

К. т. н. В. А. БОЛТЕНКОВ, Г. Х. М. АЛЬ-ДЖАСРИ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: vaboltentkov@mail.ru

## ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

*Описаны две методики оперативного контроля состояния акустических сенсорных сетей, предлагаемых для мониторинга течей теплоносителя в энергогенерирующем оборудовании. Методики основаны на создании в пределах сети звукового поля эталонного источника. В качестве тестового сигнала используется фазоманипулированный сигнал на основе M-последовательности. Работоспособность и высокие показатели качества контроля подтверждены компьютерным экспериментом.*

*Ключевые слова: акустическая сенсорная сеть, техническая диагностика, M-последовательность.*

В последние годы особое внимание уделяется системам мониторинга течей в теплоэнергетическом оборудовании, которые выполняют функции обнаружения факта течи теплоносителя и определения места течи. Раннее обнаружение течи и ее локализация позволяют предотвратить не только потери теплоносителя, но и развитие аварийной ситуации в теплотехническом агрегате. В частности, в атомной энергетике устоявшейся является концепция «течь перед разрушением», согласно которой своевременное обнаружение и локализация течи теплоносителя на АЭС позволяет избежать масштабной аварии с разрушением основного металла АЭС [1]. Среди различных систем мониторинга течей часто применяются акустические сенсорные (микрофонные) сети [2, 3]. По сравнению с другими системами мониторинга течей (влажностными, оптическими, тепловизионными, системами, основанными на расчете массового и объемного баланса) акустические сенсорные сети (АСС) имеют ряд преимуществ, таких как [4]:

- высокая чувствительность к течи с малым расходом теплоносителя;
- простота конструкции;
- долговечность и надежность.

Действие АСС основано на обнаружении широкополосного акустического сигнала, возникающего при истечении перегретого теплоносителя через дефект в основном металле оборудования или разуплотненные фланцевые соединения. Применение пространственно разнесенных микрофонных датчиков позволяет локализовать место течи. Особенностью применения АСС является их достаточно длительная эксплуатация на большом удалении от центра обработки измерительной информации и, как правило, в до-

статочно жестких температурных и климатических условиях (помещения электрических тепловых и атомных электростанций, бойлерных и т. п., характеризующиеся высокой температурой и высокой влажностью при возникновении течи). Очевидно, что в таких условиях отказы сенсорных элементов сети неизбежны. И если полный отказ микрофона обнаруживается легко – по отсутствию выходного сигнала, то параметрический (или, по терминологии ГОСТ 27.002-89, деградационный) отказ обнаружить достаточно сложно. Такие отказы приводят к снижению качества работы АСС, причем потребитель информации продолжает пользоваться ею в расчете на полностью исправное состояние системы. То есть оперативный контроль состояния АСС в процессе их эксплуатации и выявление отказавших элементов с последующим их исключением из процесса обработки измерительной информации является весьма актуальной и важной задачей.

Известные системы оперативного контроля обычно оценивают состояние системы в целом, не позволяя установить отказавший сенсор [5]. В [6] изложены общие подходы к оценке состояния микрофонной сети, применяемой для определения местоложения источника речевого сигнала. Однако анализ литературы показывает, что реально действующие методики, позволяющие установить параметрический отказ в одном из элементов АСС, на сегодняшний день отсутствуют.

Целью настоящего исследования является разработка принципов оперативного контроля АСС для обнаружения отказавшего элемента и компьютерное моделирование практических методик контроля.

**Постановка задачи**

Предположим, что вероятность одновременного отказа двух и более сенсоров пренебрежимо мала, т. е. задача заключается в выявлении единичного отказавшего элемента. Акустическая сенсорная сеть  $S_N$  представляет собой  $N$  пространственно разнесенных акустических датчиков, охватывающих определенную зону пространственного мониторинга. Необходимо в пределах АСС создать эталонное звуковое поле. Для этого в технологическом помещении, где находится АСС, размещается излучатель тестового сигнала.

Приведем описание двух различных методик последовательной обработки информации, регистрируемой элементами АСС, позволяющих установить отказавший элемент.

**Методика 1**

Пусть на АСС падает плоская акустическая волна от источника тестового звукового сигнала. Вне зависимости от характера сигнала, для любых трех датчиков сети с номерами  $i, j, k$ , образующих треугольник, выполняется условие замкнутости [6]

$$\tau_{ij} + \tau_{jk} + \tau_{ki} = 0,$$

где  $\tau_{ij}, \tau_{jk}, \tau_{ki}$  — разность времени прихода (РВП или же **TDOA** — time difference of arrival, что употребляется чаще) полезного сигнала на соответствующие пары датчиков.

В сети существует  $C_N^2 = N(N-1)/2$  пар сенсоров и  $C_N^3$  треугольников. Значения **TDOA** обычно находят по максимуму взаимнокорреляционной функции (**ВКФ**), рассчитываемой для каждой пары датчиков [7, с. 906]. Для фоновых шумов, принимаемых сенсорами, в силу их пространственной некоррелированности условие замкнутости не выполняется. Для треугольника из сенсоров с номерами  $i, j, k$  можно построить пороговую функцию

$$\Delta_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если } \tau_{ij} + \tau_{jk} + \tau_{ki} \leq Th, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где  $Th$  — некоторый порог, в качестве которого можно выбрать среднеквадратическое отклонение отношений замкнутости от нуля для всех треугольников, образуемых  $N$  датчиками сети  $S_N$ :

$$\begin{cases} Th = \sqrt{\frac{1}{C_n^3} \sum_{i>j>k} \tau_{ijk}^2}, \\ \tau_{ijk} = \tau_{ij} + \tau_{jk} + \tau_{ki} \quad (i, j, k \in R_n). \end{cases}$$

Теперь построим индикаторную функцию

$$Ind(i, j) = \sum_k \Delta_{ijk} \quad (k \in M - \{i, j\}),$$

где  $M$  — множество номеров всех сенсоров сети.

Сформируем множество индикаторных функций для каждого сенсора сети:

$$IND(i) = \{Ind(i, j), i \in M - \{i\}, j \in M - \{i\}\}.$$

При наличии отказавшего сенсора с номером, например,  $l$  все **TDOA**, определенные при его участии, будут неверными и, соответственно, будут иметь нулевую индикаторную функцию  $Ind$ .

Последовательность выполнения оперативно-го контроля в соответствии с изложенным принципом следующая.

1. Создается эталонное поле тестового акустического сигнала, при этом источник сигнала должен находиться на достаточном удалении от АСС, чтобы выполнялось условие плоской волны для любой пары сенсоров.

2. Определяется **TDOA** для каждой пары сенсоров.

3. Формируется:

— пороговая функция  $\Delta_{ijk}$  для каждого треугольника сети;

— индикаторная функция  $Ind(i, j)$ ;

— множество индикаторных функций  $IND(i)$ .

4. По всему множеству индикаторных функций проводится поиск подмножества  $IND(fault)$ , в котором все элементы нулевые, что и укажет на номер  $l=fault$  отказавшего сенсора.

Поскольку на практике в силу конструктивных особенностей теплотехнического агрегата не всегда удается расположить излучатель тестового сигнала на достаточном удалении от АСС, чтобы выполнялось условие 1, рассмотрим другую методику.

**Методика 2**

Для АСС, состоящей из  $N$  приемников, для каждой четверки (пирамиды) не лежащих в одной плоскости датчиков с координатами  $(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j), (x_k, y_k, z_k), (x_l, y_l, z_l)$  можно построить систему гиперболических уравнений [8]

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \\ & - \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2 + (z_0 - z_j)^2} = c\tau_{ij}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \\ & - \sqrt{(x_0 - x_k)^2 + (y_0 - y_k)^2 + (z_0 - z_k)^2} = c\tau_{ik}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \\ & - \sqrt{(x_0 - x_l)^2 + (y_0 - y_l)^2 + (z_0 - z_l)^2} = c\tau_{il}, \end{aligned}$$

$$i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, N; l = 1, \dots, N; \\ i \neq j \neq k \neq l,$$

где  $x_0, y_0, z_0$  — известные координаты источника тестового сигнала;

$c$  — скорость звука в воздушной среде ( $c=341$  м/с).

Из рассмотрения исключаются четверки датчиков, лежащие в одной плоскости:

$$x_i = x_j = x_k = x_l \vee y_i = y_j = y_k = y_l \vee z_i = z_j = z_k = z_l \vee i, j, k, l \in [1, \dots, N].$$

Решение системы уравнений с определением **TDOA**  $\tau_{ij}$  по максимуму **ВКФ** [9] дает век-

тор координат источника тестового сигнала  $\mathbf{R}(x, y, z)$ . В условиях действия шумов этот вектор представляет собой статистическую оценку для каждого измерения. При известном расположении источника тестового сигнала известен вектор координат  $\mathbf{R}_0(x_0, y_0, z_0)$ . Тогда при многократно повторяющихся измерениях можно построить ковариационную матрицу оценки координат источника

$$\hat{\mathbf{N}}(\mathbf{R}) = [(\hat{\mathbf{R}} - \mathbf{R}_0)(\mathbf{R} - \mathbf{R}_0)^T].$$

Геометрически ковариационная матрица оценки координат источника может быть интерпретирована как доверительный эллипсоид, т. е. эллипсоид, внутри которого с заданной вероятностью укладываются все случайные оценки вектора  $R(x, y, z)$  [10, с. 363]. Для геометрического построения доверительного эллипсоида ковариационную матрицу необходимо привести к диагональному виду:

$$\hat{\mathbf{N}}_D(\mathbf{R}) = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix},$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  — соответственно, среднеквадратические ошибки оценивания координат источника  $x, y, z$ , являющиеся полуосями доверительного эллипсоида.

Для приведения матрицы к диагональному виду применим эйлерову матрицу плоских вращений [11, с. 172]:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\varphi) \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_x(\psi),$$

где  $\mathbf{R}_z(\varphi), \mathbf{R}_y(\theta), \mathbf{R}_x(\psi)$  — соответственно, вращения вокруг осей  $z, y, x$  на угол  $\varphi, \theta, \psi$ .

Запишем матрицы вращений:

$$\mathbf{R}_z(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}_x(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}.$$

Результирующая матрица вращения имеет следующий вид:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{11} & \mathbf{R}_{12} & \mathbf{R}_{13} \\ \mathbf{R}_{21} & \mathbf{R}_{22} & \mathbf{R}_{23} \\ \mathbf{R}_{31} & \mathbf{R}_{32} & \mathbf{R}_{33} \end{bmatrix},$$

а в развернутом виде она представлена внизу страницы.

Углы вращения запишем как

$$\theta = -\arcsin \mathbf{R}_{31};$$

$$\psi = \arctg \left( \frac{\mathbf{R}_{32}}{\cos \theta} / \frac{\mathbf{R}_{33}}{\cos \theta} \right);$$

$$\varphi = \arctg \left( \frac{\mathbf{R}_{21}}{\cos \theta} / \frac{\mathbf{R}_{11}}{\cos \theta} \right).$$

После применения к корреляционной матрице процедуры эйлеровых вращений можно построить эллипсоид вращения с полуосями  $l_x = \sqrt{k\sigma_x^2}, l_y = \sqrt{k\sigma_y^2}, l_z = \sqrt{k\sigma_z^2}$  и затем найти его объем:

$$V^{el} = 4/3 \cdot \pi l_x l_y l_z.$$

Коэффициент  $k$  рассчитывается в предположении трехмерного нормального распределения ошибок оценивания координат. Вероятность того, что источник лежит внутри доверительного эллипсоида, равна

$$P^{el} = \operatorname{erf}(\sqrt{k}/2) - (\sqrt{2k}/\pi) \cdot \exp(-K/2),$$

где  $\operatorname{erf}(\dots)$  — функция ошибок (интеграл Лапласа). Значения коэффициента функции ошибок  $K$  для различных значений доверительной вероятности приведены в табл. 1 [10, с. 365].

Во всех преобразованиях, приведенных выше, не требуется расположение тестового источника звука в дальнем поле, т. е. он может быть расположен в непосредственной близости от АСС.

Таблица 1

Вероятность, %	$K$
99	13,89702713
95	8,934259824
90	6,922544695
85	5,766298681
80	4,949459443
75	4,314831079

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi & \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi & \sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi \\ -\sin \theta & \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta \end{bmatrix}.$$

Методика контроля для этого случая может быть реализована следующим образом.

1. Для каждой пирамиды, образованной сенсорами с номерами  $i, j, k, l$ , определяется положение источника тестового сигнала, строится ковариационная матрица, проводится ее диагонализация, рассчитывается объем доверительного эллипсоида.

2. Строится пороговая функция

$$\Delta_{ijkl} = \begin{cases} 1, & \text{если } V_{ijkl}^{el} \leq Th, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где  $Th$  — некоторый порог, в качестве которого выбирается среднее квадратическое значение доверительного эллипсоида для всех пирамид, образуемых  $N$  датчиками сети  $S_N$ :

$$Th = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{i,j,k,l} V_{ijkl}^{el}} \quad (i \neq j \neq k \neq l; i, j, k, l \in R_n),$$

где  $P = C_n^4 - M_{pl}$ ;

$M_{pl}$  — число четверок датчиков, лежащих в одной плоскости (исключаются из рассмотрения).

3. Формируется индикаторная функция

$$Ind(i, j, k) = \sum_l \Delta_{ijkl},$$

где  $l \in M - \{i, j, k\}$ ,  $M$  — множество номеров всех сенсоров сети.

4. Строится множество индикаторных функций для каждого сенсора сети:

$$IND(i) = \{Ind(i, j, k), i \in M - \{i\}, j \in M - \{i\}, k \in M - \{i\}\}.$$

5. По всему множеству индикаторных функций проводится поиск подмножества  $IND(fault)$ , в котором все элементы нулевые, что и укажет на номер  $i=fault$  отказавшего сенсора.

### Выбор тестового сигнала

Поскольку АСС эксплуатируются при достаточно низких значениях отношения сигнал/шум (ОСШ) (как правило, менее 5 дБ), серьезным вопросом при этом является выбор типа тестового сигнала, создающего эталонное поле. При низких значениях ОСШ требуется такой тестовый сигнал, который обеспечит достаточно узкий лепесток ВКФ и, соответственно, максимально точную оценку TDOA  $\tau_{ij}$ . Поэтому в качестве эталонного сигнала предлагается использовать кодовые последовательности, называемые кодами максимальной длины или  $M$ -последовательностями [12, с. 135], и фазоманипулированные сигналы, формируемые на их основе:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi ft + \pi/2 \cdot M(t)),$$

где  $A$  — амплитуда сигнала;

$f$  — несущая частота;

$M(t)$  — модулирующая  $M$ -последовательность.

В качестве модулирующей обычно применяется бинарная последовательность длиной  $n = 2m - 1$  элементов ( $m$  — порядок последо-

вательности), принимающая значения  $\{+1, -1\}$ .  $M$ -последовательность имеет узкий стрелообразный главный лепесток корреляционной функции и максимальный уровень боковых лепестков, равный  $1/\sqrt{n}$ .

### Компьютерный эксперимент

Для подтверждения работоспособности предложенных методик был поставлен компьютерный эксперимент. В качестве моделируемой АСС была выбрана система микрофонов, предназначенная для акустической диагностики течей теплоносителя в верхнем блоке ядерного реактора ВВЭР-1000 по шуму истечения. Конфигурация сети приведена на рис. 1.

#### Методика 1

Для исследования методики оценим количественно условия формирования поля плоской волны на АСС. Можно показать, что при расположении источника звука на расстоянии  $r$  от приемной системы локально плоская волна в пределах характерного размера приемной системы с фазовой погрешностью, не превышающей  $\lambda/16$  ( $\lambda$  — длина волны), образуется при  $r \geq 2d^2/\lambda$ . Для показанной на рис. 1 АСС при расположении источника тестового сигнала на вертикальной оси системы и послышном контроле (последовательно по каждому плоскому кольцу сенсоров) характерный размер  $d$  равен диаметру кольца (5,5 м). Полагая, что скорость звука в воздухе равна 341 м/с, при частоте тестового сигнала  $f=40$  Гц получаем, что для формирования локально-плоской волны должно выполняться условие  $r > 7$  м. Очевидно, что такое требование создает определенные трудности при расположении источника звука в помещении АЭС.

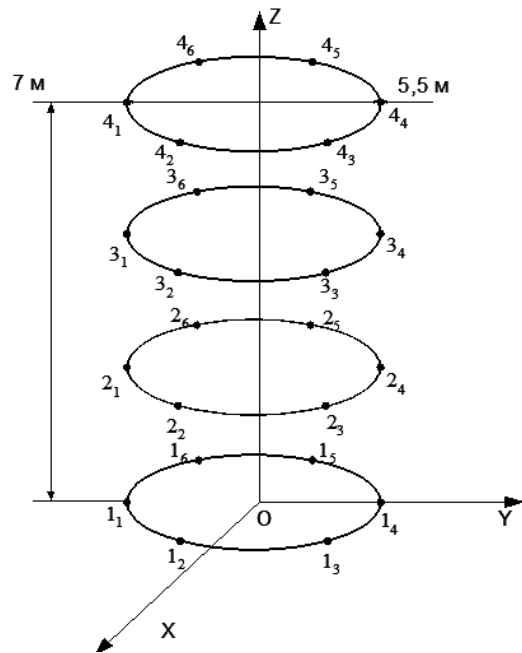


Рис. 1. Конфигурация АСС

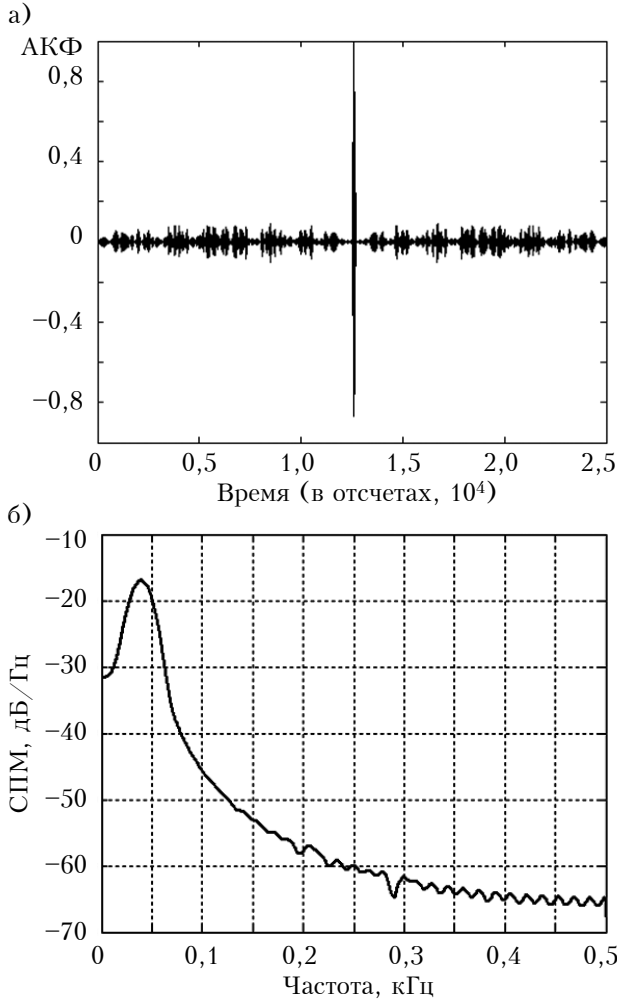


Рис. 2. Автокорреляционная функция (а) и спектральная плотность мощности (СПМ) (б) тестового сигнала для  $n=127$

На рис. 2 приведены автокорреляционная функция (АКФ) тестового сигнала и его спектр по Уэлчу.

В процессе эксперимента на тестовый сигнал накладывался аддитивный гауссов белый шум. Отказавший сенсор моделировался путем замены его истинного значения TDOA во всех образуемых им с остальными сенсорами парах на случайное значение задержки в диапазоне  $[-\tau_{\max}, \tau_{\max}]$ , где  $\tau_{\max}$  — максимально возможное значение TDOA для указанной геометрии задачи. Для каждого значения ОСШ в диапазоне от 5 до -15 дБ и случайного расположения отказавшего сенсора описанная выше процедура контроля повторялась 150 раз с различными вариантами реализации аддитивной смеси «сигнал + шум». Эксперимент показал, что при низких значениях ОСШ, когда структура фазоманипулированного сигнала практически скрыта шумом (рис. 3), максимум ВКФ достаточно хорошо выделяется, и это позволяет с достаточной точностью оценить требуемые TDOA.

Результаты эксперимента приведены в табл. 2, где под ошибкой I рода понимается признание

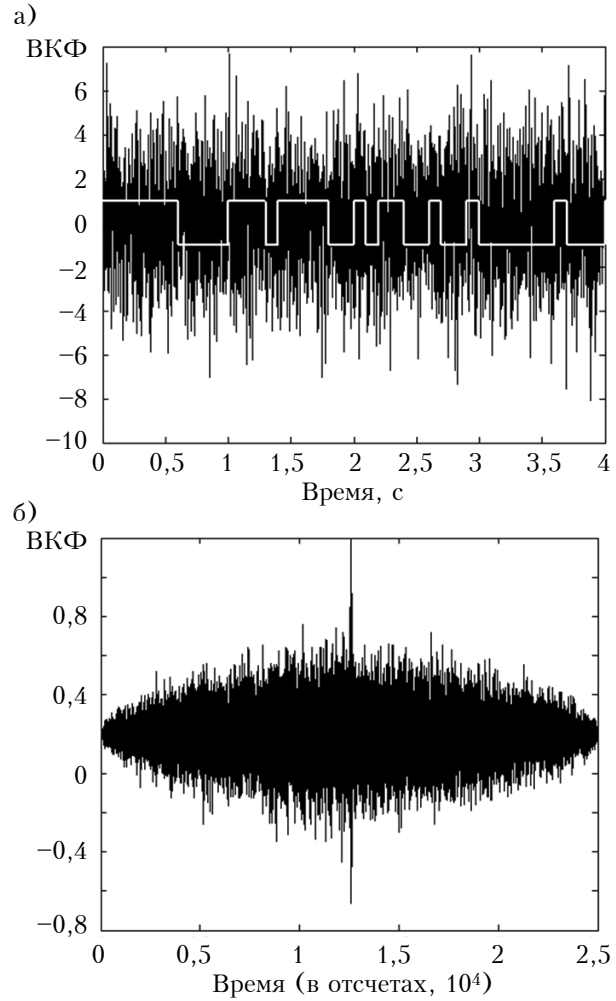


Рис. 3. Типичный вид зашумленного сигнала для низких ОСШ (слева) и ВКФ для пары сенсоров (ОСШ = -8 дБ,  $n=127$ )

отказавшего датчика исправным, под ошибкой II рода — признание исправного датчика отказавшим. Общее время контроля АСС на программно-аппаратной платформе CPU: Intel Core i5 2450M 2.5 ГГц; RAM: 6 ГБ DDR3 1300 МГц; ОС: Win7, Matlab 7.1 составляло 5–7 мин.

При отношениях сигнал/шум ниже -10 дБ точность оценивания TDOA резко падает для

Таблица 2  
Показатели качества методики 1 в зависимости от ОСШ

ОСШ, дБ	Вероятность ошибки	
	I рода	II рода
5	0	0
0	0	0
-3	0	0
-5	0	0
-10	0,08	0,04
-15	0,17	0,04

данного тестового сигнала, и достоверность контроля становится неудовлетворительной. Все описанные модельные эксперименты были выполнены для  $M$ -последовательностей длиной от  $n=31$  ( $m=5$ ) до  $n=2047$  ( $m=110$ ). Установлено, что, начиная с  $m=7$  и более, на данной несущей частоте длина последовательности практически не влияет на результативность контроля.

*Методика 2*

При моделировании методики 2 предполагалось, что источник тестового сигнала располагается на вертикальной оси АСС на 1 м выше верхнего кольца сенсоров. Отказ моделировался так же, как и для методики 1.

На рис. 4 приведены типичные формы доверительного эллипсоида для пирамиды из четы-

рех исправных датчиков и при отказе одного из них при ОСШ = -5 дБ и доверительной вероятности 0,95 ( $K=8,934259824$ ). Из рисунка видно, что при параметрическом отказе одного из датчиков четверки объем доверительного эллипсоида резко увеличивается (с 0,04 до 28,36 м<sup>3</sup>).

При моделировании методики 2 было установлено, что устойчивые результаты для оценки ковариационной матрицы требуют не менее 30 испытаний для каждой четверки датчиков, и с учетом того, что  $P = C_n^4 - M_{pl} \approx 7500$ , общее время тестирования АСС на указанной выше программно-аппаратной платформе составляет примерно 4 ч.

Общие результаты эксперимента приведены в табл. 3.

Таблица 3  
Показатели качества методики 2  
в зависимости от ОСШ

ОСШ, дБ	Вероятность ошибки	
	I рода	II рода
5	0	0
0	0	0
-3	0	0
-5	0,04	0
-10	0,12	0,04
-15	0,12	0,08

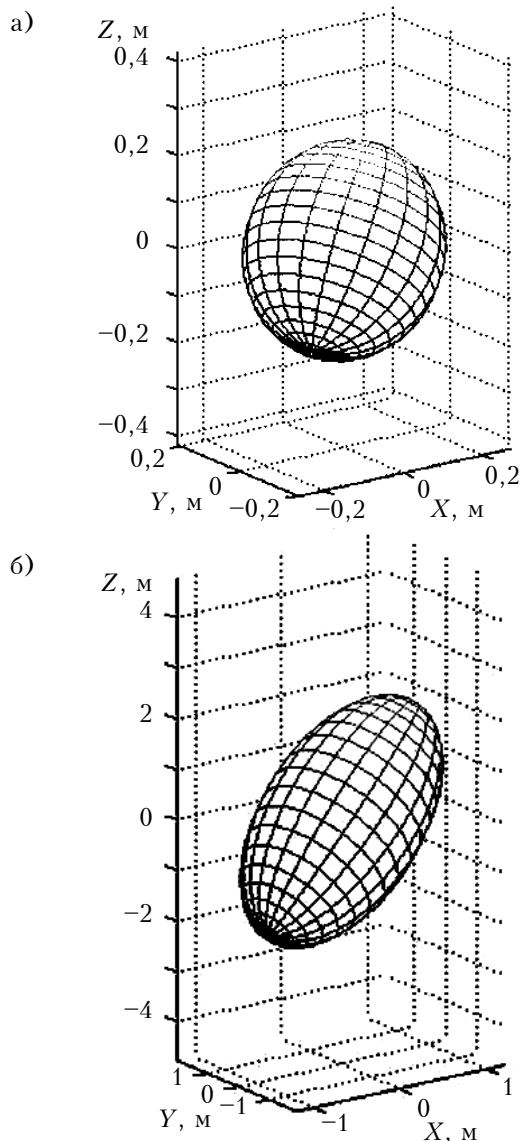


Рис.4. Типичные формы доверительного эллипсоида для пирамиды микрофонов 4<sub>1</sub>2<sub>1</sub>2<sub>3</sub>2<sub>5</sub>:  
а – все микрофоны исправны ( $\sigma_x=0,20$  м,  $\sigma_y=0,21$  м,  $\sigma_z=0,23$  м,  $V^{el}=0,04$  м<sup>3</sup>); б – отказ микрофона 4<sub>1</sub> ( $\sigma_x=1,41$  м,  $\sigma_y=1,54$  м,  $\sigma_z=3,76$  м,  $V^{el}=28,36$  м<sup>3</sup>)

Таким образом, с точки зрения реализации системы мониторинга течей на верхнем блоке ВВЭР предложенная методика 2 более предпочтительна, поскольку излучатель эталонного поля можно расположить достаточно близко к АСС. Требования и ресурсы, необходимые для создания эталонного поля, для обеих методик практически одинаковы: это размещение резервированного электродинамического излучателя в помещении АЭС и компьютерный ресурс средней производительности для решения задачи идентификации отказавшего сенсора. При работе энергоблока АЭС в базовом режиме полученная оценка времени для идентификации отказавшего сенсора вполне приемлема.

**Заключение**

Изложенные результаты позволяют заключить, что с помощью обеих предложенных методик оперативного контроля состояния АСС можно выявить одиночные параметрические отказы сенсоров с высокой достоверностью при достаточно малых отношениях сигнал/шум. Показатели качества контроля методик практически одинаковы, однако каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Так, методика 1 позволяет осуществить контроль достаточно быстро, но требует расположения тестового излучателя на большом удалении от АСС, что не

всегда возможно по технологическим соображениям. Методика 2 позволяет располагать тестовый излучатель достаточно близко, однако требует длительного времени контроля. Поэтому вопрос о применении той или другой методики должен решаться для конкретной технологической ситуации.

Дальнейшие исследования будут направлены на сокращение времени контроля, проводимого по методике 2, путем распараллеливания обработки измерительной информации, а также на проведение исследований с другими типами сложных тестовых сигналов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гетман А.Ф. Концепция безопасности (течь перед разрушением) для сосудов и трубопроводов давления АЭС. — Москва: Энергоатомиздат, 1999.
2. Geiger G. State-of-the-art in leak detection and localization // Oil and Gas European Magazine. — 2006. — N 4. — P. 193–198.
3. Huseynov J., Baliga S, Dillencourt M., Bic L., Bagherzadeh N. Gas-leak localization using distributed ultrasonic sensors // Proc. SPIE 7293 “Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems”. — 2009. — 72930Z. — DOI: 10.1117/12.812058.
4. Tae-Joon K., Yughay V. S., Sung-Tai H. et al. Advantages of acoustic leak detection system development for KALIMER steam generators // Journal of the Korean Nuclear Society. — 2001. — Vol. 33, N 4 — P. 423–440.

5. Leonardi M., Gasbarra M., Galati G. Integrity monitoring for multilateration system: design and performance evaluation. // Symposium ESAVS 2010 “Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications”. — Berlin, Germany. — 2010. — P. 273–282.
6. Pirinen T.W., Yli-Hietanen J., Pertila P., Visa A. Detection and compensation of sensor malfunction in time delay based direction of arrival estimation // Proc. International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS '2004). — Vancouver. — 2004. — P. 872–875.
7. Havelock D., Kuwano S. Vorlander M. Handbook of Signal Processing in Acoustics. — New York: Springer-Verlag, 2009. — 1950 p.
8. Болтенков В.А., Аль-Джасри Г.Х.М. Исследование акустических систем мониторинга течей теплоносителя. // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво — 2015. — № 20. — С. 16–22.
9. Болтенков В. А., Королев А. В., Максимов М. В., Маслов О. В. Алгоритмы обработки информации при акустическом бесконтактном поиске протечек на верхнем блоке реактора ВВЭР-1000 // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2009. — № 3. — С. 67–72.
10. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. — Москва: Радио и связь, 1993.
11. Лурье А.И. Аналитическая механика. — Москва: Физматлит, 1961.
12. Ipatov V.P. Spread spectrum and CDMA. Principles and applications. — N.Y.: John Willy & Sons, 2004.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 28.04 2015 г.

В. О. БОЛТОНКОВ, Г. Х. М. АЛЬ-ДЖАСРИ

Україна, Одеський національний політехнічний університет  
Email: vaboltentkov@mail.ru

ОПЕРАТИВНИЙ КОНТРОЛЬ СТАНУ АКУСТИЧНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

*Описано дві методики оперативного контролю стану акустичних сенсорних мереж, що пропонуються для моніторингу течі теплоносія в енергогенеруючому обладнанні. Методики засновані на створенні в межах мережі звукового поля еталонного джерела. Як тестовий використовується фазоманіпульований сигнал на основі M-послідовності. Працездатність і високі показники якості контролю підтверджені комп'ютерним експериментом.*

*Ключові слова: акустична сенсорна мережа, технічна діагностика, M-послідовність.*

DOI: 10.15222/TKEA2015.2-3.39  
UDC 621.313:004.9

V.A. BOLTENKOV, G. Kh. M. AL-JASRI  
Ukraine, Odessa National Polytechnic University  
Email: vaboltentkov@mail.ru

OPERATIONAL MONITORING OF ACOUSTIC SENSOR NETWORKS

*Acoustic sensor networks (ASN) are widely used to monitor water leaks in the power generating systems. Since the ASN are used in harsh climatic conditions the failures of microphone elements of ASN are inevitable. That's why the failure detection of ASN elements is a problem of current interest. Two techniques of operational monitoring ASN are developed. Both of them are based on the placement of the test sound source within a network. The signal processing for ASN sensors had to detect the failed element. Techniques are based time difference of arrival (TDOA) estimating at the each pair of ASN elements. TDOA estimates as argmaximum of cross-correlation function (CCF) for signals on each microphone sensors pair. The M-sequence phase-shift keyed signal is applied as a test acoustic signal to ensure high accuracy of the CCF maximum estimation*

at low signal/noise ratio (SNR). The first technique is based on the isolation principle for TDOA sum at three points. It require to locate the test sound source in the far field. This is not always possible due to technological reasons. For the second proposed technique test sound source can be located near the ASN. It is based on a system of hyperbolic equations solving for each of the four elements of the ASN. Both techniques has been tested in the computer imitation experiment. It was found that for the SNR to  $-5$  dB both techniques show unmistakable indicators of control quality. The second method requires significantly more time control.

Keywords: acoustic sensor network, technical diagnostics, the M-sequence.

REFERENCES

1. Getman A.F. *Kontseptsiya bezopasnosti (tech' pered razrusheniem) dlya sudov i truboprovodov davleniya AES* [«Leak Before Break» Safety Concept for NPP Pressure Vessels and Piping]. Moscow, Energoatomizdat, 1999, 256 p. (Rus)
2. Geiger G. State-of-the-Art in Leak Detection and Localization. *Oil and Gas European Magazine*, 2006, no 4, pp. 193-198.
3. Huseynov J., Baliga S., Dillencourt M., Bic L., Bagherzadeh N. Gas-leak Localization Using Distributed Ultrasonic Sensors. *Proc. SPIE 7293 "Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems"*, 2009, 72930Z. DOI:10.1117/12.812058.
4. Tae-Joon K., Yughay V. S., Sung-Tai H., Kyung-Chai J., Jong-Hyeun C. Advantages of Acoustic Leak Detection System Development for KALIMER Steam Generators. *Journal of the Korean Nuclear Society*, 2001, vol. 33, no. 4, pp. 423-440.
5. Leonardi M., Gasbarra M., Galati G. Integrity monitoring for multilateration system: design and performance evaluation. *Symposium ESAVS 2010, Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications*, Berlin, Germany, 2010, pp. 273-282.
6. Pirinen T. W., Yli-Hietanen J., Pertila P., Visa A. Detection and compensation of sensor malfunction in time delay based direction of arrival estimation. *Proc. of the 2004 International Symposium on Circuits and Systems ISCAS '2004*, Vancouver, 2004, pp. 872-875.
7. Havelock D., Kuwano S., Vorlander M. *Handbook of Signal Processing in Acoustics*, New York, Springer-Verlag, 2009, 1950 p.
8. Boltanov V.A., Al-Jasri G. K. M. [The study of acoustic coolant leak monitoring systems]. *Komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, 2015, no. 20, pp. 16-22. (Rus)
9. Boltanov V. A., Korolev A. V., Maksimov M. V., Maslov O. V. [Information processing algorithms for acoustic contactless finding leaks on the upper block of the VVER-1000]. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2009, no. 3, pp. 67-72. (Rus)
10. Chernyak V.S. *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya* [The Multiposition Radar]. Moscow, Radio i Svyaz', 1993, 416 p. (Rus)
11. Lurje A.I. *Analiticheskaya mekhanika* [The Analytical Mechanics]. Moscow, Fizmatlit, 1961, 824 p. (Rus)
12. Ipatov V.P. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*, N.Y., John Willy & Sons, 2004, 398 p.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук  $A_3B_5$ .— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.**

Проаналізовано фізичні основи створення напівпровідникових тензорезистивних датчиків механічних величин. Наведено характеристики тензорезисторів на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук  $A_3B_5$  та результати досліджень впливу електронного опромінення на властивості ниткоподібних кристалів кремнію. Розглянуто технологічні основи виготовлення датчиків механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію для різних температурних діапазонів, а також їх конструктивні особливості. Описано датчики тиску різного призначення та їхні характеристики, а також датчики зусилля і прискорення. Розглянуто можливості створення багатофункційних датчиків для вимірювання механічних і теплових величин.

Для наукових, інженерно-технічних працівників і студентів, які навчаються за напрямом “Мікро- та наноелектроніка”, а також широкого загалу спеціалістів у галузі сенсорної електроніки та мікроелектроніки.

