

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В ПЕРЕМЕННОМ СУТОЧНОМ ГРАФИКЕ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГИИ

А.М. Загребаев

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет),
г. Москва*



Исследованы возможности по оптимизации работы реактора в переменном суточном графике нагрузки с учетом утилизации энергии. В качестве критерия оптимизации рассматривается расход топлива. Изучено влияние параметров реактора и коэффициента полезного действия утилизатора на характер оптимальных режимов. Оценен эффект оптимизации и определены условия целесообразности оптимизации.

Вопросы обеспечения переменных графиков нагрузок с помощью атомных электростанций обсуждались несколько лет назад [1–6]. В настоящее время эта тема вновь становится актуальной [10]. При этом АЭС с реакторами серийных типов (ВВЭР, РБМК) по ряду причин не в состоянии обеспечить переменный суточный график нагрузки в полном диапазоне без серьезного ущерба для экономических показателей и надежности энергоустановки. Допустимый диапазон суточных колебаний мощности и скорость набора нагрузки для этих реакторов значительно ниже, чем требуется по условиям работы энергосистем с разуплотненным графиком нагрузки.

В качестве одного из эффективных решений названной проблемы предполагается создание на базе АЭС энергокомплексов, включающих установки, способные воспринять и полезно использовать избыток энергии, вырабатываемой АЭС в период снижения ее потребления в энергосистеме [7–9]. В качестве устройств, использующих избыточную энергию, могут рассматриваться утилизаторы, обеспечивающие производство другого ценного продукта (водорода, синтетического или жидкого топлива) или энергоснабжение потребителей низкопотенциальным теплом. Не останавливаясь детально на конкретных схемах утилизации энергии, рассмотрим возможности оптимизации работы комплекса «реактор-утилизатор» с точки зрения эффективности использования ядерного топлива.

Физическая предпосылка оптимизации заключается в том, что с одной стороны, если переменный график работы энергосистемы полностью отрабатывается реактором, то это может привести к резервированию дополнительного запаса реактивности, а следовательно, и к увеличенному расходу топлива. С другой стороны, если реактор работает в базовом режиме, а переменный график обеспечивается работой

утилизатора, то можно ожидать, что при низкой эффективности утилизатора также будет иметь место увеличенный расход ядерного топлива. Таким образом, возникает задача об оптимальном режиме работы энергокомплекса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Имеется ядерный энергоблок номинальной тепловой мощностью W_H [МВт]. Известно, что по условиям работы энергосистемы потребуется эксплуатация этого энергоблока в переменном суточном графике нагрузки. При этом задаются следующие параметры графика нагрузки:

- время работы на пониженной мощности τ [сут];
- уровень пониженной мощности αW_H ($0 \leq \alpha \leq 1$).

Для повышения эффективности работы энергоблока предполагается возможность утилизации части энергии с коэффициентом полезного действия $\eta = Q_A/Q_B$, где Q_A – полезная энергия, отдаваемая утилизатором, Q_B – полная энергия, отпущенная на утилизацию. Каков должен быть режим работы ядерного реактора, чтобы расход топлива на единицу отпущенной потребителю энергии был минимален?

Рассмотрим следующую ситуацию. Пусть в момент времени $t = 0$ мощность реактора снижается до уровня ϵ , где $\alpha \leq \epsilon \leq 1$. Поскольку в систему требуется поставить энергию, соответствующую работе на более низком уровне мощности а W_H , то излишек энергии в количестве $Q = \tau W_H (\epsilon - \alpha)$ передается утилизатору (рис.1). из этой энергии потребителю будет отпущена часть, равная $Q_A = \eta \tau W_H (\epsilon - \alpha)$. Таким образом, реактор за одни сутки (один цикл) вырабатывает энергию в количестве:

$$Q_p = W_H(1-\tau) + W_H \epsilon \tau,$$

потребителю будет отпущена лишь часть энергии:

$$E_n = W_H \cdot (1-\tau) + \alpha \cdot W_H \cdot \tau + (\epsilon - \alpha) \cdot \eta \cdot \tau \cdot W_H.$$

Расход топлива при работе реактора в таком режиме – G . Эта величина определяется отношением полной энергии, произведенной реактором за сутки, к глубине выгорания топлива:

$$G = \frac{W_H(1-\tau) + W_H \epsilon \tau}{Pt(\epsilon)}.$$

Тогда расход топлива на единицу энергии, отпущенной потребителю,

$$g(\epsilon) = \frac{G}{E_n} = \frac{W_H(1-\tau) + W_H \epsilon \tau}{Pt(\epsilon)[(1-\tau)W_H + \alpha \tau W_H + (\epsilon - \alpha)\eta \tau W_H]}, \quad (1)$$

где $Pt(\epsilon)$ – глубина выгорания топлива при работе реактора в переменном графике нагрузки с ежесуточной разгрузкой до уровня мощности ϵW_H ($\epsilon < 1$).

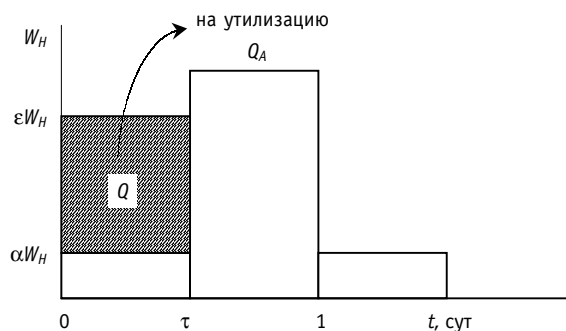


Рис.1. Режим работы энергокомплекса с утилизацией энергии

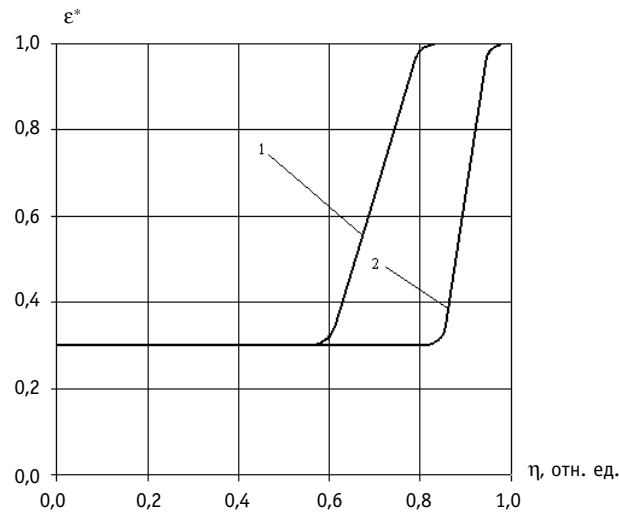


Рис. 2. Зависимость оптимальной степени снижения мощности реактора от КПД утилизатора при различных плотностях потока нейтронов: 1 - $\phi = 5 \cdot 10^{13}$ н/(см²с); 2 - $\phi = 3 \cdot 10^{13}$ н/(см²с)

Глубина выгорания топлива $Pt(\epsilon)$ зависит от резервируемого запаса реактивности, дающего возможность снизить мощность реактора до величины ϵW_H . Для реактора с непрерывной перегрузкой топлива и для корпусных реакторов в конце кампании, между глубиной выгорания топлива и величиной запаса реактивности справедливо соотношение:

$$Pt(\epsilon) = Pt_b - \frac{\Delta p(\epsilon)}{q}, \quad (2)$$

где Pt_b – глубина выгорания топлива при работе реактора в базовом режиме на номинальной мощности [МВт·сут/т У]; q – коэффициент пропорциональности, зависящий от физических свойств активной зоны реактора [т У/МВт·сут]; $\Delta p(\epsilon)$ – запас реактивности на преодоление нестационарного ксенонового отравления при снижении мощности до уровня ϵW_H .

К сожалению, в явном виде зависимость $\Delta p(\epsilon)$ получить не удастся. Однако, можно показать, что данная зависимость с погрешностью не более 3% аппроксимируется функцией вида

$$\Delta p(\epsilon) = \frac{1-\epsilon}{B\epsilon+C} \frac{\gamma_y}{v_f}, \quad (3)$$

где γ_y – выход йода на одно деление; v_f – среднее число вторичных нейтронов на акт деления; $B = 0,52$ и $C = 0,977$ – константы аппроксимации.

Подставляя эту зависимость в соотношение (2) и (1), получим явный вид минимизируемой функции:

$$g(\epsilon) = \frac{1-\tau+\epsilon\tau}{\left(Pt_b - \frac{1-\epsilon}{B\epsilon+C} \frac{\gamma_y}{v_f q} \right) (1-\tau+\alpha\tau+(\epsilon-\alpha)\eta\tau)}. \quad (4)$$

Оптимизационная задача ставится следующим образом: до какого уровня от номинала ϵ^* следует снижать мощность реактора, чтобы при заданных параметрах энергокомплекса (К.П.Д. утилизатора и плотности потока нейтронов в реакторе) расход топлива на единицу отпущенной энергии был минимален?

В математическом плане данная задача относится к классу задач нелинейного программирования:

$$\text{Найти } \min g(\varepsilon) \text{ при ограничении } \alpha \leq \varepsilon \leq 1. \quad (5)$$

АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА

Для получения численных результатов был рассмотрен энергоблок со следующими характеристиками (близкими к характеристикам реактора РБМК-1000):

- номинальная тепловая мощность реактора $W_H = 3200$ МВт;
- коэффициент $q = 1,02 \cdot 10^{-5}$, т У/МВт·сут;
- время разгрузки $\tau = 1/3$, сут.

Константы аппроксимации B и C однозначно определяются уровнем плотности потока нейтронов. Ниже рассматривались следующие варианты:

$$1) \varphi = 5 \cdot 10^{13} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}; 2) \varphi = 3 \cdot 10^{13} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}.$$

Зависимость оптимальной степени снижения мощности энергоблока от КПД утилизатора при $\alpha = 0,3$ и соответствующих φ показана на рис. 2. Из результатов, представленных на рис. 2, следует, что при КПД утилизатора менее 60% – оптимально вообще от него отказаться и отрабатывать переменный суточный график нагрузки путем соответствующего изменения мощности реактора. Напротив, если предполагается использовать утилизатор с КПД более 80%, то оптимальным режимом является базисный режим работы реактора с передачей всего излишка вырабатываемой энергии на утилизатор. Если КПД утилизации находится в пределах 60-80%, то оптимальным является режим с частичной разгрузкой энергоблока и частичной утилизацией энергии.

Ход кривой $\varepsilon^*(\eta)$ имеет простое физическое объяснение. С ростом η увеличивается доля полезной энергии при утилизации Q_A , поэтому выгодно передавать больше энергии на утилизацию. С увеличением плотности потока нейтронов растет запас реактивности на компенсацию ксенонового отравления и снижать уровень мощности в реакторе становится менее выгодным (ε^* растет).

Об эффективности оптимизации режима работы энергокомплекса «реактор – утилизатор энергии» можно судить по величине:

$$S = \frac{g_{\max} - g_{\text{опт}}}{g_{\max}} \cdot 100\%,$$

где g_{\max} – максимальный удельный расход топлива для отработки переменного графика нагрузки «антиоптимальным» способом; $g_{\text{опт}}$ – минимальный удельный расход топлива при оптимальном уровне снижения мощности.

Величина S зависит от таких параметров как номинальная плотность потока нейтронов в реакторе, КПД утилизации, времени работы на пониженной мощности и уровня снижения мощности. Расчеты показывают, что эффективность при различных КПД и потоках изменяется от 0,2 до 7%. При этом для энергокомплекса с параметрами, близкими к реально возможному ($\varphi \approx (5 \div 7) \cdot 10^{13} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$; $\eta = 60 \div 80\%$), оптимальным является компромиссный режим, при этом эффект от оптимизации составляет величину 0,2–0,3%.

Автор считает своим приятным долгом выразить признательность профессору В.И. Наумову за интерес к работе и полезные замечания.

Литература

1. Жимерин Д.Г. Энергетика: настоящее и будущее. – М.: Знание, 1978. – 182 с.
2. Доллежалъ Н.А., Мелентьев Л.А. Роль ядерно-энергетической системы в топливно-энергетическом комплексе СССР//Вестник Академии наук СССР. – 1976. – № 11. – С. 57-61.
3. Лепешинский И.Н., Гуськов С.В. К вопросу о привлечении атомных электростанций к регулированию графиков нагрузки энергообъединений//Известия вузов СССР. Энергетика. – 1981. – № 5. – С. 3-8.
4. Мелентьев Л.А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. – М.: Высшая школа, 1982. – 320 с.
5. Иванов В.А., Ремжин Ю.И., Щедров В.Б. Основные направления развития атомной энергетики//Известия вузов СССР. Энергетика. – 1979. – № 5. – С. 44-49
6. Алещенков Г.И., Баканов А.В., Зверева Г.А. Энергетические блоки с ядерными реакторами на докритические и сверхкритические параметры пара для работы в полупиковой области нагрузок энергосистем/ В кн. Опыт эксплуатации АЭС и путь дальнейшего развития атомной энергетики. – Обнинск: ФЭИ, 1974. – Т. 2. – С. 99-109.
7. Болдырев В.М. и др. Маневренные АЭС с аккумуляторами тепла//Атомная энергия. – 1982. – Т. 51. – С.153-157.
8. Воронков М.Е., Саргсян Р.М., Чаховский В.М. Аккумуляторы тепла в энергетике// Атомная техника за рубежом. – 1980. – № 9. – С.3-10.
9. Бурилович В.А. К вопросу аккумуляирования тепловой энергии и получении дополнительной работы на атомных электростанциях//Известия вузов СССР. Энергетика. – 1982. – № 10. – С.105-108.
10. Сорокин Н.М., Черкашов Ю.М., Черников О.Г. Опыт эксплуатации АЭС с реакторами РБМК/ Международная научно-техническая конф. «Канальные реакторы: проблемы и решения» (Москва – Курчатов, 19-22 октября 2004 г.): Тез. докладов. – М., 2004.

Поступила в редакцию 17.06.2005

УДК 621.311.25: 621.039

Information Representation for In-Process Review of NPP Unit STATUS\ E.N. Alontseva, A.N. Anokhin, A.S. Stebenev, E. Marshal; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 6 pages, 2 illustrations. – References, 3 titles.

The large number of process parameters which are available for NPP Main Control Room (MCR) operators can provoke the information stress which leads to unavoidable personnel errors. To decrease a probability of information stress the principle of multilevel hierarchical representation of information is used in the good world-wide practice of modern computerized MCR design. A generalized mimic diagram (GMD) constitutes the top level of such representation. The GMD objective is to provide for MCR operators the NPP conditions in a general way as well as to display status of critical safety functions and main material and power balances. The present paper describes the approach to GMD developing in the case of RBMK-1000 power unit of Leningrad NPP.

УДК 621.311.25: 621.039

Efficiency Evaluation for Small and Medium-Sized Reactors in the Sakha Republic (Yakutia) \A.A.Andrianov, Yu.A.Korovin, E.V. Fedorova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 11 pages, 2 tables, 17 illustrations. – References, 9 titles.

The present paper analyzes the technical and economic feasibility of small and medium-sized reactors (SMSR) deployment in remote regions of Russia using the Sakha Republic (Yakutia) as an example. The analysis made shows that the SMSR competitiveness evaluation models for particular regions with due account of their energy and economic environment hold more promise for SMSR development than aggregated models. The advantages of nuclear power as an energy source are offset by transition to the aggregated model of the energy supply of the republic. The calculations show that SMSR deployment in the republic may be economically feasible and desirable because it will result in the following: (1) a reduction in fossil fuel delivery costs; (2) a reduction in annual electricity production costs; (3) prerequisites for mining industry development; (4) improved environmental conditions in the region.

УДК 621.311.25: 621.039

Optimization of Nuclear Reactor Operation Regime in Variable Daily Loading Schedule with Accounting for Energy Utilization \A.M. Zagrebayev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 5 pages, 2 illustrations. – References, 10 titles.

The paper investigates potential possibilities for optimization of power nuclear reactor operation in variable daily loading schedule with accounting for energy utilization. Total fuel consumption is considered as an optimization criterion. The effects of the reactor parameters and energy utilization efficiency coefficient on characteristics of optimal regimes were studied. Total optimization effect was evaluated, and conditions for optimization expediency were defined.

УДК 621.311.25: 621.039

About a Possibility High and Low Pressure Pumps Anomalies Identification Based on Testing Data Analysis \S.T. Leskin, V.V. Kornilova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 8 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 8 titles.

The application of main components method for revealing the abnormal conditions reasons of VVER high and low pressure pumps are discussed. On the basis of selected space transformation model the laws of describing pumps behavior dynamics informative parameters influence on resulting attributes distribution in main components space are received. The parameters caused pumps behavior anomalies occurrence are revealed. The results of data processing of the fourth block of the Balakovo NPP are presented.