



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 94897

(13) C2

(51) МПК (2011.01)
G21C 7/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) СПОСІБ РЕГУЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ АКТИВНОЇ ЗОНИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА ВОДІ ПІД ТИСКОМ

1

2

(21) а200705511

(22) 21.05.2007

(24) 25.06.2011

(31) 06/04572

(32) 22.05.2006

(33) FR

(46) 25.06.2011, Бюл.№ 12, 2011 р.

(72) ГРОССЕТЕТ АЛЕН, FR

(73) АРЕВА НП, FR

(56) FR 2493582 A1, G21D3/16, публ. 07.05.1982.

US 4844856 A, G21C7/08, публ. 04.07.1989.

US 4240874 A, G21C7/06, публ. 23.12.1980.

US 4699749 A, G21C7/36, публ. 13.10.1987.

US 4647421 A, G21C7/36, публ. 03.03.1987.

RU 2173895 C1, G21C7/00, G21D3/12, публ. 20.09.2001.

(57) 1. Спосіб регулювання робочих параметрів активної зони ядерного реактора на воді під тиском, причому згаданий ядерний реактор (8) включає в себе:

активну зону (10), поділену на верхню частину та нижню частину, де виробляється теплова потужність;

множину груп (P1-P5) керувальних стрижнів (40) для регулювання реактивності активної зони (10), причому кожна група може займати в активній зоні (10) множину положень введення, розподілених по висоті, причому вихідним є верхнє положення;

засоби для введення кожної групи стрижнів (P1-P5) по вертикалі у активну зону (10);

первинний контур (30), пристосований для забезпечення циркуляції первинної охолоджувальної рідини через активну зону (10);

засоби для регулювання концентрації щонайменше однієї сполуки-поглинача нейтронів ([B]) у первинній охолоджувальній рідині;

засоби для вимірювання величин (FH, FB, TBC, TBF, Q), які характеризують робочі умови в активній зоні реактора,

який **відрізняється** тим, що згаданий спосіб регулювання включає:етап оцінювання ефективних значень ($T_{моуе}$, $AO_{е}$, \hat{P}_{max}) робочих параметрів принаймні в залежності від виміряних величин (FH, FB, TBC, TBF, Q);

етап вибору закону регулювання концентрації сполуки-поглинача ([B]) та положень введення (Z1-Z5) груп стрижнів (P1-P5), який вибирається з групи, що включає щонайменше перший та другий закони регулювання, які відрізняються один від одного; та

етап регулювання робочих параметрів згідно з вибраним законом регулювання в залежності від заданих значень ($T_{моус}$, $AO_{с}$, \hat{P}_{max}), що стосуються згаданих параметрів, та оцінених ефективних значень ($T_{моуе}$, $AO_{е}$, \hat{P}_{max}), та тим, що робочі параметри, що регулюються, включають принаймні середню температуру ($T_{моу}$) первинної охолоджувальної рідини у активній зоні (10), осьовий розподіл теплової потужності (AO) між верхньою та нижньою частинами активної зони (10) та параметр (\hat{P}_{max}), який характеризує можливість підняття потужності реактора (P_{max}), причому можливість підняття потужності (P_{max}) відповідає тепловій потужності, яка може бути вироблена в активній зоні (10) при швидкому піднятті груп стрижнів (P1-P5) у положення, близьке до верхнього.2. Спосіб за п.1, який **відрізняється** тим, що на етапі вибору перший закон вибирають, коли щонайменше одна група стрижнів (P1) знаходиться у положенні введення (Z1), нижчому від певного заздалегідь визначеного положення (Z_{ref}), а другий закон вибирають у протилежному випадку.3. Спосіб за п.1 або п.2, який **відрізняється** тим, що він включає перший етап обчислення задаваних значень ($T_{моус}$, $AO_{с}$, \hat{P}_{max}) робочих параметрів принаймні в залежності від заданих параметрів ($P_{с}$, P_{max} , $AO_{с}$) керування реактором.4. Спосіб за п.3, який **відрізняється** тим, що при застосуванні першого закону регулювання осьовий розподіл потужності (AO) регулюють з доведенням до його заданого значення ($AO_{с}$) шляхом переміщення груп стрижнів (P1-P5), а при застосуванні другого закону регулювання осьовий розподіл потужності (AO) регулюють з доведенням до його заданого значення ($AO_{с}$) шляхом встановлення концентрації сполуки-поглинача ([B]) у первинній охолоджувальній рідині.

(13) C2

(11) 94897

(19) UA

5. Спосіб за п.3 або п.4, який **відрізняється** тим, що при застосуванні першого закону регулювання параметр (\hat{P}_{max}), що характеризує можливість підняття потужності реактора (P_{max}), регулюють з доведенням до його заданого значення (\hat{P}_{maxc}) шляхом встановлення концентрації сполуки-поглиначи ($[B]$) у первинній охолоджувальній рідині, а при застосуванні другого закону регулювання згаданий параметр (\hat{P}_{max}) регулюють з доведенням до його заданого значення (\hat{P}_{maxc}) шляхом переміщення груп стрижнів ($P1-P5$).

6. Спосіб за будь-яким із пп.3-5, який **відрізняється** тим, що згаданий перший етап включає стадію обчислення задаваного значення середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні ($T_{моус}$) на основі характерного значення (P_c) потужності, що постачається в електричну мережу, яку живить реактор.

7. Спосіб за п.6, який **відрізняється** тим, що згаданий перший етап включає стадію розподілу груп стрижнів ($P1-P5$) на регульовальну підмножину (P_i), що забезпечує регулювання середньої температури первинної охолоджувальної рідини ($T_{моу}$) у активній зоні, та малорухому підмножини (H), яка головним чином забезпечує регулювання осьового розподілу потужності (AO), причому групи стрижнів малорухомої підмножини (H) введені менше, ніж групи регульовальної підмножини (P_i).

8. Спосіб за п.7, який **відрізняється** тим, що малорухома підмножина (H) стрижнів завжди розташована у верхній половині активної зони.

9. Спосіб за п.7 або п.8, який **відрізняється** тим, що параметр (\hat{P}_{max}), який характеризує можливість підняття потужності реактора (P_{max}), визначають принаймні на основі положень введення групи або груп стрижнів регульовальної підмножини (P_i), перший етап включає стадію обчислення задаваного положення (Zic) групи або груп стрижнів регульовальної підмножини (P_i) в залежності від заданої характеристики (P_{maxc}) можливості підняття потужності та вимірних значень (TBC , TBF , Q).

10. Спосіб за п.9, який **відрізняється** тим, що етап регулювання за першим законом регулювання включає:

стадію обчислення необхідних переміщень (dZ_i) групи або груп стрижнів регульовальної підмножини (P_i) в залежності від заданого значення ($T_{моус}$) та ефективного значення ($T_{моуе}$) середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні реактора; та

стадію модифікування положення або положень введення групи або груп стрижнів регульовальної підмножини (P_i) в залежності від обчислених переміщень (dZ_i) з метою регулювання середньої температури ($T_{моу}$) первинної охолоджувальної рідини у активній зоні з доведенням її до заданого значення ($T_{моус}$).

11. Спосіб за будь-яким із п.9 та п.10, який **відрізняється** тим, що етап регулювання за першим законом регулювання включає:

стадію обчислення необхідних переміщень (dZ_i) групи або груп стрижнів регульовальної підмножи-

ни (P_i) та необхідного переміщення (dZh) малорухомої підмножини (H) в залежності принаймні від заданої характеристики (AO_c) та ефективної характеристики (AO_e) осьового розподілу теплової потужності; та

стадію модифікування положення або положень введення групи або груп стрижнів регульовальної підмножини (P_i) та/або малорухомої підмножини (H) в залежності від обчислених переміщень (dZ_i , dZh) з метою регулювання осьового розподілу теплової потужності (AO) з доведенням її до заданого значення (AO_c).

12. Спосіб за п.11, який **відрізняється** тим, що коли середня температура ($T_{моу}$) охолоджувальної рідини знаходиться у межах зони нечутливості навколо її заданого значення ($T_{моус}$), то регульовальна підмножина стрижнів (P_i) та малорухома підмножина (H) переміщуються у протилежних напрямках із метою регулювання осьового розподілу теплової потужності (AO) з доведенням його до заданого значення (AO_c).

13. Спосіб за будь-яким із пп.9-12, який **відрізняється** тим, що етап регулювання за першим законом регулювання включає:

стадію обчислення концентрації сполуки-поглиначи ($[B]$) в залежності від заданого значення (\hat{P}_{maxc}) та ефективного значення (\hat{P}_{maxe}) параметра, що характеризує можливість підняття потужності реактора; та

стадію встановлення концентрації сполуки-поглиначи ($[B]$) у первинній охолоджувальній рідині відповідно до обчисленого значення з метою регулювання параметра (\hat{P}_{max}), що характеризує можливість підняття потужності реактора, з доведенням його до заданого значення (\hat{P}_{maxc}).

14. Спосіб за будь-яким із пп.9-13, який **відрізняється** тим, що етап регулювання за другим законом регулювання включає:

стадію обчислення необхідних переміщень (dZ_i) групи або груп стрижнів регульовальної підмножини (P_i) та необхідного переміщення (dZh) малорухомої підмножини (H) в залежності від заданого ($T_{моус}$) та ефективного ($T_{моуе}$) значень середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні та в залежності від заданого (Zic) та ефективного (Zle) положень групи $P1$; та стадію модифікування положення або положень введення групи або груп стрижнів регульовальної підмножини (P_i) та/або малорухомої підмножини (H) в залежності від обчислених переміщень (dZ_i , dZh) з метою регулювання середньої температури ($T_{моу}$) первинної охолоджувальної рідини у активній зоні з доведенням її до заданого значення ($T_{моус}$).

15. Спосіб за п.14, який **відрізняється** тим, що регульовальна підмножина (P_i) переміщується у першу чергу з метою регулювання середньої температури ($T_{моу}$) первинної охолоджувальної рідини у активній зоні, а малорухома підмножина (H) переміщується, коли регульовальна підмножина (P_i) досягає крайніх положень зони нечутливості, середина якої відповідає заданому положенню (Zic) цієї підмножини.

16. Спосіб за будь-яким із пп.9-15, який **відрізняється** тим, що етап регулювання за другим законом регулювання включає:

стадію обчислення концентрації сполуки-поглиначи ($[B]$) в залежності від заданого значення (AO_c) та ефективного значення (AO_e) характеристики осьового розподілу теплової потужності; та стадію встановлення концентрації сполуки-поглиначи ($[B]$) у первинній охолоджувальній рідині відповідно до обчисленого значення з метою регулювання характеристики осьового розподілу теплової потужності (AO) з її доведенням до заданого значення (AO_c).

17. Спосіб за будь-яким із пп.9-16, який **відрізняється** тим, що етап регулювання за другим законом регулювання включає:

стадію обчислення необхідного переміщення або переміщень (dZ_i) групи або груп стрижнів регулювальної підмножини (P_i) та необхідного переміщення малорухомої підмножини (H) в залежності принаймні від заданих (Z_{ic}) та ефективних (Z_{ie}) характеристик положень введення групи або груп стрижнів регулювальної підмножини (P_i); та стадію модифікування положення або положень введення групи або груп стрижнів регулювальної підмножини (P_i) та/або малорухомої підмножини (H) в залежності від обчислених переміщень (dZ_i ,

dZ_h) з метою утримання групи або груп стрижнів регулювальної підмножини (P_i) у межах зони нечутливості навколо заданого положення введення (Z_{ic}).

18. Спосіб за п.17, який **відрізняється** тим, що, коли середня температура охолоджувальної рідини (T_{mo}) знаходиться у межах своєї зони нечутливості навколо заданого значення ($T_{mo,c}$), то регулювальну підмножину (P_i) та малорухоому підмножину (H) переміщують у протилежних напрямках із метою утримання групи або груп регулювальної підмножини (P_i) у межах згаданої зони нечутливості навколо заданого положення введення (Z_{ic}).

19. Спосіб за будь-яким із пп.7-18, який **відрізняється** тим, що групи стрижнів регулювальної підмножини (P_i) при варіюванні теплової потужності, що виробляється в активній зоні, вводять або витягають послідовно, причому дві групи, які послідовно вводять або витягають, займають відповідні положення введення, відділені одне від одного проміжком, який постійно є меншим від заздалегідь визначеного граничного значення.

20. Спосіб за будь-яким із попередніх пунктів, який **відрізняється** тим, що спосіб регулювання є автоматичним.

Винахід стосується в цілому способів керування ядерними реакторами. Більш конкретно, цей винахід стосується способу регулювання робочих параметрів активної зони ядерного реактора на воді під тиском, причому згаданий ядерний реактор включає активну зону, поділену на верхню частину та нижню частину, де виробляється тепла потужність; множини груп керувальних стрижнів для регулювання реактивності активної зони, причому кожна група може займати в активній зоні множини положень введення, розподілених по висоті, причому вихідним є верхнє положення; засоби для введення кожної групи стрижнів зверху вниз по вертикалі у активну зону до досягнення одного зі згаданих положень введення; первинний контур, пристосований для забезпечення циркуляції первинної охолоджувальної рідини через активну зону; засоби для регулювання концентрації щонайменше однієї сполуки-поглиначи нейтронів у первинній охолоджувальній рідині; засоби для вимірювання величин, які характеризують робочі умови в активній зоні реактора.

У патенті FR-2,493,582 описано спосіб, згідно з яким температура первинної охолоджувальної рідини автоматично регулюється шляхом переміщення груп керувальних стрижнів в залежності від споживаної потужності на турбіні, поточного значення температури та заданого значення температури. Осьовий розподіл теплової потужності (та нейтронної потужності) автоматично регулюється шляхом переміщення окремих груп, підібраних відповідним чином. Нарешті, параметр, що характеризує можливість підняття потужності реактора,

регулюється оператором шляхом регулювання концентрації бору у первинній рідині шляхом додавання або чистої води, або концентрованого розчину бору.

У цьому способі одна група керувальних стрижнів має постійно бути введеною у нижню частину активної зони з метою забезпечення регулювання осьового розподілу потужності. Ця вимога не може бути виконана, коли реактор працює на підвищеній потужності, оскільки в цьому випадку усі групи стрижнів розташовані у верхній частині активної зони. В такому разі оператори мають переключити систему автоматичного регулювання температури та осьового розподілу потужності за описаним вище способом на інший режим, який дозволяє автоматично регулювати тільки температуру.

Це переключення вимагає стабілізації перехідного режиму - описаний вище спосіб регулювання активної зони не дозволяє автоматично регулювати потужність турбіни, коли групи стрижнів знаходяться у зоні переходу від одного режиму регулювання до іншого. У цій зоні неможливе функціонування реактора "з регулюванням частоти", оскільки таке функціонування полягає у модулюванні потужності турбіни, спрямованому на підтримання в електричній мережі, яку живить реактор, частоти 50Гц.

У зв'язку з вищезазначеним, задачею цього винаходу є запропонування способу регулювання активної зони ядерного реактора, який забезпечує ефективне та автоматичне регулювання трьох вищезгаданих робочих параметрів (температура первинної охолоджувальної рідини, осьовий роз-

поділ потужності, можливості підняття потужності реактора) на більш високому рівні робочої потужності реактора.

Для вирішення цієї задачі пропонується спосіб регулювання робочих параметрів активної зони ядерного реактора на воді під тиском, який відрізняється тим, що він включає:

- етап оцінювання ефективних значень робочих параметрів принаймні в залежності від вимірних величин;
- етап вибору закону регулювання концентрації сполуки-поглинача та положень введення груп стрижнів, який вибирається з групи, що включає щонайменше перший та другий закони регулювання, які відрізняються один від одного;
- етап регулювання робочих параметрів згідно з вибраним законом регулювання в залежності від заданих значень, що стосуються згаданих параметрів, та оцінених ефективних значень.

Цей спосіб може також мати одну або кілька вказаних нижче характеристик, що розглядаються окремо або у будь-яких технічно можливих комбінаціях:

- робочі параметри, що регулюють, включають щонайменше середню температуру первинної охолоджувальної рідини у активній зоні реактора, осьовий розподіл теплової потужності між верхньою та нижньою частинами активної зони та параметр, який характеризує можливість підняття потужності реактора, причому можливість підняття потужності відповідає тепловій потужності, яка може бути вироблена в активній зоні при швидкому піднятті груп стрижнів у положення, близьке до верхнього;
- на етапі вибору перший закон вибирають, коли щонайменше одна група стрижнів знаходиться у положенні введення, нижчому від певного заздалегідь визначеного положення, а другий закон вибирають у протилежному випадку;
- спосіб включає перший етап обчислення задаваних значень робочих параметрів принаймні в залежності від заданих параметрів керування реактором;
- згаданий перший етап включає стадію обчислення задаваного значення середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні реактора, виходячи з характерного значення потужності, що постачається в електричну мережу, яку живить реактор;
- перший етап включає стадію розподілу груп стрижнів на регульовальну підмножину, що забезпечує регулювання середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні реактора, та малорухоми підмножину, яка головним чином забезпечує регулювання осьового розподілу потужності, причому групи стрижнів малорухоми підмножини введені менше, ніж групи регульовальної підмножини;
- параметр, який характеризує можливість підняття потужності реактора, визначається принаймні на основі положень введення групи або груп стрижнів регульовальної підмножини, перший етап включає стадію обчислення задаваного положення групи або груп стрижнів регульовальної підмножини в залежності від заданої характеристики мо-

жливості підняття потужності та вимірних значень параметрів;

- етап регулювання за першим законом регулювання включає:

- * стадію обчислення необхідних переміщень групи або груп стрижнів регульовальної підмножини в залежності від заданого значення та ефективного значення середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні реактора та

- * стадію модифікування положення або положень введення групи або груп стрижнів регульовальної підмножини в залежності від обчислених переміщень із метою регулювання середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні з доведенням її до заданого значення;

- етап регулювання за першим законом регулювання включає:

- * стадію обчислення необхідних переміщень групи або груп стрижнів регульовальної підмножини та необхідних переміщень малорухоми підмножини в залежності від заданої характеристики та ефективної характеристики осьового розподілу теплової потужності та

- * стадію модифікування положення або положень введення групи або груп стрижнів регульовальної підмножини та/або малорухоми підмножини в залежності від обчислених переміщень із метою регулювання осьового розподілу теплової потужності відповідно до заданої характеристики;

- етап регулювання за першим законом регулювання включає:

- * стадію обчислення концентрації сполуки-поглинача в залежності від заданого значення та ефективного значення параметра, що характеризує можливість підняття потужності реактора та

- * стадію встановлення концентрації сполуки-поглинача у первинній охолоджувальній рідині відповідно до обчисленого значення з метою регулювання параметра, що характеризує можливість підняття потужності реактора, з доведенням його до заданого значення;

- етап регулювання за другим законом регулювання включає:

- * стадію обчислення необхідних переміщень групи або груп стрижнів регульовальної підмножини та необхідних переміщень малорухоми підмножини в залежності від заданого та ефективного значень середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні та в залежності від заданого та ефективного положень групи Р1 та

- * стадію модифікування положення або положень введення групи або груп стрижнів регульовальної підмножини та/або малорухоми підмножини в залежності від обчислених переміщень із метою регулювання середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні з доведенням її до заданого значення;

- регульовальну підмножину переміщують у першу чергу з метою регулювання середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні, а малорухоми підмножину переміщують, коли регульовальна підмножина досягає крайніх

положень зони нечутливості, середина якої відповідає заданому положенню цієї підмножини;

- етап регулювання за другим законом регулювання включає:

- * стадію обчислення концентрації сполуки-поглинача в залежності від заданого значення та ефективного значення характеристики осьового розподілу теплової потужності та

- * стадію встановлення концентрації сполуки-поглинача у первинній охолоджувальній рідині відповідно до обчисленого значення з метою регулювання характеристики осьового розподілу теплової потужності з його доведенням до заданого значення;

- етап регулювання за другим законом регулювання включає:

- * стадію обчислення необхідних переміщень групи або груп стрижнів регулювальної підмножини та необхідного переміщення малорухомої підмножини в залежності від заданих та ефективних характеристик положень введення групи або груп стрижнів регулювальної підмножини та

- * стадію модифікування положення або положень введення групи або груп стрижнів регулювальної підмножини та/або малорухомої підмножини в залежності від обчислених переміщень із метою утримання групи або груп стрижнів регулювальної підмножини у межах зони нечутливості навколо заданого положення введення;

- групи стрижнів регулювальної підмножини при варіюванні теплової потужності, що виробляється в активній зоні, вводять або піднімають послідовно, причому дві групи, які послідовно вводять або піднімають, займають відповідні положення введення, відділені одне від одного проміжком, який постійно є меншим від заздалегідь визначеного граничного значення.

Інші характерні ознаки та переваги цього винаходу будуть зрозумілі з поданого нижче опису, який має ілюстративний, але в жодному разі не обмежувальний характер, із посиланнями на креслення, що додаються, на яких:

- на Фіг.1 схематично представлені основні етапи способу за цим винаходом;

- на Фіг.2 показана схема процесу, яка більш детально характеризує етапи двох законів регулювання, які реалізуються у способі, представленому на Фіг.1;

- на Фіг.3А, Фіг.3В, Фіг.3С схематично показано переміщення груп регулювальних стрижнів у реакторі, керування яким здійснюється із застосуванням способу, представленого на Фіг.1 та Фіг.2, при переході заданої потужності від 100% номінального значення (Фіг.3А) до 50% номінального значення (Фіг.3В), а потім до 30% номінального значення (Фіг.3С);

- на Фіг.4 схематично представлена логічна схема переміщень груп стрижнів відповідно до способу, представленого на Фіг.1 та Фіг.2, в залежності від різниці $\Delta T_{\text{моу}}$ між ефективною середньою температурою первинної охолоджувальної рідини та заданою температурою (вісь абсцис; виражена у $^{\circ}\text{C}$) та різницею ΔA_O між поточним розподілом потужності та заданим розподілом потужності (вісь ординат; виражена у відсотках)

відповідно до першого закону регулювання (щонайменше одна група стрижнів введена у нижню частину активної зони);

- на Фіг.5А-5D схематично представлено переміщення груп стрижнів відповідно до першого закону регулювання з метою регулювання осьового розподілу потужності у різних випадках;

- на Фіг.6А-6С схематично представлено положення регулювальних груп із метою регулювання можливості підняття потужності реактора для двох рівнів потужності (100% та 50%) та двох різних значень характеристики можливості підняття потужності ($P_{\text{max}}=100\%$ та 70%);

- на Фіг.7 схематично представлена логічна схема переміщень груп стрижнів у залежності від різниці $\Delta T_{\text{моу}}$ між ефективною середньою температурою первинної охолоджувальної рідини та заданою температурою (вісь абсцис виражена у $^{\circ}\text{C}$) та різницею ΔZ_1 між ефективним положенням регулювальної групи Р1 та заданим положенням (вісь ординат) відповідно до другого закону регулювання; та

- на Фіг.8А та Фіг.8В схематично представлено переміщення регулювальних груп стрижнів відповідно до другого закону регулювання у різних випадках.

Спосіб, схематично представлений на Фіг.1 та Фіг.2, призначений для регулювання активної зони ядерного реактора, а саме реактора на воді під тиском.

Цей реактор 8, схематично показаний на Фіг.1, включає:

- активну зону 10, яка включає в себе блоки з ядерним паливом;

- корпус 20, всередині якого розташована активна зона 10 реактора;

- парогенератор (не показаний на фігурах);

- парову турбіну (не показану на фігурах), здатну приводити у рух генератор змінного струму, підключений до розподільчої електричної мережі;

- первинний контур 30, який з'єднує корпус 20 із первинним боком парогенератора за схемою замкнутого циклу;

- вторинний контур (не показаний на рисунках), який з'єднує вторинний бік парогенератора з турбіною за схемою замкнутого циклу.

Активна зона 10 генерує змінну теплову потужність. Вона поділена на верхню та нижню частини.

Первинний контур 30 здатен забезпечити циркуляцію через активну зону 10 первинної охолоджувальної рідини, яка містить, головним чином, воду та певну кількість розчиненого бору; ця рідина нагрівається внаслідок контакту з блоками ядерного палива, а потім віддає тепло при проходженні через парогенератор. Вторинний контур здатен забезпечити циркуляцію вторинної охолоджувальної рідини, яка містить, головним чином, воду; ця рідина випаровується у парогенераторі під впливом тепла, яке віддає первинна рідина. Пара приводить у рух турбіну, а потім конденсується та повертається у парогенератор.

Генератор змінного струму постачає у мережу електричну потужність, яка варіює залежно від потреб мережі. Керування реактором здійснюється

таким чином, щоб забезпечувати безперервне узгоджування теплової потужності, яка постачається активною зоною, з електричною потужністю, якої потребує мережа, шляхом варіювання реактивності у активній зоні реактора.

З цією метою реактор обладнаний такими засобами:

- засобами для регулювання концентрації бору, розчиненого у первинній охолоджувальній рідині, шляхом введення у первинну рідину концентрованого розчину борної кислоти в разі необхідності підвищення згаданої концентрації або ж введення чистої води при необхідності зниження цієї концентрації;

- регулювальними стрижнями 40 для регулювання реактивності активної зони (Фіг.1), кожний з яких може займати у активній зоні множину положень введення, розподілених по вертикалі, починаючи з верхнього положення; регулювальні стрижні 40 розподілені, наприклад, по п'яти групах Р1-Р5, причому стрижні однієї групи переміщуються спільно;

- засобами для вибіркового введення кожної з груп Р1-Р5 стрижнів у активну зону по вертикалі зверху вниз до досягнення одного з положень введення;

- засобами для вимірювання величин FН та FВ, які характеризують значення теплової потужності, яка генерується у верхній та нижній частинах активної зони, температури TBF первинної охолоджувальної рідини у холодній гілці 31 первинного контуру 30, тобто безпосередньо на вході активної зони, температури TBC первинної охолоджувальної рідини у гарячій гілці 32 первинного контуру 30, тобто безпосередньо на виході активної зони, та витрати Q первинної охолоджувальної рідини у первинному контурі.

Бор, розчинений у первинній рідині, поглинає нейтрони, які випромінюються блоками ядерного палива, таким чином, що реактивність активної зони 10 зменшується при підвищенні концентрації бору.

У ядерному реакторі на воді під тиском кожний блок ядерного палива включає пакет труб значної довжини, які містять таблетки речовини, що зазнає радіоактивного ділення; ці труби звуться тепловидільними елементами. Тепловидільні елементи розташовані вертикально, паралельно один одному, та зібрані у блоки за допомогою поперечних з'єднувальних решіток. У деяких блоках кілька тепловидільних елементів замінені пустими трубами, що звуться напрямними трубами.

Кожний регулювальний стрижень включає пучок труб, які містять речовину, що поглинає нейтрони. Ці труби мають таку саму довжину, як паливні блоки. Вони з'єднані одна з одною так, що утворюють пакет, що може переміщуватися по вертикалі як одне ціле. Кожний пакет може вводитися у напрямні труби паливних блоків так, що труби з поглинальною речовиною розташовуються у проміжках решітки тепловидільних елементів, які містять таблетки ядерного палива. Реактивність активної зони реактора знижується при введенні в неї регулювальних стрижнів. Що глибше, тобто далі від свого верхнього положення, розташова-

ний регулювальний стрижень, то нижчою є реактивність активної зони.

Величинами, які характеризують значення теплової потужності, яка генерується у верхній та нижній частинах активної зони, є нейтронні потоки FН та FВ відповідно у верхній та нижній частинах активної зони, які вимірюються за допомогою датчиків, розташованих в активній зоні на різних рівнях.

Спосіб регулювання, представлений на Фіг.1, забезпечує автоматичне регулювання кількох робочих параметрів активної зони реактора в залежності від заданих значень, які задає оператор, що керує реактором, або визначаються зовнішніми умовами, наприклад, станом розподільчої електричної мережі.

Параметри, що регулюються, включають принаймні середню температуру Tмоу первинної охолоджувальної рідини у активній зоні реактора, осьовий розподіл АО теплової потужності між верхньою та нижньою частинами активної зони та

параметр Pmax, який характеризує можливість підняття потужності реактора Pmax.

Концентрація бору у первинній рідині та положення груп Р1-Р5 стрижнів модифікуються автоматично з метою регулювання робочих параметрів, без втручання операторів або при дуже незначному втручанні операторів, наприклад, з метою зміни заданих значень параметрів керування або для підтвердження команд на переміщення груп стрижнів або на модифікування концентрації бору, які видаються згідно зі способом регулювання.

Можливість підняття потужності Pmax відповідає тепловій потужності, яка може бути розвинена в активній зоні при швидкому піднятті груп Р1-Р5 стрижнів у верхню частину активної зони, у положення, близьке до верхнього.

Осьовий розподіл потужності АО визначається зі співвідношення:

$$AO = (F_H - F_B) / (F_H + F_B) \quad (1),$$

де FН та FВ - нейтронні потоки відповідно у верхній та нижній частинах активної зони.

Температура Tмоу визначається зі співвідношення:

$$T_{моу} = (T_{BC} + T_{BF}) / 2 \quad (2).$$

Задані параметри керування активною зоною включають величину Pс, яка характеризує потужність на виході вторинного контуру, яка має подаватися на турбіну, задану характеристику можливості підняття потужності реактора Pmaxс та задану характеристику осьового розподілу АОс потужності між верхньою та нижньою частинами активної зони. Великою, яка характеризує вторинну потужність Pс, є, наприклад, значення теплової потужності, яка постачається вторинним контуром реактора. За іншим варіантом можна використати як таку характеристику задане значення електричної потужності, яка постачається генератором змінного струму у мережу.

Як видно з Фіг.1, спосіб регулювання включає:

- перший етап 1 обчислення задаваних значень робочих параметрів (Tмоус, АОс, Pmaxс), в

залежності від заданих параметрів керування реактором (P_c , AO_c , P_{maxc}), які встановлюються оператором, та від ефективної первинної теплової потужності (P_{pe}), яка постачається активною зоною у первинний контур;

- другий етап 2 визначення ефективних значень величин (FH , FB), які характеризують значення теплової потужності, що генерується у верхній та нижній частинах активної зони, температур первинної охолоджувальної рідини у гарячій та холодній гілках (TBC , TBF) та витрати первинної рідини (Q);

- третій етап 3 оцінювання ефективних значень ($T_{моуе}$, AO_e , $P_{махе}$) робочих параметрів принаймні в залежності від одержаних значень величин (FH , FB , TBC , TBF , Q);

- четвертий етап 4 вибору закону регулювання концентрації бору $[B]$ та положень введення Z_1 - Z_5 груп стрижнів P_1 - P_5 , причому закон регулювання вибирається з-поміж першого та другого законів регулювання, які відрізняються один від одного;

- п'ятий етап 5 регулювання робочих параметрів відповідно до вибраного закону регулювання в залежності від заданих значень ($T_{моус}$, AO_c , P_{maxc}) цих параметрів та їх оцінених ефективних значень ($T_{моуе}$, AO_e , $P_{махе}$).

Ці етапи детально показано на Фіг.2.

Перший етап 1 включає стадії 11-13, ілюстровані на Фіг.2.

На стадії 11 обчислюється задаване значення середньої температури $T_{моус}$ первинної охолоджувальної рідини у активній зоні в залежності від заданого значення потужності P_c , яке вводить оператор. Для цієї мети використовується, наприклад, заздалегідь визначений графік, який дозволяє безпосередньо визначати значення $T_{моус}$ як функції P_c .

На стадії 12 групи стрижнів P_1 - P_5 розподіляються між регулювальною підмножиною P_i , яка забезпечує регулювання середньої температури $T_{моу}$ первинної охолоджувальної рідини у активній зоні, та неглибоко введеною в активну зону малорухомою підмножиною H , яка забезпечує, головним чином, регулювання осьового розподілу потужності AO .

Як показано на Фіг.3А-3С, кожна з груп стрижнів регулювальної підмножини P_i може переміщуватися окремо у координаті з іншими з метою, зокрема, регулювання температури $T_{моу}$. Ці групи стрижнів переміщуються до досягнення певних положень введення, які можуть бути різними для різних груп. Навпаки, групи малорухомої підмножини P переміщуються спільно до досягнення певного положення введення, загального для всіх груп цієї підмножини. Застосування пакетів, що утворюють групи стрижнів, можна модифікувати з метою забезпечення мінімізації надлишкового послаблення, викликаного групою P_1 при роботі на номінальному режимі, а також забезпечення розподілу кількості кроків по сукупності пакетів. Малорухомою підмножиною H завжди розташовується у верхній половині активної зони, що означає, інак-

ше кажучи, що її положення введення завжди менше половини висоти активної зони.

Коли реактор працює при потужності, близькій до номінальної, регулювальна підмножина P_i включає лише одну групу стрижнів (групу P_1 на Фіг.3А), а малорухомою підмножиною H включає інші чотири групи.

Навпаки, при низькій потужності реактора регулювальна підмножина P_i охоплює кілька груп стрижнів (три групи на Фіг.3С), а малорухомою підмножиною H включає менше чотирьох груп.

У поданому нижче тексті положення Z_1 , Z_2 ... різних груп стрижнів підмножини P_i позначаються загальним символом Z_i , а спільне положення груп стрижнів малорухомої підмножини H - символом Z_h .

Задаване значення P_{maxc} параметра P_{max} , який характеризує можливість підняття потужності P_{max} реактора, обчислюється на стадії 13.

Параметр P_{max} відповідає вектору, координатами якого є положення Z_i введення груп стрижнів підмножини P_i . Він визначається за допомогою обчислювальної програми, виходячи з P_{max} та первинної ефективної потужності P_{pe} . Первинна ефективна потужність P_{pe} визначається з формули

$$P_{pe} = CQ(TBC - TBF) \quad (3),$$

де C - теплоємність первинної охолоджувальної рідини.

Обчислювальна програма оцінює зміни первинної потужності, які можна одержати шляхом послідовного переміщення груп стрижнів підмножини P_i вгору або вниз, виходячи з ефективного стану активної зони (ефективної концентрації бору у первинній рідині, ефективного положення груп), згідно з процедурою послідовного введення, детально описаною нижче. Знаючи ефективну первинну потужність P_{pe} та закон зміни первинної потужності в залежності від положень Z_i , можна співвіднести вектор положень Z_i зі значенням характеристики можливості підняття потужності P_{max} .

Таким чином, задаване значення P_{maxc} відповідає задаваному значенню Z_{ic} положень введення груп стрижнів підмножини P_i . Значеннями Z_{ic} є теоретичні положення груп стрижнів підмножини P_i , які уможливають одночасно одержання первинної ефективної потужності, що дорівнює P_{pe} , та можливість підняття потужності реактора, що дорівнює заданому значенню P_{maxc} .

Нижче описано процедуру послідовного введення груп стрижнів підмножини P_i .

Як показано на Фіг.3А-3С, задавані положення визначаються в розрахунку на послідовне введення груп стрижнів підмножини P_i у процесі варіювання потужності. Так, у випадку первинної ефективної потужності P_{pe} , що дорівнює 100 % номінальної потужності (Фіг.3А), підмножиною P_i включає лише групу стрижнів P_1 , і для цієї групи P_1 визначено задане положення Z_{ic} незначного

введення, а задані положення чотирьох інших груп P2-P5 відповідають верхньому положенню, і ці групи утворюють малорухому підмножину Н. В разі нижчої первинної потужності P_{pe} , вибирається більш низьке задане положення Zic групи P1. Якщо первинна потужність P_{pe} нижче від порогового значення (наприклад, 80 %), проміжок між заданими положеннями груп P1 та P2 перевищує максимальне граничне значення (наприклад, 1/2 висоти активної зони), і група P2 виводиться з підмножини Н і включається до складу регулювальної підмножини P_i . Задавані положення згаданих двох груп обчислюються з умовою підтримання заздалегідь визначеної постійної різниці введення А між ними (у вищезгаданому прикладі 50% висоти активної зони, у варіантах, яким віддається перевага, - у межах від 40% до 60% висоти активної зони) (див. Фіг.3В, де показано положення груп при заданій потужності 50% номінального значення). Якщо первинна потужність P_{pe} нижче від іншого порогового значення (наприклад, 50% номінальної потужності), то різниця між задаваними положеннями групи P2 та групи P3 перевищує максимальне граничне значення (наприклад, 1/2 висоти активної зони), і група P3 виводиться з підмножини Н і включається до складу регулювальної підмножини P_i (див. Фіг.3С, де показано положення груп при заданій потужності 30 % номінального значення). Задавані положення груп P2 та P3 обчислюються за умови підтримання заздалегідь визначеної постійної різниці введення, а між ними, у той самий час, групі P1 приписують задане положення максимального введення. Таким чином, різниця між заданими положеннями груп P1 та P2 зменшується.

На другому етапі 2 визначаються нейтронні потоки FH та FB у верхній та нижній частинах активної зони, температури TBC та TBF первинної охолоджувальної рідини у гарячій та холодній гілках первинного контуру та витрата Q первинної охолоджувальної рідини у первинному контурі. Ці величини вимірюються за допомогою вимірювальної системи реактора або встановлюються, виходячи із сигналів вимірювальних пристроїв у трубопроводній системі реактора.

На третьому етапі 3 оцінюються ефективні значення $T_{moуe}$, A_{Oe} , P_{maxe} робочих параметрів

$T_{moу}$, A_O та P_{max} . Ефективне значення характеристики осьового розподілу потужності A_{Oe} обчислюється за вищенаведеною формулою (1) як функція значень нейтронних потоків FH та FB, виміряних на другому етапі. Ефективне значення $T_{moуe}$ температури $T_{moу}$ обчислюється за вищенаведеною формулою (2) як функція значень температур TBC та TBF, виміряних на другому етапі.

Ефективне значення P_{maxe} параметра, що характеризує P_{max} , обчислюється на основі ефективних положень введення Z_{ie} груп стрижнів регулювальної підмножини P_i та ефективної первинної потужності P_{pe} . Ці положення Z_{ie} встановлюються, наприклад, за даними обчислювального пристрою, який керує засобами для введення груп

стрижнів. Потужність P_{pe} обчислюється за вищенаведеною формулою (3) як функція значень температур TBC та TBF та значення витрати Q у первинному контурі, виміряних на другому етапі.

На четвертому етапі 4 вибирається перший закон регулювання, якщо щонайменше одна група стрижнів знаходиться у положенні введення, нижчому від заздалегідь визначеного положення Z_{ref} , а у протилежному випадку вибирається другий закон регулювання.

Таким чином, другий закон регулювання застосовується у випадку, коли усі групи стрижнів P1-P5 знаходяться у верхній частині реактора, тобто коли реактор працює при потужності, близькій до номінальної.

Перший закон регулювання застосовується, коли щонайменше одна група стрижнів знаходиться у нижній частині реактора, тобто коли реактор працює при потужності, нижчій від, наприклад, 90% номінальної потужності або при частковій потужності з групами стрижнів, розташованими у верхній частині активної зони.

Етап 5 регулювання за запропонованим способом у випадку застосування першого закону регулювання представлено у лівій частині Фіг.2.

Етап 5 регулювання із застосуванням першого закону регулювання включає модуль 51 регулювання температури $T_{moу}$, модуль 52 регулювання осьового розподілу потужності A_O та модуль 53 регулювання можливості підняття потужності P_{max} .

Модуль 51 регулювання $T_{moу}$ здійснює:

- стадію обчислення необхідних переміщень dZ_i для усіх груп стрижнів регулювальної підмножини P_i в залежності від заданого значення $T_{moуs}$ та ефективного значення $T_{moуe}$ середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні та

- стадію модифікування положень Z_i введення усіх груп стрижнів регулювальної підмножини P_i в залежності від переміщень dZ_i , обчислених на попередній стадії, з метою регулювання середньої температури $T_{moу}$ первинної охолоджувальної рідини у активній зоні з доведенням до заданого значення $T_{moуs}$.

Модуль 52 регулювання розподілу потужності A_O здійснює:

- стадію обчислення необхідних переміщень dZ_h малорухомої підмножини стрижнів Н та необхідних переміщень dZ_i груп стрижнів регулювальної підмножини P_i в залежності принаймні від заданої характеристики $A_{Oс}$ та ефективної характеристики $A_{Oс}$ осьового розподілу теплової потужності та стадію модифікування положень Z_i введення групи або груп стрижнів регулювальної підмножини P_i та/або малорухомої підмножини Н в залежності від обчислених переміщень dZ_i та dZ_h з метою регулювання осьового розподілу A_O теплової потужності з доведенням до заданого значення $A_{Oс}$.

Як вказано нижче, для обчислення переміщень підмножин P_i та Н використовується різниця між ефективним значенням $T_{moуe}$ та заданим значенням $T_{moуs}$ середньої температури первинної охолоджувальної рідини.

Крім того, перевага віддається переміщенню регульовальної підмножини P_i та малорухомої підмножини H у протилежних напрямках з метою регулювання осьового розподілу теплової потужності АО таким чином, щоб не порушувалася температура первинної рідини $T_{моу}$. Зокрема, це стосується випадку, коли значення $T_{моу}$ лежить у межах зони нечутливості навколо його заданого значення $T_{моус}$.

На Фіг.4 показано логічну схему переміщень груп стрижнів у різних випадках в залежності від різниці $\Delta T_{моу}$ між ефективною температурою $T_{моуе}$ та заданою температурою $T_{моус}$ та від різниці ΔAO між реальною характеристикою AO_e осьового розподілу теплової потужності та її заданим значенням AO_c .

Заштрихована ділянка відповідає області, де кожний з параметрів АО та $T_{моу}$ знаходиться у межах зони нечутливості навколо відповідних заданих значень; в такому разі модулі регулювання температури $T_{моу}$ та розподілу потужності АО не передбачають жодного впливу на групи керувальних стрижнів.

На фігурі показано, що якщо АО знаходиться у межах своєї зони нечутливості, а $T_{моу}$ виходить за межі своєї зони нечутливості, то регульовальна підмножина P_i переміщується за командою модуля регулювання $T_{моу}$ у напрямі, який забезпечує повернення значення $T_{моу}$ у межі зони нечутливості.

Навпаки, якщо $T_{моу}$ знаходиться у межах своєї зони нечутливості, а АО виходить за межі своєї зони нечутливості, то модуль регулювання розподілу потужності видає команду на переміщення або підмножини P_i , або підмножини H , залежно від знаку різниці температур. Наприклад, якщо $\Delta AO > L_2$ і значення $\Delta T_{моу}$ є додатним (де $\Delta AO = AO_e - AO_c$ та $\Delta T_{моу} = T_{моуе} - T_{моус}$), то підмножина H переміщується вниз. Це забезпечує зсув осьового розподілу потужності в напрямі до заданого значення та одночасне зниження $T_{моу}$ так, що $\Delta T_{моу}$ стає від'ємним. Тоді виникає ситуація, при якій $\Delta AO > L_2$ і значення $\Delta T_{моу}$ є від'ємним. В такому випадку модуль регулювання розподілу потужності переміщує підмножину P_i угору, як показано на Фіг.5А, компенсуючи таким чином переміщення підмножини H униз стосовно до регулювання температури. Така сама ситуація має місце, коли ΔAO є від'ємним (дивись найнижчий рядок Фіг.4 та Фіг.5В).

Навпаки, коли АО та $T_{моу}$ одночасно виходять за межі відповідних зон нечутливості, стратегія регулювання АО є іншою. Підмножина стрижнів P_i переміщується в залежності від знака різниці температури $\Delta T_{моу}$ за командою модуля регулювання температури. Підмножина H переміщується за командою модуля регулювання розподілу потужності таким чином, що АО зсувається в напрямі заданого значення, але це переміщення блокується, якщо воно має здійснюватися в напрямі, при якому відхилення $T_{моу}$ від заданого значення збільшиться. Таким чином, у випадку, коли $\Delta AO > L_2$ і $\Delta T_{моу} < -L_1$, підмножина стрижнів P_i переміщується вгору з метою збільшення $T_{моу}$. Малорухома підмножина H переміщується вниз з метою набли-

ження АО до заданого значення, проте це переміщення блокується, якщо воно може призвести до зниження $T_{моу}$ і, таким чином, до збільшення відхилення температури від заданого значення. Отже, в такому разі малорухома підмножина H не переміщується. Переміщення малорухомої підмножини H блокується також у випадку, коли $\Delta AO < -L_2$ і $\Delta T_{моу} > L_1$. Навпаки, переміщення малорухомої підмножини H не блокується в інших випадках, тобто коли $\Delta AO < -L_2$ і $\Delta T_{моу} < -L_1$ (Фіг.5С) та коли $\Delta AO > L_2$ і $\Delta T_{моу} > L_1$ (Фіг.5D).

Модуль 53 регулювання можливості підняття потужності реактора $P_{мах}$ здійснює:

- стадію обчислення концентрації бору $[B]$ у первинній рідині в залежності від заданого значення $\hat{P}_{махс}$ та ефективного значення $\hat{P}_{махе}$ параметра, що характеризує $P_{мах}$, та

- стадію встановлення концентрації бору $[B]$ у первинній охолоджувальній рідині відповідно до обчисленого значення з метою регулювання параметра

$\hat{P}_{мах}$ відповідно до заданого значення $\hat{P}_{махс}$.

Відповідно, коли $\hat{P}_{мах}$ має значення, нижче від зони нечутливості, розташованої навколо його заданого значення $\hat{P}_{махс}$ (групи стрижнів підмножини P_i введені недостатньо низько), то модуль регулювання $P_{мах}$ видає команду на введення в охолоджувальну рідину води без домішки бору. Концентрація бору при цьому знижується, що викликає підвищення реактивності в активній зоні і, таким чином, підвищення температури первинної рідини $T_{моу}$. Тоді модуль регулювання $T_{моу}$ забезпечує переміщення регульовальної підмножини стрижнів P_i вниз із метою зниження $T_{моу}$, як описано вище,

таким чином, що значення $\hat{P}_{мах}$, яке відповідає вектору положень введення Z_i , повертається у зону нечутливості.

Навпаки, коли значення $\hat{P}_{мах}$ перевищує верхню межу зони нечутливості (групи стрижнів підмножини P_i введені занадто низько), то модуль регулювання $P_{мах}$ видає команду на введення в охолоджувальну рідину концентрованого розчину бору. Реактивність активної зони знижується, що викликає зниження $T_{моу}$ і спричиняє переміщення регульовальної підмножини стрижнів P_i вгору за командою модуля регулювання $T_{моу}$.

Відповідно до одного варіанта здійснення винаходу, модуль регулювання $P_{мах}$ частково або повністю блокується під час змін потужності з метою зведення до мінімуму стоків. Так, у прикладі здійснення, показаному на Фіг.6А-6С, модуль 53 не видає команд під час фази зниження потужності та під час перебування реактора на плато низького рівня, доки $\hat{P}_{мах} > \hat{P}_{махс}$.

На Фіг.6А-6С показано послідовність функціонування реактора, в ході якої реактор переходить

від значення ефективної первинної теплової потужності $P_{ре}$, яка відповідає 100% номінальної потужності (PN) (Фіг.6A) до 50% номінальної потужності PN (Фіг.6B), а потім зберігає незмінний рівень 50% номінальної потужності PN (Фіг.6C). Задане значення потужності $P_{мах}$ встановлено на рівні 70% номінальної потужності PN протягом усієї послідовності.

При 100% номінальної потужності (Фіг.6A) усі групи керувальних стрижнів перебувають у верхній частині активної зони. При цьому $P_{мах}$ досягає 100% номінальної потужності і, отже, перевищує задане значення $P_{мах}$. Модуль регулювання $P_{мах}$ не видає ніяких команд.

Коли реактор досягає 50% номінальної потужності (Фіг.6B), групи стрижнів P1 та P2, які складають підмножину P_i , введені в активну зону. Значення $P_{мах}$ в цьому випадку становить 100% номінальної потужності, оскільки можливим є дуже швидке виведення реактора на номінальну потужність шляхом повернення груп P1 та P2 у верхнє положення. Модуль регулювання $P_{мах}$ не видає ніяких команд, оскільки ефективне значення $P_{мах}$ перевищує задане значення $P_{мах}$.

Ефективне значення $P_{мах}$ параметра $P_{мах}$ у цьому випадку відповідає положенням Z_{1e} більшого введення у порівнянні із заданими положеннями Z_{1c} , які відповідають заданому значенню $P_{мах}$ параметра $P_{мах}$.

Під час роботи реактора на 50% номінальної потужності всередині тепловидільних елементів, які складають паливні блоки, в результаті ядерних реакцій утворюється ксенон, що призводить до зниження реактивності активної зони та зниження температури $T_{моу}$. В такому разі модуль регулювання $T_{моу}$ видає команду на переміщення регульовальної підмножини стрижнів P_i вгору з розрахунком на компенсацію впливу ксенону та підтримання постійного значення $T_{моу}$. Таким чином, тепла потужність, яка виробляється в активній зоні, залишається незмінною. Як наслідок, підняття підмножини стрижнів P_i знижує $P_{мах}$, оскільки тепер шляхом переміщення груп P1 та P2 у верхнє положення неможливо вивести реактор на 100% номінальної потужності.

Коли підмножина P_i стрижнів досягає заданого положення Z_{1c} , яке відповідає заданому значенню $P_{мах}$, модуль регулювання $P_{мах}$ видає команду на розведення первинної охолоджувальної рідини з розрахунком на припинення піднімання підмножини P_i під впливом вивільнення ксенону (Фіг.6C). Задане положення Z_{1c} та задане значення

$P_{мах}$ обчислюються, як вказано вище, в залежності від заданого значення $P_{мах}$ (в даному разі 70% номінальної потужності реактора) та первинної потужності $P_{ре}$ (в даному разі 50% номінальної потужності).

Етап 5 регулювання за запропонованим способом у випадку застосування другого закону регулювання представлено у правій частині Фіг.2.

Як вказано вище, другий закон регулювання застосовується, коли усі групи стрижнів P1-P5 знаходяться у верхній частині реактора, тобто коли реактор працює при потужності, близькій до номінальної, або коли при роботі на частковій потужності частина пакетів стрижнів виведена з активної зони. Як наслідок, регульовальна підмножина стрижнів P_i включає тільки групу P1, а малорухома підмножина H включає інші чотири групи. У цьому

випадку $P_{мах} = Z_{1c}$. Задане значення $P_{мах}$ фактично відповідає заданому положенню P1, позначеному у наступних абзацах Z_{1c} . Аналогічно, ефективно значення $P_{мах}$ параметра $P_{мах}$ фактично відповідає ефективному положенню Z_{1e} групи P1.

Як і у випадку застосування першого закону регулювання, етап регулювання включає модуль 54 регулювання температури $T_{моу}$, модуль 55 регулювання осьового розподілу потужності АО та модуль 56 регулювання можливості підняття потужності $P_{мах}$.

Модуль 54 регулювання $T_{моу}$ здійснює:

- стадію обчислення необхідного переміщення dZ_1 для групи стрижнів P1 (яка складає регульовальну підмножину P_i) та необхідного переміщення dZ_h малорухомої підмножини H в залежності від заданого значення $T_{моу}$ та ефективного значення $T_{моу}$ середньої температури первинної охолоджувальної рідини у активній зоні та від заданого положення Z_{1c} та ефективного положення Z_{1e} групи P1; та

- стадію модифікування положень введення групи P1 та/або малорухомої підмножини H в залежності від обчислених переміщень dZ_1 та dZ_h із метою регулювання середньої температури $T_{моу}$ первинної охолоджувальної рідини у активній зоні з доведенням її до заданого значення $T_{моу}$.

Для регулювання $T_{моу}$ переважно переміщується група P1 у межах зони нечутливості, розташованої навколо її заданого положення Z_{1c} . Малорухома підмножина H переміщується, коли група P1 досягає межі зони нечутливості.

Ця стратегія регулювання впливає з Фіг.7, де показано логічну схему переміщень груп стрижнів у залежності від різниці $\Delta T_{моу}$ між ефективним значенням $T_{моу}$ та заданим значенням $T_{моу}$ (вісь абсцис) та від різниці ΔZ_1 між ефективним положенням Z_{1e} групи P1 та її заданим положенням Z_{1c} (вісь ординат), де $\Delta T_{моу} = T_{моу} - T_{моу}$ та $\Delta Z_1 = Z_{1e} - Z_{1c}$.

Як видно із середнього рядка Фіг.7, якщо P1 знаходиться у межах зони нечутливості, розташованої навколо заданого значення Z_{1c} , а $\Delta T_{моу} < L_1$, то група P1 переміщується вгору. Коли ΔZ_1 досягає L2, малорухома підмножина H переміщується вгору.

Аналогічно, якщо P1 знаходиться у межах зони нечутливості, розташованої навколо заданого значення Z_{1c} , а $\Delta T_{моу} > L_1$, то група P1 переміщується вниз. Коли ΔZ_1 досягає L2, малорухома підмножина H переміщується вниз.

Модуль 55 регулювання осьового розподілу потужності здійснює:

- стадію обчислення концентрації сполуки-поглиначи [B] в залежності від заданого значення АОс та ефективного значення АОе осьового розподілу теплової потужності та

- стадію встановлення концентрації сполуки-поглиначи [B] у первинній охолоджувальній рідині відповідно до обчисленого значення з метою регулювання осьового розподілу теплової потужності АО з доведенням його до заданого значення АОс.

Більш точно, коли значення АО перевищує задане значення АОс, модуль регулювання АО видає команду на розведення первинної охолоджувальної рідини шляхом введення води без домішки бору. Це розведення має наслідком підвищення реактивності в активній зоні і, таким чином, підвищення температури Тмоу, що викликає втручання модуля регулювання Тмоу. Останній в такому випадку видає команду на опускання групи стрижнів Р1 та/або групи Н, як описано вище, що спричиняє зниження теплової потужності верхньої частини реактора і, таким чином, зниження АО.

Навпаки, коли АО менше від заданого значення АОс, модуль регулювання АО видає команду на введення в первинну охолоджувальну рідину концентрованого розчину бору. Таке введення викликає зниження реактивності активної зони і, таким чином, зниження температури Тмоу, внаслідок чого група стрижнів Р1 та/або група Н переміщується вгору за командою модуля регулювання Тмоу. Теплова потужність верхньої частини реактора збільшується, що спричиняє підвищення значення АО.

Модуль 56 регулювання Рmax здійснює:

- стадію обчислення необхідних переміщень dZ1 групи стрижнів Р1 (яка складає регульовальну підмножину Рі) та необхідних переміщень dZh малорухомої підмножини стрижнів Н в залежності принаймні від заданого положення Z1c та ефективного положення Z1e введення групи Р1 та

- стадію модифікування положень введення групи стрижнів Р1 та/або малорухомої підмножини Н в залежності від обчислених переміщень dZ1 та dZh з метою утримання групи або груп стрижнів регульовальної підмножини Р1 в межах зони нечутливості навколо заданого положення введення Z1c.

Регулювання Тмоу за другим законом регулювання забезпечує утримання групи стрижнів Р1 в межах відповідної зони нечутливості, оскільки, як показано вище, група Н переміщується, коли група Р1 досягає межі своєї зони нечутливості. Регулювання Рmax є необхідним лише зрідка. Це регулювання детально описано нижче.

Як видно з Фіг.7, коли Тмоу знаходиться у межах своєї зони нечутливості, а Z1 виходить за межі відповідної своєї зони, модуль регулювання Рmax видає команду на переміщення або групи Р1, або малорухомої підмножини Н в залежності від знака відхилення температури Тмоу. Наприклад, коли $\Delta Z1 > L2$ та $\Delta T_{моу}$ є додатним, група Р1 переміщується вниз. Наслідком цього є наближення групи Р1 до заданого положення, а також зниження Тмоу так, що $\Delta T_{моу}$ стає від'ємним. Тоді модуль

регулювання Рmax забезпечує переміщення підмножини Н угору, що компенсує переміщення групи Р1 униз відносно регулювання температури та осьового розподілу потужності (Фіг.8А). Аналогічна ситуація виникає, коли $\Delta Z1$ є від'ємним (дивись нижній рядок Фіг.7 та Фіг.8В).

Таким чином, коли середня температура Тмоу знаходиться у межах зони нечутливості навколо заданого значення Тмоус, то регульовальна підмножина стрижнів Рі та малорухомі підмножина Н переміщуються у протилежних напрямках з метою утримання регульовальної підмножини у межах зони нечутливості навколо її заданого положення Zic.

Слід зазначити, що при обчисленні переміщень підмножин Рі та Н враховується різниця між ефективним (Тмоуе) та заданим (Тмоус) значеннями середньої температури.

Описаний вище спосіб уможливорює керування режимами перехідної потужності. При таких режимах потужність, необхідна для турбіни, поступово змінюється від значення V1 до значення V2.

У випадку, коли $V1 > V2$, тепла потужність, яка відводиться із системи вторинним контуром, зменшується, і на першому етапі стає нижчою від теплової потужності, яку постачає активна зона реактора. Таким чином, температура Тмоу первинної охолоджувальної рідини підвищується, що спричиняє втручання модуля регулювання Тмоу 51 або 54, залежно від конкретних обставин. Цей модуль видає команду на переміщення груп керувальних стрижнів Р1-Р5 униз, що уможливорює наближення Тмоу до її заданого значення при підтриманні теплової потужності, яку постачає активна зона, на рівні, сумісному з потужністю, яка відводиться вторинним контуром.

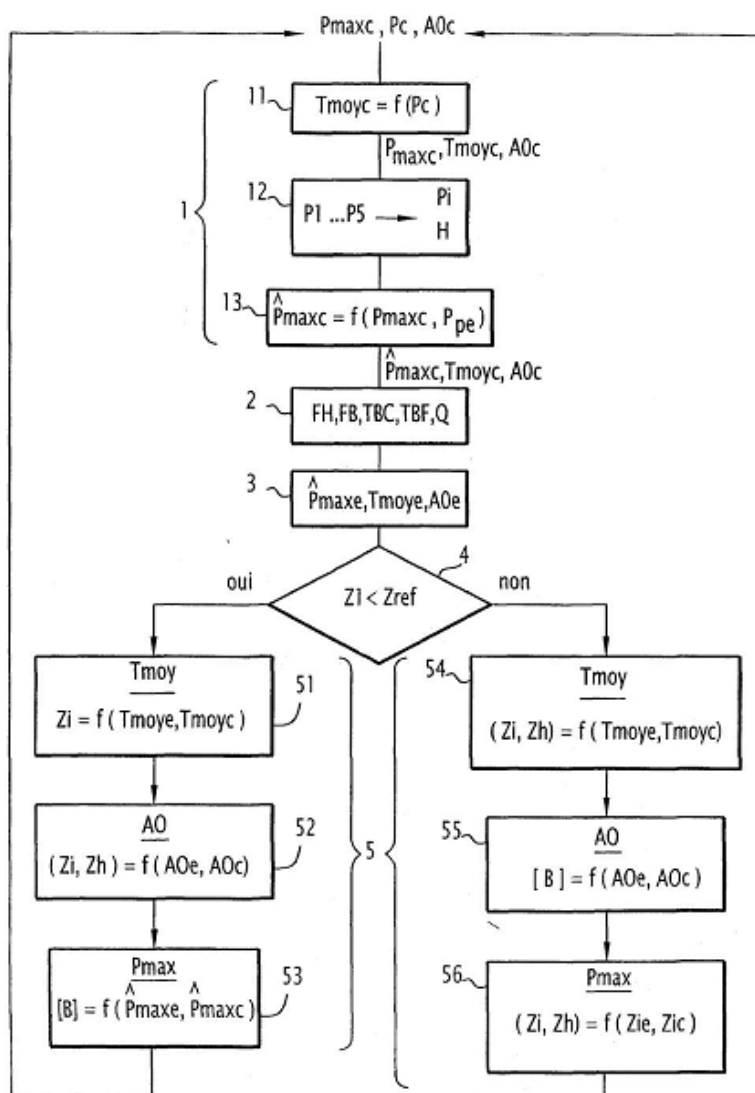
Застосування двох законів регулювання, відмінних один від одного, уможливорює здійснення ефективного та повністю автоматизованого регулювання трьох робочих параметрів реактора (температури первинної охолоджувальної рідини Тмоу, осьового розподілу теплової потужності АО,

параметра Рmax, який характеризує можливість підняття потужності реактора Рmax) при будь-якому заданому рівні потужності, зокрема, при рівні до 100% номінальної потужності реактора.

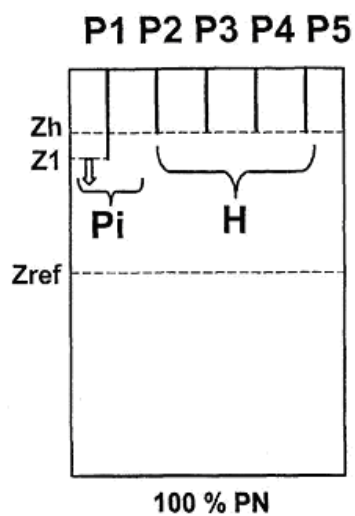
Можливість вибору закону регулювання в залежності від положення груп керувальних стрижнів дозволяє застосовувати два різні закони, з яких перший пристосований до ситуації, коли щонайменше одна група стрижнів введена у нижню частину активної зони, а другий - до ситуації, коли усі групи стрижнів знаходяться у верхній частині активної зони.

Конкретний варіант здійснення винаходу, описаний вище, забезпечує деякі інші переваги, які охарактеризовано нижче. У всякому разі слід відзначити, що відповідні переваги є факультативними.

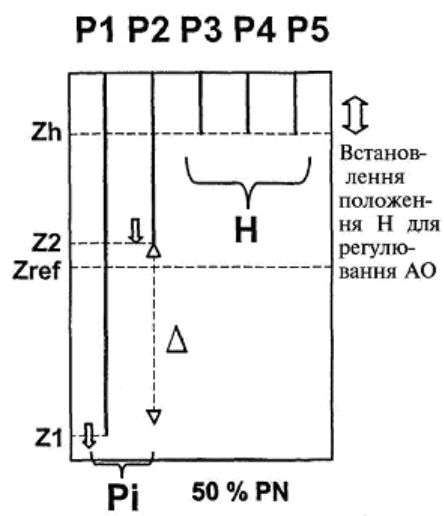
При застосуванні обох законів регулювання параметр Тмоу регулюється шляхом розподілу груп керувальних стрижнів на регульовальну підмножину та малорухому підмножину, причому з метою регулювання Тмоу групи стрижнів регулюва-



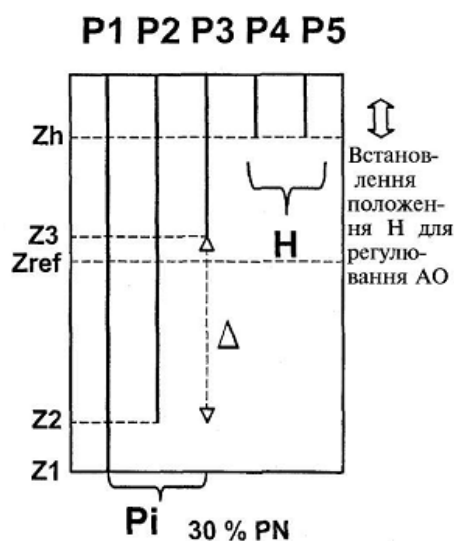
Фиг. 2



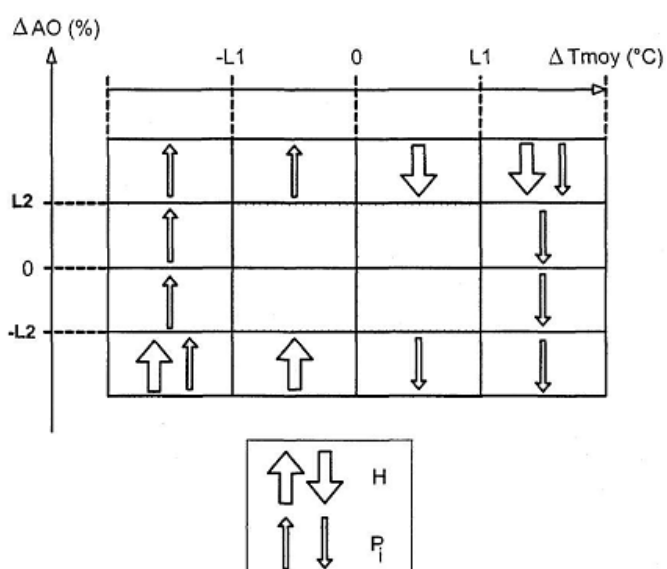
Фиг. 3A



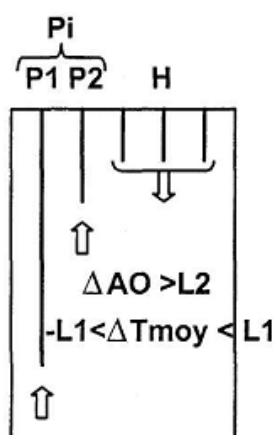
Фиг. 3B



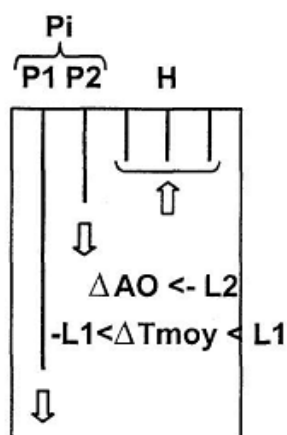
Фир. 3С



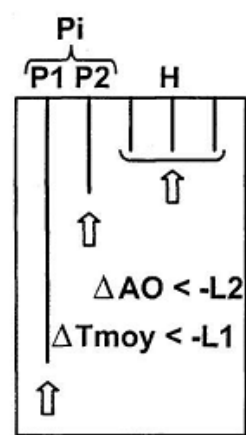
Фир. 4



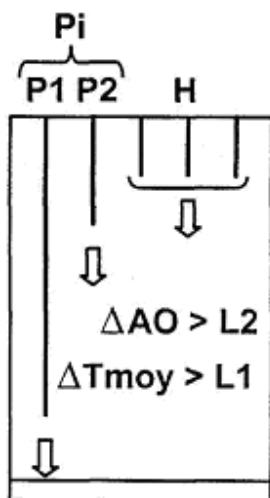
Фир. 5А



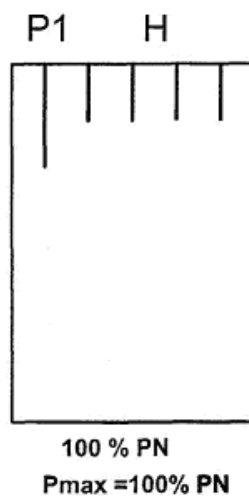
Фир. 5В



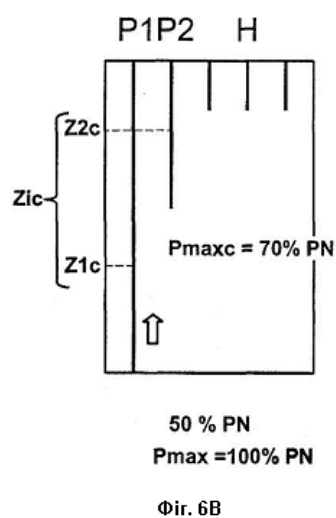
Фир. 5С



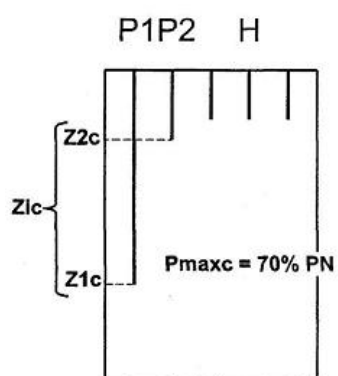
Фир. 5D



Фир. 6А

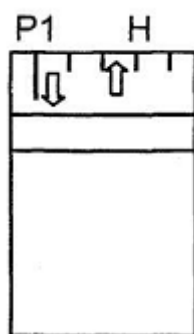


Фир. 6В

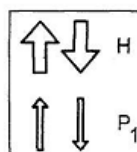
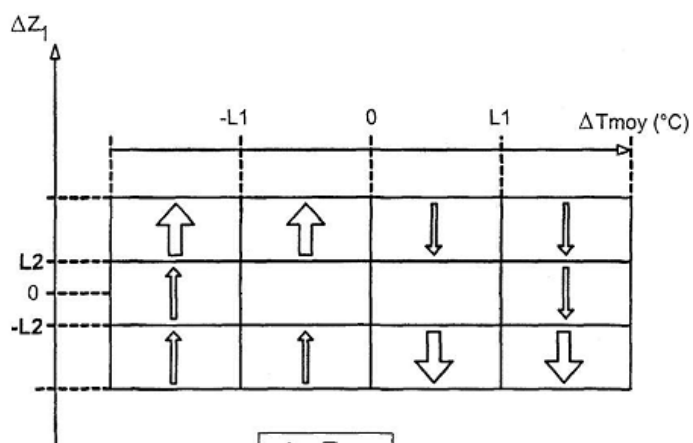


50 % PN
 $P_{max} = 70\% PN$

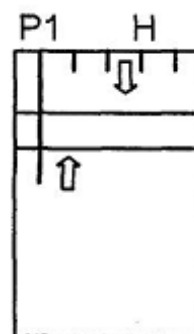
Фиг. 6C



Фиг. 8A



Фиг. 7



Фиг. 8B