

Єфімов О.В., Гаркуша Т.А.

**ВПЛИВ СТРУКТУРНИХ ЗМІН В СИСТЕМІ РЕГЕНЕРАЦІЇ
НА ПОКАЗНИКИ РОБОТИ І НАДІЙНІСТЬ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС
ПОТУЖНІСТЮ 1000 МВт**

Актуальність та постановка проблеми. Для аналізу ефективності функціонування енергоблоків АЕС потужністю 1000 МВт досить актуальними є дослідження впливу на показники роботи і надійність експлуатації різних конфігурацій схем регенеративного підігріву основного конденсату і живильної води. Тому за допомогою розробленої в [1, 2] і реалізованої у вигляді програмного комплексу моделі функціонального стану енергоблоку з турбоустановкою К-1000-60/1500-2 (що встановлені на перших енергоблоках Запорізької АЕС), розрахунків вірогідності безвідмовної роботи (надійності) різних варіантів логіко-структурних схем і розрахунків прогнозованої кількості виробленої електроенергії були проведені дослідження варіантів схем системи регенерації енергоблоків АЕС.

Аналіз роботи енергоблоку. Модель функціонального стану енергоблоку дозволяє одержати значення електричної потужності N та питомої витрати теплоти q енергоблоку.

Розрахунки вірогідності безвідмовної роботи $R(t)$ енергоблоку для різних варіантів логіко-структурних схем системи регенерації здійснювались за формулами для послідовного і паралельного з'єднання нерезервованих елементів і резервованих елементів з різними кратностями резервування, інтенсивностями відмов і відновлень, відповідно:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t), \quad (1)$$

де $R_i(t)$ – вірогідність безвідмовної роботи до першої відмови i -го елемента за час від 0 до t ;

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t), \quad (2)$$

де $Q_i(t)$ – вірогідність появи першої відмови i -го елемента за час від 0 до t .

Вірогідна кількість виробленої електроенергії $E_{\text{в}}$ енергоблоком з електричною потужністю N на інтервалі прогнозування від часу t_0 до часу t розраховувалась згідно з формулою

$$E_{\text{в}} = R(t) \int_{t_0}^t N(t) dt. \quad (3)$$

На підставі результатів досліджень енергоблоку з турбіною типу К-1000/60-1500 був проведений аналіз впливу на зміни його електричної потужності \bar{N} , теплової еко-

номічності (питомої витрати теплоти) \bar{q} , надійності $\bar{R}(t)$ та очікуваної кількості виробленої електроенергії \bar{E}_e варіантів схем регенерації зі зміною кількості підігрівачів високого тиску (ПВТ) і підігрівачів низького тиску (ПНТ), а також зі зміною кількості і місць встановлення дренажних насосів ПНТ за умови стаціонарного режиму роботи енергоблоку.

У якості показника загальної надійності схеми системи регенерації використовувалась вірогідність безвідмовної роботи енергоблоку $R(t)$ протягом часу t , якому привласнювалось значення 8000 годин, що відповідає оптимістичній оцінці тривалості безперервної експлуатації енергоблоків АЕС протягом року в період між планово-запобіжними ремонтами. Інформація про інтенсивності відмов устаткування системи регенерації узята на підставі даних [3, 4, 5] і надана в табл. 1. Віртуальні перемикачі, що організовані в програмному комплексі, дозволяють відключати підігрівачі, міняти місця встановлення і кількість дренажних насосів тощо.

Таблиця 1 – Інтенсивності відмов устаткування систем регенерації енергоблоків АЕС з турбоустановками типу К-1000-60/1500

Найменування устаткування	Інтенсивність відмови λ_i , 1/год
Насоси (дренажні, мережеві)	$2,7 \cdot 10^{-4}$
Підігрівачі низького тиску (ПНТ)	$1,23 \cdot 10^{-3}$
Підігрівачі високого тиску (ПВТ)	$1,93 \cdot 10^{-3}$
Деаератор	$0,68 \cdot 10^{-4}$
Живильний турбонасос	$2,7 \cdot 10^{-4}$
Турбопривід	$3,7 \cdot 10^{-4}$
Конденсатор турбопривіду	$1,03 \cdot 10^{-5}$
Підігрівачі мережевої води	$1,23 \cdot 10^{-5}$
Лінії зливу дренажу, байпасні лінії основного конденсату, живильної і мережевої води	$1,05 \cdot 10^{-5}$

Результати досліджень, які пов'язані з підігрівачами, що виключаються зі схеми регенерації, надані в табл. 2.

Дослідження показали, що серед всіх ПНТ найбільший вплив на зниження економічності і надійності енергоблоку надають схеми без підігрівачів П1 і П2. Це пояснюється тим, що пара, яка гріє живильну воду в цих підігрівачах, має незначний енергетичний потенціал, який визначається виробленням електроенергії на відсіку проточної частини турбіни перед відборами пари, а пара з відборів на подальші підігрівачі, кількість якої збільшується у разі відсутності у схемі П1 і П2, має значно більший потенціал.

Найменший вплив серед всіх ПВТ на зміни потужності та економічності енергоблоку надає перший по ходу живильної води підігрівач високого тиску П5, в який надходить пара з того ж відбору турбіни, що і в деаератор, і в якому нагрів живильної води

є мінімальним ($\approx 17^1 \bar{N}$). При виключенні зі схеми регенерації підігрівача П6 разом з погіршенням економічності збільшується електрична потужність енергоблоку. Такий ефект зазвичай характерний для останнього по ходу живильної води підігрівача П7. В даному випадку результат, який був одержаний, можна пояснити різким зниженням тиску в камерах першого і другого відборів турбіни, з яких надходить пара до П6 і П7, що призводить до зменшення сумарної витрати цієї пари в порівнянні з початковим режимом і, як наслідок, до збільшення електричної потужності енергоблоку.

Необхідно відзначити, що виключення зі схеми регенерації підігрівачів низького тиску, особливо П1 і П2, незначно позначається на значенні ентальпії живильної води на вході в парогенератори. У зв'язку з цим, відносні зміни електричної потужності \bar{N} і питомої витрати теплоти \bar{q} при їх виключенні зі схеми регенерації близькі за значенням. Для підігрівачів високого тиску такої відповідності не існує із-за великого впливу цих підігрівачів на ентальпію живильної води на вході в парогенератори. При розрахунках значення недогрівів в підігрівачах приймалися рівними 3°C , що відповідає їх проектним значенням. Природно, що при їх вищих значеннях (що має місце в експлуатаційній практиці атомних електростанцій) вплив виключення зі схеми регенерації підігрівачів на зміни потужності та економічності енергоблоку буде декілька більшим.

З результатів розрахунків, які надані в табл. 2, видно, що найбільш знижується надійність енергоблоку, який має регенеративну схему без П2 ($\bar{R}(t) = 0,9901$), а найменш знижується надійність енергоблоку зі схемою без П4 ($\bar{R}(t) = 0,9926$). Тому найбільше зниження очікуваної (прогнозованої) кількості виробленої електроенергії відповідає варіанту схеми без П2 ($\bar{E}_a = 0,982$), а найменше – варіанту схеми без П4 ($\bar{E}_a = 0,989$).

У табл. 3 надані результати досліджень впливу зміни кількості і місць встановлення дренажних насосів ПНТ в системі регенерації енергоблоку АЕС з турбіною К-1000-60/1500 на зміни потужності, економічності, надійності енергоблоку та очікуваної кількості виробленої електроенергії.

Результати цих досліджень показали, що схеми системи регенерації низького тиску, до яких входять три або чотири дренажних насоса, вельми незначно підвищують теплову ефективність енергоблоку в порівнянні з початковою схемою (варіант 1). Аналіз варіантів схем системи регенерації ПНТ з двома дренажними насосами за критеріями змін електричної потужності та економічності показує доцільність їх встановлення в початковій схемі біля П1 і П3. Зіставлення варіантів схеми з встановленням одного насоса показує, що найбільш ефективне встановлення насоса тільки біля П3 і найменш ефективне встановлення насоса тільки біля П1. При цьому структурна надійність цих схем при однакових інтенсивностях відмов підігрівачів буде однакою. Характерно, що виключення зі схеми регенерації дренажного насоса біля П1 дає зменшення електричної потужності та економічності всього на 0,04 %, що свідчить про його низьку ефективність і можливість відмови від нього.

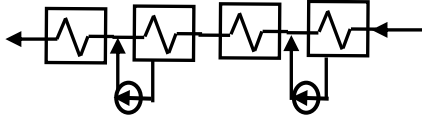
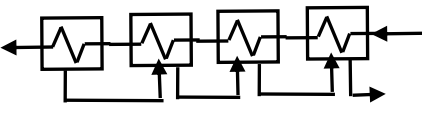
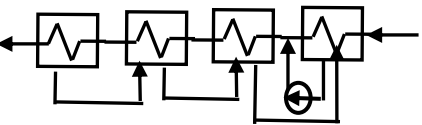
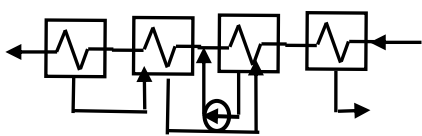
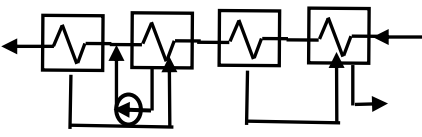
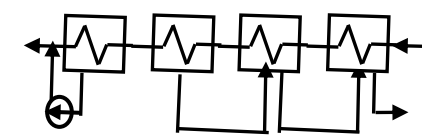
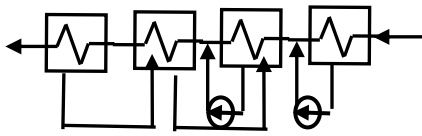
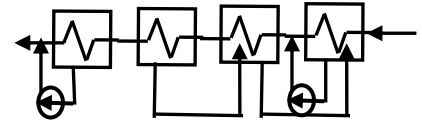
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Таблиця 2 – Вплив виключення підігрівачів зі схеми регенерації енергоблоку АЕС з турбіною К-1000-60/1500 на зміни електричної потужності, економічності, надійності та очікуваної кількості виробленої електроенергії

Показники енергоблоку	Підігрівачі, що виключаються зі схеми регенерації				
	П1	П2	П3	П4	П5
\bar{N}	0,9920	0,9920	0,9950	0,9970	0,9986
\bar{q}	1,008	1,009	1,006	1,003	1,0034
$\bar{R}(t)$	0,9905	0,9901	0,9914	0,9926	0,9925
\bar{E}_e	0,983	0,982	0,987	0,989	0,991

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Таблиця 3 – Вплив кількості і місць встановлення дренажних насосів ПНТ в системі регенерації енергоблоку АЕС з турбіною К-1000-60/1500 на зміни електричної потужності, економічності, надійності та очікуваної кількості виробленої електроенергії

№ варіанту	Схемні рішення	\bar{N}	\bar{q}	$\bar{R}(t)$	\bar{E}_a
1		1,0	1,0	1,0	1,0
2		0,9961	1,0040	1,199	1,195
3		0,9973	1,0027	1,096	1,093
4		0,9975	1,0026	1,096	1,093
5		0,9996	1,0004	1,096	1,095
6		0,9982	1,0013	1,096	1,094
7		0,9977	1,0024	1,077	1,075
8		0,9989	1,0011	1,0	0,999

Продовження табл. 3

№ варіанту	Схемні рішення	\bar{N}	\bar{q}	$\bar{R}(t)$	\bar{E}_a
9		0,9999	1,0001	1,0	0,999
10		0,9990	1,0011	1,0	0,999
11		0,9996	1,0004	1,0	0,999
12		1,0001	0,9999	0,928	0,928
13		0,9992	1,0009	0,928	0,928
14		1,0002	0,9998	0,928	0,928
15		1,0001	0,9999	0,928	0,928
16		1,0003	0,9997	0,837	0,928

Висновки. Аналіз варіантів схем системи регенерації, що надані в табл. 3, за критеріями змін надійності та очікуваної кількості виробленої електроенергії показує, що найбільші збільшення надійності енергоблоку та очікуваної кількості виробленої електроенергії відповідають варіанту 2 (каскадна схема зливу дренажів без дренажних насосів) і складають відповідно $\bar{R}(t) = 1,199$ і $\bar{E} = 1,195$. Найбільші зменшення надійності енергоблоку та очікуваної кількості виробленої електроенергії відповідають варіанту 16 і складають відповідно $\bar{R}(t) = 0,837$ і $\bar{E} = 0,928$.

Література

1. Палагин А.А., Ефимов А.В. Имитационный эксперимент на математических моделях турбоустановок. – К.: Наук. думка, 1986. – 130 с.
2. Палагин А.А., Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок. – К.: Наук. думка, 1991. – 189 с.
3. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.В. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 136 с.
4. Клемин А.И. Надежность ядерных энергетических установок. Основы расчета. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 334 с.
5. Острейковский В.А. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

УДК 621.311.18.004.15:519.85

Ефимов А.В., Гаркуша Т.А.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В СИСТЕМЕ РЕГЕНЕРАЦИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ И НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС МОЩНОСТЬЮ 1000 МВт

Проведен анализ влияния вариантов схем регенерации энергоблока АЭС с турбиной типа К-1000-60/1500 на изменение его электрической мощности, тепловой экономичности, надежности и ожидаемого количества выработанной электроэнергии.

стаття надійшла до редакції 16.10.2008 р.