

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СВОБОДНЫХ, СЛАБОЗАКРЕПЛЕННЫХ И ПОСТОРОННИХ ПРЕДМЕТОВ В ГЛАВНОМ ЦИРКУЛЯЦИОННОМ КОНТУРЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ВОДО-ВОДЯНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕАКТОРОМ

И.В. Максимов¹

iv_maksimov@mail.ru

В.И. Павелко²

В.В. Перевезенцев¹

Е.Л. Трыков²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² АО «Научно-технический центр «Диапром», Москва, Российская Федерация

Аннотация

В реакторных установках с водо-водяным энергетическим реактором не исключено появление в главном циркуляционном контуре свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов. Эти предметы, перемещаясь в потоке теплоносителя, могут соударяться с внутренними стенками элементов главного циркуляционного контура, при этом происходит передача энергии конструкции реакторной установки. Удар инициирует в материале оборудования и трубопроводов нестационарную акустическую аномалию (всплеск акустического шума). Для обнаружения таких явлений реакторные установки с водо-водяным энергетическим реактором оснащают системами обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов, основанными на регистрации акустических сигналов на поверхности оборудования реакторной установки. Наличие значительного фонового шума в некоторых режимах работы энергоблока приводит к тому, что полезный сигнал удара может быть полностью маскирован. Рассмотрен метод выделения полезного сигнала, основанный на спектральном выбеливании. Приведены примеры его использования на данных, зарегистрированных от свободных и слабозакрепленных предметов реакторной установки водо-водяного энергетического реактора

Ключевые слова

Водо-водяной энергетический реактор, системы диагностики, система обнаружения свободных предметов, цифровая обработка сигналов

Поступила в редакцию 07.06.2017
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Одна из потенциальных угроз безопасности реакторных установок (РУ) с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) — появление в главном циркуляционном контуре (ГЦК) свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов (ССП). Раннее обнаружение наличия СПП позволяет избежать серьезного повреждения оборудования ГЦК вследствие контакта или удара между СПП и частями ГЦК. При соударении СПП с оборудованием ГЦК генерируется ударный

акустический сигнал, который в условиях работы оборудования РУ может быть замаскирован фоновым шумом. Таким образом, одной из проблем обнаружения ССП является выделение полезного акустического сигнала из этого шума.

Получение информации о наличии ССП в контуре циркуляции теплоносителя (ТН) начинается с его обнаружения. Алгоритм обнаружения должен наилучшим образом выделить необходимую информацию о сигнале из совокупности самого сигнала, шумов и различных помех. Современный этап построения методик автоматического обнаружения основан на теоретической работе Фрейберга [1], в которой были использованы критерий Неймана — Пирсона и усреднение сигнала для получения лучшего отношения сигнал/шум (ОСШ). Первым практическим применением этого подхода являются детекторы, основанные на анализе отношения среднеквадратических значений (СКЗ) в коротком и длинном временных окнах, которым моделируется ОСШ.

Метод, основанный на СКЗ, был усовершенствован в работе [2], где использован метод шумоподавления, базирующийся на вейвлет-преобразовании для предварительной обработки сигнала. Затем взвешенное по времени СКЗ сравнивалось с пороговым значением. Это уменьшает вероятность ложных тревог, но результат не идеален при низких значениях ОСШ. Метод, основанный на сингулярном разложении и вейвлет-преобразовании для подавления фоновых шумов, был использован в работе [3].

Метод обнаружения, основанный на функции распределения плотности вероятности сигнала и максимума отношения правдоподобия, предложен в работах [4, 5]. Этот метод дает хорошие результаты, но для его применения необходима предварительная статистика всех видов ударных воздействий, что ограничивает его применимость.

С учетом того, что частотный спектр ударного сигнала шире спектра фонового шума, был разработан метод выделения сигналов, основанный на частотном распределении с использованием нейронной сети для принятия решения [6]. Опираясь на те же характеристики сигнала, был предложен метод выделения ударного импульса с применением алгоритма собственных векторов и характеристик эксцесса [7]. Большое развитие получили авторегрессионные модели [8, 9]. Способ для ослабления фонового шума на основе адаптивных пороговых вейвлетов предложен в работе [10].

В настоящей работе предложен метод обнаружения акустических аномалий, основанный на адаптивном к фоновому шуму спектральном выбеливании сигналов.

Фоновый акустический шум. Во время эксплуатации энергоблока на поверхности ГЦК генерируется фоновый акустический шум, вызванный турбулентным потоком ТН и питательной воды, а также работой оборудования РУ, связанного с ГЦК. Значения фонового акустического шума в значительной степени зависят от режима работы энергоблока (рис. 1). Уровень (СКЗ) фонового шума высок в режимах разогрева/расхолаживания и незначителен в номинальном режиме.

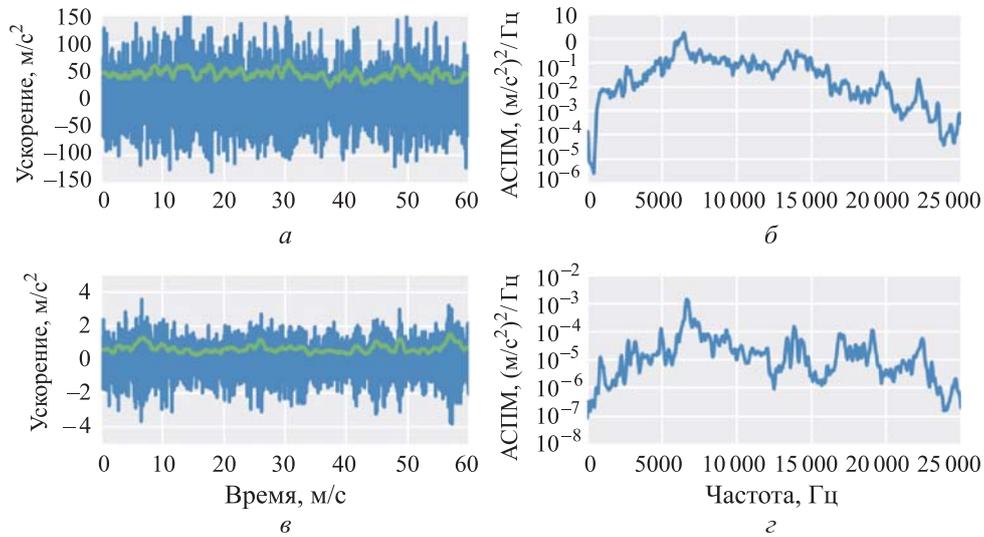


Рис. 1. Временные реализации и соответствующие автоспектральные плотности мощности фонового акустического шума, регистрируемого датчиками виброускорений вблизи работающего ГЦН при различных режимах работы РУ:

а, б — временные реализации сигналов и автоспектральные плотности мощности (АСПМ) в режиме разогрева энергоблока; *в, г* — временные реализации сигналов и АСПМ в номинальном режиме

Один из основных источников фонового акустического шума — главный циркуляционный насос (ГЦН). Фоновый акустический шум при низких температурах ТН (давлении в ГЦК) вблизи работающего ГЦН имеет достаточно большие значения, которые могут превышать 100 м/с^2 (рис. 2). По мере разогрева энергоблока фоновые значения монотонно уменьшаются и при достижении температуры около $200 \text{ }^\circ\text{C}$ изменяются незначительно с дальнейшим ее увеличением.

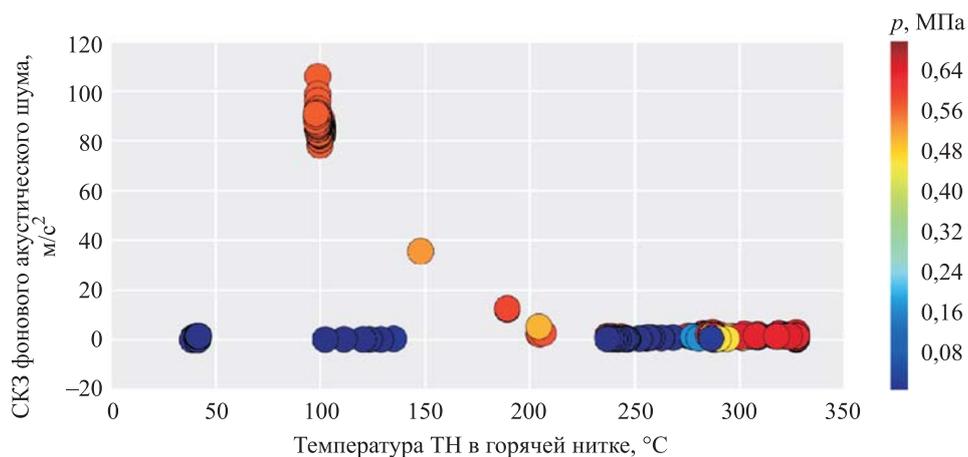


Рис. 2. Зависимость фонового акустического шума на ГЦН от температуры ТН (цветом обозначен перепад давления ТН на ГЦН, МПа)

Большинство ССП появляется при первом запуске ГЦН после планово-предупредительного ремонта. Значительная часть незакрепленных деталей быстро разрушается в результате взаимодействия с вращающимися деталями (лопастями ГЦН) или стенками ГЦК. Опыт показывает, что большинство малых и средних свободных предметов разрушается или застревает в естественных ловушках в течение первых 30 с после запуска ГЦН. Мелкие фрагменты ССП, образующиеся в результате разрушения ССП, отфильтровываются с помощью системы водоочистки (СВО), что приводит к необходимости менять фильтры СВО раньше запланированного времени. Они также могут переноситься потоком ТН в активную зону реактора, где способны повреждать оболочки тепловыделяющих элементов. Известны случаи, когда мелкие частицы застревают между движущимися элементами в активной зоне реактора (направляющие каналы стержней органов регулирования системы управления и защиты) [11]. Наличие значительного фонового акустического шума в моменты запуска ГЦН при разогреве энергоблока, когда появление ССП наиболее вероятно, приводит к тому, что сигнал контакта ССП с поверхностью ГЦК может быть полностью замаскирован, что затрудняет его обнаружение и последующий анализ, если удар слабый или удален от датчика.

Алгоритм выбеливания. Преобразование помехи (фоновый шум) с произвольным энергетическим спектром в гауссов белый шум представляет собой актуальную задачу во многих областях техники. В тех случаях, когда помеха на выходе канала связи не является белым шумом (см. рис. 1), необходимо на входе принимающего устройства включить так называемый выбеливающий фильтр, который преобразует произвольную помеху в белый шум. При этом следует помнить, что поскольку через этот фильтр пропускается аддитивная смесь полезного сигнала и помехи, наряду с выбеливанием спектра помехи происходит искажение полезного сигнала. Однако при определенных условиях такие искажения могут быть несущественными.

Выбеливание сигнала тесно связано с понятием оптимального фильтра, его характеристиками (см., например, [12]), когда на вход линейной цепи воздействует аддитивная смесь сигнала $s(t)$ и стационарного гауссова шума $n(t)$ со спектральной плотностью мощности $N(\omega)$:

$$\xi(t) = s(t) + n(t).$$

При этом выходной сигнал в силу линейности оптимального фильтра имеет вид

$$\xi_{\text{вых}}(t) = s_{\text{вых}}(t) + n_{\text{вых}}(t).$$

В этом случае можно рассматривать отдельно преобразование сигнала и шума, а отклик цепи также является аддитивной смесью сигнала и шума. В качестве характеристики, определяющей соотношение сигнала и шума на выходе цепи, принимается отношение максимального значения сигнала на выходе к среднеквадратическому отклонению шума:

$$q = \frac{\max |s_{\text{ВЫХ}}(t)|}{\sigma_{\text{ВЫХ}}}.$$

Введенная величина характеризует превышение максимального значения сигнала по отношению к СКЗ шума. Оптимальным фильтром, по критерию максимума ОСШ, называется линейная цепь, которая обеспечивает максимальное ОСШ на выходе: $q \rightarrow \max$. Характеристики такой цепи определяются видом сигнала и характеристиками шума. Спектральная плотность выходного сигнала имеет вид

$$S_{\text{ВЫХ}}(\omega) = S(\omega)H(\omega),$$

где $S(\omega)$ — спектральная плотность входного сигнала; $H(\omega)$ — спектральная характеристика оптимального фильтра.

Максимальное значение сигнала на выходе

$$\max |s_{\text{ВЫХ}}(t)| = \max \left| \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) H(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right| = \frac{1}{2\pi} \left| \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) H(\omega) e^{i\omega t_0} d\omega \right|.$$

Здесь t_0 — момент времени, когда сигнал на выходе достигает максимального значения. Дисперсия шума на выходе

$$\sigma_{\text{ВЫХ}}^2 = R_{\text{ВЫХ}}(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} N(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega,$$

где $N(\omega)$ — спектральная плотность мощности шума.

Отношение максимального значения сигнала к СКЗ шума

$$q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) H(\omega) e^{i\omega t_0} d\omega \right|}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} N(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega}}.$$

С учетом неравенства Коши — Буняковского — Шварца получим

$$q \leq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|S(\omega)|^2}{N(\omega)} d\omega}.$$

Правая часть этого неравенства дает верхнюю границу для максимально достижимого в классе линейных цепей ОСШ, которая определяется энергетическими спектрами сигнала и шума:

$$q_{\text{опт}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|S(\omega)|^2}{N(\omega)} d\omega}.$$

Преобразуем выражение для оптимального фильтра, который определен с точностью до константы k (далее для простоты предположим, что $k = 1$):

$$H(\omega) = k \frac{S^*(\omega)}{N(\omega)} e^{i\omega t_0} = k \frac{1}{\sqrt{N(\omega)}} \frac{S^*(\omega)}{\sqrt{N(\omega)}} e^{i\omega t_0} = H_1(\omega) H_2(\omega),$$

где $H_1(\omega) = \frac{1}{\sqrt{N(\omega)}}$ — фильтр, преобразующий сигнал в белый шум;

$H_2(\omega) = \frac{S^*(\omega)}{\sqrt{N(\omega)}} e^{i\omega t_0}$ — согласованный фильтр.

В рассматриваемой задаче информация о полезном сигнале отсутствует, поэтому согласованный фильтр не может быть использован. В настоящей работе рассмотрен только выбеливающий фильтр, применение которого тем не менее существенно упрощает работу с сигналами и их спектрами. Рассмотрим воздействие на выбеливающий фильтр аддитивной смеси сигнала и шума. Энергетический спектр шума на выходе

$$N_1(\omega) = |H_1(\omega)|^2 N(\omega) = N_0$$

равномерный, т. е. $H_1(\omega)$ преобразует шум на входе в белый шум и поэтому называется выбеливающим фильтром. Отметим, что фазочастотная характеристика выбеливающего фильтра может быть произвольной.

Определим спектр сигнала на выходе выбеливающего фильтра $H_1(\omega)$

$$S_1(\omega) = H_1(\omega) S(\omega) = \frac{S(\omega)}{\sqrt{N(\omega)}}.$$

Приведенная формула показывает, что выбеливающий фильтр $H_1(\omega)$ также изменяет и сам сигнал. Однако так как это линейное преобразование, полезные частоты сигнала сохраняются. Поскольку фильтр использует только плотность мощности фонового шума, соотношение спектральных энергий сигнала и фона на частотах сигнала сохраняется, а преобразованный шум выбеливается и подавляется. Если частотная характеристика фонового шума не совпадает с частотной характеристикой сигнала, то фактически сигнал очищается от воздействия фона. На тех участках спектра, где частоты сигнала перекрываются с фоновым шумом, ОСШ остается неизменным.

Результаты экспериментов. Для проверки предложенного метода были использованы ударные акустические эффекты, регистрируемые датчиками виброускорений на парогенераторе (ПГ) энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС (ВВЭР-1200). Датчики, регистрирующие акустический сигнал, расположены на горячем (ГК) и холодном (ХК) коллекторах ПГ и в верхней части корпуса ПГ между коллекторами. Временные реализации сигналов и соответствующие автоспектральные плотности мощности (АСПМ) сигналов датчиков, зарегистрировавших акустическую аномалию, показаны на рис. 3.

В рассматриваемом примере происходит разогрев энергоблока и работает ГЦН соответствующей петли. Уровень фонового акустического шума на ХК ПГ значительно превышает уровень на ГК и вверху ПГ (21 м/с² против 6 м/с² и

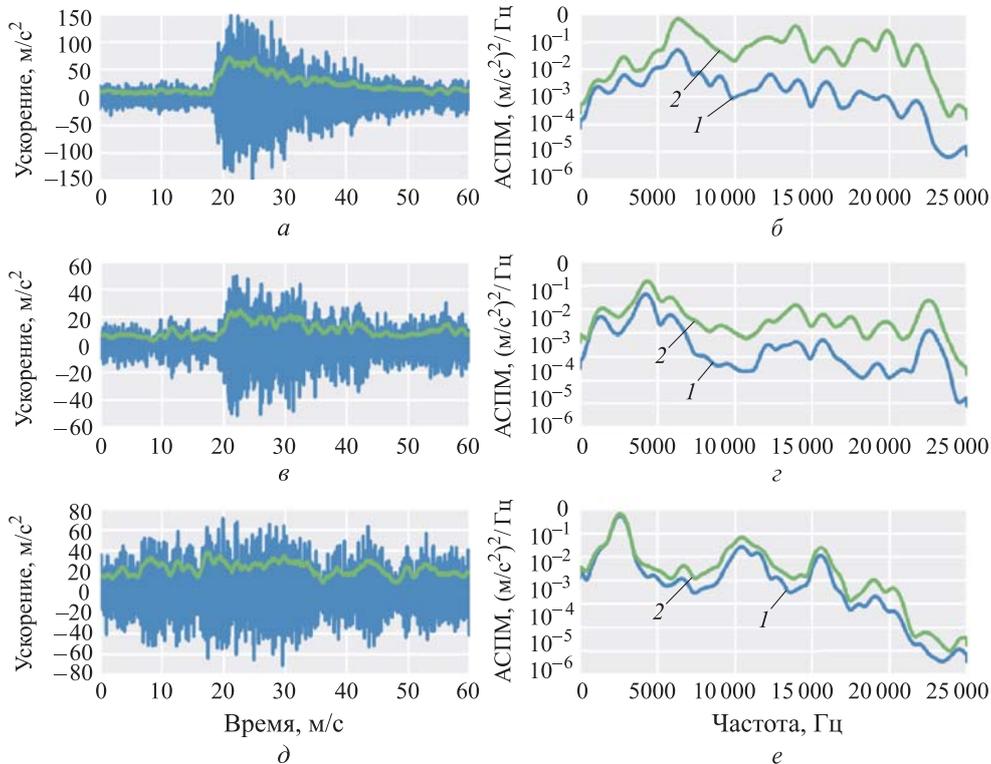


Рис. 3. Временные реализации и соответствующие АСПМ исходных сигналов события, связанного с действием технологической системы ПГ:

a, в, д — верх ПГ, горячий и холодный коллекторы ПГ; *б, г, е* — ОСШ = 36 (15,6 дБ), 7,8 (8,9 дБ), 0,0004 (−33,6 дБ); 1 — фон; 2 — фон+сигнал

9 м/с² соответственно). Поэтому всплеск акустического шума, различимый каналами наверху ПГ и ГК, полностью маскируется фоновым акустическим шумом на ХК, при этом ОСШ на ХК соответствует −33,6 дБ. Отношение сигнал/шум рассчитывалось как

$$\text{ОСШ}_{дБ} = 10 \lg \frac{P_{\text{фон+сигнал}} - P_{\text{фон}}}{P_{\text{фон}}},$$

где $P_{\text{фон+сигнал}}$ — АСПМ сигнала и фонового акустического шума; $P_{\text{фон}}$ — АСПМ фонового акустического шума.

После применения выбеливающего фильтра (рис. 4) спектр фонового акустического шума становится практически плоским, а шум превращается в гауссов белый шум с единичной дисперсией. Выделение всплеска полезного сигнала во временной области позволяет проводить более точную локализацию источника акустической аномалии.

При использовании выбеливающего фильтра вместе с увеличением ОСШ проявляются спектральные характеристики полезного сигнала, ранее замаскированные фоновым шумом. Так, на рис. 5 представлены АСПМ исходных и

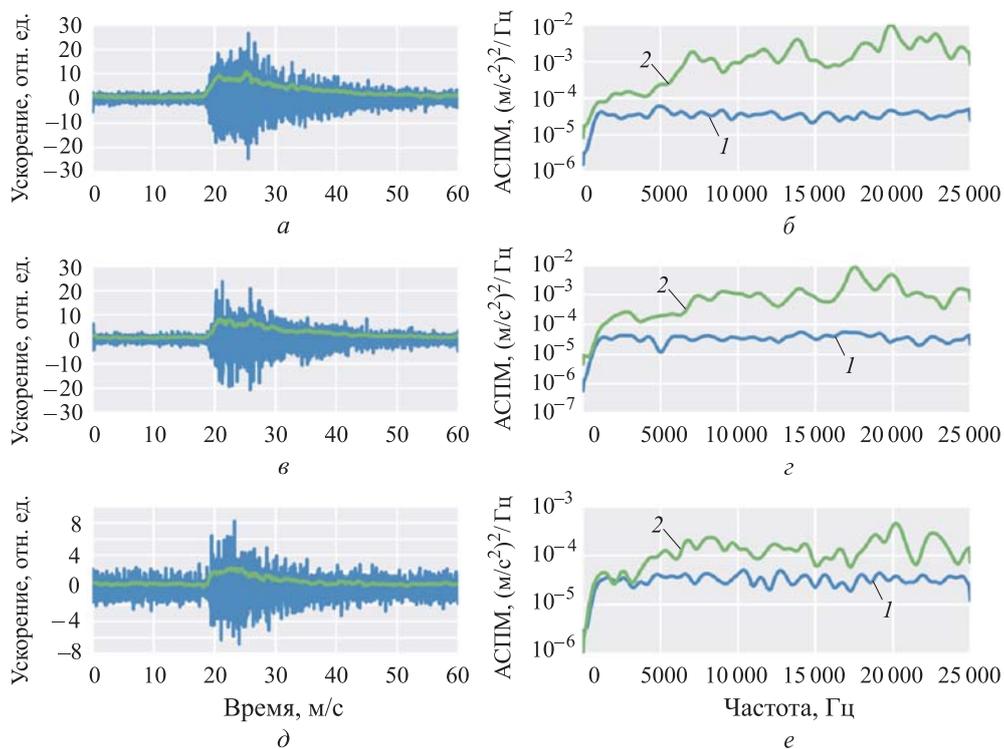


Рис. 4. Временные реализации и соответствующие АСПМ выделенных сигналов события, связанного с действием технологической системы ПГ:
а, в, д — верх ПГ, горячий и холодный коллекторы ПГ; *б, г, е* — ОСШ = 84,1 (19,3 дБ), 59,8 (17,8 дБ), 6,1 (7,8 дБ); 1 — фон; 2 — фон+сигнал

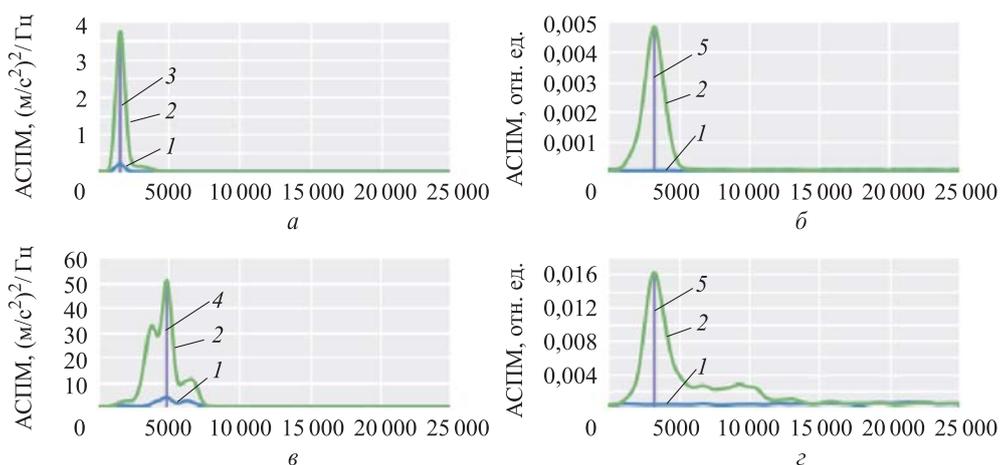


Рис. 5 (начало). Исходные АСПМ сигналов корпусных датчиков, вызванных ударом свободного предмета по днищу реактора (*а, в, д, ж*) и соответствующие АСПМ выделенных сигналов (*б, г, з, е, з*):

1 — фон; 2 — фон + сигнал; 3 — 1600 Гц; 4 — 4900 Гц; 5 — 3250 Гц; 6 — 3300 Гц

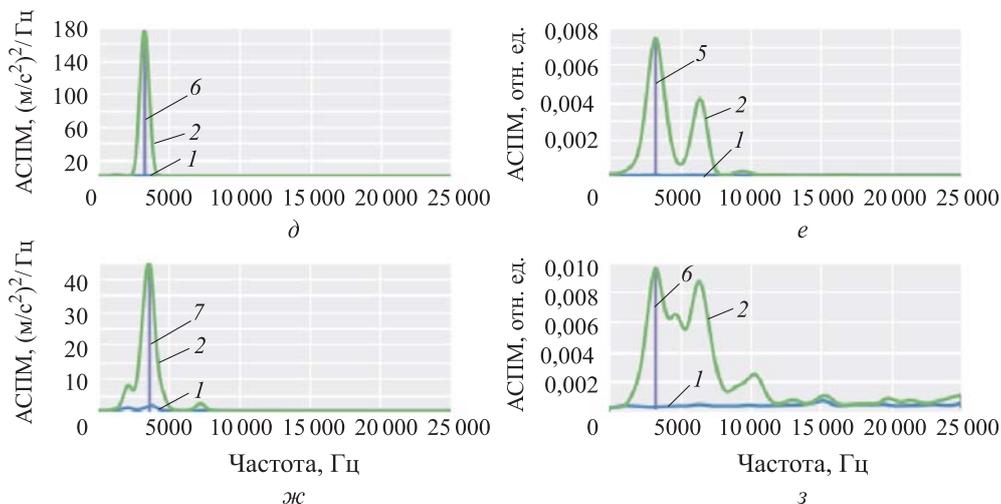


Рис. 5 (окончание). Исходные АСПМ сигналов корпусных датчиков, вызванных ударом свободного предмета по днищу реактора (а, в, д, ж) и соответствующие АСПМ выделенных сигналов (б, г, е, з):

1 — фон; 2 — фон + сигнал; 3 — 1600 Гц; 4 — 4900 Гц; 5 — 3250 Гц; 6 — 3300 Гц; 7 — 3600 Гц

выделенных сигналов датчиков на корпусе реактора, вызванных ударом свободного предмета, находившегося в районе днища реактора. Основные несущие частоты исходных сигналов довольно сильно различаются (1600...4900 Гц), в то время как после выбеливания сигнала основная несущая частота полезного сигнала выделяется в области 3 250 Гц. Выделение резонансных частот акустического эффекта полезно при определении массы источника акустической аномалии.

Выводы. Рассмотрен метод, основанный на спектральном выбеливании сигнала, с помощью которого можно реализовать алгоритм обнаружения ССП в контуре циркуляции ТН РУ ВВЭР. Предложенный метод позволяет выделить полезный сигнал даже при уровне ОСШ, достигающем -30 дБ. Применение этого метода полезно и в дальнейшем анализе сигналов, поскольку выделяются спектральные характеристики акустического эффекта, а также акустический всплеск во временной области, замаскированный фоновым акустическим шумом, который необходим для локализации источника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Freiburger W.F. An approximate method in signal detection // Quarterly Appl. Math. 1963. Vol. 20. No. 4. P. 373–378.
2. Fang L.X., Lou Y.J., Ni Y.H., Chen Z.Y. Application study on wavelet-transformation to alarming in loose parts monitoring system // Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology. 2004. Vol. 38. P. 432–435.
3. Figedy S., Oksa G. Modern methods of signal processing in the loose part monitoring system // Progress in Nuclear Energy. 2005. Vol. 46. Iss. 3-4. P. 253–267.
DOI: 10.1016/j.pnucene.2005.03.008

4. Szappanos G., Kiss J.J., Por G., Kiss J.M. Analysis of measurements made by HELPS loose part detection system during installation and operation periods // Progress in Nuclear Energy. 1999. Vol. 34. Iss. 3. P. 185–193. DOI: 10.1016/S0149-1970(98)00004-3
5. Por G., Kiss J., Sorosanszky I., Szappanos G. Development of a false alarm free, Advanced Loose Parts Monitoring System (ALPS) // Progress in Nuclear Energy. 2003. Vol. 43. Iss. 1-4. P. 243–251. DOI: 10.1016/S0149-1970(03)00034-9
6. Mao H.L., Huang Z.F., Cheng Z.Y. Artificial neural network alarm method based on signal time-frequency characteristics // Nuclear Power Engineering. 1998. Vol. 19. No. 3. P. 256–269.
7. Yang J., Yang B., Liu M., Cao Y. Detection method of loose parts in nuclear reactor based on eigenvector algorithm // Progress in Nuclear Energy. 2016. Vol. 91. P. 250–255. DOI: 10.1016/j.pnucene.2016.03.020
8. Alarming method of loose parts in nuclear power plant based on adaptive autoregressive model / J.X. Yang, H.W. Zheng, Y.L. Cao, et al. // Yuanzineng Kexue/Atomic Energy Science and Technology. 2010. Vol. 44. P. 701–705.
9. Cao Y., He Y., Zheng H., Yang J. An alarm method for a loose parts monitoring system // Shock and Vibration. 2012. Vol. 19. Iss. 4. P. 753–761. DOI: 10.1155/2012/891085
10. Yang B., Xia H., Zhang X.Y. Research on signal-noise separation in loose parts impact signal based on autonomous adaptive threshold wavelet packets // Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology. 2014. Vol. 48. P. 2045–2050.
11. Online monitoring for improving performance of nuclear power plants. Part 2: Process and component condition monitoring and diagnostics. Vienna: IAEA, 2008. 82 p.
12. Статистическая теория радиотехнических систем. URL: <http://strts-online.narod.ru> (дата обращения: 20.05.2017).

Максимов Иван Владимирович — аспирант кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Павелко Владимир Ильич — канд. техн. наук, заместитель генерального директора по науке АО «Научно-технический центр «Диапром» (Российская Федерация, 109518, Москва, ул. Газгольдерная, д. 14, офис 329).

Перевезенцев Владимир Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Трыков Евгений Львович — канд. техн. наук, начальник лаборатории АО «Научно-технический центр «Диапром» (Российская Федерация, 109518, Москва, ул. Газгольдерная, д. 14, офис 329).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Максимов И.В., Павелко В.И., Перевезенцев В.В., Трыков Е.Л. Метод выделения полезного сигнала для системы обнаружения свободных, слабозакрепленных и посторонних предметов в главном циркуляционном контуре реакторной установки с водо-водяным энергетическим реактором // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 1. С. 4–15. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-1-4-15

VALID SIGNAL ISOLATION METHOD FOR LOOSE PARTS MONITORING SYSTEM IN THE MAIN CIRCULATION CIRCUIT OF WWER REACTOR

I.V. Maksimov¹

iv_maksimov@mail.ru

V.I. Pavelko²

V.V. Perevezentsev¹

E.L. Trykov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

²Joint Stock Company "Scientific Technical Center Diaprom",

Moscow, Russian Federation

Abstract

Loose, poorly fastened and foreign parts are likely to appear in the main circulation circuit of WWER reactors. These parts carried by the coolant flow can collide with the inner walls of the main circulation circuit components transferring energy to the reactor hardware. The shock causes acoustic anomaly in the materials the equipment and pipelines are made of (a burst of acoustic noise). In order to detect such phenomena, WWER reactors are equipped with loose, poorly fastened and foreign parts monitoring systems (LPMS) based on recording acoustic signals on the surface of reactor equipment. The availability of significant background noise in certain power unit operating modes results in the valid shock signal being fully masked. The paper focuses on valid signal isolation method based on spectral whitening and provides examples of applying it to the data recorded by LPMS of WWER reactor

Keywords

WWER, diagnostic systems, loose parts monitoring system, digital signal processing

Received 07.06.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Freiburger W.F. An approximate method in signal detection. *Quarterly Appl. Math.*, 1963, vol. 20, no. 4, pp. 373–378.
- [2] Fang L.X., Lou Y.J., Ni Y.H., Chen Z.Y. Application study on wavelet-transformation to alarming in loose parts monitoring system. *Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology*, 2004, vol. 38, pp. 432–435.
- [3] Figedy S., Oksa G. Modern methods of signal processing in the loose part monitoring system. *Progress in Nuclear Energy*, 2005, vol. 46, iss. 3-4, pp. 253–267. DOI: 10.1016/j.pnucene.2005.03.008
- [4] Szappanos G., Kiss J.J., Por G., Kiss J.M. Analysis of measurements made by HELPS loose part detection system during installation and operation periods. *Progress in Nuclear Energy*, 1999, vol. 34, iss. 3, pp. 185–193. DOI: 10.1016/S0149-1970(98)00004-3
- [5] Por G., Kiss J., Sorosanszky I., Szappanos G. Development of a false alarm free, Advanced Loose Parts Monitoring System (ALPS). *Progress in Nuclear Energy*, 2003, vol. 43, iss. 14, pp. 243–251. DOI: 10.1016/S0149-1970(03)00034-9
- [6] Mao H.L., Huang Z.F., Cheng Z.Y. Artificial neural network alarm method based on signal timefrequency characteristics. *Nuclear Power Engineering*, 1998, vol. 19, no. 3, pp. 256–269.

- [7] Yang J., Yang B., Liu M., Cao Y. Detection method of loose parts in nuclear reactor based on eigenvector algorithm. *Progress in Nuclear Energy*, 2016, vol. 91, pp. 250–255.
DOI: 10.1016/j.pnucene.2016.03.020
- [8] Yang J.X., Zheng H.W., Cao Y.L., et al. Alarming method of loose parts in nuclear power plant based on adaptive autoregressive model. *Yuanzineng Kexue/Atomic Energy Science and Technology*, 2010, vol. 44, pp. 701–705.
- [9] Cao Y., He Y., Zheng H., Yang J. An alarm method for a loose parts monitoring system. *Shock and Vibration*, 2012, vol. 19, iss. 4, pp. 753–761. DOI: 10.1155/2012/891085
- [10] Yang B., Xia H., Zhang X.Y. Research on signal-noise separation in loose parts impact signal based on autonomous adaptive threshold wavelet packets. *Yuanzineng Kexue Jishu/Atomic Energy Science and Technology*, 2014, vol. 48, pp. 2045–2050.
- [11] Online monitoring for improving performance of nuclear power plants. Part 2: Process and component condition monitoring and diagnostics. Vienna, IAEA, 2008. 82 p.
- [12] Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh system [Statistical theory of radiotechnical systems] (in Russ.). Available at: <http://strts-online.narod.ru> (accessed: 20.05.2017).

Maksimov I.V. — post-graduate student, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Pavelko V.I. — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Director General for Science, Joint Stock Company "Scientific Technical Center Diaprom" (Gazgoldernaya ul. 14, office 329, Moscow, 109518 Russian Federation).

Perevezentsev V.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Trykov E.L. — Cand. Sc. (Eng.), Head of Laboratory, Joint Stock Company "Scientific Technical Center Diaprom" (Gazgoldernaya ul. 14, office 329, Moscow, 109518 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Maksimov I.V., Pavelko V.I., Perevezentsev V.V., Trykov E.L. Valid Signal Isolation Method for Loose Parts Monitoring System in the Main Circulation Circuit of WWER Reactor. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 1, pp. 4–15 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3933-2018-1-4-15