

УДК 629.9:621.311

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ ПАРОТУРБИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС ПРИ РАБОТЕ В ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТИ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

<sup>1</sup>Бурденкова Е.Ю., <sup>2</sup>Шевченко Н.Ю., <sup>2</sup>Сошинов А.Г.

<sup>1</sup> *Отдел энергетических проблем Саратовского научного центра Российской академии наук, Саратов, e-mail: lena.burdenckova@yandex.ru*

<sup>2</sup> *ФГБОУ ВО Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет, Камышин, e-mail: kti@kti.ru*

Современная турбина должна отвечать высоким требованиям безопасности, надежности и экономичности. Для работы в переменной части графика электрических нагрузок паровые турбины мощностью 200 МВт, установленные на ТЭС должны обладать достаточной маневренностью. Нормируется и число пусков, которое должно выдержать оборудование энергоблока за срок службы без повреждений от малоциклового усталости. Актуальной задачей является установление связи режимных факторов и наработки с повреждаемостью высокотемпературных элементов и ресурсом корпуса цилиндра высокого давления турбины. В статье приведены результаты исследования с использованием корреляционно-регрессионного анализа влияния режимных факторов ТЭС и наработки на поврежденность высокотемпературных элементов и ресурсом корпусов цилиндра высокого давления блочных конденсационных турбин К-200-130 на примере Луганской ТЭС.

**Ключевые слова:** паровые турбины, маневренность, пуски, режимные факторы, показатели надежности, поврежденность высокотемпературных элементов, малоцикловая усталость

## FORECASTING OF RELIABILITY PARAMETERS OF STEAM TURBINE EQUIPMENT OF THERMAL POWER PLANTS IN THE VARIABLE PART OF ELECTRICAL LOADS SCHEDULE

<sup>1</sup>Burdenkova E. Yu., <sup>2</sup>Shevchenko N. Yu., <sup>2</sup>Soshinov A.G.

<sup>1</sup> *Senior researcher of the Department of energy problems, Saratov scientific center of the Russian Academy of Sciences, Saratov, e-mail: lena.burdenckova@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Kamyshin Institute of Technology (branch) of state educational institution of higher Education Volgograd State Technical University, Kamyshin, e-mail: kti@kti.ru*

Modern turbine must meet high standards of safety, reliability and efficiency. For operation in the variable part of the schedule of electrical loads of the steam turbine capacity of 200 MW installed at thermal power plants must have adequate manoeuvrability. The number of launches which the equipment of the power unit should withstand during service life without damage from low cycle fatigue is standardized. The actual problem is fixing the connection of regime factors and operation time with the damage of high temperature elements and resources of body of high pressure cylinder of the turbine. The article adduces the results of correlation and regression analysis of the influence of regime factors of thermal power plants and operation time on the damage of high temperature elements and resources of body of high pressure cylinder of modular condensation turbine K-200-130 on the example of Lugansk thermal power plant.

**Keywords:** steam turbine, manoeuvrability, launches, regime factors, reliability indices, damage high temperature elements, low cycle fatigue

Тепловыми электрическими станциями в России производится более 65% электроэнергии. Режимы работы электростанций и отдельных энергоблоков определяются суточным графиком электрических нагрузок энергосистемы [4]. На рис. 1 приведен характерный суточный график для типовой энергосистемы.

Основу энергетических мощностей в энергосистеме России составляют крупные ТЭС и АЭС с конденсационными энергоблоками мощностью 150 - 1200 МВт. Паровые турбины мощностью 200 МВт, установленные на ТЭС, часто работают в переменной части графика электрических нагрузок, поэтому они должны обладать достаточной маневренностью [1].

Современная турбина должна отвечать высоким требованиям безопасности, надежности, экономичности и маневренности.

Наиболее крупной серией блочных конденсационных турбин являются турбины К-200-130. Максимальная наработка ряда турбин превышает 170-180 тыс. часов, число пусков более 1000, парковый ресурс продлен до 220 тыс. часов.

Обязательным требованием ко всем строящимся в настоящее время конденсационным энергоблокам является число пусков, которое должно выдержать оборудование энергоблока за срок службы без повреждений от малоциклового усталости. Строящиеся энергоблоки мощностью 300 МВт и ниже должны выдерживать не менее 1400 пусков

из неостывшего и 6000 - из горячего состояний [2]. Межремонтный период (МРП) увеличивается до 6-8 лет.

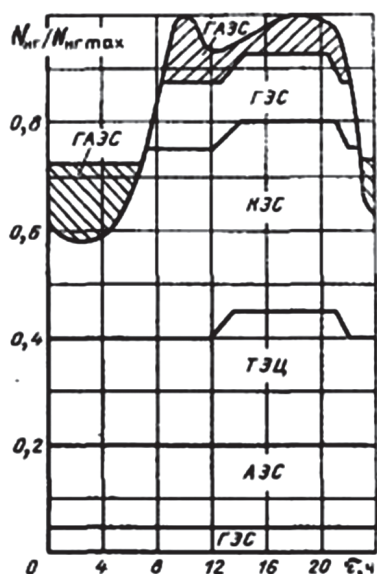


Рис. 1. Суточный график нагрузки энергосистемы

В этих условиях актуальным становится установление связи режимных факторов и наработки с повреждаемостью высокотемпературных элементов и ресурсом корпуса ЦВД (цилиндра высокого давления) турбины.

**Корреляционно-регрессионный анализ связи режимных факторов и наработки с повреждаемостью высокотемпературных элементов энергоблоков К-200-130**

Установим тесноту корреляционной связи на примере статистических данных энергоблоков К-200-130-1,3 Луганской ТЭС [6] (таблицы 1, 2).

Для установления тесноты связи между поврежденностью высокотемпературных элементов от малоциклового усталости энергоблоков и числом пусков из различных тепловых состояний, а также наработки служат коэффициенты корреляции Пирсона [3],

Результаты расчетов дисперсий \$D\_x, D\_z\$ и \$D\_y\$, выборочных средних квадратичных отклонений \$\sigma\_x, \sigma\_z\$ и \$\sigma\_y\$, выборочных ковариаций и, а также коэффициентов корреляции Пирсона и представлены в виде таблицы 3.

**Таблица 1**

Распределение количества пусков по типам из различных тепловых состояний и наработки для энергоблоков № 11,13-15 ЛТЭС

№ наблюдения	№ блока	$x_{НСi}$ – число пусков из неостывшего состояния	$x_{ХСi}$ – число пусков из холодного состояния	$z_{ni}$ – наработка, ч
1	11	263	292	280387
2	13	250	279	246901
3	14	180	259	238329
4	15	170	238	246395
$\Sigma$		863	1068	1012012
$\overline{x_{НСi}}, \overline{x_{ХСi}}, \overline{z_{ni}}$		$\overline{x_{НСi}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{НСi} = 215,8$	$\overline{x_{ХСi}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ХСi} = 267$	$\overline{z_{ni}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{ni} = 253003$

**Таблица 2**

Поврежденность высокотемпературных элементов от малоциклового усталости, определенная на основании выборки металла для энергоблоков № 11,13-15 ЛТЭС

№ наблюдения	№ блока	Поврежденность РСД, %	Поврежденность ЦВД, %	Поврежденность ЦСД, %
1	11	81	86,85	71,52
2	13	21,27	41,34	35,61
3	14	47,83	34,92	50,17
4	15	56	42,25	52,54
$\Sigma$		206,1	205,36	209,84
$\overline{u_{РСДi}}, \overline{u_{ЦВДi}}, \overline{u_{ЦСДi}}$		$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{РСДi} = 51,53$	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{ЦВДi} = 51,34$	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{ЦСДi} = 52,46$

где  $u_{РСДi}$  - поврежденность РСД (ротора среднего давления);  $u_{ЦВДi}$  - поврежденность ЦВД (цилиндра высокого давления);  $u_{ЦСДi}$  - поврежденность ЦСД (цилиндра среднего давления).

Таблица 3

Показатели корреляции поврежденности высокотемпературных элементов от малоциклового усталости для энергоблоков № 11, 13-15 ЛТЭС и числа пусков из различных тепловых состояний и наработки энергоблоков

Показатели корреляции	У <sub>РСД</sub> – поврежденность РСД			У <sub>ЦВД</sub> – поврежденность ЦВД			У <sub>ЦСД</sub> – поврежденность ЦСД		
	x <sub>НСi</sub>	x <sub>ХСi</sub>	z <sub>ни</sub>	x <sub>НСi</sub>	x <sub>ХСi</sub>	z <sub>ни</sub>	x <sub>НСi</sub>	x <sub>ХСi</sub>	z <sub>ни</sub>
D <sub>x</sub> , D <sub>z</sub>	1694,2	418,5	261527450	1694,2	418,5	261527450	1694,2	418,5	261527450
σ <sub>x</sub> , σ <sub>z</sub>	41,2	20,5	16171,8	41,2	20,5	16171,8	41,2	20,5	16171,8
D <sub>y</sub>	454,5			428,3			163,1		
σ <sub>y</sub>	21,3			20,7			12,8		
k <sub>x</sub> , k <sub>z</sub>	70,96	68,4	254102,3	584,6	290,7	333609,9	100,4	72,6	164458,1
r <sub>x</sub> , r <sub>z</sub>	0,0809	0,1568	0,7371	0,6862	0,6866	0,9968	0,1910	0,2778	0,7963
Качество связи	Слабая	Слабая	Высокая	Заметная	Заметная	Весьма высокая	Слабая	Слабая	Высокая

В таблице 3 дана качественная оценка связи между факторными показателями и результирующими переменными с использованием шкалы Чеддока [6].

Анализ таблицы 3 показывает, что во всех случаях связь прямая, так как  $r > 0$ . Между наработкой энергоблоков и поврежденностью от малоциклового усталости связь высокая для всех высокотемпературных элементов. Между числом пусков из различных тепловых состояний энергоблоков и поврежденностью от малоциклового усталости она заметна для ЦВД. В остальных случаях связь слабая.

#### Математическая модель зависимости поврежденности от малоциклового усталости

Перед построением моделей необходимо проверить факторные показатели на коллинеарность, чтобы исключить из моделей дублирующие факторы. Две переменных явно коллинеарны, если коэффициент интеркорреляции больше 0,7 [6].

Рассчитаем коэффициенты интеркорреляции между факторными показателями по формулам  $r_{x,y} = \frac{k_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y}$ ,  $r_{x,z} = \frac{k_{z,y}}{\sigma_z \sigma_y}$  и сведем их в таблицу 4.

Анализ таблицы 4 показывает, что коллинеарность факторов x<sub>НСi</sub> и x<sub>ХСi</sub>, x<sub>НСi</sub> и z<sub>ни</sub>, x<sub>ХСi</sub> и z<sub>ни</sub> сильная, следовательно, мы не можем объединять их в единые модели.

Проведем регрессионный анализ для этого примера и получим следующие однофакторные модели [3].

1. Расчетные значения поврежденности от малоциклового усталости РСД отдельных энергоблоков, зависящие от наработки этих энергоблоков:

$$\widehat{y_{z_{ни}}^{РСД}} = -193,8879 + 0,00097 \cdot z_{ни}.$$

2. Расчетные значения поврежденности от малоциклового усталости ЦВД, зависящие от наработки энергоблоков:

$$\widehat{y_{x_{НСi}}^{ЦВД}} = -22,8349 + 0,3438 \cdot x_{НСi}.$$

3. Расчетные значения поврежденности от малоциклового усталости ЦСД отдельных от наработки энергоблоков:

$$\widehat{y_{x_{ХСi}}^{ЦСД}} = -132,4094 + 0,6882 \cdot x_{ХСi}.$$

4. Расчетные значения поврежденности от малоциклового усталости ЦВД отдельных энергоблоков, зависящие от числа пусков этих энергоблоков из неостывшего состояния

$$\widehat{y_{z_{ни}}^{ЦВД}} = -277,564 + 0,0013 \cdot z_{ни}.$$

Таблица 4

Проверка факторов на коллинеарность

	x <sub>НСi</sub> и x <sub>ХСi</sub>	x <sub>НСi</sub> и z <sub>ни</sub>	x <sub>ХСi</sub> и z <sub>ни</sub>
k <sub>x<sub>НСi</sub>, x<sub>ХСi</sub></sub> , k <sub>x<sub>НСi</sub>, z<sub>ни</sub></sub> , k <sub>x<sub>ХСi</sub>, z<sub>ни</sub></sub>	801,3	477953	230100
r <sub>x<sub>НСi</sub>, x<sub>ХСi</sub></sub> , r <sub>x<sub>НСi</sub>, z<sub>ни</sub></sub> , r <sub>x<sub>ХСi</sub>, z<sub>ни</sub></sub>	0,9515	0,7180	0,6954

5. Расчетные значения поврежденности от малоциклового усталости ЦВД отдельных энергоблоков, зависящие от числа пусков этих энергоблоков из холодного состояния

$$\widehat{y}_{z_{ни}}^{ЦВД} = -99,3418 + 0,0006 \cdot z_{ни}.$$

Оценим качество составленных моделей, определив для них среднюю ошибку аппроксимации, которая не должна превышать 10-15 %:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \widehat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100 \% \quad (1)$$

Результаты расчета поместим в таблицу 5.

Вывод: так как  $F_{\phi} > F_{кр}$ , (где  $F_{кр}(0,05; 1; 2) = 18,51$  [5]) для четвертой модели, то она может быть использована для прогнозирования.

Используя четвертую модель, была рассчитана наработка ЦВД, при которой он повреждается на 100% - 290433,8 ч.

На рис. 2 представлены графики зависимости поврежденности ЦВД от малоциклового усталости от наработки энергоблока, построенные по данным выборки металла и расчета по уравнению регрессии. Анализ графиков показывает, что они мало отличаются друг от друга.

**Таблица 5**

Оценка уровня надежности однофакторных регрессионных моделей для поврежденности высокотемпературных элементов, %

$\overline{A}_{z_{ни}, УРСД}$	$\overline{A}_{x_{НСГ}, УЦВД}$	$\overline{A}_{x_{ХСГ}, УЦВД}$	$\overline{A}_{z_{ни}, УЦВД}$	$\overline{A}_{z_{ни}, УЦСД}$
39,9	25,6	30,6	3,5	15,3

**Таблица 6**

Фактический критерий Фишера

$F_{z_{ни}, УРСД}$	$F_{x_{НСГ}, УЦВД}$	$F_{x_{ХСГ}, УЦВД}$	$F_{z_{ни}, УЦВД}$	$F_{z_{ни}, УЦСД}$
2,4	1,8	1,8	305,2	3,1

Анализ данных таблицы 5 показывает, что только четвертая модель имеет высокий уровень надежности, так как средняя ошибка аппроксимации меньше 15 %.

Проверка составленных моделей на адекватность по критерию Фишера дала тот же результат (табл. 6).

**Проверка влияния различных режимов работы турбины К-200-130-3 на ресурс ЦВД**

Исходные данные представлены в таблице 7 [6]. Под предельным временем роста трещины подразумевается время, при котором окружающие трещины дорастают до

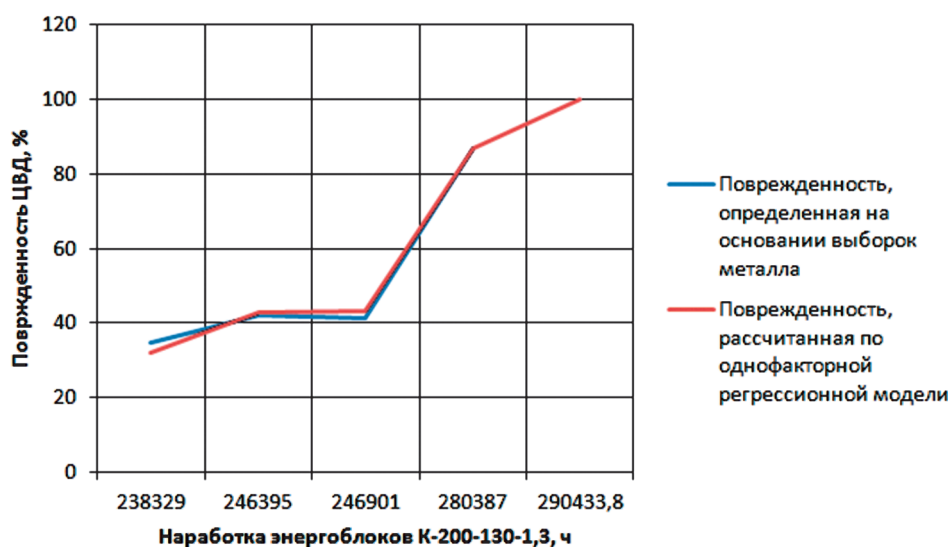


Рис. 2. Зависимость поврежденности ЦВД от малоциклового усталости от наработки энергоблоков К-200-130-1,3

Таблица 7

Ресурс ЦВД на стадии роста трещины стенки корпуса при различных режимах работы турбины К-200-130-3

№ наблюдения	Число пусков из горячего состояния	Число пусков из неостывшего состояния	Время предельного роста трещины
1	300	-	27,5
2	250	50	11
3	45	20	34
4	-	50	32
5	-	20	41,5
$\Sigma$	595	140	146

относительной глубины  $l/\delta=0,7$ , где  $l$  – глубина трещины,  $\delta$  – толщина стенки корпуса ЦВД.

Построим двухфакторную регрессионную модель для этого примера.

Расчетное значение предельного времени роста трещины, зависящие от числа пусков этих энергоблоков из горячего и неостывшего состояний.

$$\widehat{y_{x_{ГС}, x_{НС}}} = 47,56 - 0,0716 \cdot x_{ГС} - 0,3517 \cdot x_{НС}$$

Средняя ошибка аппроксимации данной модели равна  $A_{x_{ГС}, x_{НС}} = 6,7\%$ .

Модель имеет высокий уровень надежности и пригодна для составления прогнозов.

Используя полученное уравнение регрессии, строим плоскость регрессии (рис.3), показывающую изменение ресурса

корпуса ЦВД при изменении числа пусков из горячего и неостывшего состояния.

### Выводы

1. Проведены исследования с использованием корреляционно-регрессионного анализа влияния режимных факторов (числа пусков из различных тепловых состояний), а также наработки на показатели надежности (поврежденность высокотемпературных элементов и ресурс корпусов ЦВД).

2. Проверка по критерию Стьюдента показала, что наиболее тесная связь существует между наработкой энергоблока и поврежденностью ЦВД, а также между числом пусков из горячего и неостывшего состояния и ресурсом ЦВД.

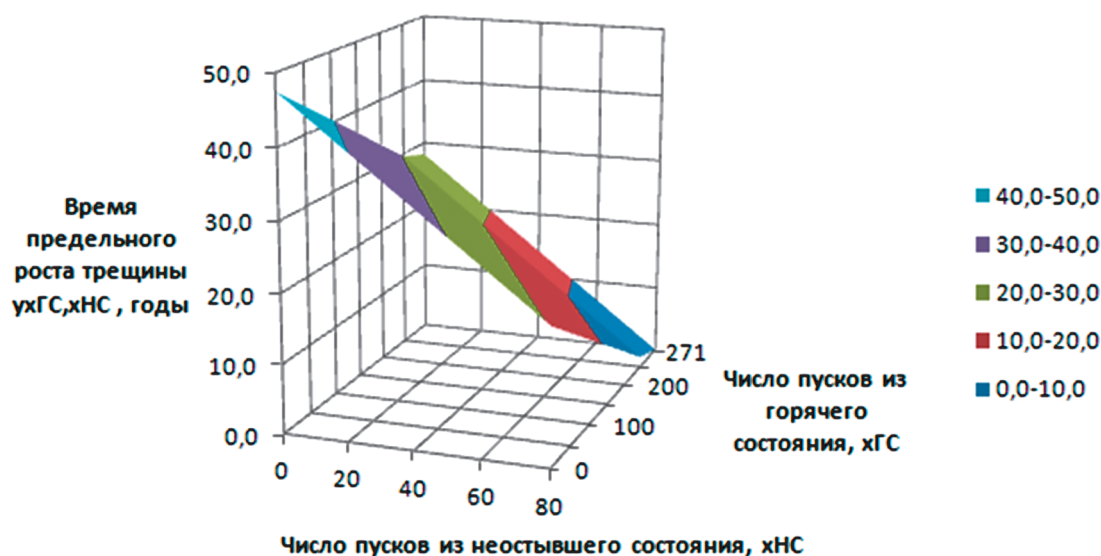


Рис.3. Плоскость уравнения регрессии времени предельного роста трещины от числа пусков из горячего и неостывшего состояния

3. Расчет средней ошибки аппроксимации и проверка по критерию Фишера показали надежность и адекватность составленных регрессионных моделей, а также их пригодность для составления прогнозов показателей надежности энергоблоков ТЭС.

**Список литературы**

1. Баклушин Р.П. Эксплуатация АЭС. Ч. I. Работа АЭС в энергосистемах. Ч. II. Обращение с радиоактивными отходами: Уч. пос.. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 304 с.  
 2. [http://library.mephi.ru/Data-IRBIS/book-mephi/Baklushin\\_Ekspluatatsiya\\_AES\\_2011.pdf](http://library.mephi.ru/Data-IRBIS/book-mephi/Baklushin_Ekspluatatsiya_AES_2011.pdf)  
 3. Берлянд В.И., Глядя А.А., Балина В.С., Консон В.Д., Кабелевский М.Г., Столярова Л.И. Оценка полного и меж-

ремонтного ресурсов модернизированных корпусов ЦВД турбин К-200-130-3 ЛМЗ по критериям малоциклового усталости и трещиностойкости // Теплоэнергетика. 1991. № 8. С. 54—60.

4. Елисеева И.И. Эконометрика. М.: Финансы и статистика, 2001

5. Оценка эффективности энергоблоков АЭС при покрытии переменной части графика электрических нагрузок / И. А. Ростунцова, Н. Ю. Шевченко // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2015.- № 9. - Часть 3. - С. 474-479.

6. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. М.: Энергия, 1976. 448 с.

7. Черноусенко О.Ю. Остаточный ресурс высокотемпературных элементов паровой турбины К-200-130 ЛМЗ // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. 2009. № 3. С. 82—85.