритме фильтрации (15), кривые 2 и 3 — оценки, найденные по формуле (5) с включенным алгоритмом фильтрации соответственно для $\psi_1 = 0,3$; $\psi_2 = 0,7$ и для $\psi_1 = 0,1$; $\psi_2 = 0,9$. Кривую 1 можно рассматривать как оценку, найденную для $\psi_2 = 0$.

Как видно из рис. 3, алгоритм (15) обладает заметными фильтрующими свойствами, по временному признаку его следует отнести к алгоритму запаздывающего оценивания [5], что вполне объяснимо, поскольку алгоритм по характеристикам близок к инерционному звену первого порядка (экспоненциальному сглаживанию первого порядка) [5, 6]. При этом, как и следовало ожидать, уменьшение ψ_1 и увеличение ψ_2 приводят к усилению как фильтрующих, так и запаздывающих свойств алгоритма. Отклонение получаемых оценок от истинного значения $k_{П}$ заметно уменьшается. В наших расчетах это отклонение всегда удавалось за счет настроек алгоритма фильтрации (за счет выбора ψ_1 и ψ_2) довести до допустимого значения. Таким образом, дополнительное использование алгоритма фильтрации позволяет получить вполне работоспособную процедуру оценивания коэффициента передачи, а равно и удельной тепловой характеристики зданий.

Выводы. Разработан адаптивный алгоритм параметрической идентификации математической модели теплового режима отапливаемых зданий. Настроенная на «реальный процесс» математиче-

ская модель может быть использована как для исследования особенностей теплового режима, так и для разработки высококачественных управляющих устройств, в частности, для настройки погодного регулятора в системах отопления [7]. Кроме того, найденное по экспериментальным данным значение удельной тепловой характеристики позволит оценить реальные теплозащитные свойства здания, что имеет весьма важное значение при оценке энергетической эффективности здания и разработке энергосберегающих мероприятий.

Литература

1. Панферов, В.И. Моделирование и управление тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: материалы междунар. науч.-практ. конф. — М.: МГСУ. — 2005. — С. 94–98.
2. Панферов, В.И. Идентификация и управление тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Вестник ГОУ ВПО УГТУ-УПИ «Строительство и образование». — 2005. — № 14 (66) — С. 351–353.
3. Медведев, Р.Б. АСУ ТП в металлургии / Р.Б. Медведев, Ю.Д. Бондарь, В.Д. Романенко. — М.: Металлургия, 1987. — 255 с.
4. Растринин, Л.А. Современные принципы управления сложными объектами / Л.А. Растринин. — М.: Сов. радио, 1980. — 232 с.
5. Авдеев, В.П. Фильтрация сигналов при наличии их частичных моделей / В.П. Авдеев, А.А. Ершов, Л.П. Мышляев // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1982. — № 4. — С. 121–126.
6. Теория автоматического управления. Ч. 1: Теория линейных систем автоматического управления / под ред. А.А. Воронова. — М.: Высш. шк., 1977. — 304 с.
7. Панферов, В.И. Адаптация погодного графика регулирования отопления / В.И. Панферов, С.В. Панферов // Вестник МГСУ. — М.: МГСУ. — 2011. — № 7. — С. 257–261.

Поступила в редакцию 11 января 2012 г.