

УДК 621.311

**ФУНКЦИЯ ОБОБЩЕНИЙ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ  
В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ**  
**THE FUNCTION OF DESIRABILITY GENERALIZATIONS  
IN THERMAL POWER ENGINEERING**

П. А. Болбас, А. Д. Яковенко

Научный руководитель – Н. Б. Карницкий, д. т. н., профессор  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь

P. Bolbas, A. Yakovenko

Supervisor – N. Karnitsky, Doctor of technical sciences, Professor  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** в исследовании решается проблема оптимизации надежности и экономичности, в частности, осуществляется выбор рационального соотношения и взаимовлияния между надежностью и экономичностью процесса производства электроэнергии и теплоты на ТЭС.*

***Abstract:** the study solves the problem of optimizing reliability and efficiency, in particular, the choice of a rational relationship and mutual influence between the reliability and efficiency of the process of generating electricity and heat at thermal power plants is carried out.*

***Ключевые слова:** надежность, экономичность, электроэнергия, теплота.*

***Keywords:** reliability, efficiency, electricity, heat.*

### **Введение**

В основе расчетов положена функция полезности [1], позволяющая оптимизировать показатели надежности и экономичности электростанции.

### **Основная часть**

При безотказной работе оборудования ТЭС показатель надежности – коэффициент готовности стремится к 1,0, а показатель экономичности – удельный расход топлива, должен стремиться к минимально возможной величине. Соответственно, это будет желаемый уровень надежности в безразмерных единицах  $d_n$  и  $d_o$  (табл. 1).

Таблица 1 – Базовые отметки шкалы желательности [2]

Количественные отметки на шкале желательности	Желательность значения отклика
0,80–1,00	Очень хорошо
0,63–0,80	Хорошо
0,37–0,63	Удовлетворительно
0,20–0,37	Плохо
0,00–0,20	Очень плохо

Выбор шкалы числовых отметок объясняется авторами [2] удобством вычислений, поскольку:

$$D = 0,63 \approx 1 - 1/e; d = 0,37 \approx 1/e. \quad (1)$$

Так, чтобы обеспечить системную надежность условной энергосистемы, состоящей из четырех энергоблоков с коэффициентом готовности 0,9 каждый, получим с учетом [2]:

$$K_{\text{гот.эн/с}} = 1 - (1 - K_{\text{гот}}^I)(1 - K_{\text{гот}}^{II})(1 - K_{\text{гот}}^{III})(1 - K_{\text{гот}}^{VI}) = 0,9999, \quad (2)$$

что соответствует максимальному значению системной надежности энергосистемы.

В исследованиях на уровне макропроектирования в общем виде:

$$d_{\text{н}} = \exp[-\exp(-K_{\text{гот}})] ; \quad (3)$$

$$d_{\text{н}} = \exp[-\exp(-b_{\text{э}} \text{ или } b_{\text{э}}^{\text{ТЭЦ}})]. \quad (4)$$

Тогда обобщенная функция желательности (синтез «надежность-экономичность») определится как [3]:

$$D_{\text{н+э}} = \sqrt{d_{\text{н}} \cdot d_{\text{э}}}. \quad (5)$$

При выполнении исследований при микропроектировании использовались формулы (1–3), для получения обобщенной функции желательности при ее стремлении к единице получается наиболее оптимальный вариант выбора оборудования электростанции, что коррелируется с работой [4].

О высокой достоверности результатов автора свидетельствуют исследования уровня готовности энергоблоков К-300-240, результаты которых приведены в [5]. В качестве математического аппарата предлагается использовать структурно-функциональный метод (СФМ) формализации вероятностных процессов на ТЭС, технологической интерпретацией которого являются структурные модели на основе графа Коутса. В результате оценки функциональной надежности энергоблока 300 МВт [5] получены следующие выражения для расчета готовности энергоблока (ЭБ):

при пуске ЭБ:

$$K_{\text{ЭБ}}^{\text{П}} = 0,9042 - (e^{\varphi_{\text{п}}} - 1); \quad (6)$$

при останове ЭБ:

$$K_{\text{ЭБ}}^{\text{ОС}} = 0,9066 - (e^{\varphi_{\text{ос}}} - 1); \quad (7)$$

при регулировании нагрузки:

$$K_{\text{ЭБ}}^{\text{РН}} = 0,9091 - (e^{\varphi_{\text{рн}}} - 1). \quad (8)$$

В выражениях (4–6)  $\varphi_{п}$ ,  $\varphi_{ос}$ ,  $\varphi_{рн}$  – численные значения вероятностей стохастических факторов: пуска, останова и регулирования нагрузки энергоблока, а стационарный коэффициент готовности принят  $K_{ЭБ}^{СТ} = 0,9091$ . Видно (табл. 2) что уровень коэффициента готовности энергоблоков К-300, определенный авторами, лежащий в пределах от 0,9051 до 0,9178, близок к вероятностному  $K_{гот} = 0,9091$ , рассчитанному в [5].

Используя приведенную методику и данные табл., найдем обобщенную функцию желательности  $D_{н+э}$ , (синтез «надежность – экономичность») работы энергоблоков К-300-240 (моноблок), как один из вариантов решения оптимизационной задачи, являющейся одной из целей наших исследований, т. е.  $D_{н+э} = f(d_n, d_э)$ .

Таблица 2 – Расчетная таблица функции желательности [Источник: собственная разработка авторов]

Количественная оценка желательности	Оценка результатов по шкале желательности	Коэффициент готовности $K_{гот}$ , определяющий уровень $d_n$	Удельный расход условного топлива $b$ , гу. т./кВт·ч, определяющий уровень $d$	Примечания
0,80–1,00	очень хорошо	1,000	318	Устойчивая работа энергоблока на номинальной нагрузке
0,37–0,20	плохо	0,976	357,6	Пуск блока из холодного состояния с набором номинальной нагрузки $\Delta B_{п}^* = 154,6$ ту. т. $\tau_{п}^* = 13$ ча-сов

\* – расход топлива на пуск блока  $\Delta B_{п}$ , и длительность пуска  $\tau_{п}$ , взяты по ОДУ концерна «Белэнерго».

В общем виде обобщенная функция желательности  $D_{н+э} = \sqrt{(d_n \cdot d_э)}$ . Для установления частных функций желательности необходимо установить преобразование опытных данных  $u$  в безразмерную равномерную шкалу  $y'$ , т. е.:

$$y' = b_0 + b_1 u, \tag{9}$$

входящую в формулу для частной функции желательности  $d$ :

$$d = [-(-y')]. \tag{10}$$

Составим таблицу для определения коэффициентов  $b_0$  и  $b_1$  (табл. 3).

Таблица 3 – Расчетная таблица коэффициентов для энергоблока К-300-240 [Источник: собственная разработка авторов]

	Коэффициент готовности $K_{\text{гот}}$		Удельный расход условного топлива $b_3$ гу. т./кВт·ч	
	Показатели работы	0,9999	0,9760	318
Числовые отметки на шкале желательности	0,999	0,20	0,999	0,2

Подставив значение в уравнение (11), получим:

$$0,999 = \exp[-\exp(-y')] \text{ и } 0,20 = \exp[-\exp(-y')]. \quad (11)$$

После преобразований имеем:

$$d_n = \exp[-\exp(-260,7 + 276,6K_{\text{гот}})]; \quad (12)$$

$$d_3 = \exp[-\exp(-66,048 + 0,186b_3)]. \quad (13)$$

В итоге обобщенная функция желательности будет иметь вид:

$$D_{n+3} = \sqrt{d_n \cdot d_3} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} [-\exp(-260,7 + 276,6K_{\text{гот}})] + \right. \\ \left. + [-\exp(-66,048 + 0,186b_3)] \right\} \quad (14)$$

Из табл. 3 видно, что коэффициент готовности блока более весом, нежели удельный расход топлива.

Аналогичный подход применен для энергоблока Т-250-240 и получена обобщенная функция желательности, при  $\Delta b_n$ , 154 гу. т.,  $\tau_n = 14,1$  часа и исходных данных, предложенных в табл. 4.

Таблица 4 – Расчетная таблица коэффициентов для энергоблока Т-250-240 [Источник: собственная разработка автора]

	Коэффициент готовности $K_{\text{гот}}$		Удельный расход условного топлива $b_3$ гу. т./кВт·ч	
	Показатели работы	0,9111	0,8004	196,9
Числовые отметки на шкале желательности	0,999	0,20	0,999	0,2

В результате обработки данных имеем:

$$d_n = \exp[-\exp(-53,8 + 66,63K_{\text{гот}})]; \quad (15)$$

$$d_3 = \exp[-\exp(-38,09 + 0,213b_3^{\text{ТЭЦ}})]; \quad (16)$$

$$D_{n+3} = \sqrt{d_n \cdot d_3} = \exp \left\{ -\frac{1}{2} [-\exp(-53,8 + 66,63K_{\text{гот}})] + \right. \\ \left. + [-\exp(-38,09 + 0,213b_3^{\text{ТЭЦ}})] \right\}. \quad (17)$$

Как и в предыдущем примере, первое место по значимости принадлежит надежности посредством  $K_{\text{гот}}$  второе – экономичности с использованием удельного расхода топлива  $b_3^{\text{ТЭЦ}}$ .

На рис. 1 приведены данные о коэффициенте готовности энергоблоков Т-250/300-240 Минской ТЭЦ-4.

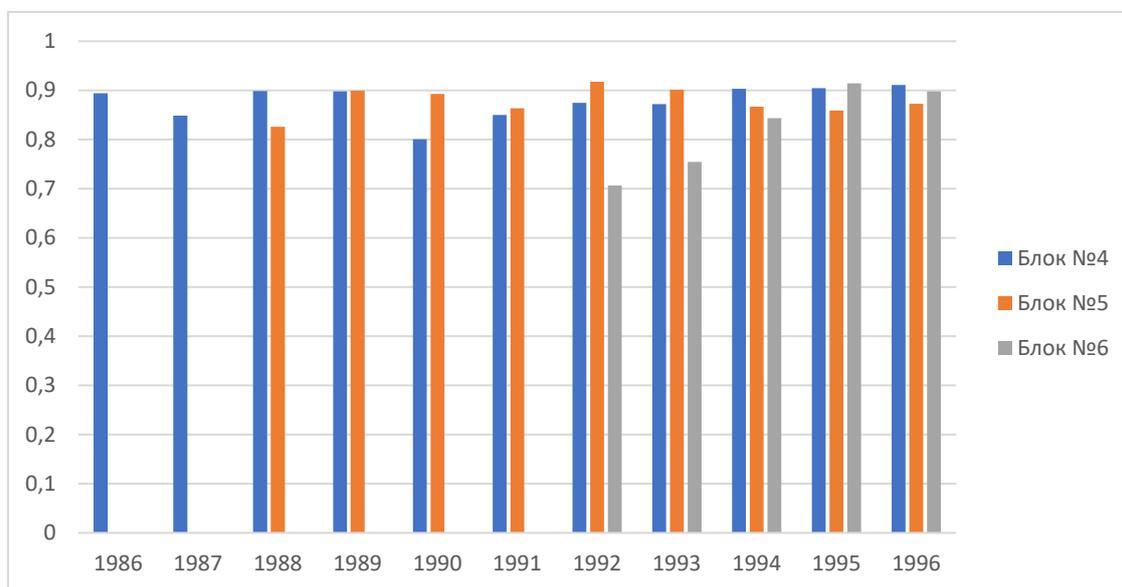


Рисунок 1 – Расчетные коэффициенты готовности  $K_{\text{гот}}$  энергоблока Т-250/300-240 Минской ТЭЦ-4 [Источник: собственная разработка авторов]

Видно увеличение  $K_{\text{гот}}$  по мере освоения блоков (для блока № 4 – это 5 лет, блока № 5 – 4 года, блока № 6–3 года), что вполне закономерно. Анализ работы энергоблоков К-160-130 Березовской ГРЭС в период 1992–1996 гг. показывает, что уровень  $K_{\text{гот}} = 0,90$  установился на блоках № 1–4 и несколько выше на блоках № 5, 6, введенных позже (рис. 2).

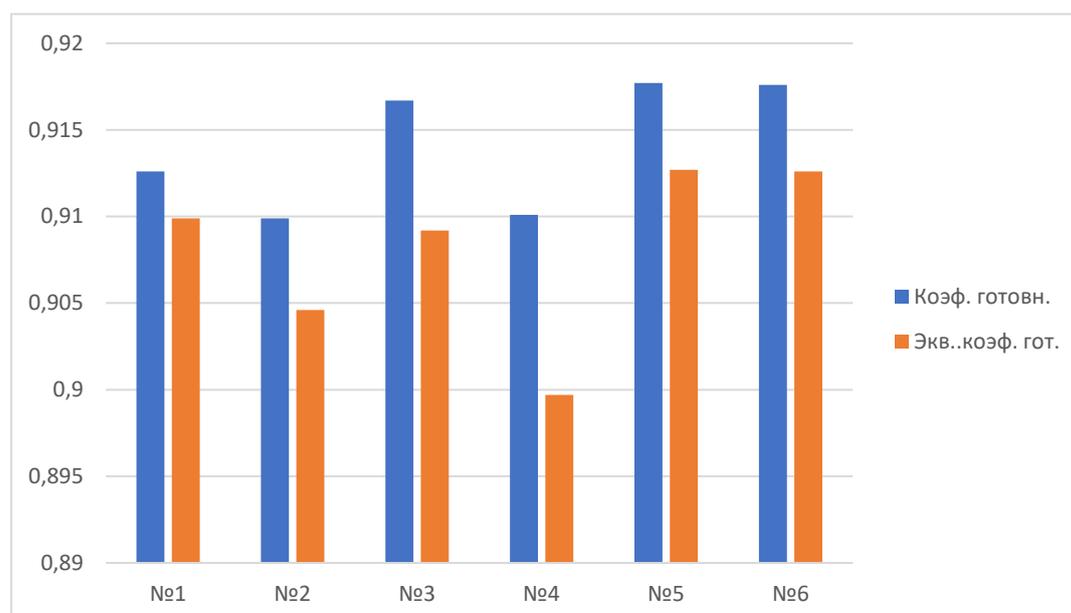


Рисунок 2 – Средние значения коэффициентов готовности  $K_{\text{гот}}$  и эквивалентной готовности  $K_{\text{гот}}^{\text{э}}$  Лукомльской ГРЭС за период 1992–1996 гг. [Источник: собственная разработка авторов]

Для блоков № 5, 6 характерна и более высокая наработка на отказ по турбинам (12348 и 16877 часов против 4697, 4401, 8770, 9656 часов турбин энергоблоков № 1–4, соответственно). Для котлов такая закономерность отсутствует, что можно объяснить дублированием по пару при сниженных нагрузках (котлы ПК-38 – двухкорпусные).

### Заключение

Видно, что наработка на отказ колеблется в достаточно широком диапазоне: от 1903 до 12390 часов. Отказы, связанные с нарушениями в экранных и пароперегревательных поверхностях нагрева, характерны для котлов серии ПК-38 (19 отказов за анализируемый период) и ТГМП-114,314, 324 (17 отказов) на Лукомльской ГРЭС.

Ущерб, нанесенный экономике отрасли в результате отказов и аварий основного теплоэнергетического оборудования ТЭС, оценивается достаточно сложно. Согласно [6] показательным параметром ненадежности работы котла является ущерб, вызываемый отказами:

$$У = ВД \cdot \frac{t \cdot n}{n_n}, \quad (18)$$

где В – средняя себестоимость пара, руб/ГДж;  
Д – фактическая паропроизводительность, ГДж/ч;  
t – суммарное время простоев, ч;  
n – число часов работы за год;  
n<sub>n</sub> – число часов наблюдений.

### Литература

1. The Desirability Function / E. C. Harrington // *Industrially Control.* – 1965. – № 10. – Р. 494–498.
2. Оптимизация эксперимента в химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: Высш. школа, 1978. – 319 с.
3. Планирование эксперимента в химической технологии / Л. П. Рузинов, Р. И. Слободчикова. – М.: Химия, 1980. – 280 с.
4. Области использования и пределы видимости критерия при формировании структуры и выборе параметров ЭЭС / Г. Ф. Ковалев, Л. М. Лебедева. – Иркутск, 1999. – 69 с.
5. Трубицин, В. И. Надежность функционирования технологических и химических систем на электростанциях / В. И. Трубицин // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Сб. ст.* – СПб.: ПЭИПК, 1993. – 46 с.
6. Елизаров, П. П. Эксплуатация котельных установок высокого давления на электростанциях / П. П. Елизаров. – Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 400 с.