

ШУМОВА ДІАГНОСТИКА АТОМНИХ РЕАКТОРІВ

Аналіз інформаційних потоків

Атомні електростанції України сьогодні виробляють ~50% електроенергії, отож проблема їх надійної і безпечної роботи має пріоритетне значення. Один із основних елементів безпеки – моніторинг зміни характеристик реактора у процесі його експлуатації. Шумова діагностика реактора є одним з найперспективніших напрямів, що дає змогу виявити несправності в його роботі вже на ранніх стадіях і таким чином запобігти небажанам наслідкам та можливим аварійним ситуаціям на АЕС.

Дослідників привабили насамперед такі особливості шумової діагностики:

1. Відсутність будь-яких зовнішніх збурювань. Для моніторингу динаміки реактора використовуються його власні шуми, що істотно прискорює процес одержання інформації про його поточний стан. Можливість раннього детектування [1,2] нестабільностей означає реальне підвищення безпечності реактора.

2. Експериментальна простота шумових досліджень. Для них можна використовувати стандартну вимірювальну апаратуру.

3. Шумова діагностика – традиційний напрям дослідження складних систем із уже сформованим широким колом використовуваних математичних методів.

Пояснимо докладніше, який зміст ми вкладаємо у поняття "шумова діагностика реактора". Шуми звичайно розглядаються як небажане збурювання, що обмежує точність вимірів і погіршує характеристики системи. Тому найпростіша стратегія полягає або в їхньому ігноруванні, або у конструюванні спеціальних пристроїв для

пригнічення шуму. Однак шуми, всупереч примітивному їх трактуванню як невизначеності у вимірюваних параметрах, часто виникають з випадкових елементів у природі розглянутої системи і несуть унікальну інформацію про її динаміку. Інакше кажучи, у багатьох фізичних системах змінна, яка описує їхній стан, містить флюктууючу складову. Процеси, що генерують випадкову (шумову) складову в ядерних реакторах, можна поділити на дві групи.

Перша – це джерела шуму, пов'язані з елементом випадковості взаємодії нейтронів з рівноважним середовищем, флюктуаціями якого нехтують. Шуми, що виникають у такому наближенні, прийнято називати шумами реактора за нульової потужності. Вони породжуються, наприклад, випадковим характером довжин вільного пробігу нейтрона між двома послідовними зіткненнями з ядрами урану або розкидом щодо кількості нейтронів, які виникають в одному акті поділу.

Другу групу джерел шумів становлять процеси, пов'язані з флюктуаціями середо-

© БОЛОТІН Юрій Львович. Доктор фізико-математичних наук. Начальник відділу «Теорія ядра і нелінійної динаміки» Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера ННЦ «ХФТІ».

ШЕПЕЛЄВ Анатолій Георгійович. Кандидат фізико-математичних наук. Провідний науковий співробітник відділу патентних досліджень і науково-технічної інформації цієї ж установи.

ПОНОМАРЕНКО Тетяна Олександрівна. Інженер-дослідник того ж відділу.

ЮРЧЕНКО Любов Дмитрівна. Інженер-програміст цього ж відділу (Харків). 2005.

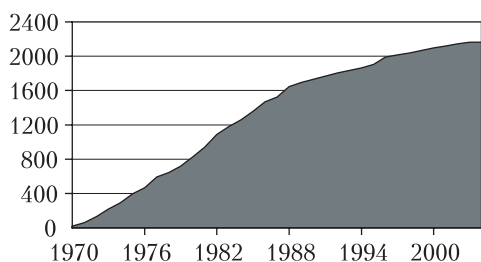
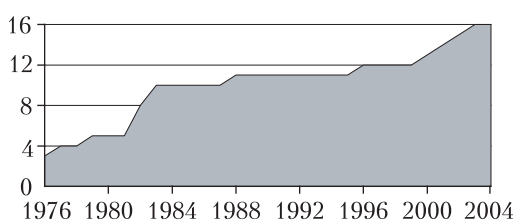
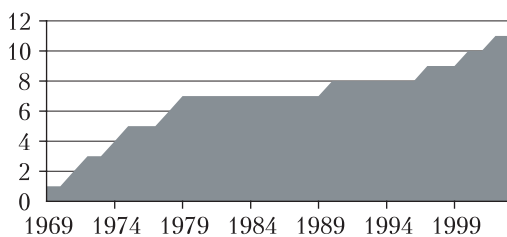


Рис. 1. Кумулятивне зростання кількості інформаційних документів у БД INIS щодо шумів у реакторах



a



б

Рис. 2. Кумулятивне зростання кількості публікацій з питань реакторних шумів за нульової потужності: а – INIS; б – INSPEC

вища. Породжуваний ними випадковий компонент домінує у функціонуючому ядерному реакторі. Це шуми на номінальній потужності. Їхнім джерелом є зміни властивостей матеріалів, з яких виготовлений реактор, під впливом механічних збурювань. Прикладами шумових джерел такого типу слугують механічні коливання керуючих стрижнів, паливних збірок, шахти реактора та флуктуації температури, тиску і швидкості потоку охолоджуваної рідини.

Частотна область цих сигналів простягається від 0,01 Гц (у випадку флуктуацій тиску теплоносія) до 100 кГц (за височастотних акустичних шумів). Звісно, у ядерному реакторі обидва типи шумів наявні

одночасно, але шум за номінальної потужності має істотно більшу амплітуду. Саме він і є основним джерелом інформації для шумової діагностики.

Простежуючи еволюцію спектральних характеристик (спектральні щільності, кореляційні й автокореляційні функції, функції когерентності між різними фізичними величинами) реєстрованого шумового сигналу, можна зробити висновки про стан конкретних елементів реактора. Це пояснюється тим, що різні типи можливих дефектів спричиняють зміни різних частин спектра шумового сигналу.

Аналізуючи реакторні шуми, можна контролювати закипання теплоносія, кризу теплообміну, вібрацію елементів активної зони і шахти реактора, утворення тріщин у корпусі реактора, витрату і вміст теплоносія, парогазовий об'єм під кришкою реактора.

Шумова діагностика реакторів бере початок із середини минулого століття. Інтенсивно розвиваючись, до середини 70-х років вона пройшла шлях від перших академічних досліджень до конкретних застосувань, досягнувши рівня корисного інструменту, що зайняв певну нішу загальної безпеки АЕС. Значні експериментальні зусилля були витрачені для одержання чисто реакторних шумів, не забруднених електронними перешкодами, котрі неминуче існують у ядерному реакторі будь-якого типу. Додаткова складність, яку дослідникам довелося подолати, пов'язана з тим, що характеристики реакторного шуму відрізняються при переході від одного реактора до іншого. Будь-яка конкретна активна зона забезпечує специфічну картину власних шумів, що залежить від умов її функціонування. Це означає, що універсальна фізична концепція шумової діагностики у своїх прикладних аспектах має охоплювати специфічні особливості шумів конкретного реактора.

За минуле десятиліття накопичено величезний теоретичний та експериментальний

досвід ідентифікації й оцінок параметрів, що описують як активну зону реактора, так і процеси, які відбуваються поза нею. На рис. 1 показано динаміку зростання кількості інформаційних документів (публікацій) щодо шумів у реакторах за матеріалами спеціалізованої Бази даних (БД) МАГАТЕ INIS. Як засвідчив аналіз, роботи виконувалися в 43 країнах, однак на фахівців Японії, Німеччини, США й Угорщини припадає 54 % усіх публікацій.

Особливо важливою є інформація про аномальне поведіння і неправильне спрацьовування різних компонентів активної зони. Прогрес у шумовій діагностиці значною мірою зумовлений застосуванням методів моделювання, що використовують сучасні комп'ютери. Тріада: теорія → моделювання → експеримент — рушійна сила будь-якої науки.

Реакторні шуми — цікавий об'єкт дослідження і з фундаментальної точки зору. Для їхнього опису потрібен синтез ядерної фізики, теорії розгалужених процесів, термодинаміки, турбулентності, теорії коливань пружних тіл. Теорія реакторних шумів є галуззю нелінійної нерівноважної класичної статистичної фізики.

Комп'ютерний аналіз інформаційних потоків за шумами у реакторах здійснювався авторами з використанням міжнародних БД: INIS (1970—2004 рр.) та INSPEC (1960—2004 рр.). Перша з них містить 2 млн рефератів звітів, статей, патентів та інших інформаційних документів з питань мирного використання атомної енергії, введених у БД 103 державами — членами МАГАТЕ. Друга база даних містить ~8 млн рефератів статей із 6 тис. найменувань журналів, матеріалів конференцій, книг та інших джерел з фізики, електроніки й обчислювальної техніки.

У процесі аналізу дослідження шумів ми використовували 20 ключових слів і понять.

ШУМИ ЗА НУЛЬОВОЇ ПОТУЖНОСТІ

Перший етап розвитку шумової діагностики — це вивчення шумів за нульової потужності [3, 4]. Активна зона реактора у заглушеному стані має суто нейтронні шумові джерела, зумовлені нейтрон-фотонним розгалуженим процесом. Основна перевага роботи з реакторними шумами, що відповідають режиму нульової потужності, полягає у відносній простоті інтерпретації реєстрованих даних. Це значною мірою пояснюється тим, що шуми нульової потужності являють собою *лінійний* марковський стохастичний процес.

На рис. 2 відображено зростання кількості публікацій з питань шумів за нульової потужності. Такі дослідження публікуються від 1969 р. і мають тенденцію до збільшення.

Дослідження виконувалися у США, Швеції, Японії, Німеччині, Нідерландах, Італії, Великій Британії, Індії та Фінляндії (рис. 3). Типи публікацій: у БД INIS — статті (36 %), праці конференцій, звіти,

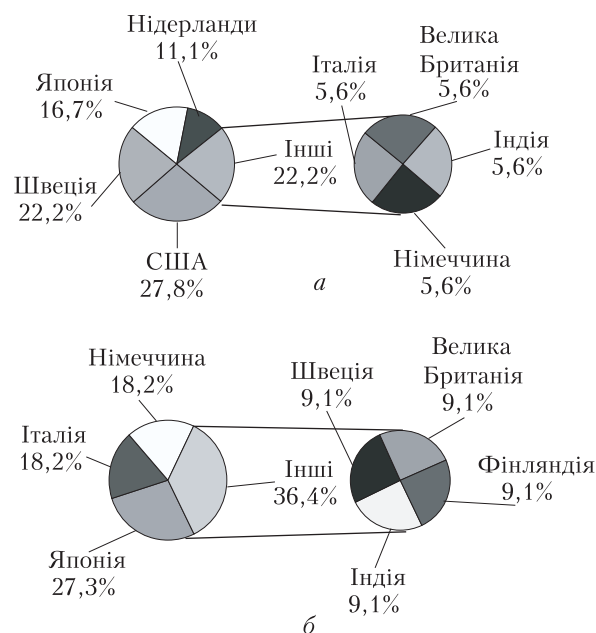


Рис. 3. Відносний внесок у публікації з питань реакторних шумів за нульової потужності: а — INIS; б — INSPEC

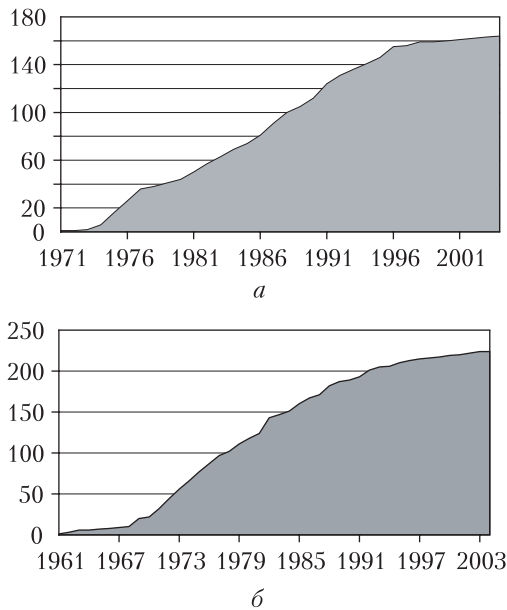


Рис. 4. Кумулятивне зростання кількості публікацій з питань реакторних шумів при аномальному поведженні: а – INIS; б – INSPEC

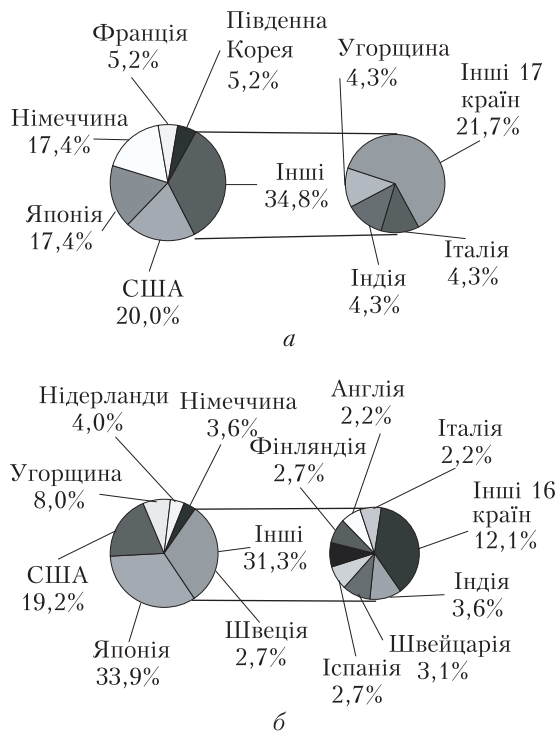


Рис. 5. Відносний внесок у публікації з проблем реакторних шумів при аномальному поведженні: а – INIS; б – INSPEC

дисертації (по 20%), книги (4%); у БД INSPEC – статті (~91%), звіти (~9%). Мовою публікацій є англійська.

ШУМИ ЗА НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Центр ваги досліджень з проблеми шумової діагностики змістився у площину реакторів, які мають номінальну потужність. Порівнюючи ці дві ділянки (вивчення шумів за нульової та номінальної потужності), слід відзначити такі особливості. У першій ділянці мотиви вивчення мають суто дослідницький характер, тоді як у другій – домінують прикладні аспекти. Істотне розширення доступних для аналізу фізичних величин у випадку функціонуючого реактора робить цей напрям досліджень більш перспективним. Якщо в експериментах із шумами за нульової потужності реактора використовуються тільки флуктуації нейтронних потоків, і потенціал їхнього дослідження значною мірою вичерпаний, то у випадку працюючого реактора вибір і, відповідно, можливість аналізу флуктуючих величин істотно більші.

У працюючому реакторі можливі такі типи шумів і їхні джерела:

1. *Ядерні шуми.* Їх зумовлюють розгалужені процеси, а також теплові флуктуації, пов'язані з продуктами розпаду.

2. *Теплові шуми.* Їх генерують температурні флуктуації теплоносія, що надходить; шуми, спричинені циркулюючими у теплоносії пухирцями; залежність від часу параметрів теплопровідності, пов'язана з флуктуаціями густини, швидкості і тиску теплоносія.

3. *Гідродинамічні шуми.* Це флуктуації тиску, зумовлені випадковим утворенням пухирців; осциляції теплоносія, пов'язані з накачуванням.

4. *Структурні шуми.* Їхні джерела – випадкові рухи шахти реактора; флуктуації у розміщенні елементів активної зони; шуми, спричинені флуктуаціями тиску теплоносія; процеси випадкового розсіювання

на неоднорідностях в активній зоні; похибки при виготовленні паливних елементів.

На рис. 4 наведено динаміку публікацій за результатами вивчення шумів у реакторах з номінальною потужністю (БД INIS та INSPEC). Результати таких досліджень почали публікуватися від 1961 року.

Як бачимо з рис. 5, найбільша кількість робіт виконана фахівцями США, Японії, Німеччини, Угорщини, Нідерландів, Франції, Індії, Південної Кореї та Швейцарії.

Розподіл за типами публікацій такий: у БД INIS — праці конференцій (~35%), звіти (~22%), статті (~21%), книги (~15%), дисертації (3%), патенти (~2%); у БД INSPEC — статті (~78%), праці конференцій (~17%), звіти (~5%). Основною мовою публікацій є англійська (79% у БД INIS і 92% у БД INSPEC), однак деякі роботи опубліковані японською, німецькою, французькою, російською, корейською та іншими мовами.

НЕЛІНІЙНІ МОДЕЛІ

Якщо рівноважний стан нелінійної динамічної системи (реактор у цілому і його окремі компоненти розглядаємо як динамічні системи) стійкий, динаміку поблизу стану рівноваги можна описати у лінійному наближенні. Однак якщо стан рівноваги нестійкий, лінійне наближення стає не ефективним, і для адекватного опису динаміки потрібні нелінійні методи. Другим джерелом нелінійності є зростання амплітуд флуктуацій у міру підвищення потужності реактора. Останнім часом методи аналізу реакторних шумів, що базуються на нелінійній динаміці, знайшли широке застосування [5].

Особливістю, властивою лише нелінійним системам, є можливість реалізації у них хаотичних режимів, за яких динаміку системи неможливо відрізнити від випадкової, навіть за відсутності зовнішніх джерел випадковості. Хаотична динаміка, будучи одним із найбільш загальних шляхів еволюції нелінійної систе-

ми, виявляється лише у певних областях значень її параметрів. Остання обставина спонукає до відповіді на такі запитання:

1. Чи можливо спостерігати хаос при параметрах, що відповідають експлуатованим реакторам?

2. За яких критичних значень параметрів відбувається перехід від регулярного руху до хаотичного?

Позитивну відповідь на перше запитання отримано за результатами аналізу найпростіших моделей для окремих елементів реактора [6].

Важливою особливістю динаміки нелінійної системи, що взаємодіє з періодичним зовнішнім полем, є можливість нерезонансного (дифузійного) поглинання енергії. Так, наприклад, у випадку хаотичних осциляцій шахти реактора можливе збільшення їхньої амплітуди за рахунок поглинання енергії теплоносія. З цієї причини значні зусилля докладалися для контролю хаосу, тобто перетворення його на періодичний процес шляхом спеціально запрограмованої зміни параметрів системи [7].

Для аналізу шумових сигналів останнім часом використовуються нові характеристики, відомі із досліджень хаотичних режимів у нелінійній динаміці. Як приклад наведемо використання поняття фрактальної розмірності при аналізі флуктуючих сигналів, які генеруються різними джерелами шумів у реакторі [8].

Зростання кількості публікацій з проблем нелінійних моделей відображає рис. 6. Перші результати досліджень почали з'являтися друком у 1958 р., відтоді спостерігається постійне збільшення їхньої кількості.

У дослідженнях з розглянутого питання брали участь науковці з 13 країн; більшість робіт виконана в Японії та США (рис. 7).

У БД INIS розподіл за типами публікацій такий: статті (~45%), праці конференцій (~22%), звіти (~13%), книги (~10%), комп'ютерні та числові дані (~10%); у БД INSPEC — статті (~88%) і праці конфе-

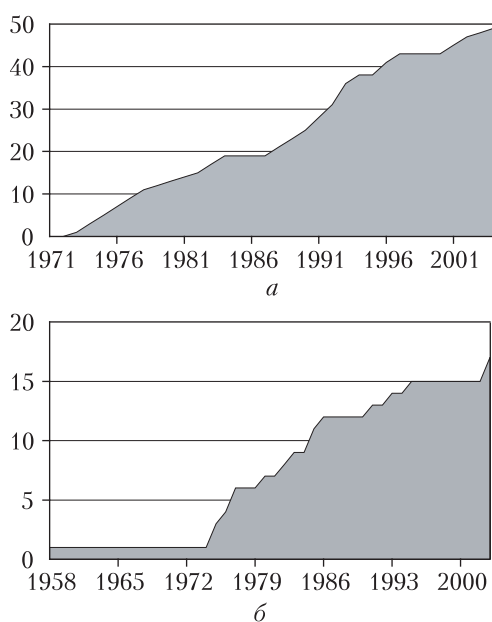


Рис. 6. Кумулятивне зростання кількості інформаційних документів з питань нелінійних моделей реакторних шумів: а – INIS; б – INSPEC

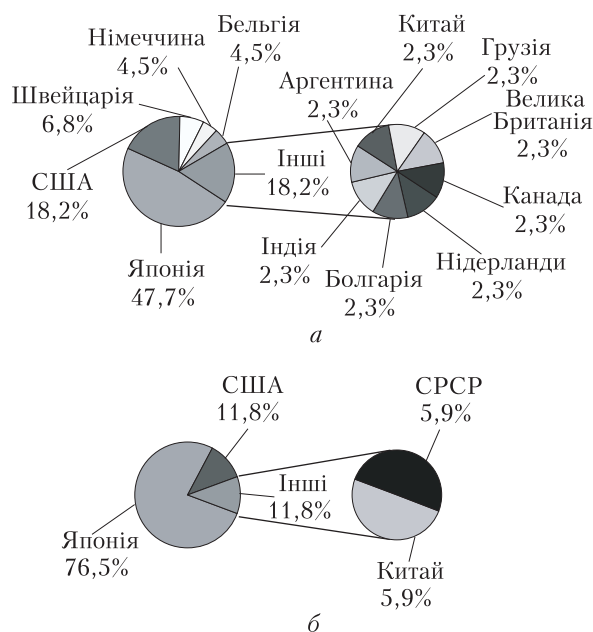


Рис.7. Відносний внесок країн у публікації з нелінійних моделей реакторних шумів: а – INIS; б – INSPEC

ренцій (~12%). Мовою матеріалів у БД INSPEC є англійська, а в БД INIS, поряд із публікаціями англійською (~71%), зустрі-

чаються публікації японською (~14%), німецькою (~6%), іспанською (~4%), китайською та болгарською мовами (по 2%).

МЕТОДИ ВИМІРЮВАНЬ

Період інтенсивних теоретичних й експериментальних досліджень реакторних шумів завершився до початку 90-х років створенням адекватних вимірювальних систем шумових сигналів.

Найбільш універсальні вимірювальні комплекси для реакторів типу ВВЕР характеризуються такими можливостями:

1. Детектування маятникових коливань шахти реактора, оцінка їхніх величин і напрямку з використанням спектрів шумових сигналів зовнішніх іонізаційних камер.

2. Виявлення коливання елементів конструкції активної зони за вимірюваннями нейтронних шумів.

3. Відокремлення інформації про термогідравлічні характеристики теплоносія.

4. Вимірювання флуктуації густоти теплоносія, оцінка його швидкості в активній зоні за нейтронними шумами.

5. Аналіз осциляції тиску і виявлення стоячих хвиль у контурах теплоносія, тестування герметичності конструкцій.

6. Створення Баз даних показників режиму паливного циклу: середньоквадратичні амплітуди окремих піків, площа під піками, а також загальні або часткові середньоквадратичні частини всього спектра шумів. Автоматизовані програми аналізу поведінки показників не тільки поліпшують існуючі дані, а й дозволяють перевірити, чи не перевищують поточні значення показників заздалегідь обраних меж.

На рис. 8 відображено зростання кількості публікацій за методами вимірів відповідно до аналізу БД INIS і INSPEC. Публікації з цього напрямку досліджень, що з'явилися у 1965 році, невпинно збільшуються.

У відповідних дослідженнях брали участь фахівці 29 країн, а більшість робіт викона-

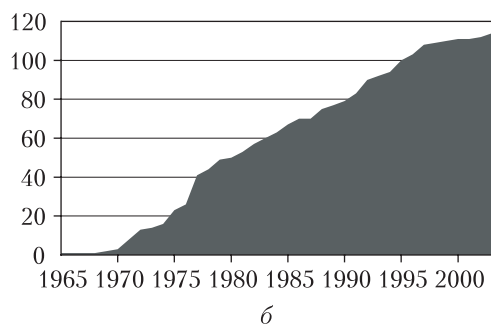
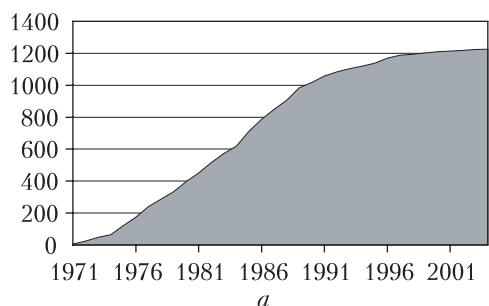


Рис. 8. Кумулятивне зростання кількості інформаційних документів за методами вимірювання реакторних шумів: а – INIS; б – INSPEC

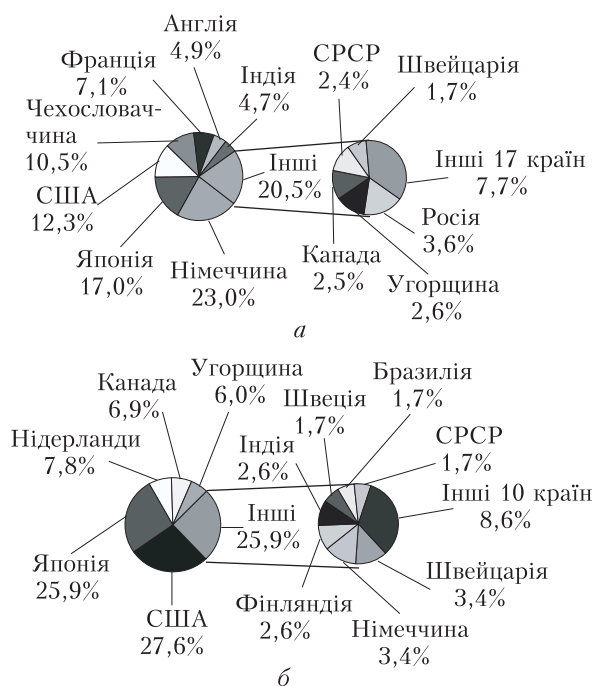


Рис. 9. Відносний внесок у публікації за методами вимірювання реакторних шумів: а – INIS; б – INSPEC

на у Німеччині, Японії, США, Чехословаччині, Франції, Великій Британії та Індії (див. рис. 9).

У БД INIS зібрано такі типи публікацій: матеріали конференцій (~37%), статті (~23%), звіти (~20%), книги (~14%) і патенти (~4%); у БД INSPEC – статті (~66%), праці конференцій (~30%) і звіти (~4%). Основною мовою публікацій є англійська (62% у БД INIS і 93 % у БД INSPEC), знаходимо також публікації німецькою, японською, російською, французькою, чеською і дев'ятьма іншими мовами.

МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛЬНОГО ПОВОДЖЕННЯ РЕАКТОРІВ

Окремо ми дослідили динаміку зростання кількості публікацій, що безпосередньо стосуються реєстрації аномального поведіння реакторів, спричиненого процесами старіння і втоми корпусу та внутрішньокорпусних пристроїв, ушкодження матеріалу насосів і трубопроводів під впливом кавітації, ініціюванням і розвитком тріщин, руйнуванням компонентів реакторів. Різні методики моніторингу аномального поведіння реакторів засновані на реєстрації небезпечних відхилень від середніх показників, що відповідають нормальному функціонуванню реактора. Реєстрація в автоматичному режимі кореляційних функцій, які враховують увесь спектр шумових сигналів (нейтронні й акустичні шуми, флуктуації різних характеристик теплоносія), дає змогу вже на ранній стадії більш надійно виявляти аномалії у реакторній динаміці. Така методика дозволяє вилучити з розгляду рідкісні аномально великі флуктуації, окремих шумових компонентів, що не становлять небезпеки для функціонування реактора. Теоретичною базою дослідження аномалій у реакторних шумах є різні варіанти авторегресивного аналізу.

На рис. 10 показано зростання кількості публікацій з проблем шумів, спричинених

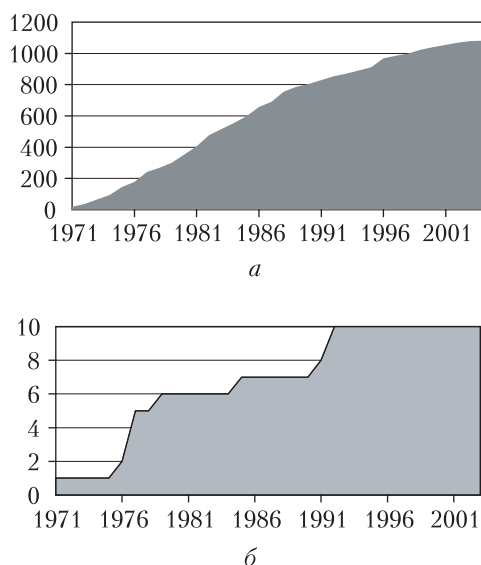


Рис. 10. Кумулятивне зростання кількості інформаційних документів з методів виявлення аномального поведіння реакторів: а – INIS; б – INSPEC

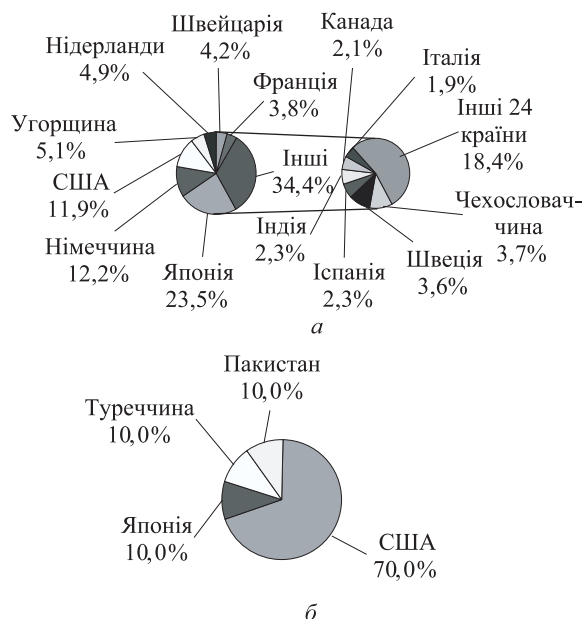


Рис. 11. Відносний внесок країн у публікації з методів виявлення аномального поведіння реакторів: а – база даних INIS; б – INSPEC

аномальним поведінням реакторів (за аналізом БД INIS і INSPEC). Як бачимо, результати досліджень почали публікуватися від 1971 р. і їхня кількість постійно збільшується.

Рис. 11. засвідчує, що у цих дослідженнях зайняті фахівці з 39 країн, причому близько 50 % робіт виконано в Японії, Німеччині та США.

Тоді як у БД INIS основними типами публікацій є матеріали конференцій (~33%), статті (~31%), звіти (~21 %), книги (~10%), числові і комп'ютерні дані (~3 %), дисертації (~2%), публікації у БД INSPEC у рівних частинах представлені працями конференцій і статтями. Англійською мовою надрукована більшість робіт (у БД INSPEC – 100%, у БД INIS – 73%), однак в останній базі даних зустрічаються публікації німецькою (~7%), японською (~6%), російською (~2,7%), французькою (~2,4%), чеською (~2%) та іншими одинадцятьма мовами.

ШУМИ У РЕАКТОРНИХ СИСТЕМАХ, КЕРОВАНИХ ПРИСКОРЮВАЧАМИ

Спинимося на роботах, які виконані впродовж останніх років і пов'язані із застосуванням модифікованих методів шумової діагностики до принципово нової концепції ядерних реакторів. Це так звана Energy Amplifier або системи, керовані прискорювачами – підкритична ядерна збірка із зовнішнім джерелом нейтронів [9]. Ці системи привертають дедалі більшу увагу завдяки унікальним характеристикам безпеки (випадкове досягнення критичного режиму практично неможливе), здатності знешкодити радіоактивні відходи, а також потенціалові для виробництва енергії. Гадаємо, що під час експериментів низької потужності з реакторами такого типу можна використовувати традиційну діагностичну апаратуру. Розглядаються також пропозиції щодо застосування традиційних методів для моніторингу підкритичності у таких реакторах. Протягом останніх п'яти років з'явилася низка теоретичних досліджень, що стосуються побудови шумової діагностики для цих реакторів [10]. На перший погляд здається, що для опису нейтронних шумів у традиційних реакторах і в сис-

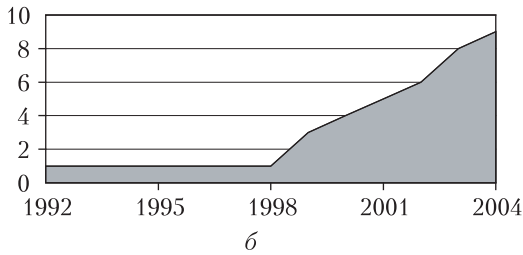
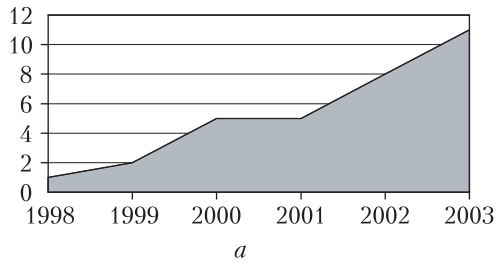


Рис. 12. Кумулятивне зростання кількості публікацій з питань шумів у системах, керованих прискорювачами: а – INIS; б – INSPEC

темах, керованих прискорювачами, застосовані однакові методи. Але такий висновок адекватно не відбиває ситуацію. Принципова різниця між шумами у реакторах нового типу і у звичайних реакторах полягає у тому, що у першому випадку статистичні характеристики шуму істотно залежать від характеристик використовуваного прискорювача. Який би тип прискорювача не застосовувався в експериментальній реалізації нового типу реакторів, неможливо припустити, що джерело подій у цьому випадку являє собою випадкове пуассонівське (точкове) джерело. Це пояснюється тим, що деякі з прискорювачів, які використовуються для експериментальних цілей, працюють в імпульсному режимі з частотами від кількох Гц до сотні Гц. Навіть у так званих безперервних прискорювачах густина пучка протонів модулюється радіочастотами керуючої системи. Ця обставина унеможлиблює використання звичайної процедури виведення основних співвідношень шумової діагностики для реакторів нового типу. Головна причина у тому, що періодичне випадкове джерело не може розглядатися як випадкове джерело з періодично модульо-

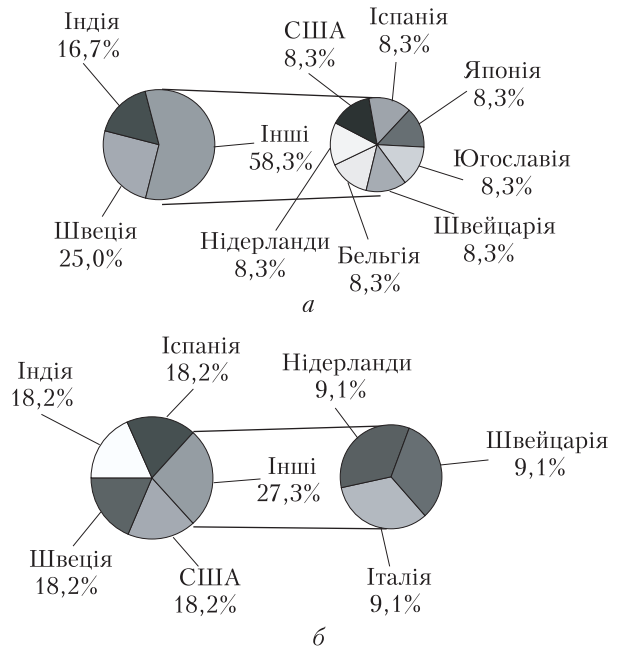


Рис. 13. Відносний внесок у публікації з питань шумів у системах, керованих прискорювачами: а – INIS; б – INSPEC

ваною інтенсивністю. Стохастичний процес, який генерується таким джерелом, не є марковським і до нього незастосовні традиційні підходи.

Динаміку публікацій з проблем шумів у системах, керованих прискорювачами, показано на рис. 12. Результати досліджень почали з'являтися друком від 1992 р. і їхня кількість невпинно зростає.

На рис. 13 відображено відносний внесок у публікації фахівців 10 країн; 50% усіх робіт належить ученим Швеції, Індії та США.

За типами публікацій роботи розподілилися так: у БД INIS – статті (~46%), дисертації (~27%), праці конференцій (~18%), звіти (~9%); у БД INSPEC – статті (~64%), праці конференцій (~36%). Мовою публікацій в обох БД є англійська.

ВИСНОВКИ

Слід зазначити, що аналіз інформаційних потоків по реакторних шумах підтвердив велику зацікавленість дослідників

розглянутою проблематикою. Це свідчить як про перспективність подальших розробок у цій галузі, так і про чималу користь від моніторингу реакторів. Успішне розв'язання цієї проблеми з часом стає дедалі актуальнішим.

Робота виконувалася за рахунок бюджетного фінансування на комп'ютерному устаткуванні, отриманому в рамках Гранта МАГАТЕ UKR/0/002 і проекту INTAS 96-09. Інформаційна підтримка роботи здійснювалася за проектом INTAS 00-02.

1. J.A. Thie. Reactor Noise. — N. Y.: Rowman & Littlefield. — 1963.
2. W. Seifritz, D. Stegemann. Reactor noise analysis // Atom. Energy Rev. — 1971. — V. 9. — P. 129—176.
3. L. Pal. On the theory of stochastic processes in nuclear reactors // Nuovo Cim. Suppl. — 1958. — V. 7. — P. 25—41.
4. В.Г. Золотухин, А.И. Могильнер. К распределению числа отчетов нейтронного детектора, помещенного в реактор // Атомная энергия. — 1963. — № 5. — С. 11—16.
5. T. Suzudo. Reactor noise analysis based on nonlinear dynamic theory — application to power oscillation // Nucl.Sci.&Eng, — 1993. — V. 113. — P.145—159.
6. A simple nonlinear model for pendular chaotic oscillations of reactor core barrel / Yu. L. Bolotin, V.V. Bulavin, A.V. Chechkin, V.Yu. Gonchar // Progress in Nuclear Energy. — 1999. — V. 35. — P. 65—78.
7. Особенности динамики ангармонического осциллятора с периодическим возмущением / Ю.Л. Болотин, В.Ю. Гончар, М.Я. Грановский, А.В. Чечкин // ЖЭТФ. 1999. — Т. 115. — С. 361—377.
8. T. Suzudo. Application of a nonlinear dynamical descriptor to BWR stability analysis // Progress in Nuclear Energy. — 2003. — V. 43. — P. 217—223.
9. Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier / C. Rubia, J.A. Rubio,

S. Buono et al. // Report CERN/AT/95—441995.

10. S.B. Degweker. Reactor noise in accelerator driven systems // Annals of Nuclear Energy. — 2003. — V.30. — P. 223—243.

Ю. Болотін, А. Шепелев,
Т. Пономаренко, Л. Юрченко

ШУМОВА ДІАГНОСТИКА АТОМНИХ РЕАКТОРІВ

Резюме

В огляді проаналізовано інформаційні потоки, що відображають розвиток і нові тенденції шумової діагностики атомних реакторів. Дослідження охоплює часовий інтервал з середини минулого століття і дотепер. Використовувалися бази даних: INIS (1970—2004 рр.) та INSPEC (1960—2004 рр.). Аналіз здійснено по шести напрямках: шуми за нульової потужності; методи аналізу шумів номінальної потужності (шуми функціонуючого реактора); методи визначення аномальної поведінки реактора; нелінійні моделі у шумовій діагностиці; методи вимірювання шумів; модифіковані методи шумової діагностики для реакторів нового покоління — систем, керованих прискорювачами.

Yu. Bolotin, A. Shepelyev,
T. Ponomarenko, L. Yurchenko

NOISE DIAGNOSTICS OF NUCLEAR REACTORS

Summary

In the review the data flows representing the development and new trends of noise diagnostics of nuclear reactors have been analysed. The analysis covers the period from the middle of the last century up to the present time. The data were retrieved from the Databases INIS (1970-2004) and INSPEC (1960—2004). The analysis was performed in the following six directions: zero power noise; methods of analysis of nominal power reactor noise (operating reactor noise); methods of determining the abnormal behaviour of the reactor; nonlinear models in noise diagnostics; methods of noise measurement and modified methods of noise diagnostics for new-generation reactors, i.e. accelerator-driven systems.