

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ АЕС НА ОСНОВІ НОВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В.О. Болтенков, М.В. Максимов, О.В. Маслов

Одеський національний політехнічний університет

65044 Одеса, просп. Шевченка, 1

Тел.: +380 482 288-440 Факс: +380 482 344-308

Електронна пошта: Galchenkov@od.goldentele.com

Abstract

The advanced diagnostic systems for NPP are discussed: leak diagnostic system and fuel diagnostic system. Leak diagnostic is based on two different principles — measuring activity of air surrounding place of leak (early leak detection) and detection of leak produced sound with distributed self-organizing net of microphone sensors (localization of leak place). Fuel burnup diagnostic is made by means of gamma-spectrometry with application of CdZnTe detectors. New technology to estimate fuel burnup in real time is proposed. The prospect of NPP diagnostic systems perfection is discussed.

1. Вступ

Ядерна енергетика є домінуючою енергогенеруючою технологією в Україні. Якщо у світовому енергетичному балансі доля енергії, що видобута АЕС, дорівнює в середньому 17%, в Україні цей показник становить біля 50%. У зв'язку з цим експлуатація АЕС потребує постійного наукового супроводу. Сьогодні в країні експлуатуються 13 енергоблоків типу ВВЕР. Усі вони потребують модернізації, дообладнання новими системами та усунення слабких місць, що виявили себе в процесі експлуатації. Проектними рішеннями на енергоблоках не були передбачені системи оперативної діагностики деяких видів пошкоджень, а саме течій в обладнанні АЕС. В той же час експлуатація демонструє, що саме течії є однією з причин позапланових зупинок блоків.

Збитки економіки держави від вимушених зупинок енергоблоків АЕС та їх роботи на понижених потужностях за компетентними оцінками в декілька разів перевищують витрати на реконструкцію та модернізацію енергоблоків, що дозволяє довести рівень їх експлуатації до рівня західних АЕС. Такі оцінки підтверджують економічну доцільність реконструкції та модернізації українських енергоблоків.

Іншою важливою проблемою для АЕС України є контроль ядерного палива (ЯП) на всьому протязі ядерного циклу. Це питання стає особливо актуальним в умовах організації самостійного

збереження відпрацьованого палива в сухих сховищах на території України. У зв'язку з цим потрібні системи оперативного контролю та діагностики ЯП на протязі всього його життєвого циклу.

Керуючись викладеним вище, можна зробити висновок про велику актуальність розробки та впровадження на АЕС систем діагностики течій в обладнанні та оперативної діагностики ядерного палива. У статті викладено наукові результати, що отримані на протязі останніх років у лабораторії "Атомспецавтоматика" Одеського національного політехнічного університету в галузі дослідження принципів побудови та практичної реалізації систем діагностики для АЕС України та інших країн, а також перспектив їхнього удосконалення шляхом застосування прогресивних алгоритмів обробки сигналів та новітніх інформаційних технологій.

2. Система діагностики течій.

2.1. Загальні положення

Діагностика течій в обладнанні АЕС базується на концепції "Течія перед руйнуванням" (LBB — Leak Before Break) [1]. Згідно з цією концепцією течія спричиняє подальше руйнування, яке може мати наслідки катастрофічного масштабу. Отже течія має бути визначеною на ранніх стадіях прояву. В першому контурі реактору ВВЕР-1000 теплоносієм знаходиться під тиском до 16 МПа при температурі до 320°C. Виток теплоносія може бути визначений за різними фізичними полями, що його супроводжують. Відомі системи, що визначають факт течії шляхом вимірювання вологості [2], шляхом візуального нагляду за місцем потенціального витoku за допомогою телевізійних камер [3], за підвищенням гамма-активності повітря в зоні контролю за рахунок виділення продуктів активації теплоносія [4], та також системи, що фіксують акустичні сигнали, якими супроводжується виток. Системи діагностики за акустичними сигналами поділяються на два класи: контактні, системи, тобто такі, де акустичні сенсори виявляють

ширококутові акустичні коливання в діапазоні частот (100...400) кГц, що виникають при течії та поширюються в матеріалі трубопроводу [5], та безконтактні, що визначають акустичні коливання, які поширюються в повітрі навколо течії [6].

Вологомірні системи мають досить високу чутливість (дають змогу виявити течію з витратою близько 70 літр/годину), але не дають змоги визначити координати місця течії. Окрім того обладнання для відбору проб повітря для систем такого класу є дуже коштовним і складним у монтажі. Системи візуального нагляду фактично потребують постійної участі оператора, оскільки на сьогодні вони не мають реальних перспектив автоматизації. Системи контролю активності високочутливі (їхня чутливість складає (3...60) літр/годину), але теж не дають змоги оцінити місце течії.

Щодо акустичних систем діагностики течій, слід зазначити таке. Контактні системи мають середню чутливість — (60...300) літр/годину — але для визначення місця течії з потрібною похибкою потребують розміщення акустичних сенсорів практично на кожному з трубопроводів, що контролюються. Отже для одного об'єкту контролю число сенсорів (і відповідно ліній зв'язку) може сягати десятків-сотен. При високій коштовності системи (ціна її при такій конфігурації може становити мільйони євро [1]) вона повністю втрачає свою експлуатаційну надійність, а під час планового ремонту руйнується практично без змоги відновлення. Отже найбільш перспективними вдаються акустичні системи безконтактного типу, тим більше, що система такого класу була успішно впроваджена на реакторі РБМК на Ленінградській АЕС [6].

Конкретна система діагностики течій розроблялась для верхнього блоку реактора ВВЕР-1000. Верхній блок налічує 92 патрубки із фланцевими з'єднаннями, в яких течії теплоносія спостерігаються досить часто [4] і, як правило, мають досить тяжкі наслідки. Згідно з міжнародними вимогами до діагностичних комплексів АЕС система повинна бути комплексною, а саме буди побудованою не менш як на двох фізичних принципах. Спираючись на приведенний вище аналіз, було обрано структуру діагностичного комплексу такою — виявляються та реєструються активність повітря в коробах вентиляційної системи верхнього блоку реактору й акустичні сигнали в повітрі, що оточує зону контролю.

2.2. Підсистема радіаційного контролю

Підсистема радіаційного контролю (ПРК) має призначенням раннє виявлення течії. Вона складається з 6 CdZnTe гамма-детекторів, що розміщуються в шести коробах вентиляційної системи повітряного охолодження приводів

керування реактором. Кожний детектор являє собою інтелектуальний сенсор, який окрім власне детектора включає підсилювач заряду та цифровий багатоканальний аналізатор, реалізований за допомогою швидкого АЦП та 32-розрядного сигнального процесора. У випадку течії теплоносія спостерігається стабільний пік гамма-активності продуктів активації у районі 511 кеВ. Обробка спектрів гамма-випромінювання, зареєстрованого гамма-детектором детально викладена в [7].

2.3. Підсистема акустичного контролю

Для обґрунтування принципів побудови підсистеми акустичного контролю (ПАК) та технології обробки інформації були проведені попередні дослідження на спеціальних стендах. Стенди використовувалися для імітації течій при робочих параметрах теплоносія крізь дефектні деталі реального обладнання АЕС. Метою експерименту була оцінка спектрально-кореляційних параметрів акустичних сигналів, що утворюються в повітряному середовищі навколо витоку, та перевірка принципів оцінювання координат витоку. Для реєстрації акустичного поля течії використовувалися ширококутові мікрофонні сенсори. Дослідження показали, що сигнали від течій є досить ширококутові, шумоподібні і лежать у діапазоні (10...40000) Гц. Конкретні особливості спектру сигналів (нерівномірність, уні- або мультимодальність та ін.) сильно залежать від характеру течії, яка у свою чергу визначається розміром та типом дефекту. Попередні дослідження переконали в тому, що для виявлення течії та оцінювання її координат потрібно використовувати адаптивні алгоритми.

Основною задачею при виявленні акустичних сигналів, що їх породжує течія, є технологічні шуми в приміщеннях АЕС, а саме в шахті реактору. Дослідження шумів показало, що це є типові сигнали від роботи різних механізмів і їх спектр має типовий характер — набір гармонійних компонент на фоні злитого спектра, можна вважати, що за граничною частотою 2 кГц технологічні шуми практично відсутні.

Конфігурація ПАК була вибрана такою. Акустичні сенсори в кількості 24 одиниці розміщуються на стінках циліндричної шахти реактору чотирма горизонтальними кільцями по 6 сенсорів у кожному з вертикальним рознесенням кілець приблизно на 0.8 м. Отже чотири кільця мікрофонних сенсорів повністю обіймають зону контролю, а на горизонтальному рівні знаходяться приблизно навпроти можливих течій.

Оскільки вся зона контролю повністю заповнена патрубками, умови розповсюдження сигналів від місця течії до сенсора досить складні: мають місце віддзеркалення як від патрубків, так і від бетонних стінок шахти. Це також потребує застосування спеціальних алгоритмів обробки сигналів.

2.4. Алгоритми функціонування системи діагностики течії

До алгоритму діагностики пред'являються такі вимоги:

- визначення факту течії на якомога ранній стадії її прояву,
- локалізація течії з максимально можливою точністю,
- оцінка масової або об'ємної витрати теплоносія крізь течію,
- прогноз розвитку процесу.

Алгоритм побудовано двоетапним. На першому етапі визначається факт течії за допомогою ПРК, при цьому ПАК функціонує в черговому режимі: усі акустичні сенсори працюють, але їхня інформація консервується в базі пасивного моніторингу і не приймає участі в процесі обробки. Якщо в двох із шести каналів радіаційного контролю рівень піку в районі 511 кеВ перевищує порогове значення, факт течії вважається установленим, і аларм-сигнал поступає на термінал оператора системи і на запуск ПАК для локалізації течії.

Для локалізації течії побудовано адаптивний алгоритм, що самоорганізується. Його основні кроки:

1) З 24 акустичних сенсорів вибираються 4, на яких рівень звукового тиску найбільший. Ці сенсори є найближчими до місця течії. Далі в обробці беруть участь тільки їхні сигнали.

2) Оскільки акустичні сигнали в повітрі мають сильне частотно-залежне ослаблення, а шлях їх розповсюдження до сенсора може бути складним за рахунок багатократних віддзеркалень, неможливо прогнозувати в якому діапазоні частот організувати локалізацію. Для визначення робочого діапазону для кожної пари з 4-х сенсорів обчислюється функція частотної когерентності. В якості робочого діапазону вибирається та 1/3 октавна смуга, де когерентність максимальна.

3) Для кожної пари сенсорів обчислюється кореляційна функція, відшукується її максимум і таким чином оцінюється різниця часів приходу (РЧП) (TDOA — time difference of arrival) згідно з принципом узагальненого корелятора Кнеппа-Картера.

4) Для кожної трійки (дві пари) сенсорів на основі оцінених РЧП складається система з двох гіперболічних рівнянь, яка чисельно вирішується й знаходяться оцінки координат течії та дисперсія оцінки.

5) З шести отриманих таким чином оцінок координат формується середньо-взважена оцінка, яка передається на термінал оператора системи.

При використанні двох комп'ютерів (для збору даних та для обчислення згідно з алгоритмами) усі процедури легко реалізуються в реальному часі.

Викладена технологія дозволяє оцінити координату течії з потенційною точністю (0,3...0,6)

м. Однак попередні іспити довели, що реальна похибка може бути на (50...60)% більшою. Це пов'язане з втратою просторової когерентності акустичного сигналу за рахунок віддзеркалень з одного боку ті сильно частотно-залежного ослаблення з іншого боку.

З метою поліпшення показників точності оцінювання координат течії зараз вивчається кілька алгоритмів підвищення просторової когерентності акустичних сигналів в умовах замкнутого приміщення. Це такі алгоритми як кепстральна деконволюція, яка дає змогу послабити в результуючому сигналі, що приймається сенсором багаторазових дзеркальних реплік, а також технологія вейвлет-анализу за схемою вейвлет-трансформація — кліппування — зворотна вейвлет-трансформація. З точки зору підвищення імовірності правильного виявлення сигналу від течії досліджується застосування методів визначення розладки за алгоритмом кумулятивних сум.

3. Система діагностики ядерного палива

3.1. Технологія оцінювання стану ЯП

Діагностика ЯП є важливою умовою забезпечення ядерної безпеки при експлуатації АЕС. Організація сухих сховищ відпрацьованого ядерного палива на українських АЕС гостро потребує створення засобів експресного інструментального контролю ЯП безпосередньо перед його перевантаженням або відвантаженням на сухе збереження. Основним параметром, що характеризує стан ЯП і критерієм можливості, його переміщення на сухе збереження, є глибина його вигорання. Для виміру вигорання ЯП авторами розроблена система, заснована на реєстрації власного гамма-випромінювання тепловиділяючої зборки, що вивантажується з активної зони реактора, (ТВЗ). Система побудована за принципом об'єднання в часі двох технологічних операцій — перевантаження палива і вимірювання його власного гамма-випромінювання. Такий принцип дозволяє істотно зменшити часові витрати й організувати функціонування системи в реальному масштабі часу. Реальний масштаб часу вимагає створення нових інформаційних технологій оцінки глибини вигорання, що забезпечують мінімальні обчислювальні витрати на обробку зареєстрованого гамма-випромінювання і високу вірогідність контролю. Пропонована технологія базується на аналізі гамма-спектрів випромінювання продуктів поділу (ПП) ЯП, що містяться у відпрацьованій ТВЗ.

Зареєстроване гамма-випромінювання із системи CdZnTe детекторів, перетворене в цифрову форму, надходить на блок формування гамма-спектрів і їхньої обробки. Обробка спектрів є досить добре відпрацьованою процедурою в гамма-спектрометрії. Результатом її є виділені піки повного

поглинання (ППП) ізотопів - ПП і їхні параметри. На основі обробки численних реальних даних, зареєстрованих у виробничих умовах, авторами встановлено ряд емпіричних залежностей, що зв'язують вигорання ЯП з обмірюваною активністю окремих ПП [8]. Далі алгоритм оцінювання вигорання є розгалужений, причому критерієм вибору робочої галузі є якість виділених піків, що спостерігаються в гамма-спектрі, а саме їхня статистична переконливість. При відсутності в гамма-спектрі добре ідентифікуємих ППП здійснюється аналіз наявності піка, пов'язаного з підсумовуванням гамма-випромінювання ПП ^{134}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb . У випадку позитивних результатів (тобто якщо наявність ^{95}Zr , ^{95}Nb підтверджується) робиться висновок про недостатню витримку відпрацьованої ТВЗ і неприпустимості її відвантаження в сухе сховище. Визначається час витримки відпрацьованої ТВЗ із використанням відношення обмірюваної інтенсивності γ -випромінювання ^{137}Cs до інтегральної інтенсивності γ -випромінювання. Якщо отримана оцінка значення часу витримки складає менш 3 років, відвантаження відпрацьованої ТВЗ у сховище також забороняється. Потім проводиться аналіз обмірюваних спектрів на предмет наявності чітких ППП довго живучих ізотопів. При наявності тільки чіткого піка ^{137}Cs оцінюється час витримки ЯП, і здійснюється розрахунок його вигорання з використанням відносини обмірюваної інтенсивності γ -випромінювання ^{137}Cs до інтегральної інтенсивності γ -випромінювання. При наявності добре ідентифікуємих піків ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{106}Ru , ^{154}Eu вигорання розраховується з урахуванням часу витримки і початкового збагачення. Цей алгоритм є основним при визначенні вигорання відпрацьованих ТВЗ, що відвантажуються на сухе збереження.

3.2. Перспективні напрямки розвитку діагностичних технологій для ЯП

Було побудовано модель утворення поля гамма-випромінювання ТВЗ з урахуванням того, що вона складається з 312 тепловиділяючих елементів (твелів) [9]. Оцінка розподілу гамма-активності ПП між окремими твелями також являє великий практичний інтерес. Зокрема, знання вигорання ЯП важливе при компоновці активної зони реактора. Нульова активність деяких ізотопів-ПП в окремих твелях може бути ознакою того, що герметичність твела порушена. Отже можна пропонувати новий спосіб контролю герметичності оболонки (КГО) твела. Відновлення активності твелів за вимірюванням загального поля гамма-випромінювання ТВЗ є зворотною задачею гамма-спектрометрії. Її вирішення можливе як методами комп'ютерної томографії [10], так і шляхом вирішення перевизначеної системи лінійних рівнянь методом Мура-Пенроуза. В даний час ці два методи

вирішення зворотної задачі досліджуються на обумовленість.

4. Висновки

Запропоновані в доповіді нові технології сумісної обробки сигналів різної фізичної природи дозволили побудувати нові вискоефективні системи діагностики течій та палива для АЕС і таким чином підвищити економічність та безпеку їх експлуатації.

Література

1. Гетман А.Ф. Концепция безопасности "Течь перед разрушением" для сосудов и трубопроводов АЭС. М.: Энергоиздат, 1999. — 262 с.
2. Петровский Б.С., Аксенов В.И., Давиденко Н.Н., Карякин Ю.Е. Компьютеризированная система раннего обнаружения протечек теплоносителя на верхнем блоке реактора ВВЭР-1000. // Вторая Международная конференция "Безопасность, эффективность и экономика ядерной энергетики". Ч.1. М., 2001. С. 170-172.
3. Усанов А.И. Состояние и проблемы внедрения систем оперативной диагностики реакторных установок ВВЭР. // Труды научно-технической конференции концерна "Росэнергоатом". М., 2000. С. 64-71.
4. Болтенков В.А., Верпета В.И., Калашников А.Н., Максимов М.В., Маслов О.В. Диагностика протечек теплоносителя на верхнем блоке ВВЭР-1000: проблема и пути решения. Атомна енергетика та промисловість України, №2(2), 1999. С.51-53.
5. Kunze U. Acoustic leak monitoring in VVER plants: ten year of experience, Nuclear Europe Worldscan, №7-8 (1999). P.114-116.
6. H. Mochizuki, H. Takeda, Y. Kasai et al. Development of leak detection system for piping using high-temperature resistant microphones. In *Proceedings of 8th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE'8)*, Baltimore, 2-6 April 2000, ASME, Baltimore, USA 2000. P.8526-8551.
7. Маслов О.В., Сухарев К.В., Кальнев Л.Л., Галченков О.Н. Цифровой спектрометр гамма-излучения. // 4-е международное совещание «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии - 2000». Одесса, 2000. С. 40.
8. Билей Д.В., Маслов О.В., Фридман Н.А., Максимов М.В. Методика, алгоритм и критерии определения выгорания ОЯТ в процессе перегрузки // Ядерная и радиационная безопасность — 2001. — Т. 4, вып. 3. — С.38 - 46.
9. Олейник С.Г., Болтенков В.А. Имитационное моделирование системы определения глубины выгорания облученного ядерного топлива // Изв. вузов. Ядерная энергетика, №1, 2002. С.39-52.
10. S. Jacobsson. Theoretical Investigations of Tomographic Methods used for Determination of the Integrity of Spent BWR Nuclear Fuel. — Uppsala University, Internal Report ISV-6/97, 1996. — P. 59.