

УДК 621.039.5-52.003.13

**В.Е. Баскаков**, инженер, Запоржская АЭС,  
г. Энергодар,  
**М.В. Максимов**, д-р техн. наук, проф.,  
**О.В. Маслов**, канд. техн. наук, доц.,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## АЛГОРИТМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОБЛОКА С ВВЭР В ПОДДЕРЖАНИИ СУТОЧНОГО БАЛАНСА МОЩНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

*В.Є. Баскаков, М.В. Максимов, О.В. Маслов.*  
**Алгоритм експлуатації енергоблока з ВВЕР у підтриманні добового балансу потужності енергосистеми.** Розглядаються питання розробки алгоритма експлуатації ядерного енергоблока зі змінним навантаженням під час мінімального накопичення в'язко-пластичної деформації оболонок тепловиділяючих елементів. Показано, якщо зробити правильний вибір часу розвантаження блоку, реактивність під час процесу отруєння-розотруєння буде повторювати графік потужності енергосистеми.

*V.E. Baskakov, M.V. Maksimov, O.V. Maslov.*  
**The WWER power unit exploitation algorithm to maintain the daily power system capacity balance.** The problems of the nuclear power unit exploitation algorithm development are considered taking into account the demand to have the minimal accumulated tough-plastic deformation of fuel cladding, under changing load conditions. It has been shown that the reactivity will follow the power system output schedule during the reactor poisoning and out-poisoning, in case of correct unloading time.

Современный рыночный этап развития ядерной энергетики ставит задачу оптимального формирования тарифа на выработанную электрическую энергию. С одной стороны, ведется экономическая борьба за рынки сбыта электрической энергии, и, как следствие, возникает необходимость строительства новых АЭС и продления срока эксплуатации действующих в заданных рамках безопасности. С другой стороны, невозможно отрицать воздействия ядерной энергетики на окружающую природную среду, поэтому для минимизации ущерба от такого воздействия необходима разработка и внедрение новых технологий, приводящих, в конечном счете, к приведению в соответствие режимов производства-потребления электрической энергии при несомненном соблюдении заданных критериев безопасности.

Для повышения отпускного тарифа на электроэнергию, производимую АЭС, необходимо работу по ее генерации перенести из базовой части графика электрической нагрузки в полупиковую. В идеальном случае график выработки электроэнергии на АЭС должен соответствовать графику потребления энергосистемы.

Энергоблоки с ВВЭР-1000 проектировались для работы только в базовом режиме. Функцию же поддержания баланса производства-потребления электроэнергии в энергосистеме выполняют ТЭС и ГЭС. В настоящее время доля АЭС в производстве электроэнергии в Украине составляет около 50 %. Уменьшение доли выработки электрической энергии на тепловых станциях, в том числе и за счет отсутствия финансовых ресурсов для закупки органического топлива и низкая часть производства электроэнергии на ГЭС (около 12 %), выявили невозможность полного покрытия переменной части графика электрической нагрузки для энергосистемы страны.

Производство электроэнергии на АЭС рассчитано на работу в базовой части графика электрической нагрузки и значительно превышает долю базовых потребителей в общем энергопотреблении энергорынка страны, что создает серьезные трудности в покрытии графика электрической нагрузки. Поэтому для решения проблемы не следует недооценивать полезный вклад любого, даже самого ограниченного (без нарушения регламента) участия блоков АЭС в регулировании энергосистемы.

В странах с высокой долей производства электроэнергии на АЭС, например во Франции в балансе около 80 %, эта проблема решена эксплуатацией энергоблоков АЭС, спроектированных для работы в маневренных режимах.

Особенностью этих АЭС является:

- большое количество органов регулирования системы управления и защиты ОР СУЗ;
- часть ОР СУЗ выполнена “облегченной” (в терминах реактивности) для уменьшения влияния на поле энерговыделения при введении их в активную зону (АкЗ) реактора.

Поэтому участие блоков АЭС с ВВЭР в регулировании суточных изменений мощности энергосистемы стало актуальной задачей как для энергосистемы Украины, так и России.

Поэтому представляется необходимой разработка алгоритма эксплуатации энергоблока в переменной части графика электрической нагрузки для поддержания суточного баланса мощности энергосистемы с максимальным использованием устойчивых физико-технологических способов управления изменением мощности АкЗ реактора.

Электрическая мощность блока  $N_{ЭЛ}$  является функцией от его тепловой мощности  $N_{тепл}$  или, иначе говоря, тепловой мощности активной зоны,

$$N_{ЭЛ} = f(N_{АкЗ}). \quad (1)$$

Таким образом, задача регулирования сводится к переводу тепловой мощности АкЗ с одного уровня на другой. Само по себе это не представляет сложности, но отрицательно сказывается на целостности оболочек ТВЭЛ. Если при снижении мощности напряжения в оболочке ТВЭЛ уменьшаются, то при повышении линейной мощности за время меньшее, чем время приработки, в оболочке ТВЭЛ могут возникать напряжения выше допустимых и, как следствие, их разрушение. Даже если разрушения не произошло, в оболочке накапливается остаточная вязкопластическая деформация, после накопления которой начинают зарождаться микротрещины.

Задача регулирования тепловой мощности АкЗ в переходном режиме с одного уровня на другой сводится к разработке алгоритма, позволяющего контролированно изменять мощность АкЗ, но при этом не допускать разрушения оболочки, в первую очередь, по механизму коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), который определен критерием приемки SC-1.

Существует несколько устойчивых физико-технологических способов управления изменением мощности АкЗ реактора ВВЭР. В основу управления мощностью АкЗ положено изменение реактивности. Рассмотрим основные способы управления реактивностью, их преимущества и недостатки.

*Введение-выведение твердого поглотителя.*

Преимущества:

- быстродействие при управлении (скорость перемещения ОР СУЗ в АкЗ составляет 20 мм/с);

- процесс изменения мощности легко автоматизируется, правда, существующий автоматический регулятор мощности (АРМ) не может быть эффективно использован при маневрировании;

- с помощью перемещения соответствующей группы ОР СУЗ можно выравнивать поле энерговыделения по высоте АкЗ и предотвращать возникновение ксеноновых колебаний.

Недостатки:

- введение ОР СУЗ в АкЗ изменяет поле энерговыделения, что, в свою очередь, может послужить причиной возникновения ксеноновых колебаний. Однако если привода введены в АкЗ на полную длину, они не оказывают такого влияния;

- при движении ОР СУЗ вверх в оболочке ТВЭЛ на границе движения ОР СУЗ возникают наибольшие напряжения, что может приводить к разрушению оболочки ТВЭЛ по механизму КРН.

Более того, такой способ увеличения мощности реактора может привести к разгерметизации ТВЭЛ, даже ТВС, соседних с ТВС, где перемещаются ОР СУЗ, если в них уже накоплена остаточная вязко-пластическая деформация. По этой причине действующие технологические регламенты безопасной эксплуатации (ТРБЭ) ядерных энергетических установок (ЯЭУ) после различных разгрузок, например, предварительная защита (ПЗ), ускоренная предварительная защита (УПЗ), предписывают приводить ОР СУЗ в регламентное положение вводом жидкого поглотителя (раствора борной кислоты) и только после этого разрешают увеличение мощности за счет его выведения.

*Изменение концентрации поглотителя в теплоносителе контура.*

Преимущества:

— не изменяет геометрию поля энерговыделения по высоте при изменениях мощности АкЗ.

Недостатки:

— имеет транспортное время 4...7 мин (это время можно регулировать, изменяя расход подпитки) и, следовательно, низкое быстродействие, которое можно компенсировать упреждающим включением;

— образуются дебалансные воды, которые перерабатываются на СВО-6 и возвращаются в цикл.

*Использование температурного коэффициента реактивности.*

Преимущества:

— не изменяет геометрию поля энерговыделения по высоте при изменениях мощности АкЗ, более того, повышая давление в главном паровом коллекторе, можно температуру входа теплоносителя в реактор поддерживать постоянной при текущем уменьшении концентрации поглотителя, тем самым замедлить дрейф максимума энерговыделения вверх.

Недостатки:

— небольшой диапазон регулирования ограничен давлением в парогенераторе 63...65 кгс/см<sup>2</sup>, что соответствует давлению в главном паровом коллекторе 59,5...61,5 кгс/см<sup>2</sup> для номинальной мощности и изменяется от блока к блоку в зависимости от состояния теплообменной поверхности парогенераторов (наличия шлама, количества заглушенных трубок и т.д.);

— при увеличении давления в главном паровом коллекторе растет температура входа теплоносителя в реактор, а эта характеристика жестко ограничена таблицей допустимых режимов (ТДР) ТРБЭ;

— появляются циклические изменения параметров 2-го контура.

*Отравление-разотравление реактора.*

На рис. 1 показано изменение реактивности после снижения мощности реактора с 100 до 90 %  $N_{ном}$  — так называемая “йодная яма”, которая имеет продолжительность по времени, сопоставимую с длительностью ночной разгрузки 6...7 ч. На рис. 2 иллюстрирован процесс изменения мощности реактора операторами на ХАЭС. Для поддержания заданного уровня мощности при разгрузке, в момент отравления реактора, вводился “чистый конденсат”. За 3 ч (с 23.00 до 2.00) операторы шесть раз включали подпитку “чистого конденсата”, в то время, когда имеется избыток генерирующей мощностей в системе.

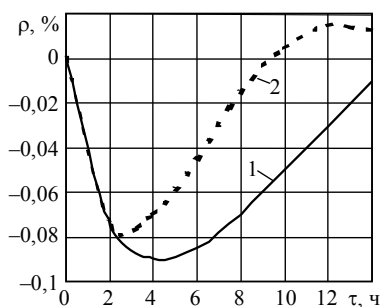


Рис. 1. Изменение реактивности после разгрузки с 3000 до 2700 МВт (йодная яма) на примере 18-й топливной кампании пятого блока ЗАЭС: начало кампании (1); конец кампании (2)

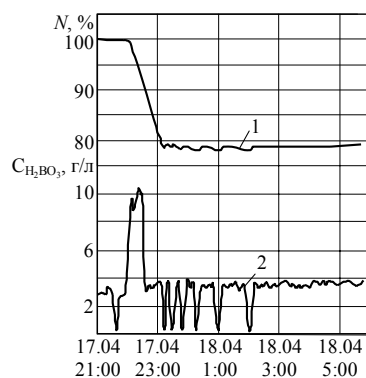


Рис. 2. Изменение нейтронной мощности (1) и концентрации борной кислоты на подпитке (2) при испытаниях на втором блоке Хмельницкой АЭС 17...18 апреля 2006 г.

Таким образом, если правильно выбрать время разгрузки блока, реактивность в процессе отравления-разотравления будет повторять график мощности энергосистемы.

Из анализа преимуществ и недостатков физико-технологических способов управления изменением реактивности разработан алгоритм изменения мощности АкЗ.

Для рассмотрения алгоритма приняты следующие исходные данные: энергоблок работает на номинальной мощности, ксеноновые колебания подавлены при помощи перемещения регулирующей группы. Снижение мощности реакторной установки (РУ) осуществляется вводом раствора борной кислоты с одновременным, насколько это возможно, повышением давления в главном паровом коллекторе, поддерживая при этом неизменной температуру входа теплоносителя в реактор. Вводом рабочей группы поддерживается оптимальный мгновенный офсет как гарантия невозникновения ксеноновых колебаний (рисунки 3 и 4, этап 1-2).

Достижение заданной мощности происходит вслед за дальнейшим ее снижением за счет отравления. Изменением положения рабочей группы удерживается оптимальный мгновенный офсет. Приблизительно через 2...3 ч отравление реактора будет максимальным, т.к. йодная яма достигнет максимума, а мощность РУ минимума. Этот интервал времени должен совпасть с минимумом потребления мощности в энергосистеме. Через временной интервал в 2...3 ч мощность РУ частично восстановится за счет разотравления (этап 2-3).

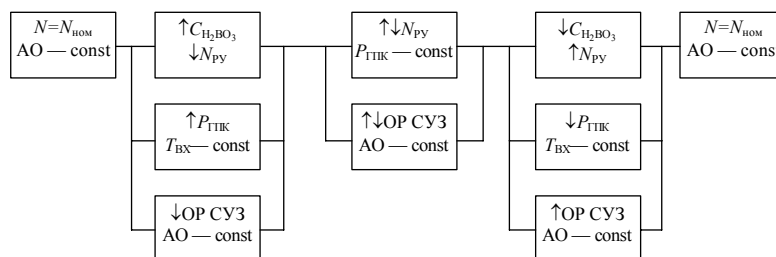


Рис. 3. Алгоритм суточного маневра мощностью блока с реактором ВВЭР-1000

Кроме этого, на этапе отравления-разотравления будут конкурировать два процесса: во первых, это дрейф максимума поля энерговыделения вверх (вниз) при снижении (увеличении) мощности за счет переходных процессов на ксеноне, и во вторых, дрейф максимума поля энерговыделения вниз на этапе отравления и вверх на этапе разотравления за счет связи этого процесс с отрицательным офсетом до начала маневра.

Конкуренция этих двух процессов повышает устойчивость АкЗ и минимизирует количество переключений оператора по поддержанию оптимального аксиального офсета.

Восстановление номинальной (заданной) мощности РУ происходит на этапе 3-4. РУ нагружается вводом "чистого дистиллята" в контур с одновременным снижением давления в главном паровом коллекторе, отслеживая температуру входа. Рабочая группа ОР СУЗ извлекается из АкЗ для поддержания оптимального мгновенного офсета. После достижения номинального уровня мощности автоматически регулятор поддерживает его на заданном уровне. Подавление возникающих ксеноновых колебаний осуществляется перемещением регулирующей группы.

Преимуществами предлагаемого алгоритма являются:

- значительное сокращение количества переключений, по сравнению с алгоритмом, проходящим испытания на втором блоке ХАЭС, что снижает вероятность ошибок действий эксплуатирующего персонала;
- уменьшение расхода чистого дистиллята, борного концентрата и других реагентов;
- уменьшенное количество дебалансных вод;
- улучшение условий работы топлива.

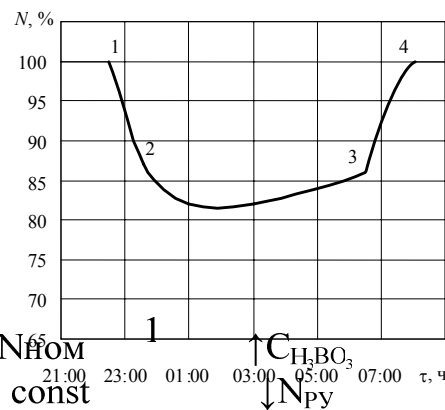


Рис. 4. Изменение мощности блока по предлагаемому алгоритму

Критерием эффективности алгоритма будем считать накопленную в процессе маневра остаточную вязко-пластическую деформацию оболочки твэл: чем она меньше, тем более эффективен алгоритм, и тем большее количество циклов маневрирования возможно выполнить в период эксплуатации без разгерметизации оболочек твэл.

Поступила в редакцию 17 мая 2007 г.