

II Міжнародна науково-технічна конференція
«Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні»

Харків, Україна, 5-8 жовтня 2020 р.

СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСООЩАДНИХ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГОБЛОКІВ

Черноусенко О.Ю., Риндюк Д.В., Пешко В.А.



*Кафедра теплоенергетичних
установок теплових і
атомних електростанцій,
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Актуальність роботи

Характерною особливістю енергетичних систем багатьох країн Європи є недостатня кількість високоманеврових потужностей в загальному енергогенеруючому балансі. Це призводить до необхідності залучати до роботи енергоблоки потужністю 200-300 МВт в піковій-напівпіковій частині графіка електричних навантажень. Проте таке обладнання не проектувалось для роботи в частих змінних режимах. Порушення регламентів експлуатації, викликане необхідністю надмірно частих пусків та зупинок обладнання, призводить до різкого зменшення терміну експлуатації вказаних енергоблоків [1].

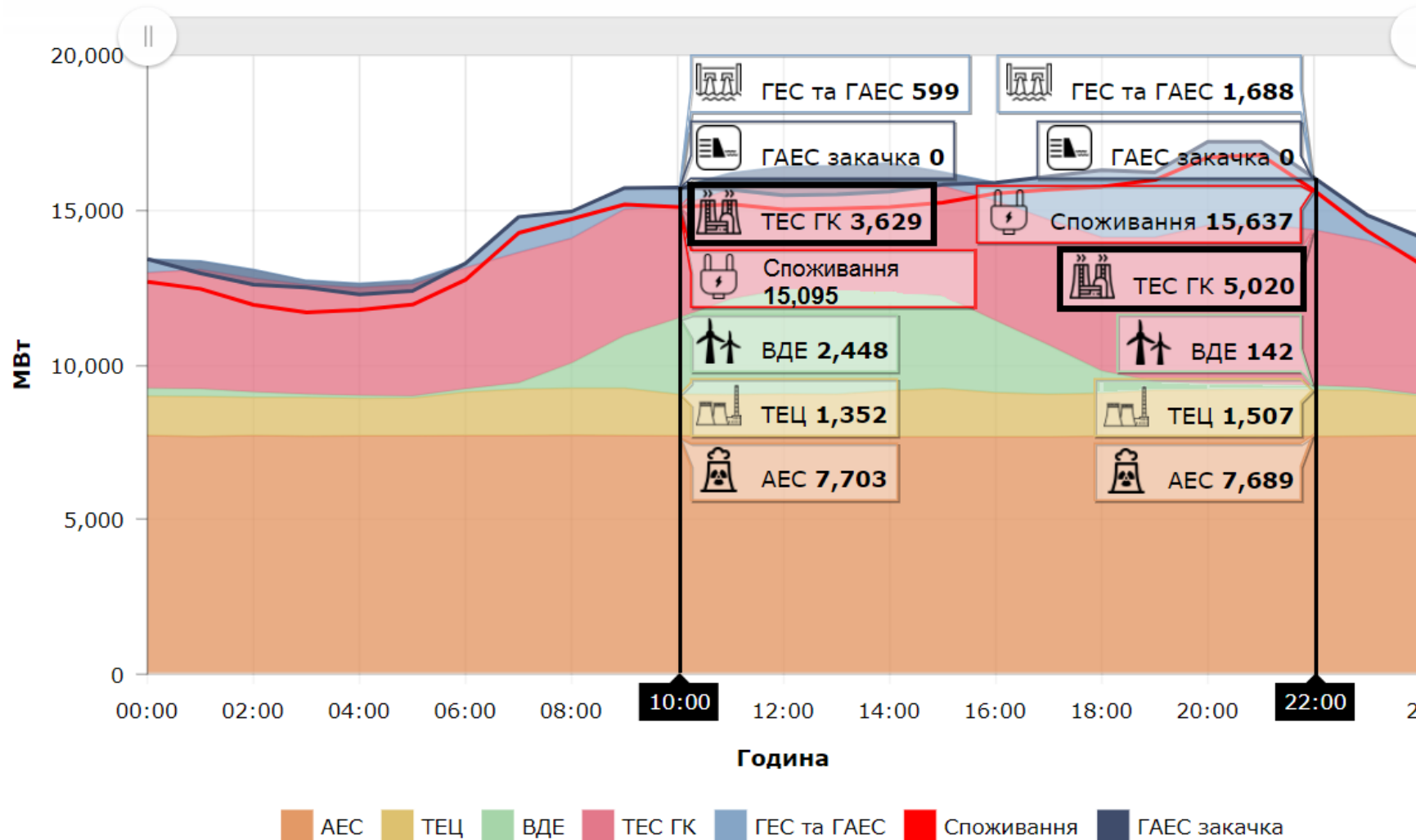
Тому пріоритетним завданням стає визначення ресурсних показників даних енергоблоків, з метою встановлення допустимості їх подальшої роботи за частих змінних режимів. Окрім цього, доцільним є застосування методів управління ресурсом, що дозволяють уповільнити темпи накопичення пошкоджуваності в основному металі енергетичного обладнання [2].

1. Черноусенко О. Ю., Пешко В. А. Вплив роботи енергоблоків ТЕС в маневреному режимі на вичерпання ресурсу енергетичного обладнання. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 10 (1182). С. 6-16. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2016.08.14>

2. Chernousenko O., Rindyuk D., Peshko V., Goryazhenko V. Development of a technological approach to the control of turbine casings resource for supercritical steam parameters. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, Issue 1 (92). pp. 51–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126042>

Нерівномірність роботи ТЕС в денному графіку споживання електричної енергії в ОЕС України

Добовий графік виробництва/споживання е/е за 10.09.2020



Значна доля відновлювальних джерел енергії в загальному балансі генерації призводить до необхідності обмежувати потужність частини ТЕС генеруючих компаній щоденно.

Наприклад, 10 вересня 2020 р. мінімальна потужність ТЕС ГК припала на 10⁰⁰ і становить 3,63 ГВт, а максимальна спостерігалась о 22⁰⁰ і становила 5,02 ГВт.

Така щоденна зміна потужності обладнання має негативний вплив на довговічності його роботи.

Мета роботи та задачі дослідження

Враховуючи значну кількість суттєвих факторів, що впливають на пошкоджуваність і залишковий ресурс, виникає необхідність визначити їх оптимальний, або, як мінімум, раціональний розподіл. Високу ефективність впровадження результатів прогнозуючої оптимізації в енергетиці доводять роботи [3, 4].

Мета роботи – створення системи оцінки та прогнозування раціональних ресурсощадних режимів роботи високотемпературних елементів енергетичного обладнання.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– накопичити та статистично обробити дані по напрацюванню конкретних енергоблоків ТЕС (число пусків; кількість пусків для найбільш характерних режимів експлуатації; загальне напрацювання);

– визначити допустиме число циклів за різними типами пусків на підставі технічного аудиту і даних щодо реальних умов експлуатації за весь період роботи, а також діагностичного контролю основного металу;

– створити математичну модель прогнозування раціональних ресурсощадних режимів роботи та здійснити її програмну реалізацію.

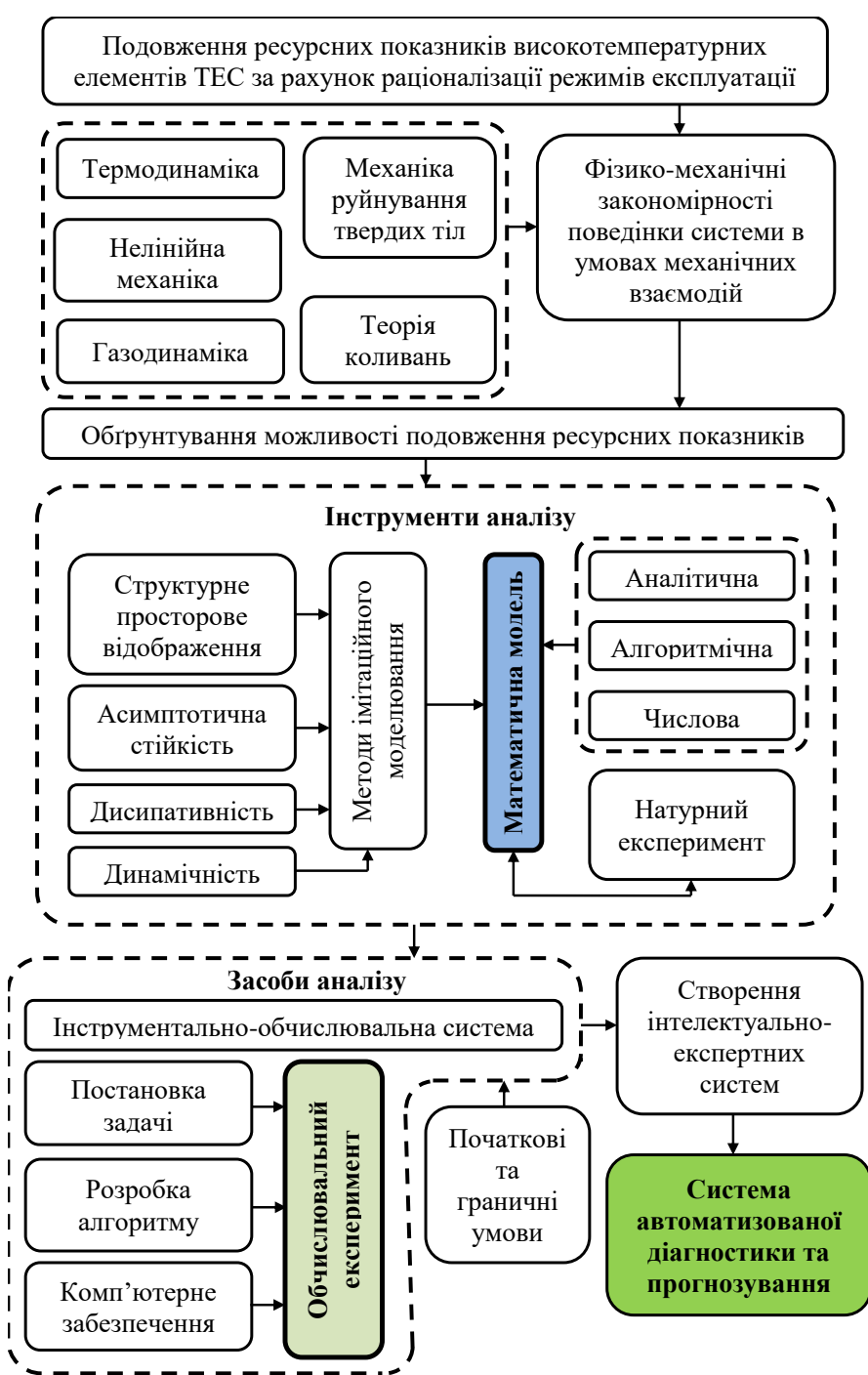
3. Lan Wanga, Eric Wai Ming Lee, Richard K.K.Yuen, Wei Feng. Cooling load forecasting–based predictive optimisation for chiller plants. *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 198. pp. 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.016>

4. Stoppato A., Mirandola A., Meneghetti G., Lo Casto E. On the operation strategy of steam power plants working at variable load: technical and economic issues. *Energy*. 2012. Vol. 37, Issue 1. pp. 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.042>

Система оцінки та прогнозування раціональних ресурсощадних режимів роботи

В якості бази для розробки системи оцінки та прогнозування запропоновано підхід що базується на [5]: «математична модель – інтелектуальна експертна система – система автоматизованої оцінки та прогнозування», яку схематично представлено ліворуч.

Дана схема розглядає технологічний процес у вигляді багатокомпонентної системи взаємопов'язаних об'єктів досліджень: елементи енергетичного обладнання, теплоносій, механічні навантаження та ін.



5. Штефан Є. В., Риндюк Д. В., Кадомський С. В. Математичне моделювання процесів механічного оброблення дисперсних органічних матеріалів. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2014. № 2/12 (68). С. 55–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23718>

Математична модель системи прогнозування раціональних ресурсоощадних режимів експлуатації енергоблоків

За період з 2004 до 2019 року, авторами проведено значну роботу з накопичення та статистичної обробки даних з напрацювання конкретних енергоблоків ТЕС України. Отримано масив даних по числу пусків, їх дольовому розподілу для різних теплових станів, тривалості роботи на певних електричних навантаженнях, загальному напрацюванню обладнання.

Дослідження базувалися на даних щодо реальних умов експлуатації за весь період роботи, а також результатах технічного аудиту і діагностичного контролю основного металу проведеного Лабораторією металів та зварювання відповідних електростанцій.

Розрахунки наявної та прогнозованої пошкоджуваності (статичної, циклічної), а також залишкового ресурсу проведені для сценаріїв експлуатації обладнання в базових режимах роботи та потенційно найбільш важкому маневреному (щоденний пуск–зупинка). Детальніше результати розрахункових досліджень представлені в [1, 2, 6, 7].

6. Olga Chernousenko, Dmitriy Ryndyuk, Vitaliy Peshko. *Re-Extension of 200 MW Turbine Cast Casing Service. Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 22. No 2. pp. 14–20. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.02.014>

7. 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 «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2018. № 11 (1287). С. 12-18. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2018.11.02>

Математична модель системи прогнозування раціональних ресурсощадних режимів експлуатації енергоблоків

Розробку математичної моделі, можна представити послідовністю наступних кроків:

1. Формулювання аналітичних залежностей, що містять параметри, які описують розрахункову схему об'єкта дослідження. Ці співвідношення повинні мати вигляд замкнутої системи рівнянь, що описують поведінку об'єкта дослідження в реальних просторово–часових координатах.

2. Розв'язок сформульованої задачі та розробка послідовності дій (алгоритму) перетворення вхідних параметрів у вихідні.

3. Реалізація розробленого алгоритму у вигляді комп'ютерної програми, метою якої є забезпечення автоматизації проведення обчислювальних експериментів.

Кожний з вищезгаданих етапів представляє собою окрему, іноді, досить складну задачу. Результатом виконання кожного з вказаних етапів є створення відповідно трьох взаємозв'язаних моделей – аналітичної, алгоритмічної та цифрової. Описання алгоритму створення та безпосередньо самих моделей представлено в [8].

8. Chernousenko O., Rindyuk D., Peshko V., Chernov S., Goryazhenko V. Development of a System for Estimating and Forecasting the Rational Resource-Saving Operating Modes of TPP. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3, No 8 (105). pp. 14–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204505>

Математична модель системи прогнозування раціональних ресурсощадних режимів експлуатації енергоблоків

Окремої уваги потребує, проведена авторами, побудова аналітичної залежності між приведеною деформацією ε_a^{red} та допустимим числом циклів N_D для сталі 25Х1М1ФА на основі математико–статистичного аналізу експериментальних даних.

Експериментальні дослідження проводилися на базі Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України з використанням лабораторної установки АІМА–5–2, яка призначена для випробувань металів на повзучість і тривалу міцність при постійній температурі і навантаженні. В результаті випробувань встановлювалась залежність між напруженням і часом до руйнування при заданій постійній температурі. Результати початкових експериментальних досліджень повзучості і тривалої міцності сталей аналізувались за допомогою методу базових діаграм.

Опираючись на дані експериментальних досліджень та використавши в якості базової апроксимуючої функції модифіковане рівняння Стейнхарта–Харта, отримано вказану вище залежність, що у загальному випадку має вигляд:

$$N_D = \frac{t(1 + t + \varepsilon_a^{red})}{1 + \ln \varepsilon_a^{red} + \ln^3(\varepsilon_a^{red})}.$$

Математична модель системи прогнозування раціональних ресурсощадних режимів експлуатації енергоблоків

Наступним кроком є розв'язання задачі оптимізації, яка полягає у визначенні такого розподілу режимних параметрів, що забезпечують максимальне збереження ресурсу обладнання. Як цільову функцію задачі оптимізації обрано залишковий ресурс G :

$$G(\vec{x}) \rightarrow \max_{\vec{x} \in \bar{X}} G(\vec{x})$$

Розв'язком поставленої задачі оптимізації буде така точка $x^{opt} \in X$, що $G(\vec{x}^{opt}) \geq G(\vec{x})$

$$G(\vec{x}^{opt}) = \max_{\vec{x} \in \bar{X}} G(\vec{x})$$

$$N_{X \min} \leq |\bar{X}| \leq N_{X \max}$$

де G – цільова функція; \vec{x} – вектор режимно-технологічних параметрів, які впливають на G ; \bar{X} – область існування вектору \vec{x} ; $N_{X(min)}$, $N_{X(max)}$ – межі області існування складових.

Математична модель системи прогнозування раціональних ресурсощадних режимів експлуатації енергоблоків

$$G(t, NS) \rightarrow \max_{\vec{x} \in \bar{X}} G(t, NS),$$

$$G(t, NS) = \frac{(1 - P_{sum}) \cdot \chi}{\frac{t}{T} + \left[\frac{(n_{min} - n_{max}) \cdot (t - t_{min})}{t_{max} - t_{min}} + n_{max} \right] \cdot \left[\frac{HS}{N_{hs}} + \frac{1 - HS}{N_{ns} \cdot NS^{-1}} + \frac{1 - HS}{N_{gs} \cdot (1 - NS)^{-1}} \right]},$$

$$\vec{x} = \left\{ \begin{array}{l} t_{min} \leq t \leq t_{max} \\ n_{min} \leq n \leq n_{max} \\ hs_{min} \leq hs \leq hs_{max} \end{array} \right\}$$

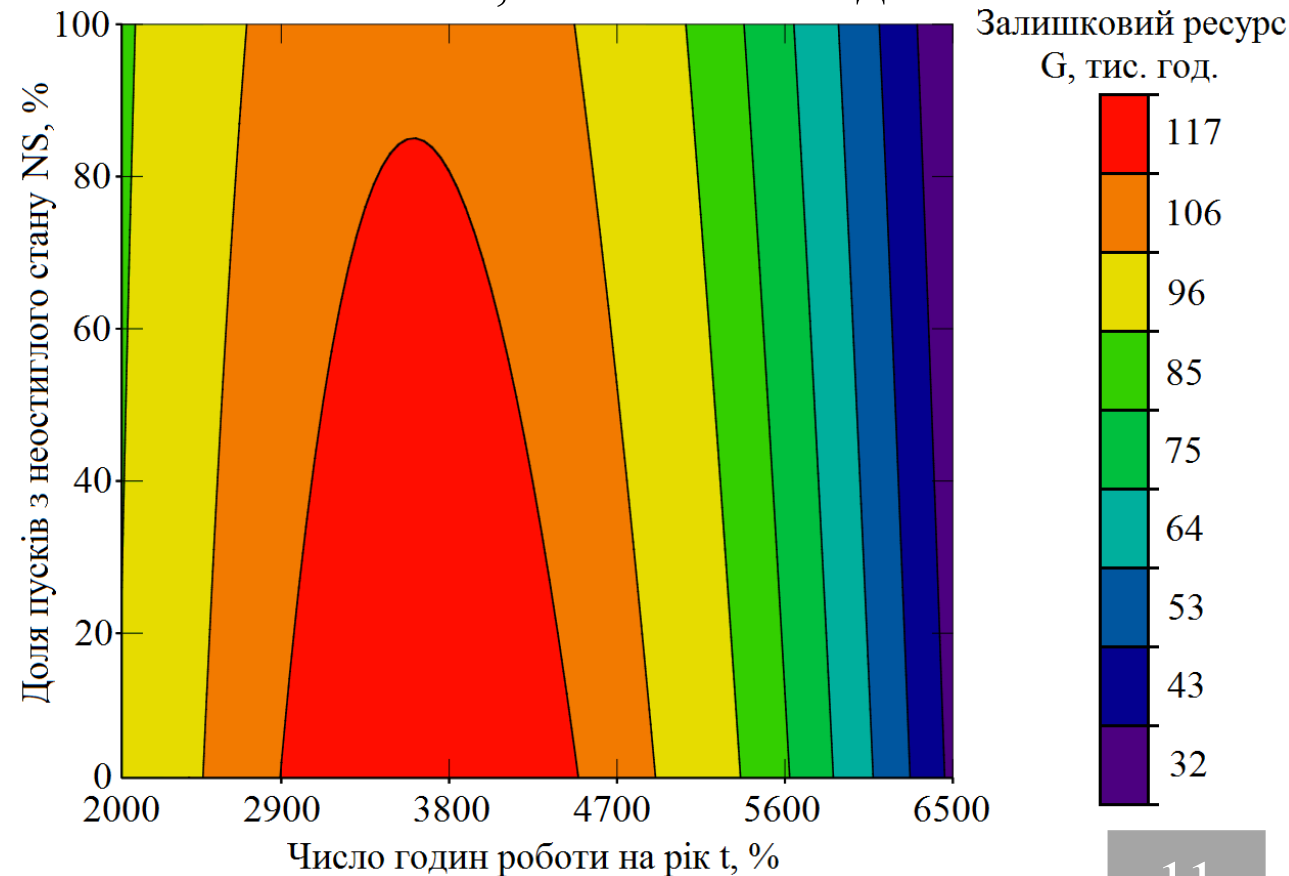
$$HS = (t - t_{min}) \cdot \frac{hs_{max} - hs_{min}}{t_{max} - t_{min}} + hs_{min}$$

де t_{min} , t_{max} – мінімальне та максимальне число годин роботи енергоблоку в рік на період, що прогнозується; n_{min} , n_{max} – мінімальна та максимальна кількість загальних річних пусків енергоблоку; hs_{min} , hs_{max} – мінімальні та максимальні значення дольового числа пусків з холодного стану; HS – доля числа пусків з холодного стану; NS – дольова частка пусків з неостиглого стану в межах частки пусків з гарячого стану; N_{hs} , N_{ns} , N_{gs} – допустиме число пусків з відповідних станів (ХС, НС, ГС); χ – середньорічне напрацювання згідно енергетичного аудиту.

Пошук раціонального ресурсощадного режиму роботи енергоблока потужністю 200 МВт, що вичерпав свій парковий ресурс

Наведена вище система оцінки та прогнозування раціональних режимів експлуатації була апробована на «середньостатистичному» енергоблоці потужністю 200 МВт, що вичерпав свій проектний ресурс 220 тис. год. При цьому число пусків відповідає парковому значенню – 800, з яких 50 % – пуски з гарячого стану металу, 20 % – з неостиглого, 30 % – з холодного.

В розглянутому випадку найбільш раціональним режимом експлуатації, що здатний забезпечити найвищу довговічність і ресурсозбереження є напівбазовий режим. Раціональні значення експлуатаційних параметрів складають: число годин роботи на рік – 3000-4400 год, число пусків-зупинок протягом року – 48-64, з дольовим розподілом за різними типами: з ХС – 28-52 %, НС – 0-20 %, ГС – 28-48 %.



Висновки

1. Авторами проведено накопичення та статистична обробка даних з напрацюванню конкретних енергоблоків ТЕС (по числу пусків, їх дольовому розподілу для різних теплових станів, тривалості роботи на певних електричних навантаженнях, загальному напрацюванню обладнання).

2. На основі математико–статистичного аналізу експериментальних даних виведено закономірність між приведеною деформацією ε_{red}^a та допустимим числом циклів N_D для легованої сталі 25Х1М1ФА. В якості базової апроксимуючої функції використано модифіковане рівняння Стейнхарта–Харта. Результати експериментальних досліджень повзучості і тривалої міцності сталей аналізувались опираючись на метод базових діаграм. Дані отримано при високих експлуатаційних температурах (400–550 °С) металу.

3. Запропоновано систему оцінки та прогнозування раціональних ресурсощадних режимів роботи енергоблоків ТЕС. В межах даної системи визначено допустиме число циклів роботи енергетичного обладнання ТЕС за різним типам пусків. Дослідження базувалися на даних щодо реальних умов експлуатації за весь період роботи, а також результатах технічного аудиту і діагностичного контролю основного металу високотемпературних елементів енергоблоків. Також створено математичну модель призначену для прогнозування раціональних ресурсощадних режимів роботи енергоблоків ТЕС та здійснено її програмну реалізацію.