

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ИЗМЕНЕНИЯ МОЩНОСТИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В УГРОЖАЕМЫЙ ПЕРИОД ПРИ ФОРС-МАЖОРНЫХ ОБСТОЯТЕЛЬСТВАХ

Загребаев А.М., Овсыанникова Н.В., Садчиков С.М.

*ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва, Россия (115409, Москва, Каширское ш., 31), e-mail: AMZagrebayev@mephi.ru, NVOvsyannikova@mephi.ru, SMS@mephi.ru*

Приводится постановка оптимизационной задачи по управлению мощностью реактора в угрожаемый период при форс-мажорных обстоятельствах. Под форс-мажорными обстоятельствами понимаются как природные катаклизмы, так и события, связанные с террористической угрозой. Предполагается, что при этом объявляется некоторый угрожаемый период, в течение которого может потребоваться аварийная остановка реактора. Момент аварийной остановки предполагается случайной величиной, распределенной по закону равномерной плотности. Требуется так управлять мощностью реактора до этого момента, чтобы в среднем минимизировать запас реактивности на компенсацию ксенонового отравления, обеспечивающий подъем мощности в любой момент времени после отмены или ликвидации угрозы. Обсуждается характер оптимальных режимов. Приводятся численные оценки для различных режимов изменения мощности. Численными исследованиями показано, что при угрожаемом периоде в одни сутки оптимальным является однократное снижение мощности до 30% от номинальной. Эффект оптимизации при этом по сравнению с резервируемым запасом реактивности на полную остановку составляет 36%.

Ключевые слова: оптимизационная задача, мощность реактора, форс-мажор, угрожаемый период, запас реактивности, аварийная остановка, случайная величина, ксеноновое отравление.

## OPTIMIZATION OF A MODE OF CHANGE OF A NUCLEAR REACTOR CAPACITY DURING THE THREATENED PERIOD UNDER FORCE-MAJEUR CIRCUMSTANCES

Zagrebaev A.M., Ovsyannikova N.V., Sadchikov S.M.

*National research nuclear university MEPHI (NRNU MEPHI), Moscow, Russia (115409, Moscow, Kashirskoye shosse 31), e-mail: AMZagrebayev@mephi.ru, NVOvsyannikova@mephi.ru, SMS@mephi.ru*

Statement of an optimization task of reactor capacity management during the threatened period under force-majeur circumstances is given. Force-majeur circumstances are both natural cataclysms, and the events connected with terrorist threat. It is supposed that under these circumstances the threatened period is announced during which the emergency stop of the reactor may be required. The moment of an emergency stop is supposed the random variable distributed on the law of uniform density. It is required to operate reactor capacity up to this moment in such a way that to minimize in the average a reactivity reserve on compensation of the xenon poisoning, providing the rise of capacity at any time after the threat is cancelled or eliminated. Character of optimum modes is discussed. Numerical estimates for various modes of capacity changes are given. By numerical researches it is shown that during one-day threatened period single decrease in capacity to 30% from nominal is optimum. The effect of optimization compared with a reactivity reserve on a full stop makes 36%.

Key words: optimization task, reactor capacity, force-majeur, the threatened period, reserve of reactivity, emergency stop, random variable, xenon poisoning.

Современное развитие ядерной энергетики в мире сопровождается необходимостью размещения атомных электростанций (АЭС) в районах, подверженных действию природных катаклизмов (землетрясений, цунами, наводнений, торнадо и др.), в отдаленных районах, где АЭС являются единственными источниками энергии, например в Арктике и Антарктике, в районах политической нестабильности и террористической угрозы (примером могут служить страны Ближнего Востока, Юго-Восточной Азии) [5].

В этой связи можно говорить о том, что на режимы нормальной эксплуатации могут накладываться форс-мажорные обстоятельства, приводящие к необходимости временной аварийной остановки ядерного реактора. Если эта остановка носит кратковременный характер и ей предшествовало предупреждение о возможности форс-мажорных обстоятельств в некоторый период времени, то может иметь место следующая постановка задач по оптимизации ксенонового отравления ядерного реактора.

Рассмотрим, например, такую ситуацию. Для АЭС с реактором на тепловых нейтронах объявляется угрожаемый (мобилизационный период) в связи с возможностью природного катаклизма – землетрясения. Поскольку предсказание носит вероятностный характер, то точное время начала землетрясения, его интенсивность и характер сдвига почвы – неизвестны. Возможно, это событие произойдет в течение ближайших нескольких часов или суток, но когда именно – неизвестно. Тогда в зависимости от силы землетрясения потребуется либо остановить реактор, либо продолжать нормальную эксплуатацию. Если при объявлении угрожаемого периода сразу остановить реактор, то это будет самое безопасное решение лишь для самой АЭС. (И то не факт. Примером может служить авария на АЭС «Фукусима», когда реакторы были остановлены, но из-за потери питания главных циркуляционных насосов резервными источниками произошло расплавление активных зон четырех ядерных реакторов.) Потребители же энергии, например предприятия с непрерывным циклом производства (металлургические, химические производства, электрифицированный транспорт и др.), могут понести существенный ущерб, несмотря на наличие резервных источников энергии, поскольку их действие по времени ограничено.

Необходимо учитывать еще один момент. Если оперативный запас реактивности реактора ограничен и не позволяет из-за наличия ксенонового отравления в любой момент времени поднять мощность реактора либо после отмены угрозы как несостоявшейся, либо после катаклизма, то последствия потери источника энергии могут быть не менее значимыми. Поднять же мощность в любой момент времени можно лишь при наличии такого оперативного запаса реактивности, который смог бы компенсировать максимальную концентрацию ксенона. В противном случае реактор вынужден в течение определенного времени  $\Delta t = t_2 - t_1$  находиться в заглушенном состоянии (рис. 1).

Как правило, в реакторах с непрерывной перегрузкой топлива и в реакторах с дискретной перегрузкой топлива в конце кампании этот запас ограничен [1; 4], поскольку резервирование запаса реактивности приводит к потере энерговыработки.

$$\Delta Q_1 = \frac{\Delta \rho}{a}, \quad (1)$$

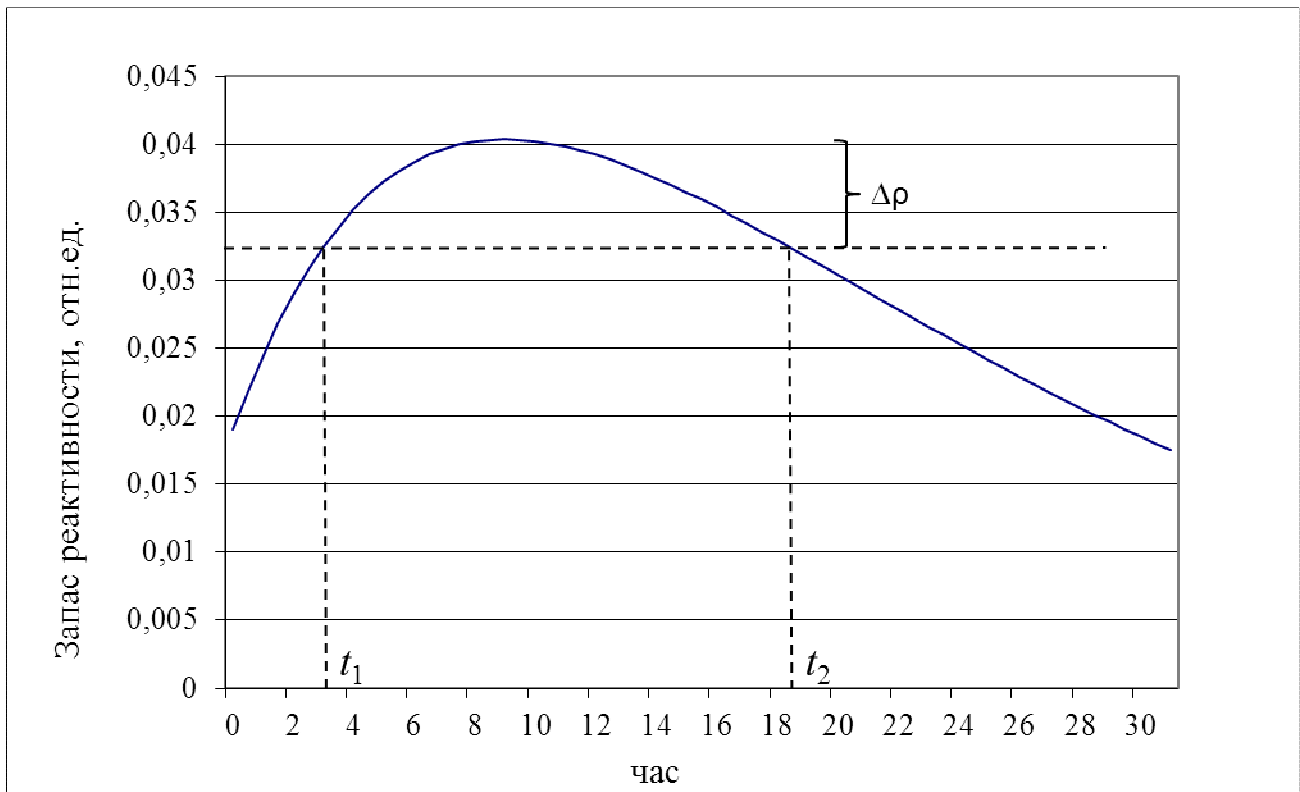
где

$\Delta Q_1$  – потеря энерговыработки,  $MВт \cdot сутки$ ;

$\Delta \rho$  – резервируемый запас реактивности, *отн.ед.*;

$a$  – темп выгорания,  $\frac{1}{MВт \cdot сутки}$ .

Как видно из рис. 1, если резервируемый запас реактивности меньше, чем  $\Delta \rho$ , то подъем мощности реактора невозможен, даже если причина остановки устранена после момента времени  $t_1$ . Реактор можно выводить на мощность только спустя время  $t_2$ .



**Рис. 1. Запас реактивности на компенсацию ксенонового отравления.**

При этом реактор не вырабатывает энергию в количестве

$$\Delta Q_2 = W_H \cdot (t_2 - t_1), \quad (2)$$

где  $W_H$  – номинальная мощность реактора,  $MВт$ .

Оценки показывают, что потеря энерговыработки на поддержание максимального оперативного запаса реактивности  $\Delta Q_{\max} = \frac{\Delta \rho_{\max}}{a}$  на порядок больше, чем  $\Delta Q_2 = W_H \cdot (t_2 - t_1)$ .

Следовательно, в обычной ситуации резервировать максимальный дополнительный оперативный запас реактивности нет смысла. Другое дело, если потеря энерговыработки при незапланированной остановке приводит к тяжким экономическим последствиям. Например, в случае ликвидации последствий землетрясения, когда невозможно другими средствами

восполнить потерю электроэнергии. В работе [2] показано, что этом случае оптимальным является резервирование запаса на полную остановку реактора. Эта мера является крайней, и в ряде случаев можно пойти по другому пути. Действительно, если предполагается кратковременная остановка реактора и момент начала остановки является случайной величиной, распределенной по какому-либо закону, то можно поставить задачу о выборе режима изменения мощности в угрожаемый период, чтобы минимизировать средний максимальный запас реактивности на полную остановку.

Математически задача ставится следующим образом:

$$\text{Найти } \min_0^T \int \Delta \rho_{\max} (U(t)) f(\tau) d\tau \quad (3)$$

где:

$U(t)$  – управление в угрожаемый период.

$$U(t) = \begin{cases} 0 \leq \varphi(t) \leq \varphi_{\max}, & \text{при } 0 \leq t < \tau \\ 0, & \text{при } t \geq \tau \end{cases};$$

$\varphi(t)$  – плотность потока нейтронов;

$\tau$  – случайный момент времени аварийной остановки по форс-мажорным причинам  
 $0 \leq \tau \leq T$ ;

$f(\tau)$  – плотность распределения момента аварийной остановки при форс-мажорных обстоятельствах;

$$\beta = \int_0^T f(\tau) d\tau \text{ – вероятность остановки при форс-мажорных обстоятельствах.}$$

Функция  $\varphi(t)$  определяет решение системы уравнений отравления:

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_I \Sigma_f \varphi(t) - \lambda_I I$$

$$\frac{dX}{dt} = \lambda_I I - \sigma_x X \varphi(t) - \lambda_x X$$

При начальных условиях:

$$I(0) = \frac{\gamma_I \Sigma_f \varphi_{\max}}{\lambda_I}$$

$$X(0) = \frac{\gamma_I \Sigma_f \varphi_{\max}}{\lambda_x + \sigma_x \varphi_{\max}}$$

где:

$I, X$  – концентрации йода и ксенона соответственно;

$\lambda_I, \lambda_x$  – постоянные распада йода и ксенона;

$\gamma_l$  – выход йода при делении;

$\Sigma_f$  – сечение деления;

$\sigma_x$  – сечение захвата ксенона.

После остановки в момент времени  $\tau$  концентрация ксенона меняется, как показано на рис. 1. При этом  $\Delta\rho_{\max} \approx X_{\max}$ . Величина  $X_{\max}$  зависит от режима изменения плотности потока нейтронов (мощности)  $\varphi(t)$  от начала объявления угрожаемого периода до момента сигнала аварийной остановки.

Известно несколько классических задач по оптимизации ксеноновых переходных процессов [3]: задача на быстроедействие, задача на максимум или минимум энерговыделения в переходном процессе и др. Общим для этих задач является то, что оптимальное решение может компоноваться из следующих режимов:  $U = 0$ ,  $U = \varphi_{\max}$ ,  $U_{\text{кл}} = \varphi(t)$ ,  $U_{\text{гр}} = \eta(t)$ . Реализация последних двух режимов может быть с успехом аппроксимирована ступенчатым изменением мощности [2].

В данной работе решение оптимизационной задачи (3) проводилось для случая, когда функция  $f(\tau)$  подчиняется закону равномерной плотности. В качестве управлений, из которых формируется оптимальный режим, выбирались ступенчатые управления (рис. 2). То есть в течение заданного времени  $\Delta t$  мощность поддерживалась на уровне  $\alpha\varphi_{\max}$ , затем поднималась до максимального значения  $\varphi_{\max}$  и поддерживалась время  $\Delta t$  и т.д. до момента полной остановки.

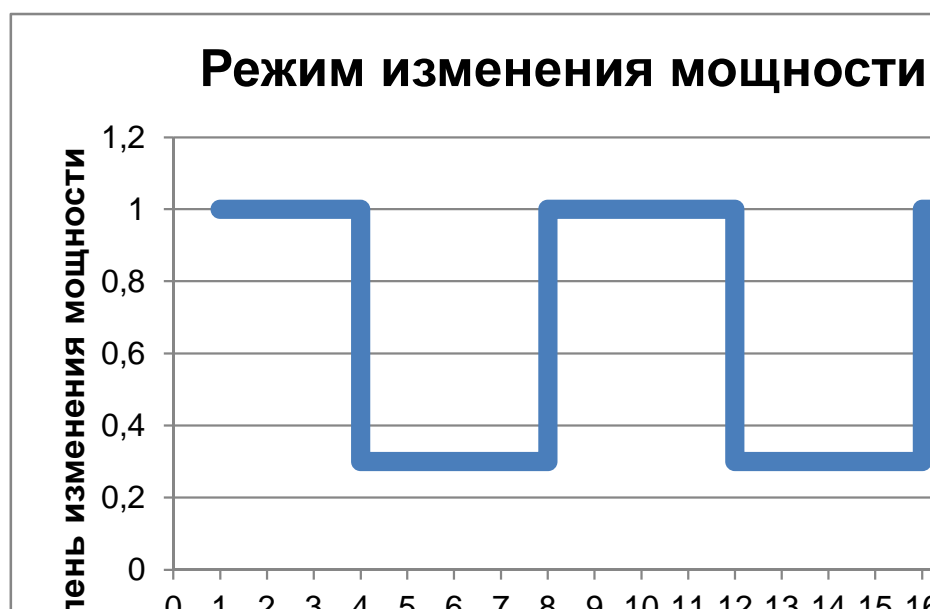


Рис. 2. Характер изменения мощности реактора в угрожаемый период.

В таблице 1 приведены значения среднего запаса реактивности для различного характера изменения мощности в угрожаемый период ( $T = 24$  час).

**Таблица 1 – Значение среднего запаса реактивности при различных степенях снижения мощности ( $\alpha$ ) и различных временах  $\Delta t$**

№ п/п	$\alpha$	$\Delta t$ , час						
		1	2	3	4	5	10	24
1.	0	2,04	2,03	2,11	2,24	2,39	2,65	2,65
2.	0,3	2,20	2,20	2,19	2,18	2,19	2,17	1,95
3.	0,5	2,33	2,32	2,31	2,30	2,30	2,28	2,05
4.	0,8	2,52	2,52	2,51	2,51	2,51	2,49	2,40

Данные, приведенные в таблице 1, следует понимать таким образом. Например, при  $\alpha = 0,3$  исследовалось ступенчатое изменение мощности при снижении мощности до 30% от номинала при различных длительностях ступенек. При  $\Delta t = 1$  час переключение управления с  $0,3\varphi_{\max}$  до  $\varphi_{\max}$  и наоборот осуществлялось каждый час, а при  $\Delta t = 24$  часа лишь однократное снижение мощности до  $0,3\varphi_{\max}$ . Как следует из таблицы, именно этот последний режим требует наименьшего в среднем запаса реактивности на возможность выхода из йодной ямы в любой момент времени ( $\Delta\rho_{\max} = 1,95\%$ ). В стандартном же подходе, когда резервируется запас реактивности на полную остановку реактора сразу при объявлении угрожаемого периода ( $\alpha = 0 \Delta t = 24$  час), запас реактивности  $\Delta\rho_{\max} = 2,65\%$ . Таким образом, эффект оптимизации:

$$S = \frac{\Delta\rho_{\max}(\alpha = 0, \Delta t = 24) - \Delta\rho_{\max}(\alpha = 0,3, \Delta t = 24)}{\Delta\rho_{\max}(\alpha = 0, \Delta t = 24)} = \frac{2,65 - 1,95}{1,95} = 36\%$$

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что оптимизация режимов изменения мощности в угрожаемый период целесообразна и оптимальным является простое снижение мощности до некоторого уровня, величина которого зависит от конкретных параметров ядерного реактора.

#### Список литературы

1. Доллежалъ Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. – М. : Атомиздат, 1980. – 208 с.

2. Загребяев А.М. [и др.] Средняя потеря энерговыработки при случайной остановке реактора с ограниченным оперативным запасом реактивности // Естественные и технические науки. – 2012. – № 2 (58). – С. 418-422.
3. Рудик А.П. Оптимизация физических характеристик ядерных реакторов. – М. : Автомиздат, 1979. – 280 с.
4. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов / Овчинников Ф.Я. [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Атомиздат, 1979. – 288 с.
5. Ядерная энергетика. Проблемы. Решения / под ред. М.Н. Стриханова. – В 2-х частях. – Часть 1. – М. : ЦСПи М, 2011. – 424 с. : ил.

### **Рецензенты**

Шумилов Юрий Юрьевич, д.т.н., профессор кафедры информационных систем и технологий ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.

Кулябичев Юрий Павлович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой математического обеспечения систем ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.