

В.Г. ПЕТРОСЯН, Г.Р. МАРКОСЯН, С.В. ШАХВЕРДЯН
ИЕРАРХИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОТЕЧКИ ИЗ ПЕРВОГО
КОНТУРА ВВЭР-440

Предложен алгоритм локализации протечки с трехуровневой иерархической структурой, предназначенный для диагностических систем контроля течи теплоносителя в энергоблоках типа ВВЭР. Дается описание вычислительной технологии алгоритма, приводятся результаты испытаний с оценкой эффективности.

Ключевые слова: локализация, протечка, вектор коррекции, имитация, коэффициент корреляции.

Системы контроля протечки теплоносителя из первого контура энергоблоков АЭС имеют важное значение для повышения безопасности их эксплуатации и обоснования применения концепции «течь перед разрывом».

В настоящее время широкое применение нашла система контроля течи «Alüs» фирмы «Siemens» на АЭС различных европейских стран и СНГ. Одна из версий системы «Alüs» внедрена на энергоблоке ¹² Армянской АЭС, основной функцией которой, помимо фиксации факта, является локализация протечки теплоносителя из первого контура энергоблока. Опыт длительной эксплуатации системы на энергоблоке ¹² Армянской АЭС показал существенно ограниченное применение алгоритма локализации [1], в особенности в условиях реальной течи. Это естественно, поскольку задача локализации протечки принадлежит к классу многокритериальных иерархических задач, требующих соответствующего решения.

В данной работе эта задача рассматривается как иерархическая многокритериальная задача, обладающая рядом нестандартных свойств.

1. Постановка и решение задачи. Задача локализации протечки в диагностических системах, в том числе и «Alüs», может быть сформулирована следующими критериями по уровням иерархии.

Уровень 1. Определение параметров линейной аппроксимации (α, A) процесса гашения сигналов датчиков по критерию $\min_{\alpha, A} \varphi$ при заданных R_0 и $k = 1$, где

$$\varphi \equiv \sum_{i=1}^n (\ln y_i - A - \alpha x_i)^2; \quad A \equiv \ln y_0; \quad y_0 - \text{значение } y \text{ при } x = 0 \text{ зависимости}$$

экспоненциального закона затухания сигналов датчиков, $y = y_0 e^{-\alpha x}$; y - среднеквадратичное безразмерное значение (RMS) сигналов датчиков; α - коэффициент ослабления сигналов по длине трактов (компонентов первого контура); $k = \{k_1, \dots, k_n\}$ -

вектор коррекции сигналов; n – число датчиков в массиве; R_0 – местоположение излучателя (источника искусственной протечки), известное для каждого массива число.

Массивы формируются таким образом, чтобы в их составе были, как минимум, один излучатель и три датчика. Важно отметить, что в условиях реальной течи значение R_0 неизвестно, и задача локализации заключается именно в определении R_0 . В связи с этим и возникает задача на уровне 2.

Уровень 2. Локализация источника энергии (местоположения протечки) R по критерию $\max_{R(k)} \rho$ при заданном k , где ρ – коэффициент корреляции между $\ln y$ и x , $\rho = \text{cov}(\ln y, x) / \sqrt{Dx \cdot Dy}$; Dx, Dy – дисперсии x и $\ln y$ соответственно.

Уровень 3. Определение вектора k по критерию $\min_{\alpha, A} \Phi(k)$, где $\Phi(k) \equiv [R(k) - R(k=1)]^2$; $R(k)$ – местоположение протечки, полученное на уровне 2 при k .

Для решения многокритериальных задач нелинейного программирования существует множество стандартных методов [2], однако непосредственное их применение в рассматриваемой задаче не представляется возможным из-за ее нестандартного характера.

Задача на уровне 1 является задачей аппроксимации экспериментальных данных заранее принятой функцией, решение которой осуществляется известными схемами, например, методом наименьших квадратов (МНК). Применение МНК возможно в известной координатной системе, однако в рассматриваемой задаче она не определена, т.к. значение $R(k=1)$ неизвестно. В силу этого возникает задача на уровне 2, решение которой реализуется методом перебора. В [3,4] даны алгоритмы решения задач на уровнях 1 и 2, поэтому здесь они не описываются.

Задача на уровне 3 решается градиентной процедурой [5] по следующей схеме.

Шаг 1. На работающем блоке по стандартному программному обеспечению (ПО) системы «Alüs» производится имитация искусственной течи поочередно $\forall s = \overline{1, m}$ и вычисляются RMS сигналов протечки по выражению [1]

$$y_{si} = \sqrt{M_{Si}^2 - B_{Si}^2}, \quad (1)$$

где y_{si} – RMS сигналов протечки i – го датчика s - го массива; $s = \overline{1, m}$ – безразмерная величина, выдаваемая системой «Alüs» секундным тактом, как 5σ RMS; M_{Si} – измеренное значение сигнала i - го датчика s - го массива при имитации течи в момент превышения M_{Si} заданного порога; B_{Si} – то же, до имитации (фоновое RMS); m – число массивов.

Затем полученное по (1) значение y_{si} переводится системой в dB по известному выражению

$$y_{si} [\text{dB}] = 20 \log y_{si}. \quad (2)$$

Шаг 2. По алгоритмам решения задач на уровнях 1 и 2 [3,4] определяется $R(k=1)$ с учетом $y_{si} [\text{dB}]$.

Шаг 3. Проверяется условие $\Phi(k=1) \leq \delta$. Если $\Phi(k=1) > \delta$, то осуществляется переход к шагу 4, где δ – заданное достаточно малое число.

Шаг 4. Выбирается $s \in \{1, \dots, m\}$, дается приращение вектору k_s (покомпонентно) на величину Δk_s и вычисляются $R(k_s + \Delta k_s)$, $\Phi(k_s + \Delta k_s)$ и $d\Phi/dk_s \cong \Delta \Phi / \Delta k_s$, где $\Delta \Phi \equiv \Phi(k_s + \Delta k_s) - \Phi(k_s)$.

Шаг 5. По рекуррентной формуле $k_s^{r+1} = k_s^r - \left(\frac{d\Phi}{dk_s} \right)_r \Delta$ определяется новое k_s , и процедура с шага 2 по 5 повторяется до сходимости итерации, где $d\Phi/dk_s$ – вектор-столбец размера n ; Δ – градиентный шаг; r – номер итерации. Причем ввод k_s осуществляется по формуле $\overline{y_{Si}}[dB] = y_{Si}[dB] + 20 \log k_{Si}$, где $\overline{y_{Si}}[dB]$ – скорректированное очищенное значение сигналов датчиков в dB ; $y_{Si}[dB]$ определено по (2).

Полученными значениями k_s , $s = \overline{1, m}$ рекомендуется пользоваться в течение всей кампании энергоблока с периодической проверкой ρ . Если окажется, что ρ значительно отклоняется от единицы, то следует скорректировать k_s путем повторения процедуры вычисления k_s , принимая за начальное значение $k_s^0 = k_s^c$, где k_s^c – ранее вычисленный вектор коррекции.

Предложенный в работе алгоритм локализации протечки в программном исполнении интегрирован в ПО системы контроля течи, установленной на энергоблоке 12 Армянской АЭС. Отметим также, что алгоритм, помимо своего прямого назначения, позволяет оценить чувствительность и адекватность датчиков, расположенных на идентичных местах первого контура энергоблока.

2. Экспериментальная проверка алгоритма. Для оценки эффективности алгоритма и ввода k на энергоблоке 12 Армянской АЭС были проведены эксперименты с имитацией течи. По информации, полученной при экспериментах, был реализован алгоритм (табл.).

Таблица

№ массива	Местоположение протечки, см		Значения k_{Si}
	Без ввода k_{Si}	С вводом k_{Si}	
1	-1500	-5000	$k_{13}=1; k_{14}=1; k_{22}=0,25;$
2	-2000	-5000	$k_{13}=-1; k_{15}=1; k_{23}=3;$
7	-1000	-4800	$k_{28}=1; k_{22}=0,25; k_{15}=1.$

В таблице приведены расстояния местоположения протечки от точки отсчета для трех массивов (1,2,7) без ввода (графа 2), т.е. при $k = 1$, и с вводом (графа 3) поправочных коэффициентов. В четвертой графе даны значения вектора k , из которых следует, что датчик A2/2

существенно чувствителен, поэтому $k_{22} = 0,25 < 1$, а датчик $A2/3$ слабочувствителен, поэтому $k_{23} = 3 > 1$.

При проведении экспериментов излучатели (источники искусственной протечки) находились в стационарном положении на расстоянии $R_0 = - 4920$ см от точки отсчета слева для всех массивов. Из таблицы видно, что при k с отличными от единицы компонентами местоположение протечки незначительно отличается от R_0 , что указывает на эффективность ввода поправочных коэффициентов и алгоритма определения местоположения протечки, т.е. ПКЛ в целом.

По остальным массивам не требовался ввод поправочных коэффициентов, т.е. для них $k = 1$, и местоположение протечки, как правило, незначительно отличалось от R_0 .

Поправочные коэффициенты k_{11} и k_{12} для датчиков $A1/1$ и $A1/2$, установленных на крышке РУ, не определены, поскольку они находились в неисправном состоянии. При проведении экспериментов во все массивы вместо них был включен исправный датчик $A1/3$, который также установлен на крышке РУ.

Полученные поправочные коэффициенты введены в ПКЛ для использования в течение одной кампании реактора блока 2 Армянской АЭС. При этом, если наблюдались значительные отклонения фоновых значений какого-либо датчика от сравнительно стабильных фоновых величин, то, вероятно, необходимо проведение пересчета k_{si} .

Анализируя данные таблицы, можно отметить следующее: из шестнадцати датчиков СКТТ, исключая два неисправных на крышке РУ, только в показаниях двух датчиков требуется ввод поправочных коэффициентов, а именно, $A2/2$ (на ГЗЗ-1г) и $A2/3$ (на ГЗЗ-2г), из-за разной их чувствительности. Для всех остальных датчиков $k_{si} = 1$, в том числе и датчика $A1/8$ (у ГЦН-5), несмотря на то, что фоновые показания его в RMS примерно в 2 раза выше, чем у датчиков, установленных в идентичных местах. Причина – высокие рабочие шумы в ГЦН-5.

Таким образом, в результате применения ПКЛ оказывается возможным выявить, с одной стороны, причины разброса показаний датчиков и оценки их чувствительности, с другой – определить величины рабочих шумов в идентичных компонентах первого контура, в частности, ГЦН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Инструкция** пользователя системы контроля течи «Alüs» фирмы «Siemens», 1992.
2. **Бенсусан А., Лионс Ж.Л., Темам Р.** Методы декомпозиции, децентрализации, координации и их приложения // Методы вычислительной математики: Сб.- Новосибирск: Наука, 1975.- С. 144-274.
3. **Петросян В.Г., Шахвердян С.В.** Система контроля течи теплоносителя из первого контура ВВЭР-440. Алгоритм локализации течи: Сб. докл. 1-й меж. энерг. конф. в Армении.-Ереван, 1998.- С. 63-74.

4. **Маркосян Г.Р., Петросян В.Г., Шахвердян С.В., Асланян М.А.** Локализация течи теплоносителя из первого контура ВВЭР – 440 в диагностической системе течи «Alüs» фирмы «Siemens» // Теплоэнергетика. - 2000.- ¹ 5.- С.15-20.
5. **Поляк Б.Т.** Введение в оптимизацию. -М.: Наука, 1993.- 384 с.

НИИ «Арматом», Армянская АЭС. Материал поступил в редакцию 10.03.1999.

Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Գ.Ռ. ՄԱՐԿՈՍՅԱՆ, Ս.Վ. ՇԱԿՎԵՐԴՅԱՆ
ՋՋԷՌ-440-Ի ԱՌԱՋԻՆ ԿՈՆՏՈՒՐԻՑ ԱՐՏԱՀՈՍՔԻ ՏԵՂԱՅՆԱՑՄԱՆ ՀԻԵՐԱՐԽԻԿ ԱԼԳՈՐԻԹՄ

Առաջարկվում է ՋՋԷՌ տիպի էներգաբլոկներում էներգակրի արտահոսքի վերահսկման ախտորոշիչ համակարգի համար նախատեսված արտահոսքի տեղայնացման ալգորիթմ՝ եռամակարդակ հիերարխիկ կառուցվածքով: Տրվում է ալգորիթմի հաշվողական տեխնոլոգիայի նկարագրությունը, բերվում են փորձարկումների արդյունքները արդյունավետության գնահատմամբ:

V.G. PETROSSYAN, G.R. MARKOSSYAN, S.V. SHAHVERDYAN

**HIERARCHIC ALGORITHM OF LEAKAGE
 LOCALIZATION FROM THE PRIMARY CYCLE OF
 THE WWER 440 – TYPE REACTOR**

A leakage localization algorithm with a three-level hierarchic structure for heat leakage control system diagnostics in WWER 440 – type power units is suggested. The computing technology description is given and the experimental results with estimation of effectiveness are presented.