УДК 614.8:69: 681.3

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В МОДЕЛЯХ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРИ БЕЗОПАСНОМ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ

© 2016 С. А. Сазонова, К. А. Трофимов, С. С. Халяпина

Воронежский государственный технический университет

Рассматриваются оценки параметров режима функционирующих систем теплоснабжения, необходимые при реализации математических моделей потокораспределения и статического оценивания. Практическое применение задач возможно при технической диагностике систем для оперативного принятия решения в случае возникновения аварий и для обеспечения безопасности при функционировании.

Ключевые слова: система теплоснабжения, потокораспределение, статическое оценивание, математическое моделирование, техническая диагностика, безопасность.

Рассмотрим матрицу ковариаций оценок, характеризующую изменчивость оценок параметров состояния систем теплоснабжения (СТС) в зависимости от случайных колебаний исходных данных. Ковариационную матрицу можно представить как

$$P = \mathrm{cov}\left(\widehat{G} - G\right) = M\left[\left(\widehat{G} - G\right)\left(\widehat{G} - G\right)^t\right]. \quad (1)$$

Ошибки оценок вектора состояния, которые будем обозначать e_G, получаются из соотношения:

$$e_G = \widehat{G} - G = G_0 - G + \widehat{G} - G_0 =$$
$$= G_0 - G + K[H^э - H^в(G_0)] =$$
$$= G_0 - G + \widehat{G} + K[H^э - H^в(G) -$$
$$-(\partial H^в/\partial G)(G_0 - G)]; \quad (2)$$

где индексом "0" помечен вектор начального приближения для системы нормальных уравнений. Входящие в состав (2) матрицы определяются как

$$K = D^{-1}(\partial H^в/\partial G)^t R_H^{-1};$$
$$D = \{\left(\frac{\partial H^в}{\partial G}\right)^t R_H^{-1}(\partial H^в/\partial G) -$$
$$-(\partial^2 H^в/\partial G^2)R_H^{-1}[H^э - H^в(G)]\}.$$

Здесь R_H – диагональная ковариационная матрица, элементы которой представляют собой дисперсии данных от телеизмерений, участвующих в обработке. Если точность i-го измерения зависит от точности j-го измерения эта матрица уже не будет диагональной и ее члены отличные от нуля показывают взаимное влияние между отдельными измерениями.

Можно считать, что

$$D^{-1}\left(\frac{\partial H^в}{\partial G}\right)^t R_H^{-1}\left(\frac{\partial H^в}{\partial G}\right) \approx I; \quad (3)$$

где I – единичная матрица. Тогда для вектора ошибок можно получить соотношения

$$e_G = G_0 - G + D^{-1}\left(\frac{\partial H^в}{\partial G}\right)^t R_H^{-1}\xi_H -$$
$$-D^{-1}(\partial H^в/\partial G)^t R_H^{-1}(\partial H^в/\partial G)(G_0 - G) =$$
$$= G_0 - G + D^{-1}\left(\frac{\partial H^в}{\partial G}\right)^t R_H^{-1}\xi_H -$$
$$-(G_0 - G) = D^{-1}(\partial H^в/\partial G)^t R_H^{-1}\xi_H. \quad (4)$$

Из (1) ковариационнная матрица определяется с учетом (4) как

$$P = M(e_G e_G^t) =$$
$$= D^{-1}\left(\frac{\partial H^в}{\partial G}\right)^t R_H^{-1}\cdot$$
$$\cdot M(\xi_H \xi_H^t) R_H^{-1}(\partial H^в/\partial G)D^{-1} =$$
$$= D^{-1}\left(\frac{\partial H^в}{\partial G}\right)^t R_H^{-1} R_H R_H^{-1}\cdot$$
$$\cdot(\partial H^в/\partial G)D^{-1} - D^{-1} =$$
$$= \left(\frac{\partial H^в}{\partial G}\right)^t R_H^{-1}\cdot$$
$$\cdot\left(\frac{\partial H^в}{\partial G}\right) - \left[(\partial^2 H^в/\partial G^2)R_H^{-1}\Delta H\right]^{-1}. \quad (5)$$

Можно воспользоваться приближенным выражением

$$P \approx [(\partial H^в/\partial G)^t R_H^{-1}(\partial H^в/\partial G)]^{-1}. \quad (6)$$

Общее выражение для поправок получаемой оценки параметров решения примет вид

$$\Delta G = \left(\frac{\partial H^в}{\partial G}\right)^t R_H^{-1}[H^э - H^в(G_{k-1})] =$$
$$= -P_k \Gamma_k^t. \quad (7)$$

Оценки $\widehat{G}$ и их ошибки являются случайными величинами, взаимосвязанные через математическое ожидание произведения компонент этих векторов, то есть

$$M[e_G\widehat{G}^t] = M\{(K\xi_H)\cdot$$
$$\cdot[G_0 + K(H^э - H^в(G_0))]^t\} =$$

Сазонова Светлана Анатольевна – ВГТУ, доцент кафедры пожарной и промышленной безопасности, к. т. н., доцент, e-mail: Sazonovappb@vgasu.vrn.ru.
Трофимов Константин Александрович – ВГТУ студент.
Халяпина Светлана Сергеевна – ВГТУ, студентка.

$$= M[K\xi_H G_0^t] + \{K\xi_H [H^э - H^в(G_0)]^t K^t\} =$$
$$= KM(\xi_H) G_0^t + KM[\xi_H (H^э)^t] K^t -$$
$$-KM(\xi_H)(H^в)^t (G_0) K^t = 0. \qquad (8)$$

Поскольку $M(\xi_H)=0$ то,

$$M(e_G) = M(K\xi_H) = KM(\xi_H) = 0. \qquad (9)$$

Доверительный интервал оценки $\hat{g}_j \in \vec{G}$ определяется как

$$g_{j*} = g_j \pm \gamma \sqrt{P_{jj}(f(\hat{G})/(m-n))}\,; \qquad (10)$$

где g_{j*} – границы, в которых с заданной вероятностью лежит истинное значение параметра g_j; p_{ii} – j-ый элемент диагональной матрицы P ковариаций ошибок оценок; $f(\hat{G})$ – значение минимизируемой функции при $g = \hat{g}$; m и n – размерность векторов H и G соответственно; γ – определяется по таблицам в виде функции от числа степеней свободы (m – n) и заданной вероятности P покрытия доверительным интервалом истинного значения.

Математическое ожидание в силу диагональности матрицы R_H равно

$$M[F(G)] = M\{[H^э - H^в(G)]^t R_H^{-1} [H^э - H^в(G)]\} =$$
$$= M\,Tr\{R_H^{-1}[H^э - H^в(G)][H^э - H^в(G)]^t\}; \qquad (11)$$

где символ "Tr" обозначает след матрицы, то есть сумму ее диагональных элементов. Учитывая возможность перестановок операций M и Tr, получим

$$M[F(G)] =$$
$$Tr\,M\{R_H^{-1}[H^э - H^в(G)][H^э - H^в(G)]^t\} =$$
$$= Tr\ R_H^{-1} M\{[H^э - H^в(G)][H^э - H^в(G)]^t\} =$$
$$= Tr\ [R_H^{-1} R_H] = Tr\ I = m; \qquad (12)$$

где m – порядок единичной матрицы I, равный числу замеров.

Для апостериорной оценки ковариационной матрицы измеряемых параметров запишем выражение:

$$f(\hat{G}) = [H^э - H^в(G)]^t R_H^{-1} [H^э - H^в(\hat{G})] =$$
$$= \hat{r}^t R_H^{-1} \hat{r}. \qquad (13)$$

Вектор $\hat{r}$ принято называть вектором остатков

$$r = H^э - H^в(\hat{G}) =$$
$$= H^э - H^в(G) - H^в(\hat{G}) + H^в(G) =$$
$$= \xi + r_H. \qquad (14)$$

Величину r можно представить как

$$\hat{r} = (I_m - S\,P\,S^t R_H^{-1})\xi = (I_m - P_H R_H^{-1})\xi =$$
$$= W\xi; \qquad (15)$$

где $S = R_V^{-1/2}(\partial H^в / \partial G)|_{G=G_k}$ – матрица, фор-мирующая систему линеаризованных уравнений на k-той итерации в методе Ньютона.

Ковариационная матрица остатков определяется как

$$M[\hat{r}\hat{r}^t] = R_H - S\,P\,S^t = WR_H = W^* \quad (16)$$

и является смещенной ковариационной матрицей ошибок измерений.

Диагональные элементы W^*являются оценкой того, насколько верно задана матрица R_H. Подставляя выражение (15) в (13) и учитывая, что $W^t R_H^{-1} W = R_H^{-1} W$, получим

$$f(\hat{G}) = \xi_H^t W^t R_H^{-1} W = R_H^{-1} W \xi_H =$$
$$= \xi_H^t R_H^{-1} \xi_H. \qquad (17)$$

Если распределение ξ является нормальным, то функция $f(\hat{G})$ будет иметь распределение χ^2 с ν=m-n степенями свободы (m – число измерений, а n – число параметров состояния) с математическим ожиданием и дисперсией

$$M[f(\hat{G})] = \nu, \quad var[f(\hat{G})] = 2\nu. \qquad (18)$$

Если число степеней свободы больше тридцати, то $f(\hat{G})$ стремится к нормальному распределению. Нормализованное значение функции $f(\hat{G})$ равно

$$\tau_1 - f(\hat{G}) - \nu/\sqrt{2\nu}; \qquad (19)$$

где τ_1 имеет нормальное распределение.

По виду функции f(G) и нормализованной форме τ_1 имеется возможность судить о наличии плохих данных. Если вектор телеизмерений $H^э$ содержит единичное плохое данное, то вектор шумов измерений в этом случае может быть записан как

$$\xi_{H^в} = \xi_{H^э} + e_i\,\alpha; \qquad (20)$$

где ξ_H – вектор малых случайных ошибок, имеющий нормальное распределение; вектор e_i содержит только i - ю отличную от нуля компоненту; α - характеристика плохого телеизмерения. Подставляя (20) в (17) будем иметь

$$f(\hat{G}) = \xi_{H^э}^t R_H^{-1} W \xi_{H^э} + 2\alpha e_i^t R^{-1} W \xi_{H^э} +$$
$$+ \alpha^2 e_i^t R^{-1} W e_i. \qquad (21)$$

При числе степеней свободы более чем 30, функция (21) имеет нормальное распределение с математическим ожиданием и дисперсией

$$\mu_f = \nu + \left(\frac{\alpha}{\sigma_i}\right)^2 W_{ii}, \quad \sigma_f^2 =$$
$$= 2\nu + 4(\alpha/\sigma_i)^2 W_{ii}, \qquad (22)$$

где σ_i – стандартное отклонение для i-го измерения.

Нормализованное значение $f(\hat{G})$ в этом случае можно представить как

$$\tau_1 = [f(\hat{G}) - \mu_f]/\sigma_f. \qquad (23)$$

Значение статистических характеристик оценок позволяет более эффективно использовать байесов подход, например, реализовать его в виде метода сканирования.

Реализация поставленной задачи требует решения ряда дополнительных задач, обеспечивающих надежность функционирования и безопасность ГС, основанных на математических моделях потокораспределения [1, 2, 3, 4]. В свою очередь с помощью использования моделей потокораспределения можно решать задачи проектирования [5] и эксплуатации [6, 7] таких систем, в том числе и задачи технической диагностики [8, 9, 10]. Модели потокораспределения необходимы при реализации задач диагностики утечек [11, 12], резервирования [13, 14] и надежности [15, 16] при управлении функционированием [17, 18] с целью обеспечения безопасности функционирования ГС [19, 20] и своевременного предотвращения аварийных ситуаций [21]. Оперативное предотвращение аварий на объектах защиты возможно в случае применения современных информационных технологий [22] при дистанционном мониторинге технического состояния ГС. В этом случае в качестве вспомогательной задачи следует рассмотреть проблему информационной безопасности [23, 24]. В случае возникновения аварийных ситуаций потребуется так же решить ряд экологических [25, 26] и экономических задач [27].

ЛИТЕРАТУРА

1. Сазонова С. А. Моделирование неустановившегося и установившегося потокораспределения систем теплоснабжения / С. А. Сазонова // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2013. – № 1 (10). – С. 55-60.

2. Сазонова С. А. Итоги разработок математических моделей анализа потокораспределения для систем теплоснабжения / С. А. Сазонова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Том 7. – № 5. – 2011. – С. 68-71.

3. Сазонова С. А. Обеспечение безопасности функционирования трубопроводных систем при реализации математических моделей на основе функционального эквивалентирования / С. А. Сазонова, В. Я. Манохин, М. В. Манохин // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2015. – № 2 (15). – С. 32-36.

4. Сазонова С. А. Особенности формирования структурных графов для систем теплоснабжения при анализе потокораспределения в задачах обеспечения безопасности/ С. А. Сазонова // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2016. – № 1 (22). – С. 106-112.

5. Сазонова С. А. Комплекс прикладных задач в области проектирования, обеспечивающих безопасность функционирования гидравлических систем / С. А. Сазонова // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2015. – № 3 (16). – С. 30-35.

6. Сазонова, С.А. Математическое моделирование гидравлических систем в области управления функционированием и развитием / С. А. Сазонова, А. Б. Мезенцев // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 60-63.

7. Сазонова С. А. Обеспечение безопасности функционирования систем газоснабжения при реализации алгоритма диагностики утечек без учета помех от стохастичности потребления / С. А. Сазонова // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2015. – № 14. – С. 60-64.

8. Сазонова С. А. Информационная система проверки двухальтернативной гипотезы при диагностике утечек и обеспечении безопасности систем газоснабжения / С. А. Сазонова // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2015. – № 14. – С. 56-59.

9. Сазонова С. А. Решение задач обнаружения утечек систем газоснабжения и обеспечение их безопасности на основе методов математической статистики / С. А. Сазонова // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2015. – № 14. – С. 51-55.

10. Сазонова С. А. Численная апробация математических моделей мониторинга безопасного функционирования систем газоснабжения / С. А. Сазонова, С. Д. Николенко, В. Я. Манохин, М. В. Манохин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 1 (35). – С. 255-264.

11. Николенко С. Д. Дистанционное обнаружение утечек в гидравлических системах с целью обеспечения безопасности функционирования при своевременном предупреждении аварий / С. Д. Николенко, С. А. Сазонова // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – Воронеж: ВГАСУ, 2016. – № 1. – С. 151-153.

12. Сазонова С. А. Решение вспомогательных задач диагностики утечек для обеспечения безопасности функционирующих трубопроводных систем / С. А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 57-59.

13. Сазонова С. А. Методы обоснования резервов при проектировании гидравлических систем / С. А. Сазонова, А. Б. Мезенцев // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8. – № 2. – С. 37-40.

14. Сазонова С. А. Методы обоснования резервов проектируемых гидравлических систем при подключении устройств пожаротушения / С. А. Сазонова // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2015. – № 4 (17). – С.22-26.

15. Мезенцев А. Б. Результаты расширенного вычислительного эксперимента по оценке надежности и резервированию распределительных гидравлических систем / А. Б. Мезенцев, С. А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8. – № 2. – С. 26-29.

16. Мезенцев А. Б. Результаты расширенного вычислительного эксперимента по оценке надежности и резервированию распределительных гидравлических систем / А. Б. Мезенцев, С. А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8. – № 2. – С. 26-29.

17. Сазонова С. А. Решение прикладных задач управления функционированием системами теплоснабжения / С. А. Сазонова // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2013. – № 2 (11). – С. 59-63.

18. Сазонова С.А. Комплекс прикладных задач оперативного управления, обеспечивающих безопасность функционирования гидравлических систем / С. А. Сазонова // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2015. – № 2 (15). – С. 37-41.

19. Сазонова С. А. Обеспечение безопасности гидравлических систем при реализации задач управления функционированием и развитием / С. А. Сазонова // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2016. – № 1 (18). – С. 22-26.

20. Сазонова С. А. Обобщенная модель для обеспечения безопасности при управлении системами теплоснабжения / С. А. Сазонова // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2016. – № 3 (20). – С. 51-56.

21. Мезенцев А. Б. Имитационное моделирование аварийных ситуаций в гидравлических системах / А. Б. Мезенцев, С. А. Сазонова // Моделирование систем и процессов. – 2015. – Т. 8. – № 2. – С. 23-25.

22. Жидко Е. А. Высокие интеллектуальные и информационные технологии интегрированного менеджмента XXI века: монография / Е. А. Жидко. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж), 2014. – 110 с.

23. Глотова Т. В.Особенности информационной безопасности распределенных систем / Т. В. Глотова, Х. И. Бешер // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2016. – № 3 (14). – С. 19.

24. Жидко Е.А. Методология формирования системы измерительных шкал и норм информационной безопасности объекта защиты /Е.А. Жидко // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2015. - № 2 (97). – С. 17-22.

25. Жидко Е. А. Анализ состояния атмосферы в регионе и социально-экономические последствия загрязнения окружающей среды / Е. А. Жидко, В. С. Муштенко // Высокие технологии в экологии. Воронеж, 2008. – С. 69-74.

26. Жидко Е. А. Методология исследований информационной безопасности экологически опасных и экономически важных объектов: монография / Е. А. Жидко. – Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2015. - 183 с.

27. Жидко Е. А. Методический подход к идентификации экологического риска, учитываемого в деятельности предприятия / Е. А. Жидко, В. С. Муштенко // Высокие технологии. Экология. – 2011. – № 1. – С. 11-14.

QUANTITATIVE CHARACTERISTICS IN MODELS OF FLOW HEATING SYSTEMS WITH SAFE FUNCTIONING

© 2016 S. A. Sazonova, K. A. Trofimov, S. S. Haljapina

Voronezh State Technical University

Discusses the evaluation parameters of the mode of functioning of systems of a heat supply, required for implementation of mathematical models of flow and static evaluation. Practical application of tasks possible for technical diagnostic systems for operational decision-making in case of emergencies and to ensure safety during the operation.

Keywords: heating system, flow distribution, static estimation, mathematical modeling, technical diagnostics, safety.