

УДК 004.047

## АЛГОРИТМ ПОИСКА ТЕЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПЕРВОГО КОНТУРА ВВЭР-1000

© 2014 г. Е.А. Абидова, О.Ю. Пугачёва, А.К. Пугачёв

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.*

Акустическая система поиска течи теплоносителя первого контура (САКТ) обеспечивает обнаружение течи теплоносителя по первому контуру с расходом от 3,8 л/мин. Время запаздывания информации при обнаружении течи не более 3 минут. Основным путем повышения эффективности и надежности системы САКТ является совершенствование алгоритма поиска течи. Авторами статьи предложены подходы к обработке данных САКТ: нормирование показаний датчиков, вычисление секвент, мажорирование. Большое внимание в статье уделяется компенсации фоновых шумов помещения первого контура и шумов измерительного тракта. Предлагаемые авторами методы должны обеспечить выявление течи расходом менее 3,8 л/мин.

*Ключевые слова:* барьеры защиты АЭС, поиск течи, акустический датчик, нормирование данных, метод секвент, мажоритарная функция.

Поступила в редакцию 10.11.2014 г.

Ключевым фактором развития атомной энергетики является обеспечение радиационной безопасности при производстве электроэнергии на АЭС. Для этой цели на АЭС предусмотрены четыре барьера защиты, одним из которых является граница первого контура, препятствующая проникновению продуктов деления в окружающую среду.

Опыт эксплуатации АЭС показывает, что невозможно полностью исключить возникновение течи трубопроводов и оборудования [1]. Своевременное обнаружение течи позволяет предотвратить возможное разрушение в системе трубопроводов или оборудования реакторной установки и, таким образом, повысить эксплуатационную безопасность АЭС.

Для обнаружения течи первого контура используется три системы: система акустического контроля течи (САКТ); система, использующая влажностный метод контроля (СКТВ); автоматизированная система обнаружения течей теплоносителя по аэрозольной активности АСОТТ-А.

Проведя сопоставление используемых систем обнаружения течи с использованием САКТ, СКТВ, АСОТТ, можно заключить, что системы взаимно дополняют друг друга. При этом САКТ за счет возможности решения широкого круга задач – выявление течи, локализация местоположения, оценка размеров – является наиболее универсальной системой. САКТ, СКТВ проигрывает с точки зрения возможности локализации течи и оценки размеров. Таким образом, развитие системы САКТ является перспективной и востребованной задачей.

Существующий алгоритм предполагает поочередный опрос датчиков и определяет течь по превышению сигналом датчика уставки. Данный алгоритм имеет ряд недостатков:

1) «Не одновременность» (т.е. поочередность) опроса датчиков не позволяет скомпенсировать высокие уровни фоновых шумов.

2) При последовательном опросе в процессе измерений теряется информация о расположении датчика и его взаимосвязи с соседними датчиками.

3) Сигналом течи считается сигнал, превышающий фоновый уровень (уставку) в определенное число раз. При изменении фоновой обстановки уставки необходимо перестраивать, а при изменении режимов (маневрирование мощностью, опрессовка и т.п.) система становится не работоспособной.

Помимо ложных срабатываний, такой алгоритм увеличивает время реакции системы и снижает чувствительность. Подходы к решению данных проблем были предложены ВНИИ АЭС для системы, установленной на ВВЭР-440. Мы распространили данные подходы и на ВВЭР-1000 [2].

Особенностями предлагаемого алгоритма является: объединение датчиков системы в группы, работающие в одинаковых условиях; выполнение операций нормирования данных; вычисление разностей показаний датчиков; сравнение разностей показаний датчиков с единой уставкой «превышение над уровнем шума».

Следует учитывать, что нормирование данных обеспечивает компенсацию неодинаковых коэффициентов передачи измерительного тракта, шумов усилителя в группе контролируемых датчиков. Вычисление разностей значений датчиков обеспечивает компенсацию фоновых шумов, которые должны быть примерно одинаковы для однородной группы датчиков; использование разностей показаний датчиков для сравнения с уставкой, устраняет необходимость коррекции уставки для разных режимов работы блока.

На рисунке 1 приведен вариант объединения шестнадцати датчиков САКТ ВВЭР-1000 в группы по четыре штуки [3]. В этих группах показания датчиков вычитаются. При возникновении течи разница в показаниях может превысить уставку, и течь будет выявлена.

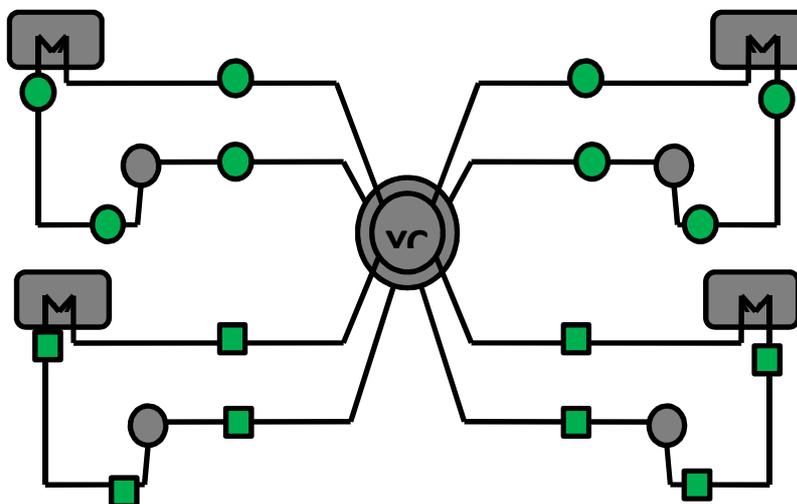


Рис. 1. – Вариант объединения датчиков системы САКТ в группы

Рассмотрим сигнал на датчике, ближайшем к течи:

$$D = k(N + N_a + \Delta)$$

где  $k$  – коэффициент передачи канала;

$N$  – фоновый шум помещения;

$N_a$  – шум усилителя;

$\Delta$  – увеличение показаний канала, зарегистрировавшего течь, вызванное появлением течи (полезный сигнал).

Сигнал на любом другом датчике:

$$D = k (N + N_a)$$

Таким образом, диагностический параметр представляет сумму трех членов:

- первый – связан с различием коэффициентов передачи тактов;
- второй – связан с неодинаковостью значений фонового шума, регистрируемого отдельными датчиками;
- третий – зависит только от сигнала течи, причем первые два члена суммы «маскируют» полезный сигнал, содержащийся в третьем члене.

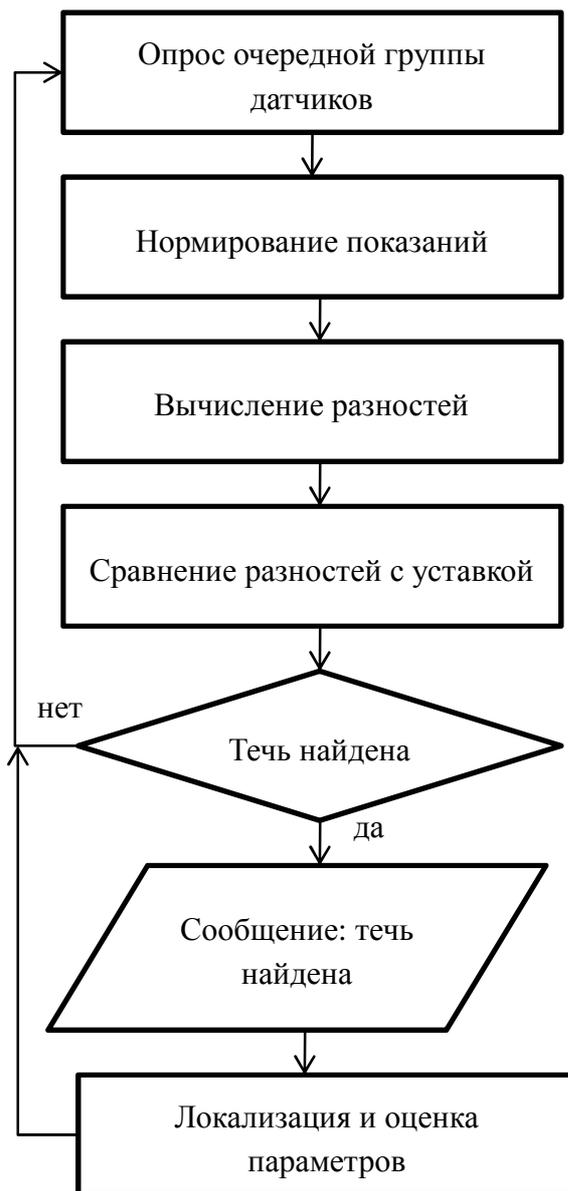


Рис. 2. – Алгоритм поиска течи в системе САКТ

Благодаря тому, что с уставкой сравнивается не абсолютное значение, а разность, ожидается повышение чувствительности системы, и снижение числа ложных срабатываний системы ALARM.

Задачей нормирования данных является минимизация первых двух членов для

снижения зависимости параметра от изменения уровня фоновых шумов и увеличения чувствительности к возникновению течи.

$$D_n = \frac{D}{k} - N_a$$

Полученное значение  $D_n$  определяется фоновыми шумами (которые должны быть примерно одинаковыми для всех датчиков) помещения и сигналом течи, если она присутствует.

При вычислении разностей нормированных показаний датчиков уровни фоновых шумов вычитаются и, следовательно, сигнал течи заметнее. В суммах «участвуют» показания всех датчиков, т.е. каждый датчик, влияет на параметр и, следовательно, все датчики одновременно находятся под контролем. Например, для первой группы датчиков (рис. 1) вычисляются четыре разности:

$$M_1 = D_1 - D_2; M_2 = D_1 - D_3; M_3 = D_2 - D_4; M_4 = D_3 - D_4 \quad (1)$$

Полученные разности сравниваются с уставкой. Такой подход позволяет сформировать единый параметр, информирующего оператора о возникновении течи, нечувствительного к изменению уровня фоновых шумов.

Во избежание маскирующего влияния второй течи вывод о наличии течи делается на основании сравнения с уставкой  $N_u$  двух разностей:

$$\left\{ \begin{array}{ll} M_1 = D_1 - D_2 > N_u \text{ U } M_2 = D_1 - D_3 > N_u & \text{– течь вблизи первого датчика;} \\ -M_1 = D_2 - D_1 > N_u \text{ U } M_3 = D_2 - D_4 > N_u & \text{– течь вблизи второго датчика;} \\ -M_2 = D_3 - D_1 > N_u \text{ U } M_4 = D_3 - D_4 > N_u & \text{– течь вблизи третьего датчика;} \\ -M_3 = D_4 - D_2 > N_u \text{ U } -M_4 = D_4 - D_3 > N_u & \text{– течь вблизи четвертого датчика.} \end{array} \right. \quad (2)$$

Алгоритм, с помощью которого предлагается обрабатывать данные в системе САКТ, был реализован с помощью программы LabVIEW.

Алгоритм был реализован для четырех датчиков, работающих в одинаковых условиях, в то время как в САКТ предусмотрена установка более сорока датчиков. Однако, используя предложенные подходы, можно, при необходимости, легко доработать алгоритм и интерфейс пользователя для контроля за несколькими группами, состоящими из четырех датчиков.

При реализации алгоритма было произведено моделирование сигналов датчиков. Предполагалось, что исследуемый сигнал прошел фильтрацию, усиление и сдвиг, дискретизацию и квантование (что является факторами потери информации о состоянии трубопровода).

На основании анализа форм графиков сигналов и частотных спектров, представленных в открытых источниках, предполагалось, что сигнал определяется постоянной составляющей, величина которой зависит от режима работы блока. На основании исследований, проведенных в Центре материаловедения и ресурса ВНИИАЭС, примем, что сигнал течи должен превышать уровень фоновых шумов на 10 дБ, внешний фоновый составит около 50 дБ. В этом случае уровень шума минимального гарантированно обнаруживаемого сигнала течи в акустической камере составит около 60 дБ. Также в сигнале содержится шумовая компонента, определяемая шумом измерительного тракта. Из анализа спектров доступных акустических сигналов можно предположить наличие периодической составляющей, частота которой определяется вращением рабочего колеса ГЦН. Обобщая, информацию о характере

акустического сигнала течи, опишем модель сигнала аналитической формулой [4]:

$$Y(t) = C + A_T * \sin 2\pi f_T t + A_r * \sin 2\pi f_r + \gamma(t),$$

где  $C$  – постоянная составляющая;

$A_T$  и  $f_T$  – амплитуда и частота периодической составляющей, характеризующей наличие течи;

$A_r$  и  $f_r$  – амплитуда и частота периодической составляющей, характеризующей работу оборудования первого контура, прежде всего ГЦН;

$\gamma(t)$  – случайная компонента.

Параметры модели могут быть откорректированы по результатам измерений в промышленных условиях.

Смоделированные сигналы от различных датчиков подвергаются нормировке. Значения коэффициента усиления тракта и ориентировочной величины шума усилителя определяются из паспортных данных измерительной системы. Затуханием акустического сигнала на пути от течи к датчику можно пренебречь из-за малости расстояния между источником сигнала и датчиком. Коэффициент усиления тракта и величина шума усилителя задаются как константы.

С целью проверки исправности датчиков их показания сравниваются со значениями, при которых регистрируется отказ параметров. Нулевой или недостоверно большой сигнал однозначно свидетельствуют о явной неисправности датчика.

Вычисление разностей производится согласно предложенным ранее схемам (1) и (2). Полученные значения разностей проверяются на достоверность. Для этого они сравниваются с недостоверно большим значением, которое может получаться при отказе одного из датчиков. Проверка производится с целью недопущения ложного срабатывания системы ALARM. Достоверные значения разностей сравниваются с уставкой.

На рисунке 3 показана лицевая панель предлагаемого интерфейса пользователя системы поиска течи первого контура. Она содержит схему первого контура, включая реактор, четыре парогенератора, четыре ГЦН, четыре циркуляционные петли.

На схеме обозначено расположение двенадцати акустических датчиков системы САКТ. Сигналы четырех датчиков, подвергнутые кондиционированию (нормировке) выводятся в графическом окне. Также на лицевую панель выводятся среднеквадратичные значения, значения максимальной разности, информация об исправности датчиков системы САКТ. Пользователем вводится уставка по значению мажоритарной функции, при достижении которой пользователь получает уведомление о наличии течи.

Сигнализация наличия течи (рисунок 3) производится:

- свечением диода у номера датчика;
- миганием диода у места установки датчика, вблизи которого зафиксирована течь теплоносителя.

Сигнализация об отказе датчика осуществляется свечением диода, соответствующего номеру неисправного датчика.

Таким образом, предлагается реализация алгоритма поиска течи теплоносителя первого контура, в котором благодаря нормированию данных, компенсации шумов и введению единой уставки для всех режимов ожидается повышение чувствительности системы, и одновременно снижение числа ложных срабатываний системы ALARM.

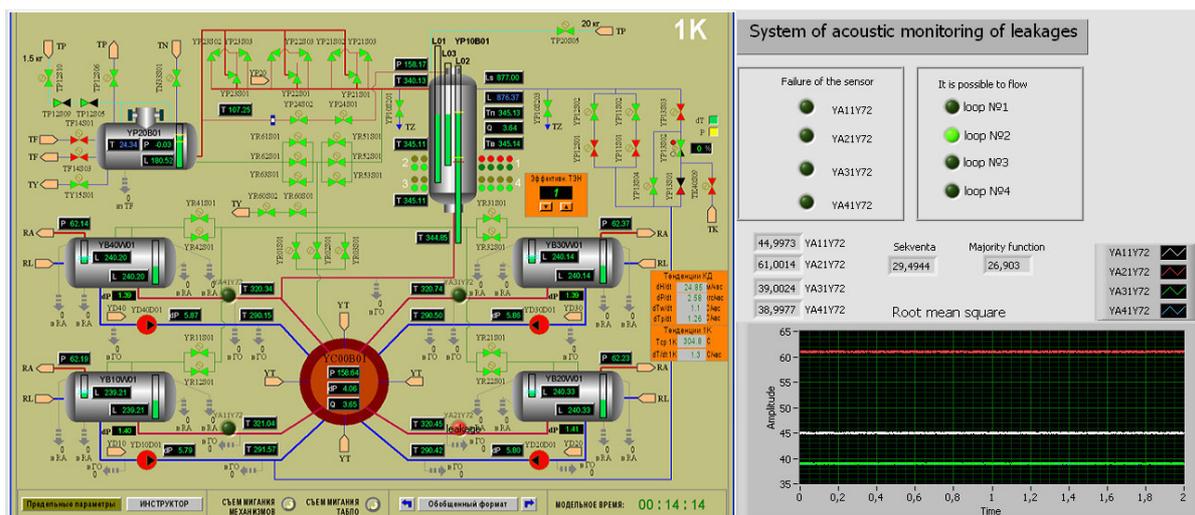


Рис. 3. – Лицевая панель интерфейса пользователя системы поиска течи первого контура в режиме тестирования: течь в горячей нитке второй петли

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство Российской Федерации по атомной энергии. Концерн «Росэнергоатом». Балаковская атомная станция. Центр подготовки персонала. Основное оборудование реакторного отделения [Текст]. – [Б.м.], 2000. – 178 с.
2. Бакиров, М.Б. и др. Внедрение концепции ТПР для АЭС с ВВЭР-440, оптимизация систем контроля течей [Текст] / М.Б. Бакиров, А.А. Афонсов, И.Ю. Иванченко, Н.Ю. Забрусков, А.В. Богачев, В.И. Левчук. – ОАО «ВНИИАЭС», НТЦ Ростехнадзор, [Б.г.] – 22 с.
3. Маркосян, Г.Р. Совершенствование диагностической системы «АЛЮС» для определения течи теплоносителя из первого контура ВВЭР-440 [Текст] / Г.Р. Маркосян // Теплоэнергетика. – 2000. – №5.
4. Гетман, А.Ф. Концепция безопасности «Течь перед разрушением» для сосудов и трубопроводов давления АЭС [Текст] / А.Ф. Гетман. – М. : Энергоатомиздат, 1999. – 258 с.

## Search Algorithm of the Heat Carrier Leak of PWR First Contour

O.J. Pugachyova, A.K. Pugachyov, E.A. Abidova

*Volgodonsk Engineering Technical Institute  
the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360  
e-mail: nii\_energomash@mail.ru*

**Abstract** – Search acoustic system of the heat carrier leak in the first contour (SLHD) provides the detection of the heat carrier leak of the first contour with an expense from 3,8 l/min. Time of information delay in case of leak detection is no more than 3 minutes. The main way of increase of efficiency and reliability of system of SLHD is enhancement of leak search algorithm. Authors of article offered approaches to SLHD data processing: regulation of sensors indications, calculation sequent, majorization. In the article much attention is paid to compensation of background noise of the first contour premises and measuring path noise. Offered methods have to provide leak identification by an expense less than 3,8 l/min.

**Keywords:** barriers protection of the nuclear power plant, leak detection, acoustic sensor, data regulation, method of sequent, majority function.

## REFERENCES

- [1] Ministerstvo Rossijskoj federacii po atomnoj jenergii. Koncern «Rosjenergoatom». Balakovskaja atomnaja stancija. Centr podgotovki personala. Osnovnoe oborudovanie reaktornogo otdelenija [Ministry of the Russian Federation of atomic energy. Rosenergoatom concern. Balakovo nuclear power plant. Center of the personnel trainig. Capital equipment reactor building]. 2000. 178 p. (in Russian)
- [2] Bakirov M.B., Afonosov A.A., Ivanchenko I.Ju., Zabruskov N.Ju., Bogachev A.V., Levchuk V.I. Vnedrenie koncepcii TPR dlja AJeS s VVJeR-440, optimizacija sistem kontrolja tecej [Introduction of the TPR concept for the NPP with WWER-440, optimization of monitoring systems of leaks]. OAO «VNIIAJeS», NTC Rostehnadzor [JSC VNIIAES (All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation), STC Rostekhnadzor]. 22 p. (in Russian)
- [3] Markosjan G.R. Sovershenstvovanie diagnosticheskoj sistemy «ALJuS» dlja opredelenija techi teplonositelja iz pervogo kontura VVJeR-440 [Improvement of diagnostic ALYuS system for definition of heat carrier leak from the WWER-440 first contour]. Teplojenergetika [Power system]. 2000, №5, ISSN 0040-3636. (in Russian)
- [4] Getman A.F. Koncepcija bezopasnosti «Tech pered razrusheniem» dlja sudov i truboprovodov davlenija AJeS [The concept of safety "A leak before destruction" for vessels and the NPP pipelines of pressure]. M. Pub. Jenergoatomizdat [Energoatomizdat], 1999, ISBN 5-283-031151-9, 258 p. (in Russian)