

4. С и н е в, Н. М. Экономика атомной энергетики / Н. М. Синев, Б. Б. Батуров. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 341 с.
5. А т о м н а я энергетика в структуре мирового энергетического производства в XXI веке // Электроэнергетика. – 2006. – № 5. – С. 63–70.
6. С к а л к и н, Ф. В. Энергетика и окружающая среда / Ф. В. Скалкин, А. А. Канаев, И. З. Копп. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 280 с.
7. Э н е р г е т и ч е с к и й способ разработки месторождений бурых углей и утилизации отходов в Беларуси / В. С. Войтенко [и др.] // Горная механика. – 2006. – № 1. – С. 3–14.
8. Б а б а н и ч, И. В. Сокращение потребления природного газа и перспективы электро-энергетики: «атомный» и «парогазовый» сценарии / И. В. Бабанич, В. А. Чупров // Вести в электроэнергетике. – 2006. – № 5. – С. 28–31.
9. Л а в р е н т ь е в, Н. Как выйти из энергетического кризиса? / Н. Лаврентьев, Д. Жуков // Энергетика и ТЭК. – 2007. – № 3. – С. 8–9.
10. Я к о в л е в, Б. В. Эффективность современных энергоустановок ТЭС / Б. В. Яковлев, А. С. Гринчук // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 1. – С. 41–51.
11. Н а п р а в л е н и я повышения экономической эффективности АЭС с ВВЭР / Ю. К. Петряев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2007. – № 1. – С. 31–34.

Представлена кафедрой экономики
и организации энергетики

Поступила 5.05.2007

УДК 621.311.22:658.012.011.56:681.32

УТОЧНЕНИЕ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРАВНЕНИЙ СВЯЗИ

Канд. техн. наук ЯНИЦКИЙ В. А.

РУП «БелТЭИ»

Обязательным условием длительной надежной эксплуатации автоматизированных систем управления технологическими процессами является наличие эффективного контроля достоверности поступающих на обработку исходных данных. Применение отдельных известных способов контроля исходной информации, как правило, позволяет решать ограниченные задачи. Однако при совместном использовании нескольких способов можно обеспечить эффективное выявление как грубых ошибок измерений, связанных с отказом датчиков информации, так и сравнительно небольших погрешностей измерений.

Одним из эффективных способов контроля достоверности и уточнения исходной информации является использование дополнительной информации, содержащейся в уравнениях связи между поступившими на контроль величинами. В качестве уравнений связи могут применяться уравнения материального или энергетического баланса, включающие поступившие на контроль величины. Задача контроля достоверности и уточнения исходной

информации с использованием уравнений связи ставится следующим образом [1, 2].

Имеется совокупность поступивших на контроль величин $x_1, \dots, x_n$, между которыми должны выполняться соотношения:

$$\Psi_1(x_1, \dots, x_k) = 0; \dots; \Psi_m(x_1, \dots, x_c) = 0,$$

где $m < n$.

Для определения уточненных величин $x_1^*, \dots, x_n^*$ воспользуемся функцией Лагранжа

$$L(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\sigma_i^2} (x_i^* - x_i)^2 + \sum_{j=1}^{j=m} \lambda_j \Psi_j(x_1, \dots, x_n), \quad (1)$$

где σ_i – весовой коэффициент, равный среднеквадратичной погрешности измерения x_i ; λ_j – неопределенный множитель Лагранжа.

Скорректированные значения $x_1^*, \dots, x_n^*$ определяются из условия

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m)}{\partial x_1} &= \dots = \frac{\partial L(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m)}{\partial x_n} = \\ &= \frac{\partial L(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m)}{\partial \lambda_1} = \dots = \frac{\partial L(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m)}{\partial \lambda_m} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Практическое применение этот способ корректировки исходных данных получил при использовании в качестве уравнений связи линейных алгебраических уравнений. Для этого случая академиком Ю. В. Линником [1] получены выражения, позволяющие определить поправки к поступившим на контроль величинам и на их основе перейти к получению статистических характеристик скорректированных величин.

При использовании в качестве уравнений связи только линейных алгебраических выражений область применения описанного способа уточнения информации ограничивается в основном случаями, когда для уточнения могут использоваться уравнения материального баланса.

Однако когда требуется уточнение информации, поступающей от энергетического оборудования, область применения метода может быть существенно расширена, если в качестве уравнений связи использовать уравнения энергетического баланса. В этих случаях в качестве уравнений связи необходимо использовать нелинейные алгебраические уравнения. Кроме того, в данных уравнениях содержатся величины, имеющие различный физический смысл, и следовательно, представленные в разных несоизмеримых единицах измерения.

Если использовать для уточнения информации уравнения (2) без учета указанных особенностей уравнений энергетического баланса, то полученное решение не будет соответствовать условию минимального среднеквадратичного отклонения скорректированных величин от исходных, и следо-

вательно, не будут обеспечены условия для получения оптимального решения.

В [3] предложено нелинейные ограничения заменить линейными с помощью разложения их в ряд Тейлора в окрестности точки $x_1, \dots, x_n$. Использование этого приема приводит к отклонению полученного решения от оптимального по нескольким причинам. Во-первых, замена криволинейных поверхностей, соответствующих нелинейным уравнениям, на плоскости, соответствующие линейным уравнениям, в результате уточнения приводит к смещению решения вдоль полученных плоскостей и, следовательно, к отклонению от исходных уравнений. Во-вторых, разложение в ряд Тейлора в окрестности точки $x_1, \dots, x_n$ может привести к ошибкам вследствие того, что исходные величины определены со значительными погрешностями.

Поэтому, чтобы исключить при уточнении информации отклонение от исходных уравнений связи, автором предложено использовать итерационную процедуру. Для упрощения выражений итерационную процедуру представим в матрично-векторной форме. После $(p - 1)$ -й итерации уточнения исходной информации линеаризованные уравнения связи корректируются с помощью выражения

$$\Psi_{\text{л}} X^{p-1} + \Psi'_{\text{л}} X^{p-1} X^p - X^{p-1} = 0, \quad (3)$$

где

$$\Psi_{\text{л}} X^{p-1} = \begin{vmatrix} \psi_{1\text{л}} X^{p-1} \\ \vdots \\ \psi_{m\text{л}} X^{p-1} \end{vmatrix};$$

$$X^p - X^{p-1} = \begin{vmatrix} x_1^p - x_1^{p-1} \\ \vdots \\ x_n^p - x_n^{p-1} \end{vmatrix};$$

$$\Psi'_{\text{л}} X^{p-1} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \psi_{1\text{л}}}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial \psi_{1\text{л}}}{\partial x_n} \\ \vdots \\ \frac{\partial \psi_{m\text{л}}}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial \psi_{m\text{л}}}{\partial x_n} \end{vmatrix}.$$

Уточненные с помощью (3) уравнения связи подставляются в (1) и с использованием (2) определяются исходные величины X^{p+1} .

Итерационный процесс уточнения продолжается до тех пор, пока невязки линеаризованных уравнений связи $\Psi_{\text{л}} X^q$ не окажутся меньше принятой величины.

При использовании в качестве уравнений связи уравнений энергетического баланса возникает возможность уточнения с помощью (1) величин, имеющих различный физический смысл (давления, температуры, массы и др.). В этом случае для минимизации среднеквадратичного отклонения

В этом случае функция Лагранжа (1) принимает следующий вид:

где

$$p_i = \frac{\partial \psi}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_g).$$

При поиске оптимального решения целесообразно также использовать описанную выше процедуру итерационного уточнения линеаризованного уравнения связи.

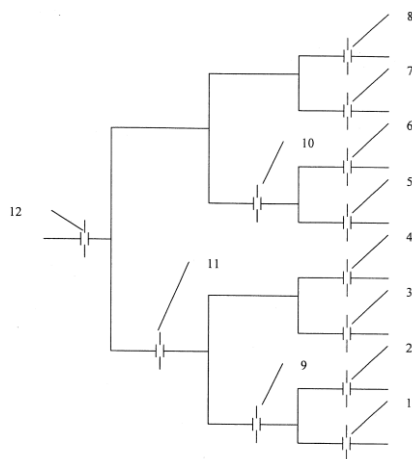


Рис. 1. Схема расположения точек измерения расходов топлива, подаваемого в котлы

Для оценки эффективности рассмотренного метода уточнения исходной информации произведен расчетный эксперимент. Расчетные оценки выполнены для схемы измерений расходов мазута, подаваемого к котлам ТЭС. Обычно измеряются общий расход мазута ТЭС и расходы мазута к каждому котлу. Для исследования влияния на результат количества уравнений, в которых присутствует уточняемая величина, в обычную схему контроля расходов мазута включены несколько дополнительных точек контроля. Схема измерений расходов мазута показана на рис. 1.

Составим уравнения баланса:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^8 D_i - D_{12} &= 0; \\ \sum_{i=1}^4 D_i - D_{11} &= 0; \\ \sum_{i=1}^2 D_i - D_9 &= 0; \\ \sum_{i=5}^6 D_i - D_{10} &= 0.\end{aligned}\tag{4}$$

В уравнениях индексы соответствуют номерам датчиков на схеме.
Функция Лагранжа в матричной форме представляется как

$$L(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = P(X^* - X)(X^* - X)^T + \lambda^T A X, \quad (5)$$

где

$$P = \begin{pmatrix} p_1, 0, \dots, 0 \\ 0, p_2, \dots, 0 \\ \dots \\ 0, 0, \dots, p_n \end{pmatrix};$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1, 0, \dots, 0 \\ 0, \lambda_2, \dots, 0 \\ \dots \\ 0, 0, \dots, \lambda_m \end{pmatrix},$$

где $p_1, p_2, \dots, p_n$ – весовые коэффициенты; A – матрица коэффициентов в системе уравнений (4).

В данном случае

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Решение, соответствующее стационарной точке функции Лагранжа, определяется по выражению

$$X^* = [I - PA^T(APA^T)^{-1}A]X,$$

где I – единичная матрица.

Примем, что исходные величины X распределены нормально $N(M, K)$, где M – вектор математических ожиданий; K – ковариационная матрица. В большинстве практических случаев это допущение подтверждается.

Согласно теореме о линейной комбинации нормально распределенных величин [4] вектор, полученный в результате умножения вектора X на матрицу C , также подчиняется нормальному закону распределения с параметрами $N(CM, C K C^T)$. В данном случае вектор получается в результате умножения вектора X на матрицу

$$C = I - PA^T(APA^T)^{-1}A.$$

Следовательно, параметры полученного нормального распределения:

$$M^* = CM = [I - PA^T(APA^T)^{-1}A]M;$$

$$K^* = C K C^T = [I - PA^T(APA^T)^{-1}A]K[I - PA^T(APA^T)^{-1}A]^T.$$

Если регулярно выполняется поверка датчиков информации, то корреляция между измерениями практически отсутствует. В этом случае все недиагональные элементы матрицы **К** равны нулю, а по диагонали расположены дисперсии измерений.

Результаты расчетов дисперсий для точек, указанных на рис. 1, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Дисперсии измерений расходов мазута, %

	Номер датчика на схеме											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
До корректировки	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
После корректировки	1,55	1,55	1,75	1,75	1,57	1,57	1,9	1,9	1,32	1,39	1,48	1,9

Из таблицы видно, что использование корректировки исходных величин рассмотренным методом позволяет уменьшить дисперсии на 22–46 %.

Меньшее снижение относится к измерениям, участвующим в наименьшем количестве уравнений связи (точки 7, 8, 12), и наибольшее снижение дисперсий приходится на точки, связанные с максимальным количеством уравнений связи (точки 9, 10).

ВЫВОДЫ

1. Использование описанного способа уточнения исходной информации позволяет при недостаточной точности датчиков информации получить необходимую точность измерений.

2. Для исключения влияния грубых ошибок измерений уточняемой информации на полученные результаты целесообразно использовать рассмотренный способ контроля и уточнения информации в сочетании с другими способами контроля достоверности, позволяющими не допускать поступление величин с грубыми ошибками измерений на последующую обработку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л и н н и к, Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. – С. 340.
2. Г о л о в а н о в, О. В. Применение математической модели для определения погрешностей при измерении технологических параметров / О. В. Голованов, В. Г. Свиридов // Приборы и системы управления. – 1968. – № 8.
3. Т е р н о в ы х, Ю. П. Информационная избыточность и контроль достоверности информации в системах управления / Ю. П. Терновых, Ю. И. Жамков // Приборы и системы управления. – 1976. – № 6.
4. А н д е р с о н, Т. Введение в многомерный статистический анализ / Т. Андерсон. – М.: Физматгиз, 1963. – 500 с.

Поступила 19.09.2007