

**О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, О. П. УСАТИЙ, Д. В. РИНДЮК, В. А. ПЕШКО**

### **УПРАВЛІННЯ РЕСУРСОМ ТУРБІН 200 МВТ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ДОЛІ ПУСКІВ З РІЗНИХ ТЕПЛОВИХ СТАНІВ**

Відомою проблемою Об'єднаної енергетичної системи України є нестача пікових потужностей в загальному генеруючому енергетичному балансі. З цієї причини пилувугільні енергоблоки потужністю 200 МВт, що були спроектовані для роботи в базовій частині графіка навантажень, приймають участь у регулюванні частоти енергомережі зміною своєї потужності, або вимушеними зупинками під час провалів енергоспоживання. На поточному етапі більшість енергетичного устаткування потужністю 200 МВт вичерпало свій парковий ресурс, маючи величезне число пусків з різних теплових станів. Таким чином в основному металі накопичена значна малоциклова втома, яка здатна сильно обмежити ресурсні показники обладнання, призводить до частих аварійних відключень та зменшує загальну надійність енергосистеми України. В роботі запропоновано метод управління ресурсом старіючого обладнання, шляхом оптимізації дольового відношення числа пусків устаткування з різних теплових станів. На базі технічного аудиту експлуатаційної документації генеруючих компаній та статистичної обробки ресурсних показників турбінного обладнання 200 МВт Курахівської, Луганської та Старобешівської ТЕС встановлено компоненти незалежних змінних для вирішення оптимізаційної задачі. Цільовою функцією обрано залишкове напруження, для описання якого було використано теорію планування експерименту, зокрема насичені плани Рехтшафнера. Отриманий опис цільової функції у вигляді повного квадратичного поліному дозволить встановити, що максимум залишкового ресурсу енергоблоків 200 МВт при роботі у маневрових режимах забезпечується при наступному співвідношенні числа пусків з різних теплових станів: 25–39 % пусків з холодного стану, 18–25 % пусків з неостиглого стану та 36–57 % пусків з гарячого стану металу.

**Ключові слова:** теплова електростанція, енергоблок, Об'єднана енергетична система України, пошкоджуваність, пуск, залишковий ресурс, прогнозування, оптимізація.

**О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, А. П. УСАТИЙ, Д. В. РЫНДЮК, В. А. ПЕШКО**

### **УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ ТУРБИН 200 МВТ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ДОЛИ ПУСКОВ ИЗ РАЗНЫХ ТЕПЛОВЫХ СОСТОЯНИЙ**

Известной проблемой Объединённой энергетической системы Украины является нехватка пиковых мощностей в общем генерирующем энергетическом балансе. По этой причине пылеугольные энергоблоки мощностью 200 МВт, которые были спроектированы для работы в базовой части графика нагрузок, принимают участие в регулировании частоты энергосети изменением своей мощности, или вынужденными остановками во время провалов энергопотребления. На текущем этапе большинство энергетического оборудования мощностью 200 МВт исчерпало свой парковый ресурс, имея огромное число пусков из различных тепловых состояний. Таким образом в основном металле накоплена значительная малоцикловая усталость, которая способна сильно ограничить ресурсные показатели оборудования, приводит к частым аварийным отключениям и уменьшает общую надёжность энергосистемы Украины. В работе предложен метод управления ресурсом стареющего оборудования, путем оптимизации долевого отношения числа пусков оборудования с различных тепловых состояний. На базе технического аудита эксплуатационной документации генерирующих компаний и статистической обработки ресурсных показателей турбинного оборудования 200 МВт Кураховской, Луганской и Старобешевской ТЭС установлены компоненты независимых переменных для решения оптимизационной задачи. Целевой функцией избрана остаточная наработка, для описания которой была использована теория планирования эксперимента, в частности насыщенные планы Рехтшафнера. Полученное описание целевой функции в виде полного квадратичного полинома позволило установить, что максимум остаточного ресурса энергоблоков 200 МВт при работе в маневренных режимах обеспечивается при следующем соотношении числа пусков из различных тепловых состояний: 25–39 % пусков из холодного состояния, 18–25 % пусков с неостывшего состояния и 36–57 % пусков из горячего состояния металла.

**Ключевые слова:** тепловая электростанция, энергоблок, Объединённая энергетическая система Украины, поврежденность, пуск, остаточный ресурс, прогнозирование, оптимизация.

**O. CHERNOUSENKO, O. USATIY, D. RINDYUK, V. PESHKO**

### **ESTABLISHING CONTROL OVER THE RESIDUAL RESOURCE OF 200 MW STEAM TURBINES BY OPTIMIZATION OF PERCENTAGE OF LAUNCHES FROM DIFFERENT THERMAL STATES**

A well-known problem of the United Energy System of Ukraine is the lack of peak capacities in the total generating energy balance. For this reason, coal-fired power units with a capacity of 200 MW, which were designed to work in the base part of the electrical load graph, are involved in regulating the frequency of the power grid by changing their power, or forced stops during energy consumption reduction. At the current stage, most of the power equipment with a capacity of 200 MW has exhausted its park resource, while having a huge number of launches from various thermal states. Thus, considerable low-cycle fatigue has been accumulated in the base metal, which can severely limit service life-time of equipment. It also leads to frequent emergency shutdowns and reduces the overall reliability of the energy system of Ukraine. The paper proposes a method for establishing control over the aging equipment resource, by optimizing the percentage of the number of equipment launches from different thermal states. On the basis of a technical audit of operational documentation of generating companies and statistical processing of resource indicators for turbine equipment 200 MW of the Kurakhivska, Luhanska and Starobeshivska thermal power plants, components of independent variables were identified to solve the optimization problem. The residual service life-time was chosen as a target function, to describe which the theory of experimental planning was used, in particular, rich Rechtschaffner plans. The obtained description of the objective function in the form of a full quadratic polynomial allowed us to establish the maximum residual resource of power units of 200 MW. When operating in maneuvering modes, the maximum service life-time is provided with the following ratio of the number of launches from different thermal states: 25–39 % of starts from a cold state, 18–25 % of starts from non-cooled state and 36–57 % from a hot state of the metal.

**Key words:** thermal power plant, power unit, United Energy System of Ukraine, damage, launch, residual service life-time, forecasting, optimization.

## Вступ

Для забезпечення стабільної роботи електричних станцій в структурі генеруючих потужностей базові енергоблоки повинні складати 50–55 %, напівпікові енергоблоки – 30–35 %, а пікові енергоблоки – 15 %. Потужності ГЕС і ГАЕС, які можуть бути високоманевровими піковими потужностями, складають лише 10 % проти 15 % необхідних для сталої роботи енергосистеми. Енергоблоки ТЕС потужністю 100–150 МВт, які можуть ефективно використовуватись як маневрові напівпікові потужності, складають 18 % проти необхідних 30–35 %. Поширеною практикою є використання в маневрових напівпікових режимах, окрім пилувугільних енергоблоків ТЕС потужністю 100 та 150 МВт, пилувугільних блоків потужністю 200–300 МВт. З аналізу технічних рішень заводів виробників енергетичного обладнання та рішень проектних організацій по пускових схемах блоків від 150 до 300 МВт зрозуміло, що при проектуванні енергоблоків 200–300 МВт не ставилось задачі реалізації напівпікових режимів експлуатації [1].

## Мета роботи

Метою даної роботи є вирішення оптимізаційної задачі пошуку дольового розподілу типів пуску з різних теплових станів для забезпечення максимально високого залишкового напруження. Дана задача вирішується на базі технічного аудиту експлуатаційних даних генеруючих компаній, щодо роботи енергетичного обладнання, а також статистичної обробки ресурсних показників однотипного устаткування.

## Аналіз стану питання

Маневрений режим роботи (пуск-зупинка) суттєво впливає на роботу парових турбін, які є одним з аварійно небезпечних елементів ТЕС. Для проходження мінімальних навантажень за наявної структури генеруючих потужностей в ОЕС України використовується зниження навантаження ТЕС України. Третину зменшення навантаження покривають ГЕС, інше – вугільні ТЕС з вимушеною зупинкою на ніч на 4–6 год., які потім пускаються з гарячого стану [2]. Такі непроекtnі зупинки і пуски обладнання ТЕС України прискорюють його зношення, підвищують аварійність блоків і супроводжуються понад нормативними витратами палива та недопустимі для енергоблоків надкритичного тиску, виходячи з наявності в них товстостінних елементів та особливостей їх прогріву на не розрахункових режимах роботи.

Згідно нормативних документів Мінпаливенерго України [3] парковий ресурс парових турбін

K-200-130 ПАТ ЛМЗ дорівнює 220 тис. год. при кількості пусків 800.

Натепер більшість енергоблоків ТЕС України перевищили парковий ресурс та подовжений індивідуальний ресурс (300 тис. год.) Для подовження терміну їх експлуатації необхідно проводити комплексне дослідження з оцінки залишкового ресурсу та визначати оптимальну кількість пусків з різних теплових станів з урахуванням маневрених режимів роботи енергетичного обладнання, що проектувалося для базового навантаження.

До участі в регулюванні частоти електричного струму в енергосистемі можуть залучатися енергоблоки з подовженим залишковим терміном експлуатації, але з оптимізованою дольовою кількістю пусків з урахуванням ступеня їх впливу на пошкоджуваність енергетичного обладнання.

## Дослідження впливу роботи енергоблоків ТЕС в маневреному режимі на пошкоджуваність енергетичного обладнання

При аналізі впливу режимів частих пусків-зупинок на надійність роботи, аварійність та швидкість вичерпання ресурсу вузлів та деталей турбіни використані дані по кількості пусків з різних теплових станів: гарячий стан (ГС, НС-2), неостиглий стан (НС), холодний стан (ХС).

Парові турбіни K-200-130 Курахівської ТЕС (КуТЕС) були введені в експлуатацію протягом 1972–1975 років [1, 3]. Повної статистики пусків турбін з різних теплових станів станція не має. Тому розрахункове число пусків визначалося згідно відсотковому співвідношенню різних типів пусків за період з 01.02.1993 р. до 01.02.2006 р. За цей період, кількість пусків блока № 5 парової турбіни K-200-130-3 склало: 366 пусків після 6–10 годин простою, 60 пусків після 15–20 годин простою, 59 пусків після 30–35 годин простою, 64 пуску після 50–60 годин простою, 151 пуск з холодного стану.

При цьому, пуски після 6–10 годин простою прирівнювалося до пусків з гарячого та неостиглого станів (ГС та НС-2), пуски після 15–20 і 30–35 годин простою названі пусками з неостиглого стану НС-1, а пуски після 50–60 годин простою прирівнювалися до пусків з холодного стану (ХС). Використовуючи наявні дані, решту пусків було згруповано за видами, близьким до НС-2 (383 пуски, 37 %), НС-1 (166 пусків, 16 %) і ХС (487 пусків, 47 %). Аналогічні дані є по всім іншим блокам КуТЕС та Луганської ТЕС ДТЕК «Східенерго».

Розрахункові дослідження напружено-деформованого стану роторів турбоустановки K-200-130 проведені для найбільш характерних в практиці експлуатації ТЕС режимів роботи. Температура пари і тиск, а також електричні навантаження взяті з діаграм, отриманих з цеху наладки

КуТЕС приблизно відповідають обраним режимам. Графіки зазначених пусків взяті окремо для циліндрів високого та середнього тиску (ЦВТ і ЦСТ) [4].

Експлуатаційні дані за період з 2012 до 2015 року по блокам КуТЕС приведені в табл. 1.

Розрахунки сумарної прогнозованої та наявної пошкоджуваності (статичної, циклічної), а також залишкового ресурсу проведені для сценаріїв експлуатації обладнання в базових режимах роботи та потенційно найбільш важкому маневренному (щоденний пуск-зупинка). При цьому, швидкості вичерпання ресурсу для блоків КуТЕС збільшуються в 3–7 разів у порівнянні з нормальною експлуатацією в базових режимах роботи, що призводить до вичерпання ресурсу (табл. 1). Прогнозована пошкоджуваність блоків КуТЕС, що розрахована згідно рекомендацій [1, 6], також наближається до максимальної.

Аналізуючи отримані дані, можна зазначити, що прогнозована пошкоджуваність блока № 3 КуТЕС, при нормальній експлуатації становить 0,966, при чому статична прогнозована пошкоджуваність на стаціонарних режимах складає 0,350, а циклічна прогнозована пошкоджуваність на пускових режимах дорівнює 0,616. Якщо розглядати подальший термін як роботу у маневреному режимі щоденного пуску-зупинки, то прогнозована річна пошкоджуваність дорівнює 1,039 та перевищує допустиму пошкоджуваність 1,0, тобто енергоблок не може далі експлуатуватися.

При дослідженні можливого повторного продовження експлуатації роторів високого та середнього тиску парових турбін К-200-130 Курахівської ТЕС станом на 2018 р. показано, що задовільні ресурсні характеристики можна отримати при зниженні коефіцієнтів запасу міцності по кількості циклів і по деформаціях до 3 та 1,25 згідно даних

Таблиця 1 – Показники пошкоджуваності та залишковий ресурс турбін Курахівської ТЕС станом на 2015 р. для різних експлуатаційних режимів роботи

Ресурсний показник	Блок №3	Блок №4	Блок №5	Блок №6	Блок №7	Блок №8	Блок №9	
Рік введення блока в експлуатацію	1972	1973	1973	1973	1974	1974	1975	
Напрацювання блока на 01.10.15	279723	254623	239615	234531	247278	244695	239208	
Кількість пусків блока на 01.10.15	1424	2352	2862	2655	2186	2381	1691	
Пошкоджуваність за весь час при нормальній експлуатації	статична	0,350	0,318	0,300	0,188	0,309	0,198	0,183
	циклічна	0,616	0,653	0,683	0,433	0,660	0,442	0,426
	сумарна	0,966	0,971	0,983	0,621	0,969	0,640	0,609
Пошкоджуваність за рік при щоденному пуску-зупинці	циклічна	0,073	0,122	0,060	0,159	0,122	0,122	0,106
	сумарна	1,039	1,092	1,043	0,779	1,091	0,762	0,715
Залишковий ресурс, год.	Нормальна експлуатація	15626	11388	6044	205412	11430	199123	219552
	Щоденний пуск-зупинка	4807	2164	2364	19127	2221	25545	31583

експериментальних досліджень [6]. При визначенні статичної пошкоджуваності допустимий час роботи металу можна збільшити до 450–560 тис. год. Дані щодо залишкового ресурсу енергоблоків Курахівської ТЕС наведені в табл. 2. Зі зменшеними коефіцієнтами запасу залишковий ресурс РВТ енергоблока № 4 ДТЕК Курахівська ТЕС може бути збільшений до 95714 год., а РСТ – до 44667 год. Залишковий ресурс РВТ енергоблока № 5 може бути збільшений до 79820 год., а РСТ – до 103088 год.

Слід також зазначити, що найбільшу долю в пошкоджуваність роторів парової турбіни К-200-130 вносять пуски з гарячого та холодного станів. Найменшу долю в пошкоджуваність роторів додають пуски з неостиглого стану НС-1 при температурі металу на початку пуску 250 °С.

Так, для роторів середнього тиску РСТ допустима кількість пусків з холодного стану складає 2500, допустима кількість пусків з неостиглого стану НС-2 дорівнює 3900, а допустима кількість пусків з неостиглого стану НС-1 практично у 2 рази більша та дорівнює 5800 (табл. 2). Допустима кількість пусків з неостиглого стану НС-1 менше за всі інші типи пусків впливає на циклічну пошкоджуваність роторів, що визначається за формулою [5]:

$$[\Pi_{\text{ц}}] = \sum n_i / [N_{pi}], \quad (1)$$

де  $n_i$  – реальна кількість пусків з різних теплових станів, визначена експлуатуючими організаціями (ТЕС);

$[N_{pi}]$  – допустима кількість пусків з різних теплових станів, визначена згідно нормативних документів Мінпаливенерго [5].

Таким чином, для зменшення пошкоджуваності роторів РВТ та РСТ необхідно зменшити кількість пусків з ХС та ГС, при цьому збільшити кількість пусків з НС-1.

Таблиця 2 – Розрахункова оцінка пошкоджуваності і залишкового ресурсу РВТ та РСТ енергоблоків № 4, 5 Курахівської ТЕС при повторному продовженні експлуатації у 2018 р.

Ресурсний показник	РВТ №4		РСТ №4		РВТ №5		РСТ №5		
Загальна кількість пусків	2475		2475		2978		1742		
Загальне напрацювання, год.	261773		261773		243785		241544		
Коефіцієнти запасу міцності по числу циклів / по деформації	5 / 1,5	3 / 1,25	5 / 1,5	3 / 1,25	5 / 1,5	3 / 1,25	5 / 1,5	3 / 1,25	
Допустима кількість циклів по різним типам пусків	$[N_{pl}]_{HC-2}$	7500	>10000	3900	6400	7500	>10000	3900	6400
	$[N_{pl}]_{HC-1}$	6200	9300	5800	8000	6200	9300	5800	8000
	$[N_{pl}]_{XC}$	5200	8200	2500	4170	5200	8200	2500	4170
Циклічна пошкоджуваність	38,21	26,48	65,10	40,90	45,74	31,8	46,37	29,01	
Допустимий час роботи, год.	$3,7 \times 10^5$	$5,6 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$5,6 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$5,6 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$5,6 \times 10^5$	
Статична пошкоджуваність	70,75	46,75	70,75	44,52	65,89	43,53	65,28	41,08	
Сумарна пошкоджуваність	108,96	73,23	135,85	85,42	111,68	75,33	111,65	70,09	
Залишковий ресурс, год.	<0	95714	<0	44667	<0	79820	<0	103088	

Таблиця 3 – Показники пошкоджуваності та залишковий ресурс турбін Луганської ТЕС станом на 2015 р. для різних експлуатаційних режимів роботи

Ресурсний показник	Блок №9	Блок №10	Блок №11	Блок №13	Блок №14	Блок №15	
Рік введення блока в експлуатацію	1962	1962	1963	1967	1968	1968	
Напрацювання блока на 01.10.15	322672	308281	317571	284658	280930	292226	
Кількість пусків блока на 01.10.15	1617	1813	1811	1896	1729	1327	
Пошкоджуваність за весь час при нормальній експлуатації	статична	0,403	0,385	0,397	0,356	0,198	0,183
	циклічна	0,591	0,554	0,589	0,471	0,809	0,783
	сумарна	0,994	0,939	0,986	0,827	1,006	0,966
Пошкоджуваність за рік при щоденному пуску-зупинці	циклічна	0,220	0,225	0,243	0,061	0,228	0,225
	сумарна	1,214	1,164	1,230	0,888	1,234	1,191
Залишковий ресурс, год.	Нормальна експлуатація	3096	34027	7429	104530	-2208	12755
	Щоденний пуск-зупинка	264	2675	579	29604	-23524	1163

Парові турбіни потужністю 200 МВт блоків № 9–15 Луганської ТЕС (ЛуТЕС) були введені в експлуатацію в 1963–1969 роках [1, 3]. Станом на 01.10.2015 року відпрацювали 199661–322672 год. при загальній кількості пусків від 687 до 1896. Аналогічно до КуТЕС, детальне дольове відношення типів пуску для різних теплових станів відсутнє. Тому для розрахункового дослідження (табл. 3) усі пуски були згруповані за описаною вище методикою для періоду часу з 2005 до 2008 р., коли ця статистика велася.

Чотири із шести блоків ЛуТЕС, що розглядаються мають сумарну пошкоджуваність близьку до граничного стану 1,0. Пошкоджуваність енер-

гоблока № 14 уже складає 1,006, що говорить про неможливість його експлуатації за прийнятих коефіцієнтів запасу міцності по числу циклів  $n_N = 5$  і по приведеній деформації  $n_e = 1,5$ .

Залишковий ресурс 5 з 6 блоків знаходиться на дуже низькому рівні, що свідчить про потребу у негайному дослідженні поточного стану обладнання та проведенню комплексу робіт з продовження ресурсу. Осереднена швидкість з якою енергоблоки ЛуТЕС щорічно себе зношують лежить на рівні 1,72–2,14 %/рік. Однак при роботі обладнання у режимі щоденного пуску-зупинки, ця швидкість зростає майже в 10 разів і становить 21,99–24,33 %/рік [1, 3]. Це пов'язано з високою

чутливістю устаткування до частих пусків із гарячого стану. Для блока № 13, на якому реалізована подача гарячої пари на передні кінцеві ущільнення ЦВТ і ЦСТ, швидкість зношення турбіни при щоденному пуску-зупинці складає 6,08 %. Це пояснюється меншими тепловими перепадами і відповідно нижчими температурними градієнтами у початкові моменти пуску з холодного стану, через відсутність заохолодження кінцевих ущільнень.

Аналогічно, при дослідженні можливого повторного продовження експлуатації роторів високого та середнього тиску парових турбін К-200-130 ЛуТЕС у 2018 р. розглянуті ротори РВТ та РСТ [7].

У 2011 році Державне підприємство «ДонОРГРЕС» провело обстеження РВТ парової турбіни К-200-130-3, знятого з енергоблока № 15 ЛуТЕС, недопустимих дефектів не виявлено. Лабораторією металів і зварювання ЛуТЕС в 2017 році виконано вихрострумний контроль теплових канавок РВТ, виявлені тріщини в канавках № 1–16 глибиною 8 мм, в канавках № 17–30 глибиною 11–14 мм, якість металу ротора з боку осевого каналу оцінена як задовільна. Дефекти лопаток вибрані механічним способом і закруглені. Фактичне напрацювання РВТ на листопад 2017 р. склало 222438 год., а кількість пусків – 2118.

Аналогічні роботи були проведені для РСТ парової турбіни К-200-130-3, що знятий з енергоблока № 13 ЛуТЕС. Виявлені кільцеві тріщини були усунені. За результатами неруйнівного контролю висновок є задовільним. Фактичне напрацювання РСТ1 листопад 2017 р. склало 144596 год., а кількість пусків – 927.

Відповідно до результатів технічного аудиту всі виявлені дефекти в процесі повірного розрахунку при моделюванні геометрії РВТ, РСТ вносились в проектну конструкцію. Дані щодо залиш-

кового ресурсу енергоблоків ЛуТЕС наведені в табл. 4.

Для роторів РВТ та РСТ допустима кількість пусків з холодного стану ХС складає 1800 та 1450, допустима кількість пусків з неостиглого стану НС-2 дорівнює 6800 та 1800, а допустима кількість пусків з неостиглого стану НС-1 більша та дорівнює 7100–4800 (табл. 4). Допустима кількість пусків з неостиглого стану НС-1 менше за всі інші типи пусків впливає на циклічну пошкоджуваність роторів аналогічно енергоблокам КуТЕС.

З аналізу даних (табл. 1–4) видно, що при поточному рівні напрацювання (222438–322672 год.) та кількості пусків (1424–2978) навіть за знижених коефіцієнтів запасу міцності, пошкоджуваність енергоблоків знаходиться в межах 0,67–0,85. Це свідчить про дуже обмежену можливість енергоблоків потужністю 200 МВт до регулювання навантаження у мережі. При експлуатації цих блоків у маневрових режимах, а особливо у режимі щоденного пуску-зупинки, їх залишковий ресурс значно зменшиться. Подальша експлуатація в таких умовах потребує оптимізації кількості пусків з різних теплових станів.

#### Пошук оптимального дольового співвідношення пусків для типових теплових станів металу

Для розв'язання оптимізаційної задачі з планування (визначення) кількості пусків з різних теплових станів, комбінація яких забезпечить максимальне напрацювання розглянутих вище енергоблоків, за цільову функцію обрано залишковий ресурс  $G$ .

В даному випадку, постановку оптимізаційної задачі можна записати наступним чином:

Таблиця 4 – Розрахункова оцінка пошкоджуваності і залишкового ресурсу РВТ та РСТ енергоблока № 9 Луганської ТЕС при повторному продовженні експлуатації у 2018 р.

Ресурсний показник		РВТ		РСТ	
Загальна кількість пусків		2475		2475	
Загальне напрацювання, год.		222438		144596	
Коефіцієнти запасу міцності по числу циклів / по деформації		3 / 1,25	5 / 1,5	3 / 1,25	5 / 1,5
Допустима кількість циклів по різним типам пусків	$[N_{pl}]_{НС-2}$	$>10^4$	6800	3000	1800
	$[N_{pl}]_{НС-1}$	$>10^4$	7100	7500	4800
	$[N_{pl}]_{ХС}$	2700	1800	2600	1450
Циклічна пошкоджуваність		0,172	0,453	0,2789	0,4698
Допустимий час роботи, год.		$3,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$	$3,7 \times 10^5$
Статична пошкоджуваність		0,601	0,601	0,391	0,391
Сумарна пошкоджуваність		0,7739	1,0549	0,6697	0,8606
Залишковий ресурс, год.		85699	<0	64562	23419

Таблиця 5 – Діапазон зміни параметрів енергоблоків 200 МВт  
Курахівської, Луганської та Старобешівської ТЕС

Енергоблоки	$n$	$n_{\text{ХС}}$	$n_{\text{НС}}$	$n_{\text{ГС}}$	$t_{\text{ex}}$ , ГОД
3 РСТ КуТЕС	1036	487 (47 %)	166 (16 %)	383 (37 %)	221120
4 РСТ КуТЕС	1611	556 (35 %)	268 (17 %)	787 (49 %)	204886
5 РСТ КуТЕС	1756	544 (31 %)	–	1212 (69 %)	194809
6 РСТ КуТЕС	1730	519 (30 %)	260 (15 %)	951 (55 %)	188157
7 РСТ КуТЕС	1323	435 (32,8 %)	–	892 (67,2 %)	200641
8 РСТ КуТЕС	1629	542 (33,3 %)	–	1087 (66,7 %)	198542
9 РСТ КуТЕС	300	141 (47 %)	–	159 (53 %)	40113
11 РСТ ЛуТЕС	1216	292 (24,1 %)	263 (21,7 %)	661 (54,4 %)	280387
13 РСТ ЛуТЕС	775	249 (32,2 %)	131 (16,9 %)	395 (51 %)	77864
14 РСТ ЛуТЕС	1085	259 (23,9 %)	180 (16,6 %)	646 (59,9 %)	238329
15 РСТ ЛуТЕС	903	190 (21,1 %)	154 (17,1 %)	559 (61,9 %)	223721
10 РСТ СТЕС	704	331 (47,1 %)	113 (16,1 %)	260 (37 %)	101288
4 РСТ КуТЕС	2352	823 (35 %)	400 (17 %)	1129 (49 %)	254623
5 РСТ КуТЕС	2862	887 (31 %)	–	1975 (69 %)	239615
Повторне продовження 2017–2018 рр.					
4 РСТ КуТЕС	2475	539 (22 %)	727 (29 %)	1209 (49 %)	261773
5 РСТ КуТЕС	1742	655 (22 %)	774 (26 %)	1549 (52 %)	241544
9 РСТ1 ЛуТЕС	927	155 (17 %)	190 (20,5 %)	582 (62,8 %)	144596
9 РСТ2 ЛуТЕС	1389	233 (17 %)	285 (20,6 %)	871 (62,7 %)	250264
3 РСТ КуТЕС	704	331 (47 %)	113 (16 %)	260 (37 %)	101288

$$G^{opt}(\vec{x}_r^{opt}) = \max_{\vec{x}_r \in X} \left\{ \begin{array}{l} \vec{G}(\vec{x}_r), \\ G(G_1(\vec{x}_r), G_2(\vec{x}_r), \dots, G_n(\vec{x}_r)), \\ N_{X \min} \leq |X| \leq N_{X \max}, \end{array} \right. \quad (2)$$

де  $G$  – цільова функція;

$\vec{x}_r$  – вектор параметрів, які впливають на  $G$ ;

$X$  – область існування вектору  $\vec{x}_r$ ;

$N_{X(\min, \max)}$  – межі області існування компонент вектора  $\vec{x}_r$ .

Тобто, задача оптимізації залишкового ресурсу  $G$  потребує пошуку такої комбінації значень компонент вектору  $\vec{x}_r$ , реалізація яких дає екстремальне значення цільової функції  $G$ .

Для опису цільової функції було використано теорію планування експерименту, зокрема насичені плани Рехтшафнера [8]. Використання цих планів дозволяє описати цільову функцію в вигляді повного квадратичного поліному:

$$G(\vec{q}) = A_0 + \sum_{i=1}^z (A_i q_i) + \sum_{i=1}^z (A_{ii} q_{ii}^2) + \sum_{i=1}^{z-1} \sum_{j=i+1}^z (A_{ij} q_i q_j), \quad (3)$$

де  $A$  – коефіцієнти квадратичного поліному;

$\vec{q}$  – вектор нормованих значень незалежних змінних (компонент вектору  $\vec{x}_r$ ;

$z$  – кількість незалежних змінних.

Для формування даних, які відповідно до плану експерименту необхідні для отримання залежності (3), були використані статистичні дані

впливу пусків різного типу на значення залишкового ресурсу  $G$ .

У якості компонент вектору незалежних змінних  $\vec{x}_r$  при розрахунках прийняті наступні параметри: загальна кількість пусків енергоблоків  $n$  (діапазон від 300 до 2900) за весь період експлуатації; дольова кількість пусків з холодного стану  $n_{\text{ХС}}$  (діапазон 0,17–0,47), з неостиглого стану  $n_{\text{НС}}$  (діапазон 0,16–0,3); направлення енергоблоків  $t_{\text{ex}}$  (діапазон 40–300 тис. год.). При цьому пуски з ГС складають 23–67 %. Діапазони зміни параметрів отримані з даних експлуатації (табл. 5), які були надані для енергоблоків № 3–9 КуТЕС, № 9–15 ЛуТЕС та № 10 Старобешівської ТЕС (СТЕС) організаціями, що їх експлуатують.

Для пошуку оптимального співвідношення компонент вектору  $\vec{x}_r$  був використаний метод квазівипадкового пошуку з використанням ЛПт послідовності [9].

Розрахункові дослідження з оптимізації залишкового ресурсу  $G$  свідчать, що максимальний залишковий період експлуатації має місце при мінімальній загальній кількості пусків до 600–800, що відповідає базовим режимам роботи енергоблоків 200 МВт, на які вони були спроектовані (рис. 1).

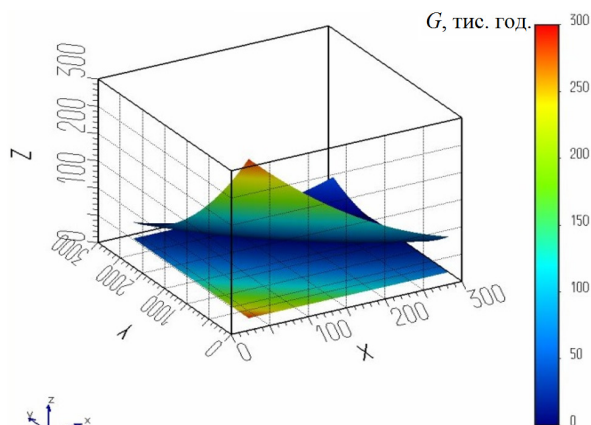


Рис. 1 – Результати розрахунку оптимальних параметрів для забезпечення високих значень залишкового ресурсу: вісь  $X$  – експлуатаційне напруження  $t_{ex}$ , тис. год.; вісь  $Y$  – загальна кількість пусків енергоблоків  $n$ ; вісь  $Z$  – залишковий ресурс  $G$ , тис. год.

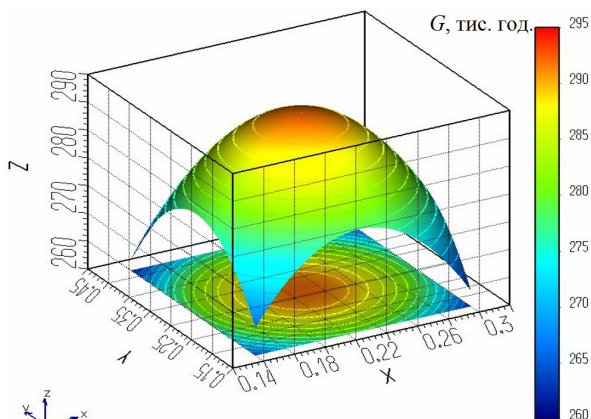


Рис. 2 – Результати розрахунку оптимальних параметрів для забезпечення високих значень залишкового ресурсу: вісь  $X$  – доля кількості пусків з НС  $n_{HC}$ ; вісь  $Y$  – доля кількості пусків з ХС  $n_{HC}$ ; вісь  $Z$  – залишковий ресурс  $G$ , тис. год.

Оптимізаційні дослідження показали, що максимум залишкового ресурсу при роботі енергоблоків 200 МВт у маневрових режимах знаходиться у діапазоні 18–25 % пусків з нестиглого стану та 25–39 % пусків з холодного стану. При цьому, число пусків з гарячого стану визначається як різниця між загальною кількістю енергоблоків та кількістю пусків з нестиглого і холодного станів (рис. 2).

Будь яке відхилення від оптимального розподілу кількості пусків з різних теплових станів при маневрових режим експлуатації енергоблоків 200 МВт скоротить вже продовжений ресурс експлуатації вугільних енергоблоків теплових електричних станцій України.

Так, зменшення до 14–17 % долі пусків з нестиглого стану та до 15–23 % долі з холодного стану призведе збільшення числа пусків з гарячого стану до 60–71 % та до зменшення залишкового ресурсу на 10–12 %.

## Висновки

Станом на січень 2019 р. більшість енергоблоків потужністю 200 МВт спрацювали парковий ресурс 220 тис. год. при значному перевищенні по ресурсним показникам маневреності (близько 2000 пусків при нормативних – 800). Це може призвести до значного зниження залишкового напруження та збільшення аварійних зупинок при подальшому збільшенні числа пусків, що характерно для роботи у маневрових режимах.

Таким чином, неможливе залучення більшості енергетичного обладнання 200 МВт для регулювання електричного навантаження.

Оптимізаційні дослідження показали, що для більшості турбінного обладнання енергоблоків 200 МВт максимум залишкового ресурсу при роботі у маневрових режимах знаходиться у діапазоні 18–25 % пусків з нестиглого стану та 25–39 % пусків з холодного стану.

Будь яке відхилення від оптимального розподілу кількості пусків з різних теплових станів при маневрових режим експлуатації енергоблоків 200 МВт скоротить вже продовжений ресурс експлуатації вугільних енергоблоків теплових електричних станцій України.

## Список литературы

1. Черноусенко О. Ю., Пешко В. А. Влияние работы энергоблоков ТЭС в маневренном режиме на вычерпывание ресурса энергетического оборудования. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХП», 2016. № 10(1182). Бібліогр.: 7 назв. С. 6–16. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.01.
2. Черноусенко О. Ю., Пешко В. А. Влияние работы энергоблоков ТЭС в маневренном режиме на надежность та аварийность энергетического оборудования. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХП», 2016. № 8(1180). Бібліогр.: 8 назв. С. 100–106. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.14.
3. НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція. СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. Офіц. вид. Київ: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2005. 76 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України, Типова інструкція).
4. Peshko V., Chernousenko O., Nikulenkova T., Nikulenkov A. Comprehensive rotor service life study for high & intermediate pressure cylinders of high power steam turbines. *Propulsion and Power Research*. China: National Laboratory for Aeronautics and Astronautics. 2016. Vol. 5. Iss. 4. pp. 302–309.
5. РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. Москва, 1985. № АЗ–002/7382. 49 с.
6. Черноусенко О. Ю., Рындюк Д. В., Пешко В. А. Повторное продление эксплуатации роторов высокого и среднего давления турбины К-200-130 Кураховской ТЭС. *Вісник НТУ*

- «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХП», 2018. № 11(1287). Бібліогр.: 8 назв. С. 12–18. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2018.11.02.
7. Черноусенко О. Ю., Рындюк Д. В., Пешко В. А. Особенности продления эксплуатации роторов высокого и среднего давления турбины К-200-130 Луганской ТЭС. *Проблеми загальної енергетики*. Київ, 2018. № 2(53). Бібліогр.: 8 назв. С. 65–70. ISSN 1562-8965. doi: 10.15407/pge2018.02.065.
  8. Rechtschaffner R. L. Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs. *Technometrics*. 1967. Vol. 4. pp. 569–575.
  9. Соболев И. М., Статников Р. Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. Москва: Дрофа. 2006. – 175 с. ISBN: 5-7107-7989-X.
- References (transliterated)**
1. Chernousenko, O. and Peshko, V. (2016), “Influence of the Operation of the Power Units of Thermal Power Plants in the Maneuvering Mode on the Aging Rate of Power Equipment”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1182), pp. 6–16, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.01.
  2. Chernousenko, O. and Peshko, V. (2016), “Influence Produced by the Operation of the Power Units of Thermal Power Plants in the Maneuver Load Mode on the Reliability and Accident Rate of Power Equipment», *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 100–106, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.14.
  3. *Ministry of fuel and energy of Ukraine (2005), ND MPE Ukrainy. Kontrol' metalu i prodovzhennja terminu ekspluatatsii' osnovnyh elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovyh el-ektrostantsij: SOU-N MPE 40.17.401:2004* [RD of MFEU. Metal inspection and extending operating life of main components of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants: SOU-N MPE 40.17.401:2004], Kiev, 76 p.
  4. Peshko, V., Chernousenko, O., Nikulenkova, T., Nikulenkov A. (2016), “Comprehensive rotor service life study for high & intermediate pressure cylinders of high power steam turbines”, *Propulsion and Power Research*, National Laboratory for Aeronautics and Astronautics, China, vol. 5, iss. 4, pp. 302–309.
  5. (1985), RTM 108.021.103. *Detali parovyh stacionarnykh turbin. Raschet na malociklovuju ustalost' [Details of stationary steam turbines. Low cycle fatigue calculation]*, Moscow, Russian.
  6. Chernousenko, O., Rindyuk, D., Peshko, V. (2018), “Refreshing Extension of the Operation of High Pressure Rotors and Average Pressure Rotors of the Turbine K-200-130 at the Kurakhovska Heat Power Plant”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 11(1287), pp. 12–18, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2018.11.02.
  7. Chernousenko, O., Rindyuk, D., Peshko, V. (2018), “Features of prolongation of the service life of high- and intermediate-pressure rotors of K-200-130 steam turbine of Luhansk TPP”, *The Problems of General Energy*, No. 2(53), pp. 65–70, ISSN 1562-8965. doi: 10.15407/pge2018.02.065.
  8. Rechtschaffner R. (1967), “Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs”, *Technometrics*, vol. 4, pp. 569–575.
  9. Sobol I., Statnikov R. (2006), *Vyibor optimalnykh parametrov v zadachah so mnogimi kriteriyami* [The choice of optimal parameters in problems with many criteria], Drofa, Moscow, 175 p. ISBN 5-7107-7989-X.

Надійшло (received) 17.05.2019

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Черноусенко Ольга Юрійвна (Черноусенко Ольга Юрьевна, Chernousenko Olga)** – доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського, завідувач кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (067) 504–82–92; e-mail: chernousenko20a@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>. Scopus 6507954096.

**Усатий Олександр Павлович (Усатый Александр Павлович, Usaty Oleksandr)** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; e-mail: alpaus@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8568-5007>. Scopus 56461340500.

**Риндюк Дмитро Вікторович (Рындюк Дмитрий Викторович, Rindyuk Dmitro)** – кандидат технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (099) 055–47–04; e-mail: rel\_dv@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7770-7547>. Scopus 57193402888.

**Пешко Віталій Анатолійович (Пешко Виталий Анатольевич, Peshko Vitaliy)** – кандидат технічних наук, КПІ ім. Ігоря Сікорського, старший викладач кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: (067) 176–54–71; e-mail: vapeshko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>. Scopus 57194077095.