

Проблемы оптимального управления ядерными реакторами

Соловьев Д.А., Семенов А.А., Щукин Н.В.

1. Генератор стратегий управления.

Основной целью эксплуатации АЭС является производство электроэнергии. Наилучшим режимом работы энергетических ядерных реакторов с точки зрения безопасности и надежности является режим работы на номинальном уровне мощности. Но это в идеале, на практике энергосистема накладывает свои требования и, следовательно, необходимо обеспечение возможности менять мощность энергоблока, чтобы обеспечить режим следования за нагрузкой.

Задача управления состоит из трех основных компонент - набора управляющих воздействий, перечня ограничений, и целевого функционала.

В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением АЭС с водо-водяными реакторами под давлением.

Для управления мощностью реактора на АЭС с ВВЭР оператор может использовать:

- борное регулирование;
- органы регулирования СУЗ;
- изменение температуры теплоносителя на входе в активную зону.

На режим несения нагрузки накладываются ограничения. Ограничения могут диктоваться детерминированными внешними причинами, например требованиями со стороны энергосистемы, или случайными внутренними причинами, например отказами оборудования станции.

При управлении реакторной установкой (РУ) для обеспечения надежной эксплуатации оператору необходимо удерживать режимные параметры в безопасных пределах. Ограничения на изменение параметров обусловлены желанием избежать отказов элементов РУ или конструктивными особенностями оборудования. Для активной зоны это повреждения ТВЭЛ и корпусного оборудования. Основными характеристиками, на которые накладываются ограничения, являются:

- линейная нагрузка на ТВЭЛ;
- офсет поля энерговыделения;
- расход теплоносителя через ТВС активной зоны;
- давление в первом контуре;
- положение ОР СУЗ;
- скорости ввода-вывода борной кислоты и дистиллята;
- границы изменения входной температуры.

Целевые функционалы управления в настоящее время не являются жестко фиксированными. Поэтому оператор волен самостоятельно выбирать стратегию управления реакторной установкой, используя одну из большого списка целей. При оценке качества управления часто используют следующие цели:

- максимизация коэффициента использования установленной мощности;
- минимизация потери энерговыработки;
- минимизация погрешности при несении заданного графика нагрузки;
- наискорейшее подавление ксеноновых колебаний;
- минимизация расхода топлива;
- продление ресурса оборудования;
- минимизация накопления радиоактивных отходов;
- минимизация дозовых нагрузок;
- могут использоваться и различные комбинации перечисленных выше критериев.

Стратегию управления можно вырабатывать на разных уровнях: энергосистемы, атомной станции или отдельного энергоблока. Для помощи оператору реакторной установки энергоблока в решении задач управления разрабатываются специализированные программные средства - **генераторы стратегий управления (ГСУ)**.

В настоящее время существуют различные виды генераторов стратегий управления. Они

могут выполнять следующие функции в различных комбинациях:

- прогноз поведения установки при заданном законе управления;
- проверка выполнения эксплуатационных ограничений;
- получение оптимизированной последовательности выполнения операций по управлению РУ;
- расчет целевых функционалов.

Некоторые ГСУ имеют законченный вид и предлагают оператору оптимизированную последовательность выполнения управляющих операций, другие обеспечивают предсказание поведения РУ при задаваемой оператором последовательности действий и оценку целевых функционалов. И, наконец, самые элементарные – просто предсказывают поведение установки.

Оценки показывают, что использование оптимальной стратегии управления, выработанной ГСУ, по сравнению с применением стратегии, выработанной опытным оператором РУ, позволяет снизить количество удаляемой из первого контура радиоактивной жидкости на 10-12 % в процессе кампании. За счет этого снижается нагрузка на систему спецводоочистки, уменьшается количество накипи в выпаривательных установках, снижается загрязнение ионных фильтров и уменьшается количество используемых очистительных реагентов, т.е. происходит уменьшение общего количества вырабатываемых АЭС радиоактивных отходов. Это, в свою очередь, приводит к снижению дозовых нагрузок на обслуживающий персонал. Повышение ядерной и радиационной безопасности эксплуатации ЯЭУ также очевидно, так как оператору психологически легче принимать решения при наличии прогнозного расчета.

2. Различные способы постановки задачи.

В литературе встречаются две группы задач. В первой группе находятся задачи с явно выраженным технико-экономическим эффектом. Ко второй группе относятся задачи, диктуемые сложившейся практикой управления реактором. Наиболее характерные задачи перечислены в Таблица 1. Эти задачи в основном сводятся к тому, что на входе в ГСУ задается предписанный график несения нагрузки, а программа должна предлагать решение задачи оптимального управления, которая с математической точки зрения является задачей о минимизации аддитивного целевого функционала J с ограничениями типа неравенств и равенств.

Распишем более подробно постановку задач первой группы.

Таблица 1 Обозначения решаемых задач.

Задачи первой группы	
$\int G dt$	Минимизация водообмена
$\int W dt$	Максимизация энерговыработки
Задачи второй группы	
$A_0(t)$	Поддержание заданного офсета мощности
$A_{band}(t)$	Удержание офсета мощности в заданной области
$\min(A - A_0)(t)$	Подавление ксеноновых колебаний
$W A_{band}(t)$	Поддержание заданного энерговыделения
$C_b(t)$	Поддержание концентрации борной кислоты

Минимизация водообмена.

Управление водо-водяными реакторами осуществляется, главным образом, изменением положений стержней СУЗ и изменением концентрации борной кислоты. Каждый из этих способов обладает своими достоинствами и недостатками. Перемещение органов СУЗ позволяет быстро воздействовать на мощность реактора, однако приводит к сильным локальным возмущениям и большим градиентам в поле энерговыделения. Изменение концентрации борной кислоты равномерно влияет на энерговыделение в активной зоне, однако скорость ее ввода-вывода при водообмене ограничена. Кроме того, при водообмене происходит удаление из первого контура радиоактивной воды. Она требует переработки, в результате которой происходит накопление радиоактивных отходов. Водообмен наиболее интенсивен при малых концентрациях борной

кислоты в теплоносителе первого контура.

Задачу оптимизации ставят как задачу на снижение водообмена $G(t)$ при заданных ограничениях и соответствии текущей электрической мощности установки $W(t)$ заданному графику несения нагрузки $W_0(t)$.

$$J = \int_0^{tend} G(t) dt$$
$$W(t) = W_0(t)$$

Максимизация энерговыработки.

В некоторых ситуациях, например по требованию энергосистемы или в случаях отказа оборудования, требуется как можно быстрее снизить, а затем набрать мощность, при этом необходимо соблюсти требования регламентных ограничений.

Эта задача оптимизации ставится как задача максимизации интегральной энерговыработки $W(t)$ за весь период управления при заданных ограничениях.

$$J = \int_0^{tend} W(t) dt$$

Задача со штрафной функцией.

Часто задача с ограничениями типа неравенств заменяется на задачу безусловной оптимизации со штрафной функцией.

Введем штрафную функцию следующего вида:

$$R(x_{\min}, x, x_{\max}) = \begin{cases} x - x_{\min} & \text{if } x < x_{\min} \\ x & \text{if } x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ x - x_{\max} & \text{if } x_{\max} < x \end{cases}$$

Задача с ограничением:

$$J = \int_0^{tend} W(t) dt$$
$$Q(t) \leq Q_0(t)$$

Задача со штрафной функцией:

$$J^* = \int_0^{tend} (F(t) + \alpha \cdot R^2(-\Delta, Q - Q_0, \Delta)) dt$$

В Таблица 3 и Таблица 4 задачи в такой постановке будут обозначаться $+^*$, а не $+$.

3. Три кита ГСУ - математическая модель, синхронизация модели, алгоритм оптимизации.

Математическая модель объекта управления.

К математической модели объекта предъявляются противоречивые требования - способность с высокой точностью реагировать на управления и воспроизводить при этом целевые функционалы - с одной стороны, и высокое быстродействие (необходимое для проведения массовых вариантных расчетов при оптимизации) - с другой стороны.

Это противоречие в существующих ГСУ разрешается двумя способами. Один способ заключается в разделении модели на детальную («медленную») и приближенную («быструю»). Детальная модель используется для идентификации текущего состояния и проведения прогнозных расчетов. Быстродействующая модель (субмодель) используется для проведения оптимизации. Примерами быстродействующих моделей являются:

- двухточечные (SCORPIO [1], TRIAX [2]);
- одномерные (OSG [3]);

- специализированные трехмерные (БОБР [4]).

Второй способ - использование только детальной модели. Такие ГСУ сильно ограничены в возможности решения оптимизационных задач. В ГСУ второго типа чаще всего используются существующие математические модели ядерного реактора, предназначенные для решения других задач (физические расчеты для обоснования безопасности, обучения персонала, системы восстановления поля энерговыделения по показаниям датчиков и т.п.). К ним относятся, например, программы: POWERTRAX [5], Имитатор Реактора(ИР)[6].

Алгоритм синхронизации состояния модели.

Для того, чтобы генерируемая стратегия управления могла использоваться при эксплуатации установки, необходимо синхронизировать состояние модели, используемой для оптимизации, с текущим состоянием РУ. Все описанные в литературе ГСУ получают начальное состояние детальной модели методом установления, т.е. путем воспроизведения предыстории управляющих воздействий с помощью самой математической модели.

Генераторы, использующие быстродействующую модель, дополнительно проводят преобразование состояния детальной модели в состояние быстродействующей.

Алгоритм оптимизации.

Набор возможных алгоритмов оптимизации очень широк. Список методов возглавляют подходы, в которых алгоритм оптимизации прост - оператору предписывается самому придумать стратегию управления (Имитатор Реактора).

В виду сложности задачи оптимизации многие авторы используют слабо формализованную итерационную процедуру - многоэтапный процесс оптимизации (multistage optimization process) как, например, в POWERTRAX.

Математически корректная оптимизация может осуществляться, например, методом покоординатного спуска (SCORPIO), на основе применения принципа максимума Понтрягина (OSG), методом динамического программирования Беллмана (БОБР).

4. Сравнительный анализ ГСУ.

В Таблица 2 приведена краткая информация по рассмотренным ГСУ.

Таблица 2 Обзор ГСУ

	POWERTRAX	OSG	SCORPIO	ИР	БОБР
Автор	Moop	Turinsky	MkEllin	Филимонов	Соловьев
Фирма	Siemens	Westinghouse	IFE	РНЦ КИ	МИФИ
Реактор	PWR	PWR	PWR	ВВЭР	ВВЭР
3D модель	PRIZM	NESTLE	PANTHER	БИПР-7	ПРОСТОП
Субмодель	-	1D	2 точечная	-	3D

Как показал анализ, все ГСУ проходят следующий эволюционный путь развития:

1. Индикация важных для оператора реактора режимных параметров текущего состояния РУ.
2. Анализ режимных параметров текущего состояния с целью выявления нарушений условий нормальной эксплуатации. Оператор на блочном щите управления РУ обладает этой информацией, но для удобства использования она должна отображаться и в ГСУ.
3. Прогноз развития ситуации при заданном законе управления реактором.
4. Вычисление функционалов, характеризующих качество управления (КИУМ, объем водообмена в первом контуре, расход ресурса оборудования и т.п.). Оператор может самостоятельно выработать приемлемую стратегию на основе имеющихся оценок качества управления.
5. Выработка работоспособной (неоптимальной) стратегии. Такие стратегии могут быть построены на основе обобщения опыта управления лучших операторов РУ.

6. Выработка оптимальной стратегии управления при заданных целевых функционалах.
7. Организация процесса проверки качества стратегий управления: генерация стратегии - проверка на полномасштабной модели - проверка на реальном объекте управления.

Возможности решения вышеперечисленных задач для разных ГСУ представлены в Таблица 3.

Таблица 3 Возможности ГСУ

POWERTRAX	OSG	SCORPIO	ИР	БОБР
1. Индикация параметров текущего состояния				
+	-	-	+	-
2. Анализ текущего состояния				
+	-	-	+	-
3. Прогноз развития ситуации				
+	+	+	+	+
4. Вычисление функционалов качества управления				
-	-	+	-	+
5. Выработка работоспособной (неоптимальной) стратегии				
+	+	+	+	+
6. Выработка оптимальной стратегии				
-	+	-	-	+
7. Проверка качества стратегии управления				
-	-	+	-	+

Отсутствие функциональных возможностей в пунктах 1,2 в Таблица 3 объясняется тем, что эти возможности реализованы в системах, формально не относящихся к данным ГСУ.

Видно, что во всех ГСУ реализована возможность прогнозного расчета.

Возможность генерации работоспособной и оптимальной стратегии управления различными ГСУ характеризуется Таблица 4, которая дает более развернутое описание пунктов 5-6 Таблица 3. Поскольку задача выработки оптимальной стратегии управления сложна, многие программы ограничиваются выработкой работоспособных стратегий, основанных на использовании простых алгоритмов регулирования. Поэтому минимизируемые в этих задачах функционалы не обеспечивают явно выраженного технико-экономического эффекта. Например, задача минимизации водообмена заменяется задачей поддержания концентрации борной кислоты в заданном диапазоне. Эти функции описаны в разделе «регулирование» Таблица 4, и со временем должны отмереть, вследствие перехода к решению математически корректных задач оптимизации, отмеченных в разделе «оптимизация» Таблица 4.

Таблица 4 Целевые функционалы

	POWERTRAX	OSG	SCORPIO	ИР	БОБР
Регулирование					
$A_0(t)$	+	-	-	-	-
$A_{band}(t)$	+	+	-	+	+
$\min(A - A_0)(t)$	+	+	+	+	+
$WA_{band}(t)$	+	+	+	-	+
$C_b(t)$	-	+	-	-	-
Оптимизация					
$\int Gdt$	-	+	-	-	+
$\int Wdt$	-	-	-	-	+

В настоящее время еще ни один из ГСУ не прошел эволюционный путь до конца. Математически корректные алгоритмы оптимизации применяются в программах OSG и БОБР. А остальные функции ГСУ наиболее полно реализованы в программах SCORPIO и ИР.

5. Заключение.

Генераторы стратегий управления для водо-водяных реакторов активно развиваются. Это связано с тем, что построение ГСУ, даже с неполным перечнем функций, сулит значительные выгоды.

В настоящее время для ГСУ разработаны алгоритмы синхронизации с текущим состоянием энергоблока, реализованы функции индикации и анализа текущего состояния, имеются возможности прогнозного расчета.

Однако, не смотря на хорошо развитую теорию оптимального управления, далеко не все ГСУ используют математически корректные алгоритмы построения оптимальных стратегий управления. Одной из причин этого является отсутствие быстродействующих математических моделей РУ, способных с высокой точностью реагировать на управления и воспроизводить при этом целевые функционалы.

В связи с этим в настоящее время необходимо сосредоточиться на разработке методик построения быстродействующих математических моделей реакторов, предназначенных для решения конкретных задач, без чего невозможно эффективное решение оптимизационных задач.

Решение этой задачи будет сопряжено с отмиранием функций ГСУ, реализованных в виде простейших алгоритмов управления, и, в результате, приведет к решению математически корректных задач оптимизации.

Наиболее полно всем требованиям, предъявляемым к ГСУ, соответствует отечественная разработка: Блок оптимизации борного регулирования (БОБР) [4]. БОБР осуществляет математически корректную оптимизацию методом динамического программирования. Для повышения скорости расчета в алгоритме оптимизации используются эвристические подходы для отсека неэффективных ветвей расчета и округление переменных состояния задачи.

В БОБРе используется быстродействующая трехмерная модель активной зоны. При построении модели приняты следующие физические и математические приближения. Квазистационарная модель нейтронного поля (быстрые переходные процессы не учитываются), квазистационарная модель выделения тепла в топливе и теплоносителе (энерговыведение в топливе уравновешено теплосъемом), постоянные значения выгорания топлива - позволяют сократить круг рассматриваемых физических процессов и повысить быстродействие. Достаточная точность воспроизведения трехмерных полей достигается за счет настройки модели на выбранный момент кампании для заданного энергоблока и использования базиса главных компонент (БГК) для представления нейтронного поля и концентраций нуклидов. Для получения динамической модели и повышения быстродействия используется метод выбора минимальных подмножеств (Minimal Subset Selection).

Кроме того, для дополнительного повышения скорости расчета, в БОБРе используются современные технологии распределенных многопроцессорных вычислений.

Список литературы:

[1] A.Hornaes, J.Porsmyr, O.Berg, T.Bodal. User interface design and system integration aspects of core monitoring systems. Proceedings of the workshop on Core monitoring for commercial reactors: Improvements in systems and methods, October 4-5 1999.

[2] Yoichiro Shimazu. Application of three axial offsets trajectory method for load follow operation control in PWRs. Nuclear science and technology, 38(10):809-818, October 2001.

[3] P.J.Turinsky, Y.Jiangqing. Pressurized water reactor core maneuvering utilizing optimal control theory. Nuclear science and engineering, 129(2):97-123, 1998.

[4] А.А.Семенов, Д.А.Соловьев. Блок оптимизации борного регулирования для снижения накопления жидких радиоактивных отходов в переходных режимах ВВЭР-1000. Научная сессия МИФИ-2009, 1:48, 2009.

[5] J. R. Caves, H. Moon, M. Beczkowiak. Operating strategy generator method and utilization in POWERTRAX PWR core monitoring system. In Proc. Of the PHYSOR 2000 ANS Int. Topl. Meet. on Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computations into the Next Millennium, May 7-12, 2000, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. CD-ROM, ANS, 2000.

[6] В.В. Мамичев, П.Е. Филимонов, С.П. Аверьянова, А.И. Ковель. Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора». Атомная энергия, 105(4):237-240, октябрь 2008.