

УДК 621.165

Ефимов А.В., Гаркуша Т.А.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ЭНЕРГООБЛОКОВ ПО ПАРАМЕТРАМ СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

Себестоимости электрической и тепловой энергий, вырабатываемых тепловыми и атомными электростанциями, становятся все более заметными факторами конкурентной борьбы на рынке энерго- и теплоснабжения. В то же время, количество и стоимость этих видов энергии и приходящийся на их выработку удельный расход теплоты существенно зависят от надежности энергетических установок. Поэтому учет показателей надежности оборудования при выборе принципиальных и развернутых тепловых схем энергоблоков электростанций, как на этапах проектирования и модернизации, так и, в ряде случаев, на этапе эксплуатации, является актуальным, поскольку расширяет возможности обеспечения их эффективной и безопасной эксплуатации и конкурентоспособной стоимости вырабатываемых видов энергии.

Нелинейные математические модели функционального состояния паротурбинных энергоблоков, описывающие в неявном виде связь между основными технико-экономическими показателями эффективности работы (электрической мощностью N , тепловой мощностью Q , удельным расходом теплоты q) и значениями отклонений вектора теплогидравлических параметров ΔX , представляют собой систему математических отношений [1,2]:

$$\left. \begin{aligned} N &= \varphi(\Delta X) \\ Q &= F(\Delta X) \\ q &= f(\Delta X) \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Аналитический вид зависимостей φ , F и f сложен и потому, как правило, не устанавливается. Эти зависимости проявляются через входящие в математические отношения равенства, неравенства, логические условия, таблицы и т.п. Поэтому нелинейные математические модели (1) дают возможность получать только численные значения N_i , Q_i и q_i для i -го численного эксперимента из области допустимых значений ΔX , не определяя при этом явный вид зависимостей влияния изменений теплогидравлических параметров на эффективность функционирования тепловых схем энергоблоков.

Исходя из законов протекания технологических процессов в оборудовании тепловых схем энергоблоков, известно, что функции φ , F и f непрерывны в области допустимых значений вектора ΔX для фиксированных схем и имеют непрерывные частные производные по его компонентам, что допускает их линеаризацию. На основании ряда предыдущих исследований [1,2], а также результатов тепловых испытаний энергоблоков ТЭС и АЭС [3,4,5] установлено, что диаграммы рассеивания N , Q и q по отклонениям компонент вектора $\Delta X = (x_1 - x_{1,0}, x_2 - x_{2,0}, \dots, x_k - x_{k,0}, \dots, x_n - x_{n,0})$, где $X_0 = (x_{1,0}, x_{2,0}, \dots, x_{k,0}, \dots, x_{n,0})$ — номинальные значения теплогидравлических параметров, носят практически линейный характер в области диапазонов малых отклонений, характерных для эксплуатации на стационарных режимах. Указанные обстоятельства обусловили возможность получения линейных моделей функционального состояния паротурбинных энергоблоков при эксплуа-

тации на стационарных режимах в виде аналитических зависимостей между показателями эффективности работы N, Q и q и вектором ΔX :

$$\left. \begin{aligned} N &= N_0(1 + a_0) + N_0(a_1\Delta\bar{x}_1 + a_2\Delta\bar{x}_2 + \dots + a_k\Delta\bar{x}_k + \dots + a_n\Delta\bar{x}_n) \\ Q &= Q_0(1 + d_0) + Q_0(d_1\Delta\bar{x}_1 + d_2\Delta\bar{x}_2 + \dots + d_k\Delta\bar{x}_k + \dots + d_n\Delta\bar{x}_n) \\ q &= q_0(1 + b_0) + q_0(b_1\Delta\bar{x}_1 + b_2\Delta\bar{x}_2 + \dots + b_k\Delta\bar{x}_k + \dots + b_n\Delta\bar{x}_n) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где N_0, Q_0 и q_0 – номинальные показатели работы при стационарных режимах эксплуатации, $\Delta\bar{x}_k = (x_k - x_{k,0}) / x_{k,0}, k = \overline{1, n}$.

В работах [1,2] приведены линейные модели функционального состояния различных энергоблоков ТЭС и АЭС, полученные для стационарных режимов их эксплуатации в широком диапазоне нагрузок. Значения коэффициентов a_k, d_k, b_k для этих моделей определялись на основании статистической обработки методом наименьших квадратов данных многофакторных численных экспериментов, поставленных на нелинейных моделях вида (1). Анализ соответствующих этому методу статистик [6,7,8] подтвердил адекватность полученных линейных моделей данным численных экспериментов, а сравнение с данными тепловых испытаний энергоблоков – их достоверность.

На прогнозируемом интервале эксплуатации энергоблоков $\Delta t = t - t_0$ некоторые теплогидравлические параметры $x_k, k = \overline{1, r}, r \in n$ моделей (2) подвержены эволюции вследствие изменения функционального состояния части оборудования схем и представляют, таким образом, собой функции времени t , а другие параметры $x_k, k = \overline{(r+1), n}$ сохраняются постоянными и равными своим значениям в момент времени t_0 . Следовательно, на интервале прогнозирования выработки электрической и тепловой энергий линейные модели функционального состояния энергоблоков могут быть представлены следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} N(t) &= N_0(1 + a_0) + N_0\left(\sum_{k=1}^r a_k \frac{x_k(t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n a_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}}\right) \\ Q(t) &= Q_0(1 + d_0) + Q_0\left(\sum_{k=1}^r d_k \frac{x_k(t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n d_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}}\right) \\ q(t) &= q_0(1 + b_0) + q_0\left(\sum_{k=1}^r b_k \frac{x_k(t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n b_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где параметры $x_k(t), k = \overline{1, r}$ – непрерывные и монотонные функции времени t , характеризующие функциональное состояние и надежность соответствующего оборудования тепловых схем, которые можно рассматривать как полумарковские зависимости [9] с известными аппроксимациями их реализаций. Эти аппроксимации могут быть представлены разными видами. Для часто встречающихся линейного и экспоненциального видов [10] они записываются соответственно как

$$\left. \begin{aligned} x_k(t) &= c_k + \gamma_k t, k = \overline{1, r} \\ x_k(t) &= \alpha_k e^{\beta_k t}, k = \overline{1, r} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Для определения аппроксимаций, описывающих изменение функционального состояния и надежности оборудования предлагается следующий подход. Начиная с начала эксплуатации оборудования в момент времени $t_0 = 0$, с помощью контрольно-измерительных приборов АСУТП энергоблоков последовательно наблюдаются реализации функций $x_k(t), k = \overline{1, r}$ до конца прогнозируемого интервала эксплуатации t . По получаемым в процессе наблюдения в точках $t_i = \overline{t_0, t}; i = \overline{1, m}$ дискретным значениям реализаций $x_k(t_i), k = \overline{1, r}$, учитывая применение полумарковских моделей для описания их эволюций, строятся наилучшие экстраполяционные кривые $x_k(t), k = \overline{1, r}$, то есть находятся коэффициенты c_k, γ_k или α_k, β_k аппроксимационных зависимостей (4), причем каждые новые значения наблюдаемых реализаций уточняют кривые прогноза $x_k(t), k = \overline{1, r}$. Точка пересечения каждой функции $x_k(t), k = \overline{1, r}$ с заданной границей $g_k, k = \overline{1, r}$, определяющей ее предельное значение исходя из технико-экономических показателей энергоблока или его безопасности, интерпретируется как наработка оборудования, состояние и надежность которого характеризуется функцией $x_k(t), k = \overline{1, r}$, до отказа. Полученные таким образом аппроксимационные зависимости $x_k(t), k = \overline{1, r}$ для всего перечня эксплуатируемого энергетического оборудования составляют базу данных эволюций параметров состояния и надежности оборудования для конкретных типов энергоблоков и условий их эксплуатации. Эта база данных может быть использована на разных этапах жизненного цикла энергоблоков: в процессах проектирования, модернизации, эксплуатации.

В зависимости от видов аппроксимаций (4) линейные модели функционального состояния энергоблоков с учетом прогнозирования изменения на интервале $\Delta t = t - t_0$ теплогидравлических параметров тепловых схем, определяющих надежность оборудования, записываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} N(t) &= N_0(1 + a_0) + N_0 \left(\sum_{k=1}^r a_k \frac{(c_k + \gamma_k t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n a_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \\ Q(t) &= Q_0(1 + d_0) + Q_0 \left(\sum_{k=1}^r d_k \frac{(c_k + \gamma_k t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n d_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \\ q(t) &= q_0(1 + b_0) + q_0 \left(\sum_{k=1}^r b_k \frac{(c_k + \gamma_k t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n b_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

или

$$\left. \begin{aligned} N(t) &= N_0(1 + a_0) + N_0 \left(\sum_{k=1}^r a_k \frac{\alpha_k e^{\beta_k t} - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n a_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \\ Q(t) &= Q_0(1 + d_0) + Q_0 \left(\sum_{k=1}^r d_k \frac{\alpha_k e^{\beta_k t} - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n d_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \\ q(t) &= q_0(1 + b_0) + q_0 \left(\sum_{k=1}^r b_k \frac{\alpha_k e^{\beta_k t} - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n b_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В качестве показателя структурной надежности тепловых схем энергоблоков, состоящих из множества последовательных и параллельных соединений нерезервированных и резервированных элементов (оборудования) с различными кратностями отказов и восстановлений, выбирается вероятность их безотказной работы $R(t)$ [11,12] на стационарных эксплуатационных режимах.

Тогда количества вырабатываемых на интервале прогнозирования Δt электрической $E_э$ и тепловой E_T энергий и приходящийся на них удельный расход теплоты q , рассматриваемые в качестве критериев эффективности тепловых схем энергоблоков, могут быть представлены как

$$\left. \begin{aligned} E_э &= R(t) \int_{t_0}^t N(t) dt \\ E_T &= R(t) \int_{t_0}^t Q(t) dt \\ q &= (1 - R(t)) \int_{t_0}^t q(t) dt \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Заменяя в (7) подынтегральные выражения соответствующими зависимостями (5) или (6), получим математические модели, описывающие влияния параметров функционального состояния и надежности оборудования и структурной надежности тепловых схем энергоблоков на эффективность их работы:

$$\left. \begin{aligned} E_э &= R(t) \int_{t_0}^t \left(N_0(1 + a_0) + N_0 \left(\sum_{k=1}^r a_k \frac{(c_k + \gamma_k t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n a_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt, \\ E_T &= R(t) \int_{t_0}^t \left(Q_0(1 + d_0) + Q_0 \left(\sum_{k=1}^r d_k \frac{(c_k + \gamma_k t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n d_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt, \\ q &= (1 - R(t)) \int_{t_0}^t \left(q_0(1 + b_0) + q_0 \left(\sum_{k=1}^r b_k \frac{(c_k + \gamma_k t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n b_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ИЛИ

$$\left. \begin{aligned} E_э &= R(t) \int_{t_0}^t \left(N_0(1 + a_0) + N_0 \left(\sum_{k=1}^r a_k \frac{a_k e^{\beta_k t} - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n a_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt, \\ E_T &= R(t) \int_{t_0}^t \left(Q_0(1 + d_0) + Q_0 \left(\sum_{k=1}^r d_k \frac{a_k e^{\beta_k t} - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n d_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt, \\ q &= (1 - R(t)) \int_{t_0}^t \left(q_0(1 + b_0) + q_0 \left(\sum_{k=1}^r b_k \frac{\alpha_k e^{\beta_k t} - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n b_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Задачу синтеза оптимальной тепловой схемы энергоблока на основе рассматриваемых критериев и параметров состояния и надежности оборудования и схемы можно сформулировать в виде задачи выбора из возможных конфигураций $\Omega_i, i = \overline{1, L}$ такой схемы $\Omega_s, s \in i$, которая обеспечивает прогнозируемые максимумы производства электрической $E_{\text{э max}}(\Omega_s)$ и тепловой $E_{\text{т max}}(\Omega_s)$ энергий и минимум удельного расхода теплоты $q_{\text{min}}(\Omega_s)$ на заданном интервале эксплуатации. С математической точки зрения ее можно рассматривать как одну из задач непрерывного линейного программирования [13]:

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{э max}}(\Omega_s) &= \max_{\Omega_i} R_{\Omega_i}(t) \int_{t_0}^t \left(N_0(1 + a_0) + N_0 \left(\sum_{k=1}^r a_k \frac{(c_k + \gamma_k t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n a_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt, \\ E_{\text{т max}}(\Omega_s) &= \max_{\Omega_i} R_{\Omega_i}(t) \int_{t_0}^t \left(Q_0(1 + d_0) + Q_0 \left(\sum_{k=1}^r d_k \frac{(c_k + \gamma_k t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n d_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt, \\ q_{\text{min}}(\Omega_s) &= \min_{\Omega_i} (1 - R_{\Omega_i}(t)) \int_{t_0}^t \left(q_0(1 + b_0) + q_0 \left(\sum_{k=1}^r b_k \frac{(c_k + \gamma_k t) - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n b_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt \end{aligned} \right\} (10)$$

$(i = 1, 2, \dots, L)$

или

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{э max}}(\Omega_s) &= \max_{\Omega_i} R_{\Omega_i}(t) \int_{t_0}^t \left(N_0(1 + a_0) + N_0 \left(\sum_{k=1}^r a_k \frac{a_k e^{\beta_k t} - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n a_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt, \\ E_{\text{т max}}(\Omega_s) &= \max_{\Omega_i} R_{\Omega_i}(t) \int_{t_0}^t \left(Q_0(1 + d_0) + Q_0 \left(\sum_{k=1}^r d_k \frac{a_k e^{\beta_k t} - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n d_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt, \\ q_{\text{min}}(\Omega_s) &= \min_{\Omega_i} (1 - R_{\Omega_i}(t)) \int_{t_0}^t \left(q_0(1 + b_0) + q_0 \left(\sum_{k=1}^r b_k \frac{\alpha_k e^{\beta_k t} - x_{k,0}}{x_{k,0}} + \sum_{k=r+1}^n b_k \frac{x_k(t_0) - x_{k,0}}{x_{k,0}} \right) \right) dt \end{aligned} \right\} (11)$$

$(i = 1, 2, \dots, L)$

Предложенные постановка и математические методы решения задач оценки эффективности и оптимального синтеза тепловых схем энергоблоков электростанций на основе анализа параметров функционального состояния и надежности оборудования и схем могут быть использованы при разработке и создании их систем автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами во время эксплуатации.

Литература

1. Палагин А.А., Ефимов А.В. Имитационный эксперимент на математических моделях турбоустановок. – К.: Наук. думка, 1986. – 130 с.
2. Палагин А.А., Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок. – Киев: Наук. думка, 1991. – 192 с.
3. Тепловые испытания головных образцов двух турбин типа К-750-65/3000 ПОАТ ХТЗ блока 1500 МВт ст. № 1 Игналинской АЭС: Отчет о НИР Южтехэнерго, № ГР 12745. – Львов, 1987. – 136 с.

4. Тепловые испытания турбоустановки К-1000-60/1500-2 ПОАТ ХТЗ и энергоблока 1000 МВт ст. № 1 Запорожской АЭС: Отчет о НИР Южнэнерго, № ГР 12748. – Львов, 1987. – 140 с.
5. Типовая энергетическая характеристика турбоагрегата К-300-240 ХТГЗ второй модификации: Отчет Министерства энергетики СССР. – Москва, 1976. – 26 с.
6. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. – Л.: Судостроение, 1980. – 383 с.
7. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
8. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. – М.: Мир, 1981. – 516 с.
9. Севастьянов Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
10. Половко А.М. Основы теории надежности. – М.: Наука, 1964. – 448 с.
11. Острейковский В.А., Сальников Н.Л. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ. – М.: Энергоатмиздат, 1990. – 416 с.
12. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
13. Раскин Л.Г., Кириченко И.О. Континуальное линейное программирование. – Х.: Військ. ін-т ВВ МВС України, 2005. – 176 с.

УДК.621.165

Єфімов О.В., Гаркуша Т.А.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ СХЕМ ЕНЕРГОБЛОКІВ ПО ПАРАМЕТРАМ СТАНУ ТА НАДІЙНОСТІ УСТАТКУВАННЯ

Запропоновані постановка і математичні методи розв'язання задач оцінки ефективності та оптимального синтезу теплових схем енергоблоків електростанцій на основі аналізу параметрів функціонального стану та надійності устаткування і схем, які можуть бути використані при розробці і створенні їхніх систем автоматизованого проектування і управління технологічними процесами під час експлуатації.