

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ СИНТЕЗА НАДЕЖНОСТИ С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Докт. техн. наук, доц. КАРНИЦКИЙ Н. Б.

Белорусская государственная политехническая академия

Высокоэффективное энергопроизводство невозможно без решения компромиссных задач, связанных с повышением надежности и экономичности основного оборудования тепловых электростанций, в совокупности представляющих сложную научно-техническую проблему. Надежность ТЭС формируется на стадиях исследования и проектирования, реализуется при изготовлении оборудования на предприятиях энергомашиностроения и должна поддерживаться на должном уровне в процессе эксплуатации.

Одной из задач синтеза надежности является выделение рассматриваемой системы и определение параметров, характеризующих ее внешние связи.

Задачу синтеза надежности и экономичности можно решить с использованием предложенной в [1] Харрингтоном обобщенной функции полезности D . Построение шкалы полезности, устанавливающей соотношение между значением отклика y_i и соответствующим ему значением частной функции полезности d_i , является в определенной степени субъективным, отражающим требования исследователя к отдельным откликам (экспертная оценка). При решении проблемы оптимизации надежности и экономичности, в частности, осуществляется выбор рационального соотношения и взаимовлияния между надежностью и экономичностью процесса производства электроэнергии и теплоты на ТЭС. Для поддержания на требуемом уровне надежности теплоэнергетического оборудования требуются значительные инвестиции, которые приводят к удорожанию производимой энергии. Максимальная готовность оборудования характеризуется $K_{\text{гот}} = 1,0$ в случае безотказного функционирования всех структурных частей энергоблока или ТЭС. Для оценки эффективности работы последних в условиях переходной экономики нашей страны и стран СНГ предлагается воспользоваться таким показателем, как удельный расход условного топлива на производство электро- и теплоэнергии, соответствующей желаемому уровню экономичности d_3 и надежности d_n . Такой подход позволяет избежать значительных колебаний, характерных для стоимости топлива. Таким образом, удельный расход топлива будет характеризовать техническую эффективность теплоэнергетического оборудования, тесно связанную с его надежностью. Воспользуемся приведенными в [2] базовыми отметками шкалы желательности (табл. 1).

Таблица 1

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:

$$d = 0,63 \approx 1 - \frac{1}{e}; \quad d = 0,37 \approx \frac{1}{e}. \quad (1)$$

В данном случае частная функция полезности по надежности d_n характеризуется коэффициентом готовности, численные значения которого в верхней части шкалы совпадают с предлагаемыми в [2] количественными отметками. Действительно, если $K_{\text{гот}} \leq 1,0$, то значение d_n адекватно этим численным пределам. При $K_{\text{гот}} = 1,0$ частная функция полезности d_n также будет равна единице. При снижении $K_{\text{гот}}$ соответственно уменьшается и значение d_n .

Принятое значение $K_{\text{гот}}$ может быть обеспечено и дублированием генерирующих мощностей. Например, при $K_{\text{гот}} = 0,8$ двух энергоблоков можно обеспечить системную надежность

$$H_{\text{гот}} = 1 - (1 - K_{\text{гот}}^I) (1 - K_{\text{гот}}^{II}) = 1 - (1 - 0,8)(1 - 0,8) = 0,96, \quad (2)$$

которая на 0,16 выше единичной готовности энергоблока. При наличии четырех таких параллельно включенных энергоблоков обеспечивается системная надежность $H = 0,9984$ при нормативной надежности некоторых энергосистем $H_{\text{гот}} = 0,9960$. Данная информация приведена в качестве иллюстрации объективности подхода при формировании шкалы желательности и возможности ее дальнейшего использования. Необходимо отметить, что значение отклика должно строго находиться между пределами спецификации, но на определенном расстоянии от них, чтобы противостоять присущим производственным процессам случайным колебаниям [2].

Наиболее часто обобщенный критерий оптимальности представляется в аддитивной или мультипликативной форме [3]. В наших исследованиях выбрана последняя форма, процедура построения частной функции полезности в соответствии с которой приводится ниже. Вначале задаем ограничения на значения параметров оптимизации d_n и d_s . Верхняя граница должна соответствовать наилучшему желаемому значению параметра оптимизации, т. е. $d_n \rightarrow 1,0$ через $K_{\text{гот}} \rightarrow 1,0$ и $d_s \rightarrow 1,0$ посредством b_s или $b_s^{\text{ТЭЦ}}$, стремящихся к своим технически возможным минимальным значениям. Нижняя граница соответствует наихудшему из значений, полученных в результате обработки расчетных и экспериментальных данных, т. е. выработка электро- и теплоэнергии производится в этом случае на менее эффективном оборудовании (b_s и $b_s^{\text{ТЭЦ}}$ стремятся к максимуму), поскольку надежность высокоэффективного теплоэнергетического оборудования в данной ситуации снижена; $K_{\text{гот}} \rightarrow 0$ (авария, внезапный отказ и т. п.). После выбора интервалов изменения всех параметров оптимизации осуществляется переход в безразмерную форму (y_i может быть задан как по равномерной, так и по неравномерной шкале)

$$g_i = a_0 + a_1 y_i \quad (3)$$

или

$$g_i = a_0 + a_1 y_i + a_2 y_i^2, \quad (4)$$

где g_i – значение параметра оптимизации по безразмерной шкале; a_i – коэффициенты.

Далее строится функция полезности [2, 3]. Переход от безразмерной шкалы к функции полезности осуществляют по формуле

$$d_i = \exp[-\exp(-g_i)]. \quad (5)$$

В исследованиях на уровне макропроектирования в общем виде:

$$d_n = \exp[-\exp(-K_{\text{гот}})]; \quad (6)$$

$$d_n = \exp[-\exp(-b_3 \text{ или } -b_3^{\text{ТЭЦ}})]. \quad (7)$$

Тогда обобщенная функция полезности «надежность–экономичность» определится как

$$D_{n+3} = \sqrt{d_n d_3}. \quad (8)$$

Обобщенная функция полезности обладает очень удобным свойством. Так, если хотя бы одна частная функция полезности $d_i = 0$, то и обобщенная функция желательности D также обратится в нуль. В то же время, если значение ее стремится к 1 (табл. 1), создается наилучшее сочетание для всех параметров оптимизации.

Используя описанную выше методику и данные табл. 2, найдем обобщенную функцию полезности D_{n+3} «надежность–экономичность» работы энергоблоков К-300-240 (моноблок) как один из вариантов решения оптимизационной задачи, т. е. $D_{n+3} = f(d_n, d_3)$.

Таблица 2

Количественная оценка на шкале желательности	Оценка результатов по шкале желательности	Коэффициент готовности $K_{\text{гот}}$, определяющий уровень d_n	Удельный расход условного топлива b_3 , г у.т./кВт·ч, определяющий уровень d_3	Примечание
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 $\Delta B_n = 154,6$ т у. т., $\tau_n = 13$ ч

Примечание. ΔB_n – расход условного топлива на пуск; τ_n – длительность пусковых операций.

Для установления частных функций полезности необходимо преобразовать опытные данные y в безразмерную равномерную шкалу y' , т. е.

$$y' = b_0 + b_1 y, \quad (9)$$

входящую в формулу для частной функции полезности d

$$d = \exp[-\exp(-y')]. \quad (10)$$

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

Таблица 3

Показатели работы	Коэффициент готовности $K_{\text{гот}}$		Удельный расход условного топлива b_3 , г у. т./ (кВт·ч)	
	Числовые отметки на шкале желательности d	0,999	0,20	0,999

После подстановки значения d в (10) и преобразований имеем:

$$d_n = \exp[-\exp(-260,7 + 276,6K_{\text{гот}})]; \quad (11)$$

$$d_3 = \exp[-\exp(66,048 - 0,186b_3)]. \quad (12)$$

В итоге обобщенная функция полезности будет иметь вид

$$D_{n+3} = \sqrt{d_n d_3} = \exp\left\{-\frac{1}{2}[\exp(-260,7 + 276,6K_{\text{гот}}) + \exp(66,048 - 0,186b_3)]\right\}. \quad (13)$$

Поскольку на пуск блока из холодного состояния необходимо 154,6 т у. т. ($\tau_{\text{п}} = 13$ ч), а после простоя $\tau \geq \tau_{\text{п}}$ удельный расход условного топлива не изменяется $b_3 = 357,6 \frac{\text{г у. т.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$, определяющей величиной, влияющей на D_{n+3} , будет $K_{\text{гот}}$, т. е. с ростом $\tau_{\text{п}}$ значение $K_{\text{гот}}$ будет падать и при достижении D_{n+3} значения ниже 0,37 можно утверждать о неудовлетворительном состоянии готовности энергоблока.

Аналогичный подход применен для энергоблока Т-250-240, и получена обобщенная функция полезности при $\Delta b_{\text{п}} = 154$ т у. т., $\tau_{\text{п}} = 14,1$ ч и исходных данных, приведенных в табл. 4.

Таблица 4

Показатели работы	Коэффициент готовности $K_{\text{гот}}$		Среднее значение удельного расхода топлива на ТЭЦ на отпуск электроэнергии $b_3^{\text{тэц}}$, г у. т./ (кВт·ч)	
	Числовые отметки на шкале желательности	0,999	0,20	0,999

В результате обработки данных имеем:

$$d_n = \exp[-\exp(-53,8 + 66,63K_{\text{гот}})]; \quad (14)$$

$$d_3 = \exp[-\exp(38,09 - 0,2131b_3^{\text{тэц}})]; \quad (15)$$

$$D_{n+3} = \exp\left\{-\frac{1}{2}[\exp(-53,8 + 66,63K_{\text{гот}}) + \exp(38,09 - 0,2131b_3^{\text{тэц}})]\right\}. \quad (16)$$

Как и в предыдущем примере, наиболее значимым в обобщенной функции полезности является надежность посредством $K_{\text{гот}}$.

ВЫВОД

На примере энергоблоков К-300-240 и Т-250/300-240 получены обобщенные функции полезности как синтез надежности и экономичности, причем в качестве анализируемого показателя надежности принят коэффициент готовности $K_{\text{гот}}$, а экономическая оценка производится посредством удельных расходов топлива, являющихся наиболее стабильными показателями в странах с переходной экономикой. Выявлено соотношение между надежностью и экономичностью в полученном критерии оптимальности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Harrington E. C. // *Industrially Quality Control*. – 1965. – № 10. – S. 494–498.
2. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. – М.: Высш. шк., 1978. – 319 с.
3. Рузинов Л. П., Слободчикова Р. И. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1980. – 280 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 30.01.2001