

Поиск наилучшего временного сдвига по перегрузкам реакторов для максимально быстрого выхода на мощность после остановки

Загребаев А.М. *, Рамазанов Р.Н. **

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ),

Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Россия

**e-mail: amzagrebayev@mephi.ru*

***e-mail: tem@gmx.com*

Аннотация

В работе рассматривается один из аспектов оптимизации режимов эксплуатации атомных электростанций в условиях форс-мажорных обстоятельств. Предполагается, что станция состоит из нескольких энергоблоков с ядерными реакторами, находящимися на разных этапах кампании. Предлагается постановка и решение оптимизационной задачи по выбору наилучшего временного сдвига между перегрузками ядерных реакторов, позволяющего максимально быстро выйти на номинальную мощность после остановки электростанции по форс-мажорным обстоятельствам. В задаче учитывается, что момент наступления форс-мажорных обстоятельств – случайная величина, поэтому минимизируется среднее время выхода энергоблока на номинальную мощность.

Ключевые слова: атомная электростанция, ядерный реактор, водо-водяной энергетический реактор, форс-мажорные обстоятельства, задача оптимизации, йодная яма, компенсация ксенонового отравления.

Введение

Современный этап развития ядерной энергетики предполагает использование ядерных реакторов на самых различных объектах [1]. К ядерным энергетическим установкам (ЯЭУ) предъявляются высокие требования безопасности [2], поскольку они могут размещаться в районах, подверженных возможным природным катастрофам или террористической угрозе [3]. Таким образом, на режимы нормальной эксплуатации ЯЭУ на атомной электростанции (АЭС) могут накладываться форс-мажорные обстоятельства, приводящие к необходимости временной аварийной остановки ядерных реакторов [4]. Рассмотрим ситуацию, когда требуется остановить АЭС с несколькими энергоблоками, отличающимися по физическим свойствам, в силу форс-мажорных обстоятельств [5]. Отмена угрозы также может произойти в случайный момент времени. Понятно, что не все энергоблоки в общем случае могут сразу поднять мощность до номинала. Это различие может быть обусловлено, например, наличием разного оперативного запаса реактивности на компенсацию ксенонового отравления, а в общем случае разными маневренными свойствами. Например, для водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) различие может определяться временем до плановой перегрузки [6] и планово-предупредительного ремонта (ППР), поскольку блоки, как правило, вводятся в эксплуатацию не одновременно.

Постановка и решение задачи

Пусть для простоты АЭС состоит из двух реакторов типа ВВЭР, запас реактивности каждого из них на компенсацию ксенонового отравления зависит от времени, прошедшего от начала кампании. Обозначим T_0 – время работы реактора

между перегрузками, τ – сдвиг во времени между перегрузками двух энергоблоков, Δt – время, необходимое на перегрузку и ППР. Изменение реактивности реакторов двух энергоблоков показано на рис. 1. При малых сдвигах $\tau(1)$ после внеплановой остановки обоих реакторов существует период времени, когда ни один реактор не может быть выведен на номинал, поскольку они оба находятся в йодной яме, в остальное время оба реактора могут быть сразу подняты на номинал. При больших сдвигах $\tau(2)$ напротив один из двух реакторов в какой-то момент времени будет иметь запас реактивности на компенсацию йодной ямы, в то время как другой будет находиться в йодной яме.

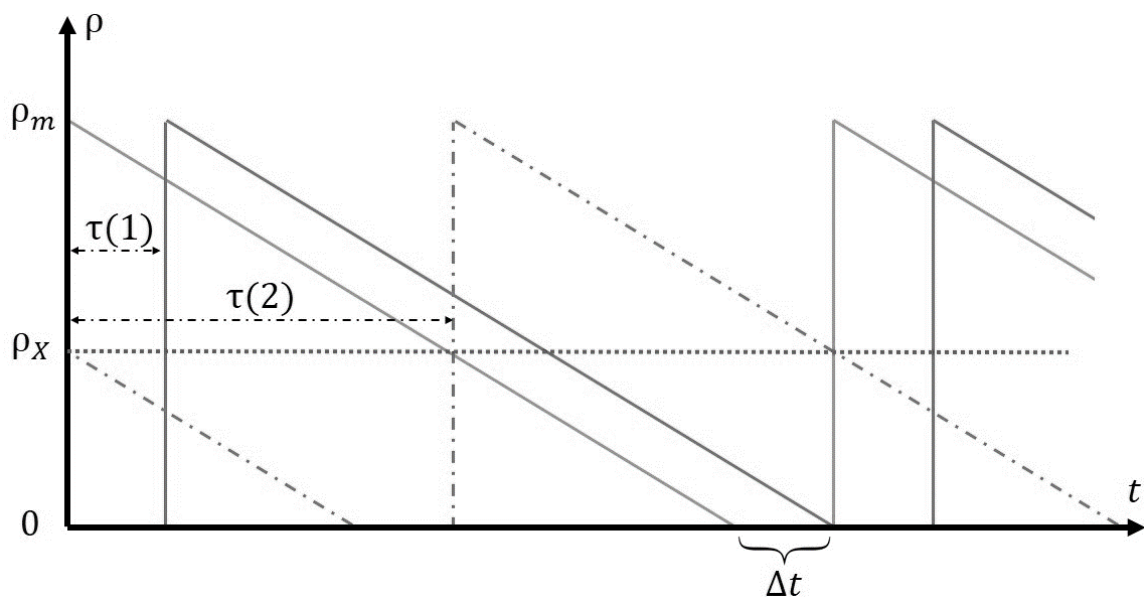


Рис. 1. Зависимость реактивности от времени в пределах кампании (черная линия – первый реактор, серая линия – второй реактор (сплошная – при малом сдвиге, штрихпунктирная – при большом))

Таким образом, сдвиг τ существенно влияет на маневровые свойства АЭС. Определим, какой сдвиг по времени после перегрузки должен быть у реакторов,

чтобы за минимальное время после отмены угрожаемого периода выйти на номинальную мощность.

Если реактор находится на таком отрезке кампании, что регулируемыми стержнями невозможно или нежелательно манипулировать, то для выхода из йодной ямы необходимо изменить концентрацию борной кислоты в активной зоне, т. е. совершить продувку теплоносителя. Чем меньше запас реактивности, тем больше времени должна будет осуществляться продувка.

Обозначим C_0 – концентрация борной кислоты на начало переходного процесса, $G_{пр.}$ – расход продувки, $V_{1к}$ – объем первого контура. Тогда концентрация борной кислоты в случае подпитки дистиллятом будет рассчитываться по формуле:

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{G_{пр.}t}{V_{1к}}\right)$$

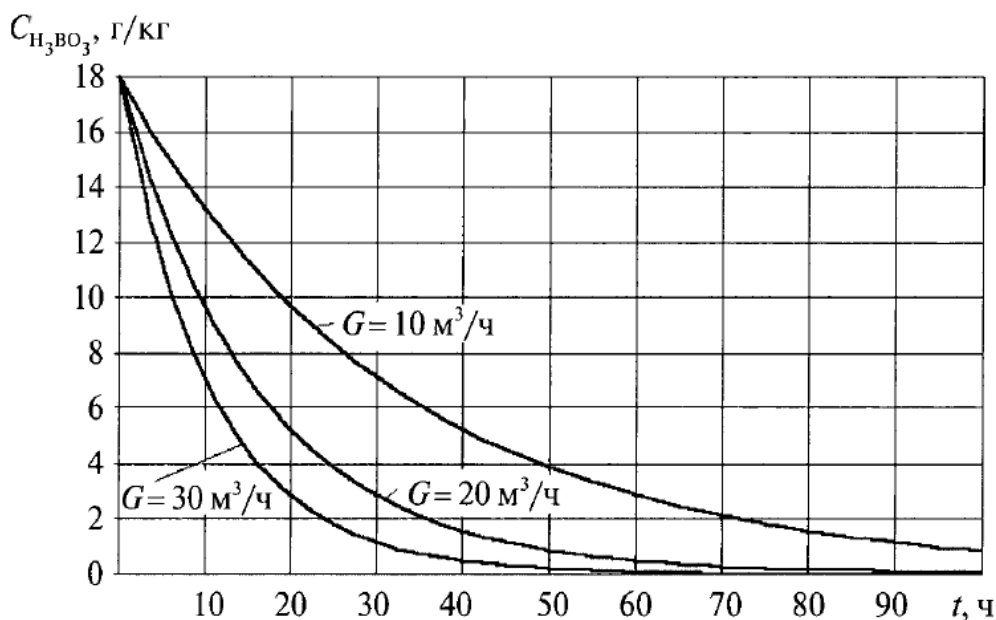


Рис. 2. Концентрация борной кислоты в первом контуре при введении дистиллята с разными расходами (рисунок из [6], с. 271)

Запас реактивности за счёт наличия борной кислоты в теплоносителе пропорционален её концентрации, тогда если реактивности $\rho(T)$ соответствует концентрация $C(T)$, то $\rho(t) = \rho(T) \exp\left(-\frac{G_{\text{пр.}} \cdot t}{V_{1\text{к}}}\right)$. Если требуется освободить запас реактивности $\Delta\rho_x$ на выход из йодной ямы, нужно уменьшить концентрацию борной кислоты в соответствии со следующим соотношением:

$$\rho(T) - \rho(t) = \rho(T) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{\text{пр.}} \cdot t}{V_{1\text{к}}}\right)\right] = \Delta\rho_x$$

Предположим, что зависимость концентрации борной кислоты от времени $C(t)$ в пределах кампании достаточно точно можно аппроксимировать линейной функцией:

$$C(t) = C_0 - \alpha_c t$$

Соответственно, $\rho(t)$ также будет выражаться линейной зависимостью [7]:

$$\rho(t) = \rho_0 - \alpha t$$

Таким образом, если реактор был остановлен в момент кампании T , то для выхода из йодной ямы ему потребуется время:

$$t = -\frac{V_{1\text{к}}}{G_{\text{пр.}}} \ln\left(1 - \frac{\Delta\rho_x}{\rho_0 - \alpha T}\right)$$

Анализ этого выражения показывает, что чем дальше находится реактор от начала кампании, тем больше времени ему потребуется на продувку, чтобы обеспечить запас реактивности, достаточный для компенсации ксенонового отравления. Из рис. 1 видно, что если останов произошёл в интервале $(0; \tau)$, то запас реактивности больше у первого реактора, следовательно, он первым должен выходить на мощность, и время выхода одного реактора будет:

$$t_1 = -\frac{V_{1к}}{G_{пр.}} \ln \left(1 - \frac{\Delta\rho_x}{\rho_0 - \alpha T} \right), 0 \leq T \leq \tau \quad (5)$$

Если же останов произошёл в интервале $(\tau; T_0)$, то выходить на мощность должен второй реактор, и время выхода на мощность одного реактора будет:

$$t_2 = -\frac{V_{1к}}{G_{пр.}} \ln \left(1 - \frac{\Delta\rho_x}{\rho_0 - \alpha(T - \tau)} \right), \tau \leq T \leq T_0 \quad (6)$$

Поскольку момент времени остановки T случаен, есть смысл говорить о среднем времени продувки для выхода одного реактора на мощность в зависимости от сдвига:

$$\bar{t} = \int_0^{T_0} t(T) f(T) dT$$

Предположим, что моменты наступления форс-мажорных обстоятельств в пределах кампании равновероятны. Тогда $f(T) = \frac{1}{T_0}$, а среднее время выхода на мощность будет выражаться соотношением:

$$\bar{t} = -\frac{V_{1к}}{G_{пр.} T_0} \left\{ \int_0^{\tau} \ln \left(1 - \frac{\Delta\rho_x}{\rho_0 - \alpha T} \right) dT + \int_{\tau}^{T_0} \ln \left(1 - \frac{\Delta\rho_x}{\rho_0 - \alpha(T - \tau)} \right) dT \right\}$$

Можно поставить оптимизационную задачу поиска временного сдвига τ , чтобы за минимальное время после отмены угрожаемого периода хотя бы один энергоблок мог выйти на номинальную мощность. Тогда взяв производную от \bar{t} по параметру τ , получим:

$$\ln \left(1 - \frac{\Delta\rho_x}{\rho_0 - \alpha T} \right) - \alpha \ln \left(\frac{\rho_0 - \Delta\rho_x - \alpha T_0 - \alpha \tau}{\rho_0 - \alpha T} \right) - (1 + \alpha) \ln \left(1 - \frac{\Delta\rho_x}{\rho_0} \right) = 0$$

Подставив известные значения $\Delta\rho_x$, ρ_0 , α , T_0 , можно найти точку минимума функции \bar{t} (τ), которая соответствует оптимальному сдвигу. Для случая двух однотипных реакторов получаем $\tau = 50\% T_0$ (см. рис. 3).

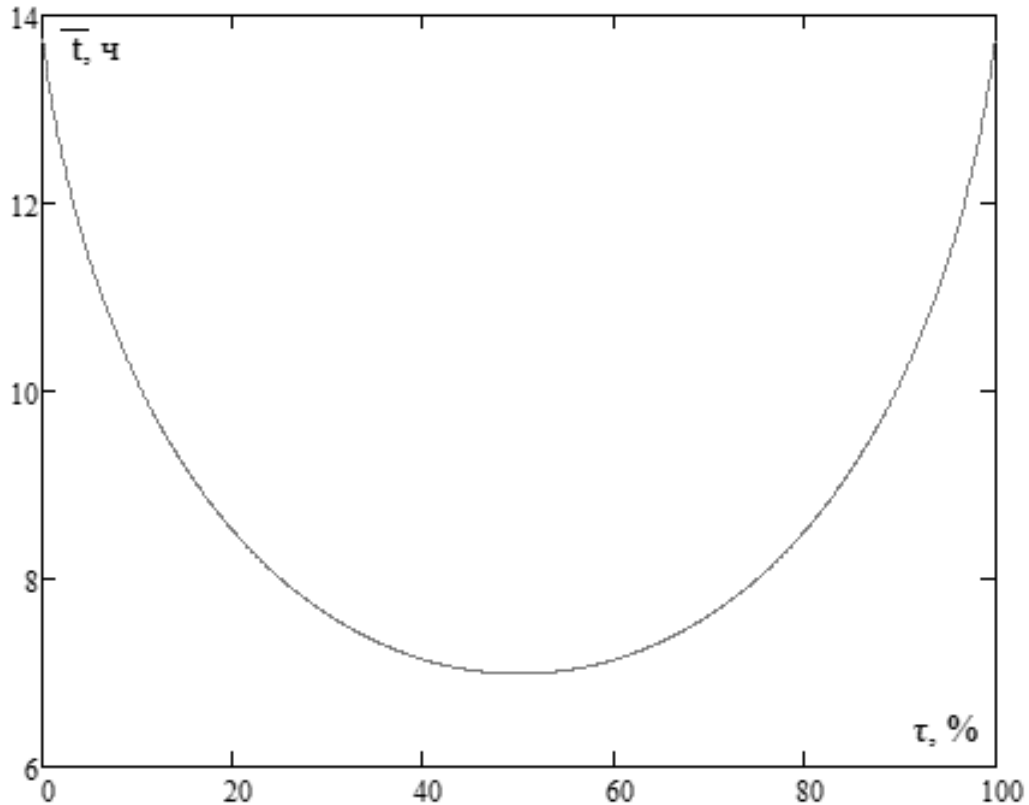


Рис. 3. Среднее время выхода на мощность одного блока (в часах) в зависимости от сдвига (в процентах кампании) для $V_{1к} = 370 \text{ м}^3$, $\alpha = 0,15$, $G_{пр.} = 20 \text{ М}^3/\text{ч}$, $\rho_0 = 20\%$, $\Delta\rho_x = 5\%$

Если же поставить задачу поиска временного сдвига τ для минимизации времени выхода на мощность после отмены угрожаемого периода всей АЭС, то тогда получим:

$$\bar{t} = -\frac{V_{1к}}{G_{пр.}T_0} \left\{ \int_0^{\tau} \ln \left(1 - \frac{\Delta\rho_x}{\rho_0 - \alpha(T_0 - \tau) - \alpha T} \right) dT + \int_{\tau}^{T_0} \ln \left(1 - \frac{\Delta\rho_x}{\rho_0 - \alpha T} \right) dT \right\}$$

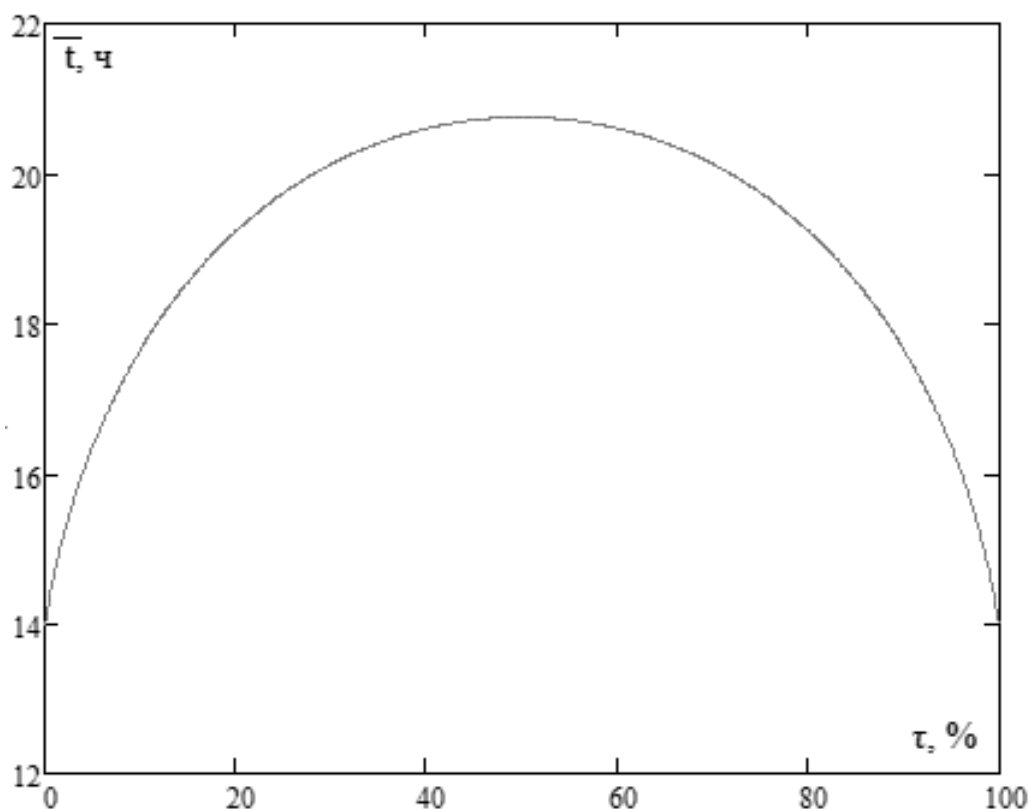


Рис. 4. Среднее время выхода на мощность всей АЭС (в часах) в зависимости от сдвига (в процентах кампании) для $V_{1к} = 370 \text{ м}^3$, $\alpha = 0,15$, $G_{пр.} = 20 \text{ М}^3/\text{ч}$, $\rho_0 = 20\%$, $\Delta\rho_x = 5\%$

В этой ситуации (рис. 4) минимумы будут достигаться в точках 0 и 100%, то есть при отсутствии сдвига.

Заключение

В результате данной работы показано, что наличие сдвига во времени между перегрузками реакторов на АЭС позволяет в случае форс-мажора максимально быстро вывести на мощность один блок, но не позволяет одновременно вывести на мощность все реакторы. При этом в общем случае для АЭС из N энергоблоков оптимальный сдвиг составляет $1/N$ часть кампании реактора.

Библиографический список

1. Полоус М.А., Алексеев П.А., Ехлаков И.А. Современные расчетные технологии обоснования характеристик ядерных электродвигательных установок в проектных работах создания термоэмиссионных космических ядерных энергетических установок нового поколения // Труды МАИ, 2013, № 68: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41822>
2. Федоров М.Ю., Краус Е.И., Фомин В.М., Шабалин И.И. Моделирование ударных воздействий на конструкцию в проблеме обеспечения безопасности космических ЯЭУ // Вестник Московского авиационного института. Т. 16. № 3. 2009. С. 49-53.
3. Стриханов М.Н. Ядерная энергетика. Проблемы. Решения - М.: ЦСПиМ, 2011. – 424 с.
4. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Безопасность атомных электрических станций при экстремальных внешних воздействиях // Биосфера. 2010. Т. 2. № 2. С. 197-213.
5. Загребаев А.М., Овсянникова Н.В., Садчиков С.М., Черняев В.В. Средняя потеря энерговыработки при случайной остановке реактора с ограниченным оперативным запасом реактивности // Естественные и технические науки. 2012. № 2 (58). С. 418-423.
6. Андрушечко С.А., Афров А.М., Васильев Б. Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010. – 628 с.
7. Овчинников Ф.Я., Семенов В.В. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. – М.: Энергоиздат, 1988. – 359 с.