

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ УТЕЧЕК В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Сазонова С.А., Кораблин С.Н., Мозговой Н.В.

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Аннотация

Рассматриваются особенности разработки методов технической диагностики для дистанционного контроля параметров работы теплоэнергетических трубопроводных систем, с основным акцентом на системах теплоснабжения, включая обнаружение утечек, а также в создании программного обеспечения для автоматизированных систем управления. Предложены математические модели для дистанционного обнаружения утечек, реализуемые с помощью программного обеспечения для осуществления регулярного мониторинга и обслуживания, чтобы обеспечить надежную работу рассматриваемых систем. Показано, что создание алгоритмов и системы требуется для обнаружения утечек, включая определение их местоположение и масштаб. Созданное программное обеспечение можно использовать для автоматизированного управления и мониторинга теплоэнергетической системы на основе результатов исследования. На основе собранных данных, связанных с параметрами системы теплоснабжения, таких как давление, расход газа и других, можно построить статистическую модель, которая может включать в себя распределение вероятности, ожидаемые значения и дисперсии параметров. Решение задачи конкретного обнаружения утечек может различаться в зависимости от типа теплоснабжения и используемых технологий. Показано, что исследование будет способствовать повышению надежности и безопасности систем теплоснабжения путем обеспечения более эффективного обнаружения и контроля утечек и других аномалий в работе трубопроводных систем.

Ключевые слова: теплоэнергетические гидравлические системы, системы теплоснабжения, утечки, математическая модель, мониторинг технического состояния системы, программная обработка информации.

REMOTE LEAK DETECTION IN THERMAL POWER PIPELINE SYSTEMS

Svetlana Sazonova, Sergey Korablin, Nikolai Mozgovoy

Voronezh State Technical University, Voronezh

Abstract

The features of the development of technical diagnostic methods for remote control of the parameters of the operation of thermal power pipeline systems are considered, with a main focus on heat supply systems, including leak detection, as well as in the creation of software for automated control systems. Mathematical models for remote leak detection are proposed, implemented using software for regular monitoring and maintenance to ensure reliable operation of the systems under consideration. It is shown that the creation of algorithms and a system is required to detect leaks, including determining their location and scale. The created software can be used for automated control and monitoring of a thermal power system based on the results of the study. Based on the collected data related to the parameters of the heat supply system, such as pressure, gas flow and others, it is possible to build a statistical model that may include the probability distribution, expected values and variances of the parameters. The solution to the problem of specific leak detection may vary depending on the type of heat supply and the technologies used. It is shown that the study will contribute to improving the reliability and safety of heat supply systems by providing



more effective detection and control of leaks and other anomalies in the operation of pipeline systems.

Keywords: thermal power hydraulic systems, heat supply systems, leaks, mathematical model, monitoring of the technical condition of the system, program information processing.

Введение

Основная цель исследований заключается в разработке методов технической диагностики теплоэнергетических трубопроводных гидравлических систем, обеспечивающих дистанционный контроль параметров режима работы таких систем, в первую очередь систем теплоснабжения, с учетом утечек и их реализации в виде программного обеспечения для автоматизированных систем управления [1].

Применительно к гидравлическим системам предлагается использовать математический приемник информации, реализующий метод диагностики утечек на основе манометрической съемки.

Материалы и методы

Заключение о наличии утечки принимается не по одному значению x_n , а по выборке X_n , которую формально можно представить как

$$X_n = \lambda \alpha S_n + \Xi_n \quad (1)$$

где n – длина выборки; λ – параметр, описывающий неопределенность; α – амплитуда утечки; S_n – множество возможных значений утечки с элементами S_i ; Ξ_n – значения с элементами ξ_i некоррелированных помех.

Процедура проверки гипотезы в рамках метода максимального правдоподобия заключается в определении отношения правдоподобия в виде

$$L(X_n | \alpha^*, \sigma_1^{2*}, \sigma_2^{2*}) = \left[\frac{\sigma_2^{2*}}{\sigma_1^{2*}(\alpha^*)} \right]^{n/2} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{E} \left(\sum_{i=1}^n x_i S_i \right)^2} \right\}^{n/2}. \quad (2)$$

где символом "*" помечены оцениваемые параметры окружения; $E = \sum_{i=1}^n s_i^2$.

Отношение $\sigma_2^{2*} / \sigma_1^{2*}(\alpha^*)$ должно сравниваться с порогом $C(X_n)$, при условии $\sigma_2^{2*} / \sigma_1^{2*}(\alpha^*) \geq C(X_n)$ принимается решение о наличии утечки. Обратное соотношение свидетельствует о ее отсутствии.

Порог $C(X_n)$ определяется как

$$C(X_n) = \left(\frac{g_{21} - g_{22}}{g_{12} - g_{11}} \frac{p_2}{p_1} \frac{\Delta \alpha}{\sqrt{\pi}} \sqrt{h_0^*} \right)^{\frac{2}{n-2}}, \quad (3)$$

где: $h_0^* = E / 2\sigma_1^{2*}(\alpha^*)$ – оценочное значение отношения сигнал / шум.

Величину функции потерь g_{ij} в (3) можно считать независимой от значения сигнала. Вероятности ситуаций p_1 , p_2 в (3) определяются:



$$p(h^* | 0) = \begin{cases} 0 & \text{при } h^* < 0, \\ \frac{1}{\sqrt{\pi h^*}} \exp(-h^*) & \text{при } h^* \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

и при $\lambda=1$

$$p(h^* | 1) = \begin{cases} 0 & \text{при } h^* < 0, \\ \frac{1}{2\sqrt{\pi h^*}} \left\{ \exp \left[-\left(\sqrt{h^*} - \sqrt{h} \right)^2 \right] + \exp \left[-\left(\sqrt{h^*} + \sqrt{h} \right)^2 \right] \right\} & \text{при } h^* \geq 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $h = \alpha^2 E / 2\sigma^2$ - истинное отношение сигнал / шум.

Создание алгоритмов и системы требуется для обнаружения утечек, включая определение их местоположение и масштаб. Создание программного обеспечения используется для автоматизированного управления и мониторинга теплоэнергетической системы на основе результатов исследования. Далее необходимы проведение тестов и внедрение разработанных методов и программного обеспечения в реальные системы теплоснабжения. Проводят обучение персонала и обеспечение регулярного обслуживания системы дистанционного контроля и управления [2-4].

Изложим алгоритм для разработки метода дистанционного обнаружения утечек в системах теплоснабжения, для реализации которого необходимо выполнить следующие действия:

- формулировка математической модели для контроля параметров состояния системы теплоснабжения на основе сведений о манометрической съемке. Учитывают в этой модели факторы, которые могут влиять на параметры системы и могут быть связаны с утечками;

- разработка метода, который позволяет компенсировать отсутствие экспериментальных данных [5, 6, 7] с помощью генерации псевдоизмерений на основе имеющихся данных. Эти псевдоизмерения должны быть достаточно точными и надежными для использования в диагностических задачах;

- создание метода, который будет выполнять комплексную диагностику системы теплоснабжения. Этот метод должен включать в себя: установление факта утечки; определение местоположения утечки в системе теплоснабжения; расчет величины утечки;

- написание программного обеспечения, реализующего все описанные методы и модели. Обеспечение интерфейса для ввода и вывода данных, а также визуализации результатов. Тестирование и отладка программного комплекса;

- проведение тестовых испытаний на реальных системах теплоснабжения для проверки эффективности и точности разработанных методов и программ. Внедрение разработанных решений на практике и обучение персонала;

- после внедрения системы следует организовать мониторинг ее работы и регулярное обновление методов и программного обеспечения для обеспечения надежности и актуальности системы дистанционного обнаружения утечек.

Задачу обнаружения утечек можно сформулировать следующим образом. Допустим между двумя последовательными оценками, возникла утечка. На основе совместной обработки данных по манометрической съемке, выдается "сигнал" x_i , характеризующий величину утечки и ее местоположение в гидравлической системе (ГС), в частности, в системе теплоснабжения. Требуется установить причину изменения параметров состояния системы. Либо это изменение обусловлено возникновением утечки, либо оно связано с погрешностью (помехами) самого приемника информации



(с дисперсией σ_1), а также с помехами в ГС из-за стохастичности потребления (с дисперсией σ_2).

Статистические характеристики обнаружения можно получить по следующим выражениям. Вероятность ложной тревоги вычисляется как

$$F = \int_C^{\infty} p(h^* | 0) dh^* = 1 - \int_0^C \frac{1}{\sqrt{\pi x}} \exp(-x) dx = 2[1 - \Phi(\sqrt{2C})], \quad (6)$$

где $\Phi(\dots)$ – интеграл вероятности.

Вероятность правильного обнаружения утечки определяется как

$$D = \int_C^{\infty} p(h^* | 1) dh^* = 1 - \int_0^C \frac{1}{\sqrt{\pi x}} \left\{ \exp\left[-(\sqrt{x} - \sqrt{h})^2\right] + \exp\left[-(\sqrt{x} + \sqrt{h})^2\right] \right\} dx = 2 - \Phi(\sqrt{2C} - \sqrt{2h}) - \Phi(\sqrt{2C} + \sqrt{2h}). \quad (7)$$

Совместно с механизмом проверки двухальтернативных гипотез на основе выборки X_n , необходимо рассматривать алгоритмы последовательной и рекуррентной процедуры анализа, когда не безразличен момент принятия решения, и желательно получить результат обнаружения утечки на любом шаге наблюдения за системой. Кроме того, необходимо рассматривать алгоритмы обнаружения утечек в двух частных случаях формулировки рассматриваемой задачи. В первом случае предполагается, что помехи от стохастичности потребления отсутствуют, погрешность приемника информации известна и оценке подлежит лишь амплитуда утечки.

Во втором случае известной считается дисперсия σ_1 , а искомой величиной являются помехи в системе теплоснабжения от стохастичности потребления.

Процесс диагностики утечек опишем следующим образом. Устанавливаются манометры в различных точках ГС для непрерывного мониторинга давления. Данные о давлении записываются и анализируются в реальном времени или периодически. Разрабатывается математическая модель, которая связывает изменения в данных о давлении с возможными утечками в системе. Математический приемник информации использует модель для обнаружения аномалий в данных о давлении, которые могут свидетельствовать о наличии утечек. По результатам обнаружения утечек проводится дополнительный анализ для определения местоположения и размеров утечек.

Этот метод позволяет диагностировать утечки в ГС, основываясь на изменениях в данных о давлении, и может быть эффективным способом обнаружения потенциальных проблем в системе.

Для более гибкого и адаптивного обнаружения утечек с учетом момента принятия решения и разных частных случаев формулировки задачи, можно рассмотреть следующие подходы:

- последовательная процедура обнаружения утечек;
- рекуррентная процедура анализа;
- обнаружение утечек в частных случаях.



Эти подходы требуют разработки специфических алгоритмов и моделей в зависимости от характеристик системы и требований к обнаружению утечек.

Контроль быстро изменяющихся параметров в системах теплоснабжения включает две алгоритмически взаимосвязанные задачи - статическое оценивание и диагностику утечек. Решение этих задач необходимо для эффективного управления и обеспечения безопасности таких систем. Эти задачи принадлежат к разным классам и требуют различных подходов.

Задача статического оценивания обычно связана с мониторингом параметров системы в реальном времени и оценкой их значений. Модель, основанная на физически обоснованных принципах эквивалентирования абонентских подсистем, может быть использована для определения ожидаемых значений параметров в системе. В этом контексте, статическое оценивание может включать в себя оценку давления, расхода газа, температуры и других параметров.

Задача диагностики утечек обычно связана с обнаружением и локализацией утечек в ГС. Это требует анализа изменений параметров системы и выявления аномалий, которые могут свидетельствовать о потенциальной утечке целевого продукта. Физически обоснованные модели могут быть использованы для создания базовых представлений о том, как параметры должны вести себя в нормальных условиях, что может помочь выявить аномалии.

Совместная формализация этих задач может быть сложной, так как они имеют разные цели и подходы. Эти задачи могут быть взаимосвязаны через обмен информацией и данными. Например, результаты статического оценивания, такие как аномалии в параметрах, могут использоваться как входные данные для более точной диагностики утечек.

Физически обоснованный принцип эквивалентирования абонентских подсистем предоставляет основу для разработки моделей и алгоритмов, которые могут быть использованы как в статическом оценивании, так и в диагностике утечек. Важно разрабатывать и оптимизировать такие модели и алгоритмы, чтобы обеспечивать надежный контроль и безопасность ГС.

Основные аспекты этой модели и метода могут быть кратко представлены следующим образом. Основная задача заключается в выявлении факта утечки целевого продукта, определении её местоположения и величины.

Для обнаружения ординарных утечек модель предполагает использование двухальтернативной гипотезы. Это означает, что требуется сравнить два варианта: существование утечки и отсутствие утечки. Нарушение ординарности не меняет основную структуру задачи, но может потребовать более сложных алгоритмов, так как утечка может иметь различные характеристики.

В качестве оптимального приемника информации предлагается использовать алгоритм определения местоположения и величины утечки, основанный на формализации задачи в классе динамических обратных задач анализа возмущенного состояния. Этот алгоритм предполагает использование информации о динамике системы для точной диагностики.

В случае нарушения ординарности, задача может превратиться в распознавание образов или проверку многоальтернативных гипотез, что может потребовать более сложных методов анализа данных.

Математическая модель и метод реализации задачи диагностики утечек в ГС представляют собой важное исследование для обеспечения безопасности и надежности таких систем. Математическая модель и методика диагностики утечек имеют потенциал значительно повысить эффективность и точность обнаружения утечек в ГС, обеспечивая безопасность и устойчивость таких систем.



Результаты

Разработка метода на основе проверки двухальтернативной гипотезы является распространенным методом в статистике и обработке сигналов.

В контексте обнаружения утечек в системах теплоснабжения, процесс может выглядеть следующим образом. Рассматриваются две альтернативные гипотезы: H_0 (нулевая гипотеза) и H_1 (альтернативная гипотеза). В данном случае, H_0 может представлять собой отсутствие утечек, а H_1 - наличие утечек.

Собираются данные, связанные с параметрами системы теплоснабжения, такие как давление, расход газа и другие релевантные переменные. На основе собранных данных строится статистическая модель, которая может включать в себя распределение вероятности, ожидаемые значения и дисперсии параметров. Выбирается статистический критерий, который позволяет сравнить данные с нулевой и альтернативной гипотезами.

Выводы

Система дистанционного обнаружения утечек требует регулярного мониторинга и обслуживания, чтобы обеспечить надежную работу. Решение задачи конкретного обнаружения утечек может различаться в зависимости от типа теплоснабжения и используемых технологий.

Результаты исследований будут способствовать повышению надежности и безопасности систем теплоснабжения путем обеспечения более эффективного обнаружения и контроля утечек и других аномалий в работе трубопроводных систем.

Библиографический список

1. Формирование транспортного резерва в теплоэнергетических системах / С.А. Сазонова, В.Ф. Асминин, С.Н. Кораблин, Д.А. Володкин // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2022. – № 1 (27). – С. 28-34. EDN: [TWCDZV](#)
2. Михневич И.В., Рыбаков А.В., Николенко С.Д. Конструкторское решение и технология быстровозводимого сооружения для применения в зонах чрезвычайных ситуаций // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2019. – № 1 (40). – С. 66-75. EDN: [JVFDFI](#)
3. Состояние разработок элементной базы для систем связи и управления / В.К. Зольников, А.Ю. Кулай, В.П. Крюков, С.А. Евдокимова // Моделирование систем и процессов. – 2016. – Т. 9, № 4. – С. 11-13. DOI: [10.12737/24575](#). EDN: [XXBBUB](#)
4. Анализ проектирования блоков RISC-процессора с учетом сбоеустойчивости / В.К. Зольников, А.С. Ягодкин, В.И. Анциферова и др. // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 56-65. DOI: [10.12737/2219-0767-2020-12-4-56-65](#). EDN: [EGIH0Y](#)
5. Асминин В.Ф., Дружинина Е.В., Болучевский А.В. Обоснование конструкции облегченной панели для переносных акустических экранов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – № 1 (27). – С. 21-26. EDN: [YQEROI](#)
6. Асминин В.Ф., Антонов А.И., Епифанов Е.Н. Использование акустических характеристик речевых пожарных оповещателей для расчёта звуковых полей помещений // Технологии технологической безопасности. – 2014. – № 1 (53). – С. 13. EDN: [TGSLIR](#)
7. Асминин В.Ф., Корда У.Ю. Об одном из путей снижения шума в сложившейся жилой застройке, прилегающей к остановочным пунктам общественного автотранспорта // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 4 (124). – С. 21-24. EDN: [NQYPIN](#)



References

1. Sazonova, S. A., Asminin, V. F., Korablin, S. N., & Volodkin, D. A. (2022). Formirovanie transportnogo rezerva v teploenergeticheskikh sistemah [Formation of a transport reserve in thermal power systems]. *Informacionnye tekhnologii v stroitel'nyh, social'nyh i ekonomicheskikh sistemah*, 1 (27), 28-34. [In Russian]
2. Mihnevich, I. V., Rybakov, A. V., & Nikolenko, S. D. (2019). Konstruktorskoe reshenie i tekhnologiya bystrovozvodimogo sooruzheniya dlya primeneniya v zonah chrezvychajnyh situacij [Design solution and technology of a prefabricated structure for use in emergency zones]. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity*, 1 (40), 66-75. [In Russian]
3. Zol'nikov, V. K., Kulaj, A. Yu., Kryukov, V. P., & Evdokimova, S. A. (2016). Sostoyanie razrabotok elementnoj bazy dlya sistem svyazi i upravleniya [The state of development of the element base for communication and control systems]. *Modelirovanie sistem i processov*, 4(9), 11-13. <https://doi.org/10.12737/24575> [In Russian]
4. Zol'nikov, V. K., Yagodka, A. S., Anciferova, V. I., Evdokimova, S. A., Skvorcova, T. V., & YAn'kov, A. I. (2019). Analiz proektirovaniya blokov RISC-processora s uchetom sboeustojchivosti [Analysis of the design of RISC processor blocks, taking into account fault tolerance]. *Modelirovanie sistem i processov*, 4(12), 56-65. <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2020-12-4-56-65>
5. Asminin, V. F., Druzhinina, E. V., & Boluchevskij, A. V. (2017). Obosnovanie konstrukcii oblegchennoj paneli dlya perenosnyh akusticheskikh ekranov [Justification of the lightweight panel design for portable acoustic screens]. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika*, 1 (27), 21-26. [In Russian]
6. Asminin, V. F., Antonov, A. I., & Epifanov, E. N. (2014). Ispol'zovanie akusticheskikh harakteristik rechevyh pozharnyh opoveshchatelej dlya raschyota zvukovyh polej pomeshchenij [The use of acoustic characteristics of speech fire alarms to calculate the sound fields of rooms]. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti*, 1 (53), 13. [In Russian]
7. Asminin, V. F., & Korda, U. Yu. (2011). Ob odnom iz putej snizheniya shuma v slozhivshejsya zhiloj zastroyke, prilgayushchej k ostanovochnym punktam obshchestvennogo avtotransporta [About one of the ways to reduce noise in the existing residential development adjacent to public transport stops]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 4 (124), 21-24. [In Russian]

Сведения об авторах

Сазонова Светлана Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, кафедра техносферной и пожарной безопасности, ВГТУ, e-mail: ss-vrn@mail.ru, ORCID: [0000-0001-8626-7723](https://orcid.org/0000-0001-8626-7723).

Кораблин Сергей Николаевич, аспирант, кафедра техносферной и пожарной безопасности, ВГТУ, e-mail: korablin2015@inbox.ru.

Мозговой Николай Васильевич, д-р техн. наук, профессор, кафедра техносферной и пожарной безопасности, ВГТУ, e-mail: nv_moz@mail.ru.

Authors about

Sazonova Svetlana Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technospheric and Fire Safety, Voronezh State Technical University, e-mail: ss-vrn@mail.ru, ORCID: [0000-0001-8626-7723](https://orcid.org/0000-0001-8626-7723).

Korablin Sergey Nikolaevich, postgraduate student, Department of Technospheric and Fire Safety, Voronezh State Technical University, e-mail: korablin2015@inbox.ru.

Mozgovoy Nikolay Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technospheric and Fire Safety, Voronezh State Technical University, e-mail: nv_moz@mail.ru.

