

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

БАРДЖ ЄВГЕН ІВАНОВИЧ

УДК 621.311.018.782.3.311.25

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОБЛОКА АЕС ПРИ АВАРІЙНИХ  
ЗМІНУВАННЯХ ЧАСТОТИ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ  
ВЛАСНИХ ПОТРЕБ

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції (електрична частина),  
мережі, електроенергетичні системи та  
управління ними

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

КИЇВ 1994

ДВ 30.690

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі електричних станцій факультету електроенергетехніки та автоматики Київського політехнічного інституту.

- Науковий керівник - доктор технічних наук, професор Костерев М.В.
- Офіційні опоненти - доктор технічних наук, с.н.с., лауреат премії ім. С.А.Лебедева НАН України Авраменко В.М.
- кандидат технічних наук, доцент Лосицький Ю.Є.

Провідна організація - Національний Диспетчерський Центр електроенергетики України

Захист дисертації відбудеться "26" Вересня 1994 р. о 15 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої Ради К 068.І4.05 по присудженню вченого ступеня кандидата технічних наук в Київському політехнічному інституті (корпус 20, ауд. 3).

Відгуки на автореферат у двох примірниках, засвідчених печаткою установи, просимо надіслати за адресов: 252056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37, КПІ, Вченому секретарю.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Київського політехнічного інституту.

Автореферат розіслано "16" серпня 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради к.т.н., професор

*Курис*

Б.М.Кондра

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00756611 (Q)

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Характерною особливістю сучасного розвитку електроенергетики є подальше нарощування генеруючих потужностей, в тому числі і за рахунок спорудження атомних електростанцій (АЕС).

В теперішній час частка атомних електростанцій в світовому виробництві електроенергії складає близько 16 %. В 1993 році на АЕС України було вироблено близько 75,2 млрд. кВт/г електроенергії, що складає 111 % від запланованого і 32,9 % від загальної виробки електроенергії на Україні. Складна паливна кон'ктура, що склалася в останні роки, змушує в умовах України і надалі орієнтуватися в вирішенні енергетичної кризи на введення нових потужностей на АЕС.

Після аварій на АЕС Тримайл-Айленд в США та на Чорнобильській АЕС істотного значення набули питання забезпечення безпеки АЕС, особливо при запроектних аваріях, що мають дуже малу очікувану частоту і надзвичайно небезпечні наслідки.

Специфіка виробництва електроенергії на АЕС, пов'язана в першу чергу з необхідністю гарантованого розхолодження реактора при всіх аварійних режимах, потребує забезпечення високої надійності електропостачання власних потреб (ВП). По даним бюлетеня МАГАТЕ імовірність втрати зовнішнього електропостачання та, як наслідок цієї події, імовірність розплавлення активної зони, мають найбільші значення.

В зв'язку з цим важливого значення набувають питання аналізу поведінки енергоблоків АЕС при збуреннях в електроенергетичній системі (ЕЕС) та на АЕС, які викликають втрату зовнішнього електропостачання ВП, оцінки живучості енергоблоків після втрати живлення ВП. Підставою для висновку про живучість енергоблоків в таких режимах є розрахунки електромеханічних перехідних процесів в системі ВП. Разом з тим, існуючі методи моделювання і математичні моделі енергоблоків, які розроблені для аналізу динамічних режимів ТЕС та АЕС, не враховують ряд особливостей проходження перехідних процесів на АЕС, найбільш важливих з яких є сильна взаємозалежність процесів в технологічній та електричній частинах станції.

Достовірні розв'язання численних задач (як на рівні проектування, так і в процесі експлуатації) енергоблоків АЕС можна одержати, використавши системний підхід щодо дослідження динамічних режимів АЕС. Застосування системного підходу потребує розробки нових математичних моделей енергоблока, відображуючих процеси в усіх його

ланках (системі ВП, технологічній та електричній частинах). Це дає можливість в цілісному вигляді розглядати різні по своїй фізичній суті внутрішньоблочні процеси при широкому спектрі збурень і, отже, приймати більш обґрунтовані рішення.

Мета і завдання досліджень. Мета роботи полягає в розвитку методів моделювання перехідних процесів атомних енергоблоків при збуреннях, що викликають істотні змінювання частоти в системі ВП електростанції. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні наукові завдання:

формулювання поняття живучості енергоблока відповідно до класу процесів, що розглядаються в роботі;

розробка комплексних математичних моделей енергоблока для аналізу процесів при аварійному зниженні частоти в ЕЕС, спільному вибігу турбогенератора і двигунів ВП, живленні електроприймачів ВП від автономних джерел живлення (дизель-генераторів);

дослідження спільних фізичних закономірностей в електротехнічному, теплотехнічному та реакторному устаткуванні;

реалізація розроблених моделей та алгоритмів в програмному забезпеченні, яке дає можливість аналізувати динамічні процеси в енергоблоці при аварійному зниженні частоти на шинах ВП.

Методи досліджень. В основу досліджень покладені методи моделювання руху динамічних систем, теорія живучості і цифрове моделювання. Достовірність одержаних по моделям результатів зумовлена порівнянням результатів натурних та машинних експериментів, позитивним досвідом експлуатації програм в ряді організацій.

Основні положення, які виносяться на захист:

1. Комплексна математична модель динаміки енергоблока з реактором ВВЕР.

2. Математичні моделі для дослідження поведінки енергоблока АЕС і ЕЕС при аварійних змінюваннях частоти в системі. Математична модель енергоблока для розрахунку спільного вибігу турбогенератора з механізмами ВП. Математична модель динаміки автономної системи надійного живлення енергоблока.

3. Метод оцінки живучості енергоблока при втраті зовнішнього електропостачання ВП.

4. Фізичні закономірності, що зумовлені взаємовпливом процесів в технологічній і електричній частинах енергоблока при аварійному зниженні частоти в ЕЕС, спільному вибігу турбогенератора АЕС з механізмами ВП, аварійних перехідних процесах в автономній системі надійного живлення при зовнішньому обезструмленні.

5. Комплекс алгоритмів і програм розрахунку динамічних процесів в енергоблоках АЕС при збуреннях в електричній частині станції та ЕЕС.

Наукова новизна роботи:

1. Розвиток методів моделювання перехідних процесів енергосистем відповідно до процесів, які викликають істотні змінювання частоти на шинах ВП атомних енергоблоків, для вивчення яких запропонована комплексна математична модель енергоблока з реактором ВВЕР, що дає можливість спільно розглядати процеси в електричному і технологічному устаткуванні.

2. Математичні моделі процесів при аварійних зниженнях частоти в ЕЕС, спільному вибігу турбогенератора з двигунами ВП, автономному електропостачанні системи ВП від дизель-генераторів. Моделі враховують процеси в технологічному устаткуванні, що дає можливість в більш повному об'ємі враховувати взаємовплив процесів різної фізичної природи.

3. Розвиток основ теорії живучості АЕС в частці визначення показника живучості відповідно до процесів, що розглядаються в роботі.

4. Фізичні закономірності, виявлені на основі розрахункових досліджень і що зумовлені взаємовпливом технологічної та електричної частин енергоблоків АЕС при: аварійному зниженні частоти в ЕЕС з АЕС, вибігу турбогенератора енергоблока АЕС з механізмами ВП, перехідних процесах в автономній системі надійного живлення при втраті зовнішнього електропостачання станції.

Практична цінність полягає в розвитку методології моделювання та дослідження перехідних процесів в енергоблоках АЕС, що дало можливість створити комплекс програм розрахунку динаміки енергоблока АЕС при аварійному зниженні частоти в ЕЕС, вибігу турбогенератора з механізмами ВП та ступінчастому наборі навантаження на дизель-генератор. Застосування розроблених моделей і програм в проектних і дослідних організаціях, а також на діючих АЕС дозволяє приймати при проектуванні та експлуатації АЕС більш обгрунтовані технічні рішення при оцінці працездатності енергоблоків і допустимості ряду аварійних режимів при збуреннях в електричній частині станції і ЕЕС, координації дій та уставок технологічної та протиаварійної системної автоматики, а також зв'язати перехідні процеси в електричній і технологічній частинах станції.

Реалізація роботи. Результати досліджень, наведених в дисертації є частиною виконаних в КПІ робіт при особистій участі автора, спрямованих на рішення пріоритетних науково-технічних проблем відповідно до завдання Комплексної програми НТП країни-членів РЕВ до

2000 року, 3-го пріорітетного напрямку "Прискорений розвиток атомної енергетики" (проблема 3.1.4., завдання 2.4.2), Рішення урядової комісії по ліквідації наслідків на Чорнобильській АЕС (№ 355 від 03.02.87. (завдання № 28), Галузевої науково-дослідної програми Мініенерго СРСР (проблема 80.02.12, завдання 02), Координаційного плану АН України на 1981-1985 роки (шифр І.9.6.2.5.3) та інших.

Отримані в роботі результати впроваджені в науково-дослідних, проектних та експлуатаційних організаціях, в тому числі:

результати досліджень динамічних процесів і оцінки живучості Рівненської АЕС передані ВНДІАЕС Мініатоенерго Росії;

результати виконаних розрахунків перехідних процесів Чорнобильської АЕС використовуються в МІФІ при розробці проектною документації на математичне та програмне забезпечення повномасштабного тренажору УТП Чорнобильської АЕС;

математичні моделі і програмні модулі динаміки енергоблока з ВВЕР впроваджені в ІЕД НАН України, ВНДІЕ, Київському філіалі інституту "Укренергомережапроект".

Основні положення і результати досліджень дисертаційної роботи використовуються в учбовому процесі при організації практичних і лабораторних робіт, в курсовому і дипломному проектуванні.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 8 робіт, в тому числі одна брошура.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наступних Всесоюзних та республіканських науково-технічних конференціях, семінарах і нарадах: Всесоюзній науковій конференції "Моделювання електроенергетичних систем" (Баку, 1982, Каунас, 1991), Всесоюзній науково-технічній нараді "Питання стійкості і надійності енергосистем" (Душанбе, 1989), Всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми нелінійної електротехніки" (Київ, 1984), Всесоюзній науково-технічній нараді "Дослідження тривалих перехідних процесів енергосистем" (Новосибірськ, 1982), Республіканській конференції "Сучасні проблеми енергетики" (Київ, 1985), Республіканському семінарі "Управління режимами електроенергетичних систем в умовах неповної інформації" (Київ, 1980), Республіканській науково-технічній конференції молодих вчених (Київ, 1979).

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновку, викладених на 224 сторінках і включає 28 ілюстрацій, список літератури із 166 найменувань на 17 стор. і додатків на 40 стор.

#### З М І С Т      Р О Б О Т И

У вступі обґрунтована актуальність проблеми, сформульовані

мета і задачі досліджень, відображено її наукову новизну та практичну цінність, положення, що виносяться на захист, наводяться відомості про апробацію, публікації, впровадження результатів досліджень і структуру роботи.

У першому розділі наведена загальна характеристика сучасного стану проблеми. Специфічні особливості технологічного режиму АЕС, пов'язані в першу чергу з наявністю залишкових тепловиділень, великими питомими енерговиділеннями в активній зоні, важкими наслідками аварій потребують забезпечення надійності функціонування всіх підсистем енергоблока, які гарантують ядерну і радіаційну безпеку, особливо системи ВП. Разом з тим, інтенсивність виникнення аварії з втратою живлення ВП і зв'язана з ним імовірність розплавлення активної зони мають найбільші значення в порівнянні з іншими подіями, які призводять до порушення безпечної роботи реактора.

В цих умовах загострюється проблема збереження власних потреб станції, а також живучості енергоблоків АЕС після втрати зовнішнього електропостачання, безпосередньо зв'язаною з безпекою реактора. Найбільш прийнятним методом одержання кількісних характеристик для оцінки рівня живучості енергоблока АЕС є імітаційне моделювання, яке дозволяє відобразити основні стадії динамічного процесу та враховувати активність АЕС.

На основі фактологічного аналізу взаємодії електричної частини АЕС і ЕЕС з технологічною частиною станції, зарубіжного і вітчизняного досвіду експлуатації атомних станцій виявлено великий взаємовплив процесів в технологічній та електричній підсистемах АЕС. Існуючі на цей час методи моделювання і математичні моделі енергоблоків АЕС не в повній мірі враховують цю обставину. Прийняття достовірних рішень задач, що виникають при проектуванні і експлуатації АЕС потребує системного підходу щодо вивчення процесів в енергоблоці АЕС і розробки комплексних математичних моделей його динаміки, адекватно описуючих процеси в електричній та технологічній частинах станції.

З одного боку, враховуючи специфіку виробництва енергії на АЕС, доцільно в математичній моделі врахувати широке коло фізичних явищ і їх детальний опис, а з іншого - бажано мати достатньо повну і відносно просту модель, яка дозволяє одержувати достовірні результати. Для розв'язання цієї суперечності при побудові комплексної моделі в роботі прийняті наступні принципи: декомпозиція атомного енергоблока на підсистеми; доцільна повнота математичної моделі, яка визнається в залежності від характеру задачі, що розв'язується; єдність математичної моделі та інформаційних процесів; поділ рухів об'єкта

по темпу проходження процесів.

Для визначення показника живучості атомного енергоблока після втрати зовнішнього електропостачання ВП, запропоновано метод, суть якого полягає в наступному.

Визначення. АЕС зберігає живучість відносно  $(X_v^0, T, Z, G)$ , якщо для кожного  $X_v^0 \subset X$  і  $\{Z_i(t_k(\delta_k))\} \in Z$  при всіх  $t \in T$  має місце:

$$\inf G(I_v, X_{vi}, t) \geq G_{min},$$

де  $X_v^0$  - підмножина початкових допустимих станів станції;  $Z_i$  - множина збурень, які надходять із зовнішнього середовища у випадкові моменти часу;  $I_v$  - структура АЕС, яка визначається сукупністю елементарних підсистем  $M^s$ , що утворюють єдину систему у відповідності з вибраною топологією;  $G$  - деяка функція, оцінюєча ступінь збереження живучості;  $G_{min}$  - значення функції  $G$ , яке визначає гранично-допустимий стан АЕС з точки зору живучості.

Це визначення вимагає, щоб структура і фазові координати не досягли деякого мінімального рівня, при якому ще забезпечуються умови функціонування АЕС. Оскільки в роботі оцінка живучості енергоблока проводиться для режимів, що виникають після втрати зовнішнього електропостачання, показник живучості буде визначатись тільки працездатністю енергетичної підсистеми. Враховуючи те, що електроустаткування ВП, після втрати зовнішнього джерела живлення повинно забезпечити аварійне розхолодження реактора, показник живучості енергетичної підсистеми  $G_{a.p.}$  має таку змістовну трактовку. Цей показник повинен бути зв'язаний з працездатністю мінімального числа електроустаткування, яке у відповідності з технологічним регламентом по експлуатації реактора, повинно забезпечити режим аварійного розхолодження реактора.

Функція стану  $g_j^s(y_p)$  електродвигунів, яка характеризує рівень його працездатності з точки зору участі в забезпеченні режиму аварійного розхолодження, визначається виразами:

$$g_j^s(y_p) = \begin{cases} g_j^s, & \text{якщо } f_p(y_p, K) < 0, p = 1 \dots m \\ 0, & \text{якщо } f_p(y_p, K) \geq 0. \end{cases}$$

де  $f_p(y_p, K)$  - деякі характеристичні функції, які описують обмеження на здатність електроустаткування виконувати задані функції,  $K$  - числові величини, які характеризують відхилення режимних параметрів  $y_p$  електроустаткування,  $g_j^s$  - рівень працездатності електроустаткування, нормований відносно заданої характеристики.

Значення функції  $G$ , яке визначає гранично-допустимий стан енергоблока АЕС з точки зору живучості після втрати живлення ВП, можна визначити:

$$G_{\min} = \sum_i g_i(\text{норм}) \cdot (f, U),$$

де  $g_i(\text{норм})$  - рівень працездатності електродвигунів, які забезпечують необхідну по технологічному регламенту продуктивність механізмів в режимі аварійного розхолодження;  $f$ ;  $U$  - частота і напруга на шинах ВП.

Другий розділ присвячений побудові комплексної математичної моделі енергоблока АЕС, яка відображає його динаміку при широкому спектрі збурень, що виникають як в ЕЕС, так і на АЕС. Необхідність моделювання різноманітних аварійних процесів, що виникають на АЕС, потребує побудови деякої множини моделей електричних та технологічних елементів, які б з достатньою повнотою і достовірністю відображали специфічні властивості енергоблока АЕС при аналізі конкретного динамічного процесу.

Для відтворення процесів в енергоблоці АЕС відповідно з прийнятими принципами розроблена комплексна математична модель, яка описує стан технологічної та електричної підсистем і містить моделі процесів в елементах різної природи: нейтронно-фізичні процеси в реакторі; теплофізичні процеси в реакторі, парогенераторі і турбіні; гідродинамічні процеси в циркуляційному контурі; електромеханічні процеси в електричній частині енергоблока.

Модель електричної підсистеми енергоблока описує стан генераторів з системою збудження і автоматичним регулятором збудження (АРЗ), асинхронних двигунів ВП, електричної мережі.

Побудовані математичні моделі синхронних і асинхронних машин змінного струму базуються на рівняннях Парка-Горьва в формі ЕРС, які є загальноприйнятими в практиці проведення розрахунків електромеханічних перехідних процесів. Достатність повноти математичних моделей синхронних генераторів, асинхронних двигунів ВП досягається наявністю набору моделей:  $M_c^2$  - модель синхронного генератора, в якій не враховуються електромагнітні перехідні процеси статорних обмоток;  $M_c^3$  - модель, в якій не враховуються перехідні процеси в демпферних обмотках;  $M_c^4$  - модель синхронного генератора, в якій приймається незмінність ЕРС;  $M_A^2$ ,  $M_A^3$ ,  $M_A^4$  - відповідно моделі двигунів, в яких враховуються перехідні процеси в двох обмотках на роторі, одній обмотці на роторі і без врахування перехідних процесів в роторних контурах.

В моделі електричної мережі описуються процеси в трансформато-

рах, що подані П-образною схемою заміщення, лініях електропередач, також поданих П-образною схемою заміщення і кабелях. Навантаження подано постійною провідністю та асинхронними двигунами.

Найбільш повне відображення процесів, що відбуваються в технологічній частині енергоблока, може дати модель, яка описує просторову залежність параметрів. При дослідженні аварійних перехідних процесів в ЕЕС з АЕС, а також вивченні взаємодії електричної та технологічної підсистем АЕС при збуреннях в ЕЕС, найбільш істотна динаміка інтегральних параметрів енергоблока (нейтронна потужність реактора, тиск і рівень в парогенераторі, витрати теплоносія і живильної води, температура теплоносія на виході із активної зони). Це пов'язано насамперед з тим, що на змінювання інтегральних параметрів енергоблока реагує аварійний захист реактора, системи технологічного захисту блока, системи регулювання і від інтегральних параметрів залежить потужність турбіни та моменти опору механізмів ВП, які в значній мірі впливають на проходження перехідних процесів в ЕЕС. При прийнятих в роботі припущеннях і з врахуванням вищевикладених міркувань, для побудови моделі технологічної частини станції можна використати метод зосереджених параметрів, реалізація якого потребує розбиття кожного елемента енергоблока на ділянки зосереджені з незалежними від просторових координат параметрами.

Побудована на основі цього підходу модель технологічної підсистеми енергоблока АЕС містить моделі таких процесів:  $M_k$  - модель нейтронно-фізичних процесів в реакторі,  $M_{TR}$  - модель теплофізичних процесів в активній зоні реактора,  $M_{П1}$  - модель теплофізичних процесів в парогенераторі (перший контур),  $M_{П2}$  - модель теплофізичних процесів у другому контурі парогенератора,  $M_{ЦК}$  - модель динамічних процесів в циркуляційному контурі,  $M_T$  - модель динамічних процесів в турбіні.

Зазначені моделі динаміки процесів в основних елементах технологічного устаткування доповнені моделями основних регуляторів:

$M_{AR}$  - автоматичний регулятор потужності реактора,  $M_{РЖВ}$  - регулятор живильної води,  $M_{БРЧ}$  - швидкодіючий регулятор тиску в паровому колекторі,  $M_{РТ}$  - модель системи регулювання турбіни,  $M_{РАС}$  - модель регулятора тиску перед турбіною,  $M_{РП}$  - модель регулятора потужності турбіни.

Запропонована комплексна модель енергоблока АЕС є базовою (еталонною) при обґрунтуванні і отриманні на її основі модифікованих моделей, які відтворюють конкретну режимну ситуацію на АЕС та в ЕЕС.

В третьому розділі розглядаються питання комплексного моделю-

вання динаміки енергоблока АЕС з реакторами ВВЕР при аварійних змінюваннях частоти в системі. На основі еталонної комплексної моделі для моделювання поведінки енергоблока при змінюваннях частоти в ЕЕС побудована модель, яка складається із моделей технологічного устаткування станції і системи ВП з досить докладним відтворенням динаміки змінювання внутрішніх параметрів енергоблока та його систем регулювання. При розв'язанні численних задач, пов'язаних з розрахунком динамічної частотної характеристики енергосистеми, коли енергоблоки АЕС, нарівні з блоками ТЕС, розглядаються в моделі ЕЕС як окремі елементи складної багатомашинної системи, повна модель енергоблока АЕС є надлишковою. В цьому випадку немає необхідності відображати в моделі докладно змінювання внутрішніх параметрів енергоблока, а досить відобразити в моделі динаміку змінювання найбільш істотних з точки зору взаємовпливу в перехідних режимах ЕЕС та АЕС параметрів (потужностей реактора та турбіни, витрати теплоносія). З цією метою в роботі обґрунтована і побудована спрощена математична модель енергоблока АЕС для врахування реакції технологічного устаткування АЕС, що має важливе значення при виборі уставок АЧР. Ця модель містить у собі такий набір моделей окремих елементів енергоблока:

$$M^{PAEC} = M_K^c UM_{TP}^c UM_{n2}^c UM_T^c UM_{PT}^c UM_{чк}^c UM_{PAC} UM_{Pл} UM_{вл},$$

де  $M_K^c$  - модель нейтронно-фізичних процесів в реакторі,  $M_{TP}^c$  - модель теплофізичних процесів в активній зоні реактора,  $M_{n2}^c$  - модель теплофізичних процесів в парогенераторі,  $M_{чк}^c$  - модель динамічних процесів в циркуляційному контурі,  $M_T^c$  - модель процесів в турбіні,  $M_{PT}^c$  - модель системи регулювання турбіни,  $M_{PAC}$ ,  $M_{Pл}$  - моделі регуляторів тиску перед турбіною і потужності турбіни,  $M_{вл}$  - модель системи власних потреб.

Відповідно з даними моделями розроблено програмний модуль PAEC, в якому реалізовані повна та спрощена моделі енергоблока АЕС, призначений для аналізу тривалих перехідних процесів на АЕС і в ЕЕС з АЕС, що супроводжуються аварійним змінюванням частоти. Програмний модуль PAEC зістикований з програмою моделювання та аналізу тривалих перехідних процесів в складних енергосистемах (ПАТІ), розробленою в КІП і Київському філіалі інституту "Укренергомережапроект". Оцінка достовірності моделі енергоблока АЕС проводилась шляхом порівняння натурних експериментів з результатами розрахунків по програмі PAEC, а також з розрахунками, що отримані по моделі ВТІ.

І. Порівняння з натурними експериментами, які проводились на Рівненській АЕС (збурення вносились переміщенням груп регульовальних касет реактора - перший дослід і переміщенням регульовальних клапанів

однієї із турбін в сторону закриття - другий дослід) та Нововоронежській АЕС (збурення вносились закриттям регулювальних клапанів турбіни і дії регулятора потужності реактора АРП - третій дослід). Порівняння результатів показало, що якісні картини процесів збігаються. Максимальні середньоквадратичні відхилення складають для нейтронної потужності реактора 10,3 % (перший дослід), для потужності турбіни 11,2 % (другий дослід) і для тиску в парогенераторі 9,4 % (третій дослід).

2. Порівняння результатів розрахунків, виконаних по запропонованій моделі енергоблока АЕС з ВВЕР і по моделі ВТІ. Розглядався динамічний процес енергоблока з реактором ВВЕР-1000 при скиненні навантаження на 20 % шляхом закриття регулювальних клапанів турбіни. Порівняння результатів, отриманих по цим моделям, показує збіг якісних картин процесів. Середньоквадратичні відхилення основних параметрів складають: для тиску пару в парогенераторі 13,1 %, для середньої температури теплоносія 17,3 %, для нейтронної потужності реактора 4,14 %.

Виконаний в роботі якісний аналіз, обчислювальні експерименти дали можливість описати фізичну картину процесів при аварійному зниженні частоти в ЕЕС, виявити основні закономірності проходження цього режиму, які зумовлені взаємовпливом електричної та технологічної частин АЕС. Показано, що такі процеси на АЕС в значній мірі залежать від типу ядерної паровиробляючої установки, конструктивних та динамічних характеристик окремих елементів енергоблока, а також динамічних властивостей конкретної енергосистеми, що визначають рівень, швидкість і тривалість зниження частоти. Були також виконані багатоваріантні дослідно-промислові розрахунки перехідних процесів при небалансах активної потужності в енергосистемі, що містить Рівненську АЕС.

Четвертий розділ присвячений моделюванню процесів при вибігу турбогенератора з механізмами власних потреб. Дійовим способом з точки зору електропостачання власних потреб АЕС в аварійних режимах є використання режиму спільного вибігу турбогенератора з механізмами ВП. Найбільш ефективно використання даного режиму в умовах аварійного розхолодження і зовнішньому обезструмленні станції, коли необхідно до запуску резервних джерел живлення (дизель-генераторів) зберегти в роботі відповідальні насосні агрегати ВП.

На основі аналізу особливостей електричної частини АЕС, схемних рішень ВП АЕС, характерних особливостей проходження режиму вибігу турбогенератора виявлено найбільш суттєві фактори, врахування яких необхідно при подовженні моделі цього процесу, обґрунтована не-

обхідність моделювання процесів в технологічній частині станції. Завдання аналізу даного режиму зводиться до розрахунку внутрішньо-блочного процесу автономної ЕЕС, що супроводжується істотним одночасним зниженням частоти і напруги. Для моделювання цього процесу на основі повної моделі енергоблока АЕС побудована математична модель  $M_{ВНБ}^{РАЕС}$ , яка містить моделі окремих елементів, модифікованих для відображення процесів при глибоких зниженнях частоти і напруги:

$$M_{ВНБ}^{РАЕС} = M_T U M_{РТ} U M_{СΩ}^{3'} U M_{АРЗ} U M_{АΩ}^4 U M_{ЕМ},$$

де  $M_T$ ,  $M_{РТ}$  - моделі динамічних процесів в турбині і її системі регулювання,  $M_{СΩ}^{3'}$  - модель генератора,  $M_{АРЗ}$  - модель системи збудження генератора з АРЗ,  $M_{АΩ}^4$  - модель асинхронного двигуна,  $M_{ЕМ}$  - модель електричної мережі.

Відповідно з даною моделлю розроблена програма РВАЕС, яка зістикована з комплексною програмою розрахунку динаміки технологічної частини АЕС з РВК (розробка НДКІЕТ). Достовірність моделі енергоблока АЕС для розрахунку вибігу турбогенератора перевірялась порівнянням експериментальних характеристик з розрахунковими. Порівняння результатів розрахунку та натурального експерименту показало, що максимальне середньоквадратичне відхилення не перевищує 9,3 %, що свідчить про правильність і достатню для практичних цілей точність відображення моделлю реальних процесів вибігу турбогенератора енергоблока АЕС з механізмами власних потреб. На основі численних обчислювальних експериментів та дослідно-промислових розрахунків були установлені фізичні закономірності проходження процесів при вибігу турбогенератора, що обумовлені взаємовпливом технологічної та електричної частин станції.

У п'ятому розділі розглядаються питання комплексного моделювання процесів при автономному живленні електроприймачів ВП. Характерною особливістю автономних систем електропостачання АЕС є сумірність установлених потужностей джерела живлення і навантаження, що призводить до того, що пускова потужність двигунів значно перевищує потужність джерела. В результаті в теперішній час на діючих АЕС застосовується пуск навантаження ступінями, який характеризується великою тривалістю (декілька хвилин) і супроводжується значними коливаннями частоти і напруги.

Для оцінки живучості енергоблока АЕС після втрати зовнішнього електропостачання, визначення факторів, що справляють першорядний вплив на процеси пуску двигунів на дизель-генератор, а також складу

черг навантаження, що пускаються і інтервалів часу між ними, потрібні досить точні розрахунки параметрів технологічної та електротехнічної підсистем системи надійного живлення АЕС в аварійних режимах. Існуючі на сьогоднішній час моделі автономних систем електропостачання АЕС орієнтовані головним чином на опис процесів в електричній підсистемі і дуже приблизно моделюють динаміку технологічного устаткування, що не завжди допустимо. Разом з тим динамічними властивостями технологічної підсистеми в значній мірі визначаються показники якості електроенергії в автономній системі електропостачання АЕС. Ця обставина підтверджує необхідність розробки повної моделі технологічної частини (дизеля з системами регулювання) системи надійного живлення енергоблока АЕС. З цієї метов розроблена достатньо докладна модель дизеля  $M_d$ , яка описує стан власне дизеля, паливноподавальної апаратури, компресора, газової турбіни, впускного та випускного колекторів, а також модель системи регулювання дизеля  $M_{рш}^s$ , які разом з моделлю електричної підсистеми становлять комплексну математичну модель системи надійного живлення енергоблока АЕС. Побудована комплексна модель автономної системи надійного живлення енергоблока АЕС  $M_{НЖ}^{РАЕС}$  має вигляд (рис. 1):

$$M_{НЖ}^{РАЕС} = M_d \cup M_{рш}^s \cup M_{св}^{3'} \cup M_{АРЗ} \cup M_A^3 \cup M_{ЕМ},$$

де  $M_{св}^{3'}$  - модель генератора,  $M_{АРЗ}$  - модель системи збудження генератора в АРЗ,  $M_{ЕМ}$  - модель електричної мережі.

Відповідно з комплексною моделлю  $M_{НЖ}^{РАЕС}$  розроблена програма РАЕС-НЖ, яка дозволяє проводити розрахунки електромеханічних перехідних процесів при ступінчастому пуску від дизель-генератора навантаження ВП АЕС з різними типами реакторів.

Для перевірки достовірності розробленої комплексної моделі були виконані контрольні розрахунки при накиданні навантаження на дизель-генератор та порівняння розрахункових перехідних процесів з експериментальними для дизеля ІІД45. Порівняння результатів розрахунку частоти обертання дизель-генератора  $\omega$  з результатами експерименту показує задовільний їх збіг (середньоквадратичне відхилення не перевищує 5 %). Були також виконані багатоваріантні дослідно-промислові розрахунки перехідних процесів в автономних системах надійного живлення енергоблоків АЕС з реакторами ВВЕР-1000 при зовнішньому обезструмленні та аваріях в технологічній частині станції. На основі виконаних розрахунків показана істотна залежність перехідних процесів від динамічних властивостей дизель-генератора, встановлені основні фізичні закономірності проходження процесів, що

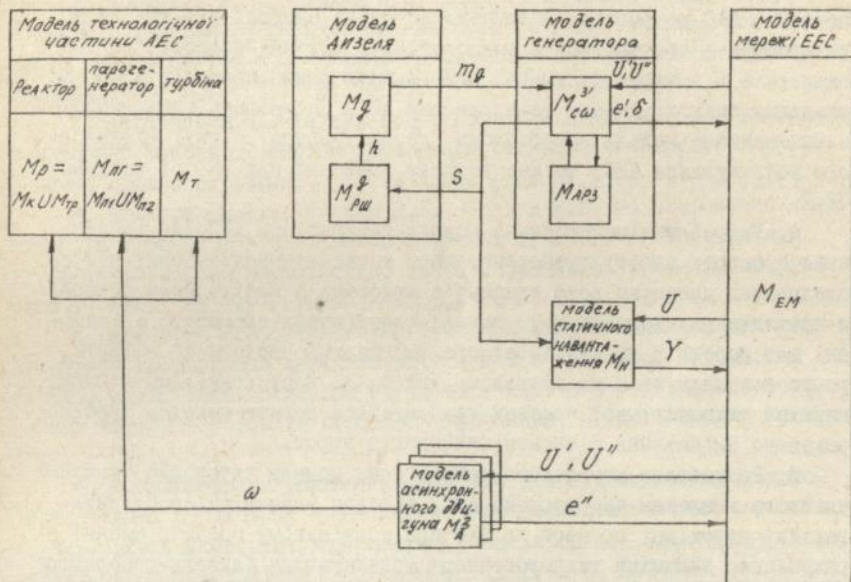


Рис. 1. Структурна схема моделі автономної системи надійного живлення енергоблока АЕС.

обумовлені взаємовпливом в технологічній та електричній частинах АЕС, а також обґрунтовані і одержані спрощені моделі дизель-генератора з системою регулювання.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

В дисертаційній роботі здійснено нове рішення актуального завдання – комплексного моделювання атомного енергоблока при істотних змінюваннях частоти в системі електропостачання ВП для оцінки живучості енергоблока при збуреннях в ЕЕС та електричній частині станції, що має важливе народногосподарське значення.

При цьому отримано такі основні результати:

1. Запропоновано, обґрунтовано та реалізовано системний підхід щодо моделювання перехідних процесів енергоблоків АЕС при глибоких змінюваннях частоти в системі ВП, що дало можливість в цілісному вигляді розглядати динаміку технологічної та електричної частин АЕС. На основі даного підходу запропонована комплексна математична модель енергоблока з реактором ВВЕР.

2. Сформульовано поняття живучості енергоблока при істотних зниженнях частоти в системі ВП і метод її оцінки.

3. Для аналізу динаміки енергоблока при аварійних змінюваннях частоти в ЕЕС розроблена математична модель енергоблока, яка враховує процеси в системі ВП та технологічній частині станції, що дає можливість в конкретних умовах аналізувати вплив процесів в ЕЕС на поведінку технологічного устаткування АЕС. Побудована також спрощена математична модель енергоблока для врахування реакції технологічного устаткування АЕС, що має важливе значення при виборі уставок АЧР.

4. Розроблена математична модель енергоблока АЕС для дослідження процесів вибігу турбогенератора з механізмами власних потреб. Моделювання динаміки всіх елементів виконано з врахуванням специфіки проходження цього режиму: моделі електричних елементів орієнтовані для роботи в умовах істотного змінювання частоти та напруги, процес розглядається на тривалому інтервалі часу (декілька хвилин), динаміка технологічної частини враховується повною моделлю турбіни, враховано змінювання різноманітних видів втрат.

5. Розроблена комплексна математична модель автономної системи надійного живлення енергоблока АЕС, яка дає можливість дослідити аварійні перехідні процеси на АЕС при зовнішньому обезструмленні з врахуванням динаміки технологічного устаткування (дизель-генератора з системою регулювання). Така модель дозволяє виконувати точні розрахунки режимів ступінчастого пуску навантаження на дизель-генератор і на цій основі здійснювати більш достовірну оцінку живучості станції при аваріях в електричній частині АЕС.

6. На основі обчислювальних експериментів встановлені фізичні закономірності взаємовпливу процесів в технологічній та електричній частинах атомних енергоблоків при аварійному зниженні частоти в ЕЕС, спільному вибігу турбогенератора АЕС з механізмами власних потреб та ступінчастому пуску навантаження на дизель-генератор в автономній системі надійного живлення при зовнішньому обезструмленні станції.

7. Моделі і методи дослідження аварійних режимів енергоблока реалізовані в програмному забезпеченні, яке дозволяє дослідити процеси середньої тривалості та тривалі внутрішньоблочні перехідні процеси на АЕС і впроваджені в ряді дослідних та проектних організацій.

#### ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

І. Бардик Е.И., Костерев Н.В. Нелинейные математические модели атомных электростанций для исследования электромеханических переходных процессов в энергосистемах // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Проблемы нелинейной электротехники. Ч.2. - Киев, Наукова думка, 1984. - С. 92-94.

2. Костерев Н.В., Гардик Е.И. Модель энергоблока одноконтурной АЭС с каналными реакторами кипящего типа для анализа устойчивости энергосистемы при больших возмущениях // Техническая электродинамика. - 1989. № 1. - С. 70-75.

3. Костерев Н.В., Гардик Е.И., Яновский В.П. Методы и алгоритмы построения локальных систем управления режимами энергосистем с АЭС. - Киев, общество "Знание", УССР, 1981. - 24 с.

4. Костерев Н.В., Денисюк П.Л., Гардик Е.И. Моделирование динамических процессов в системе собственных нужд АЭС // Тез. докл. IV Республиканской научн.-техн. конф. Современные проблемы энергетики. - Киев, Изд. АН Украины, 1985. - С. 54-56.

5. Костерев Н.В., Гардик Е.И. Модель энергоблока АЭС при решении задач координации действий агрегатной и системной автоматики // Тез. докл. Респ. семинара Управление режимами электроэнергетических систем в условиях неполной информации. - Киев, Изд. АН УССР, 1980. - С. 33-34.

6. Моделирование режимов работы АЭС для исследования электро-механических переходных процессов в электроэнергетических системах // Тез. докл. Всесоюзн. научн.-конф. Моделирование электроэнергетических систем. - Баку: АЗ и нефтехим, 1982. - С. 237-238.

7. Костерев Н.В., Яновский В.П., Гардик Е.И. Комплекс программ моделирования динамики электростанций при возмущениях в энергосистеме // Тез. докл. Всесоюзн. научн.-техн. совещ. Вопросы устойчивости и надежности энергосистемы СССР. - Душанбе; НТЭС и ЭП, 1989. - С. 83-84.

8. Костерев Н.В., Гардик Е.И., Алексаков А.Н. Комплекс программ расчета динамики энергосистем с АЭС в аварийных режимах // Тез. докл. X Всесоюзн. научн. конф. Моделирование электроэнергетических систем. - Каунас: ИЭПЭ АН Литвы, 1991. - С. 102-104.

---

Підп. до друку 06.02.94. . Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Папір друк. № 3 . Спосіб друку офсетний. Умовн. друк. арк. 0,23 .  
Умовн. фарбо-відб. 1,04 . Обл.-вид. арк. 1,0 .  
Тираж 100 . Зам. № 4-39½ . Безплатно.

---

Фірма «ВІПОЛ»  
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

1-2570

AB 30.690