

**УДК 621.039**

**Е.А. Данилова**, канд. техн. наук,  
**Д.В. Малимоненко**, маг.  
НТУ "ХПИ", г. Харьков

## **РАБОТА ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000 В МАНЕВРЕННОМ РЕЖИМЕ ПРИ МИНИМАЛЬНОМ БОРНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ**

**Введение.** В настоящее время доля выработки электроэнергии на АЭС Украины составляет около 50% при суммарной установленной мощности АЭС 13,8 ГВт. Согласно Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года установленная мощность АЭС должна составить 25 ГВт [1]. Сегодня производство электроэнергии на АЭС рассчитано на работу в базовой части графика электрической нагрузки и значительно превышает долю базовых потребителей в общем энергопотреблении страны. Увеличение доли выработки электроэнергии на АЭС приведет к необходимости перенести работу АЭС по генерации электроэнергии из базовой части графика электрической нагрузки в полупиковую. В идеальном случае график выработки электроэнергии на АЭС должен соответствовать графику потребления энергосистемы. Поэтому работа блоков АЭС с ВВЭР в маневренном режиме стало актуальной задачей для энергосистемы Украины.

Наибольший опыт развития и внедрения маневренности АЭС с PWR (аналог ВВЭР-1000) имеет Франция. Особенностью этих АЭС является наличие большого количества органов регулирования системы управления и защиты реактора (ОР СУЗ). Способ управления французских реакторов в маневренном режиме основан на использовании нескольких групп ОР СУЗ разной эффективности, которые вводятся в активную зону и перемещаются в неизменном порядке, установленном по убыванию эффективности групп. При введении управляющей группы в разные (по высоте) половины активной зоны появляется возможность воздействия на реактивность и распределение энерговыделения без привлечения борного регулирования [2].

Украинские энергоблоки с ВВЭР-1000 проектировались для работы только в базовом режиме. Расчетными исследованиями установлена принципиальная возможность работы реактора в маневренном режиме [2]. Однако это требует непрерывного управления реактивностью и распределением энерговыделения в активной зоне. Для действующих ВВЭР – 1000 эта возможность существенно ограничена недостаточным числом ОР СУЗ. Управление типовым реактором ВВЭР-1000 заключается в перемещении 61 ОР СУЗ с применением системы борного регулирования. Возникает задача создания алгоритма работы энергоблока с ВВЭР-1000 в маневренном режиме с поддержанием при этом оптимального аксиального офсета ОР СУЗ при минимальном борном регулировании. Технология борного регулирования такова, что введение и выведение борной кислоты осуществляется путем разбавления теплоносителя или дистиллятом или концентрированным раствором борной кислоты.

Следовательно, минимизация борного регулирования приведет к уменьшению жидких радиоактивных отходов.

**Управление мощностью и энергораспределением в активной зоне реактора.**

Наиболее жесткие требования при маневренном режиме работы предъявляются к подсистеме управления мощностью и энергораспределением в активной зоне реактора. Неравномерность поля энерговыделения свидетельствует об изменении линейной мощности твэлов, что может привести к преждевременному выходу из строя тепловыделяющих сборок. Одной из основных величин, характеризующих нейтронное поле, и следовательно, энерговыделение в активной зоне реактора является аксиальный офсет, являющийся мерой изменения аксиального энергораспределения.

Аксиальный офсет в процентах (АО) определяется как разность мощностей верхней ( $P_V$ ) и нижней ( $P_H$ ) половин активной зоны, отнесенная к ее полной мощности ( $P$ )

$$AO = \frac{P_V - P_H}{P} \quad (1)$$

Выбор АО в качестве характеристики нейтронного поля обоснован тем, что его первая гармоника вносит основной вклад в распределение энерговыделения в активной зоне реактора. Поэтому поведение АО в переходных режимах во многом характеризует энергораспределение, и, управляя аксиальным офсетом, можно достаточно эффективно управлять нейтронным полем.

При следовании за нагрузкой каждый раз, когда в результате изменения мощности и движения стержней возникает опасность, что АО мощности выйдет за допустимые пределы (рис.1), оператор должен установить положение стержней, при котором АО имеет оптимальную величину.

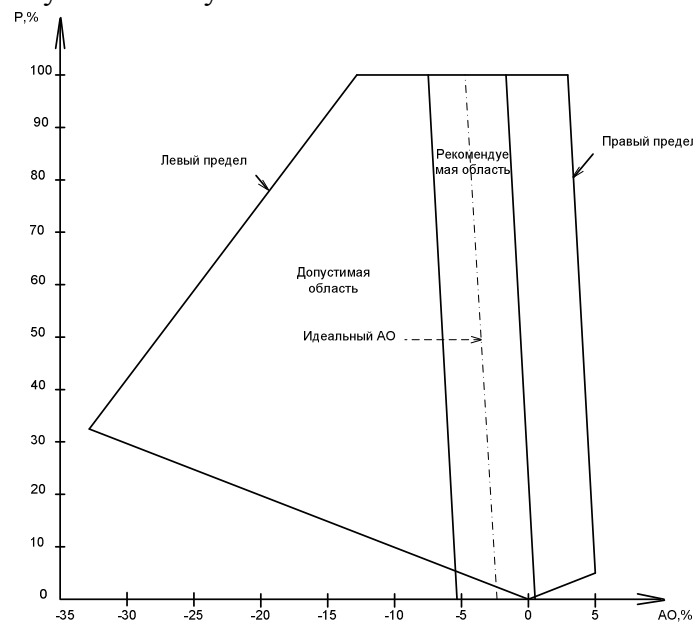


Рис.1. Рабочая область реактора и ее границы

Известен способ управления реактором при изменении его мощности, заключающийся в отслеживании данных изменений системой регулирования турбины при помощи регулирующего клапана, изменяющего расход пара на турбину [4].

Недостатком описанного способа является игнорирование поддержания оптимального аксиального офсета в активной зоне реактора и отсутствие требований по минимизации борного регулирования.

**Работа энергоблока с ВВЭР-1000 в маневренном режиме с поддержанием при этом оптимального аксиального офсета.** Авторами статьи предлагается создать

алгоритм работы энергоблока с ВВЭР-1000 в маневренном режиме с поддержанием при этом оптимального аксиального офсета ОР СУЗ при минимальном борном регулировании на базе математического аппарата теории нечетких множеств.

Рассмотрим решение поставленной задачи на примере снижения мощности реактора до 30%. Подобный эксперимент проводился на 5 блоке ЗАЭС. Зависимость снижения нейтронной мощности реактора (N) в процентах во времени приведена на рис.2

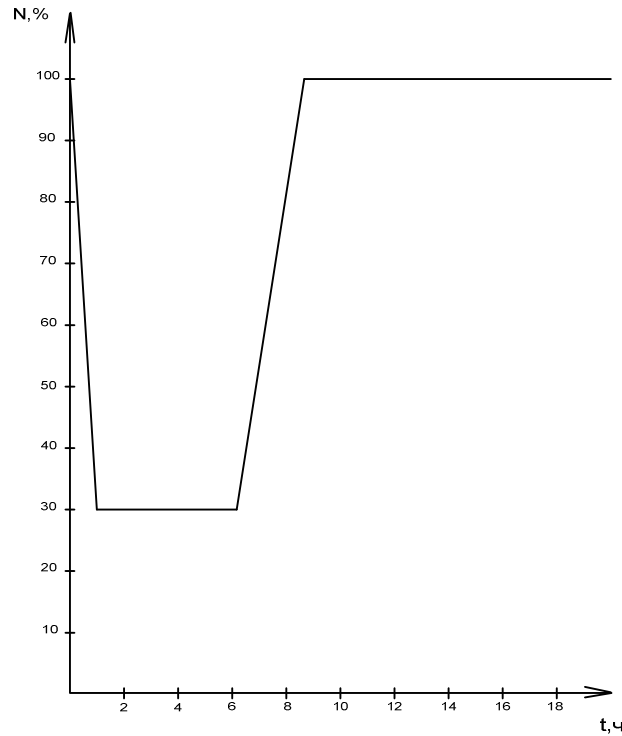


Рис.2 Изменение нейтронной мощности реактора ВВЭР-1000

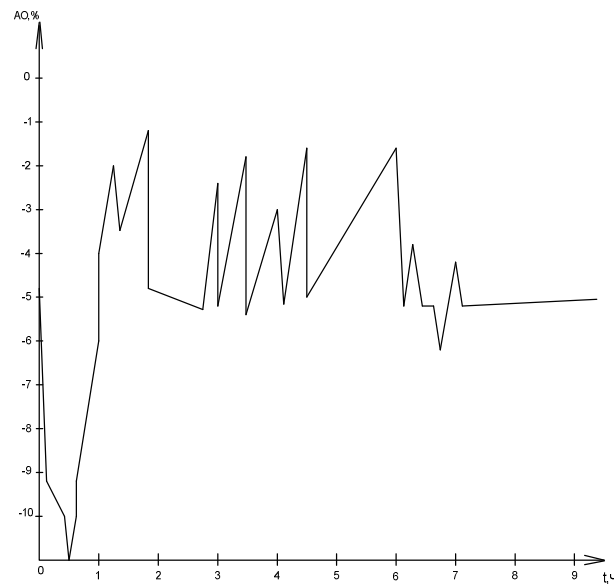


Рис.3 Изменение аксиального офсета при снижении мощности реактора до 30%

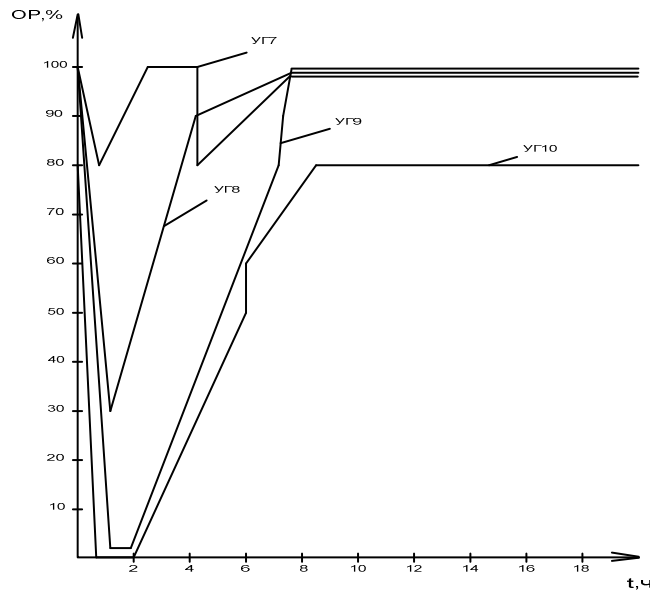


Рис. 4 Положение стержней управляющих групп при снижении мощности

Достижение оптимального АО реактора (рис. 3) обеспечивается путем перемещения в активной зоне реактора соответствующих групп ОР СУЗ (рис. 4). Выбор групп ОР СУЗ и расчет глубины их погружения в активную зону выполнен по методу цуга [2], который заключается в том, что при заданных значениях глубины погружения – величины, пропорциональной суммарному количеству поглотителя, введенного в активную зону и дистанции – дистанция групп в цуге, можно однозначно определить положение цуга и, следовательно, положение всех управляющих групп. Управление способом цуга устанавливает однозначное соответствие между управляющими и управляемыми параметрами: погружение цуга отвечает за управление реактивностью, дистанция цуга – мощностью.

От сочетания полученного АО и глубины вхождения поглощающих стержней ОР СУЗ в активную зону реактора, по сути, зависит введение в теплоноситель дистиллята или раствора борной кислоты, или отсутствие необходимости последующих действий. Так как эта зависимость представляет собой эмпирические знания эксперта, т.е. носит нечеткий характер, то авторами для принятия решения предлагается использовать теорию нечетких множеств.

В качестве входных лингвистических переменных будем рассматривать

АО: <смещение аксиального офсета>,

ПС: <положение поглощающих стержней СУЗ>.

Разобьем каждую входную переменную на лингвистические термы, характеризующие особенности состояния данной переменной

АО: <смещение аксиального офсета> на следующие термы:

Б: <большое>, С: <среднее>, М: <маленькое>.

ПС: <положение поглощающих стержней СУЗ> на следующие термы:

В: <высоко>, С: <в середине>, Н: <низко>.

Выходную лингвистическую переменную ВР: <борное регулирование> разобьем на три терма:

В: <ввод борной кислоты>, Н: <отсутствие действий>, Р: <ввод дистиллята>.

Каждый терм имеет характеристическую функцию, называемую функцией принадлежности, которая характеризует степень достоверности понятия, соответствующего терма, в зависимости от текущего значения величины измеряемого параметра. Набор функций принадлежности должен перекрывать возможный диапазон измеряемой величины (рис.5).

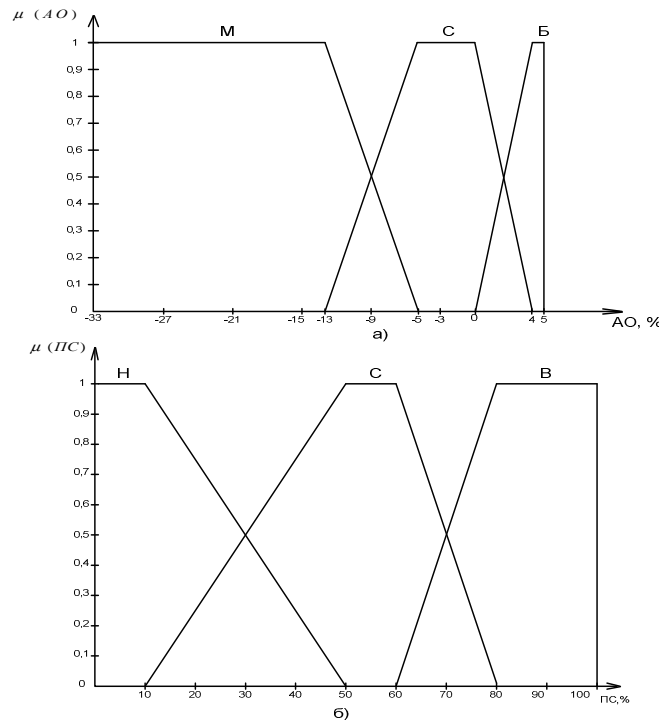


Рис.5 Функции принадлежности входных лингвистических переменных: а) смещение аксиального офсета б) положение поглощающих стержней СУЗ

Решение задачи выполняется в три этапа: фаззификация, вычисление правил, дефаззификация. Результатом работы блока фаззификации является массив нечётких выходов, которые представляют собой набор пар: терм и его значение достоверности. Для вычисления правил используются нечёткие входы, полученные от блока фаззификации, и правила, находящиеся в базе знаний. Правило имеет вид ЕСЛИ [ ] И [ ] ТО [ ]. В левые части правил перебираются возможные описания ситуации на входе системы, а в правой части указывается, какой терм в этом случае описывает правильную реакцию системы. Согласно экспертным данным [5] база правил будет содержать три правила вида:

- П1: ЕСЛИ [АО <маленькое>] И [ПС не<высоко>] ИЛИ [АО <среднее>] И [ПС <низко>] ТО [<ввод борной кислоты>]
- П2: ЕСЛИ [АО <большое>] И [ПС <в середине>] ИЛИ [АО не <маленькое>] И [ПС<высоко>] ТО [<ввод дистиллята>]
- П3: ЕСЛИ [АО <маленькое>] И [ПС<высоко>] ИЛИ [ АО<среднее>] И [ПС< в середине>] ИЛИ [АО<большое>] И [ПС<низко>] ТО [<отсутствие действий>]

На этапе дефаззификации происходит преобразование нечёткой информации, содержащейся в виде значений достоверности терма, в чётко определённое значение. Дефаззификация производится по фигуре, полученной путём сложения всех функций принадлежности термов выходной переменной.

Применяем центроидный метод дефаззификации, находим результат объединения всех правил по формуле:

$$u = \frac{\sum_i \mu_i \cdot u_i}{\sum_i \mu_i}, \tag{2}$$

где  $\mu_i$  – степень выполнения левой части  $i$ -го правила  $\mu_i \in [0,1]$   
 $u_i$  - степень достоверности правой части  $i$ -го правила.

$u_i$  может принимать три значения для термов выходной переменной:

В: <ввод борной кислоты>  $u_i=1$

Р: <ввод дистиллята>  $u_i=-1$

Н: <отсутствие действий>  $u_i=0$

Если полученное  $u > 0$ , то на выходе системы нечеткого вывода получаем совет <ввод борной кислоты> напором  $F = 9 \cdot u, \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Если  $u < 0$ , то получаем совет <ввод дистиллята> напором  $F = 27 \cdot u, \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Если  $u = 0$ , то нет необходимости включать систему борного регулирования.

При снижении мощности со 100 до 30% получаем значения лингвистических переменных ПС=15%, АО=-5%, которые поступают на блок фаззификации. Применяя центроидный метод дефаззификации по формуле (2), получаем  $u=0,875$ , а на выходе системы нечеткого вывода совет <ввод борной кислоты> напором  $F=7,875 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

**Выводы.** Разработан алгоритм работы энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 в маневренном режиме. При этом поддерживается оптимальный аксиальный офсет поглощающими стержнями системы управления и защиты реактора при минимальном борном регулировании с целью сокращения жидких радиоактивных отходов.

### Литература

1. Энергетична стратегія України на період до 2030 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. № 145
2. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П., Филимонова М.П. Управление группами рабочих органов СУЗ в маневренном режиме работы ВВЭР-1000 // Атомная энергия, Т. 84, Вып.5, май 1998.
3. Нигматуллин И.Н., Нигматуллин Б.Н. Ядерные энергетические установки. М.: Энергоатомиздат, 1986г
4. Митин В.И., Филимонов П.Е. Способ управления ядерной энергетической установкой. Патент РФ №2173895, МПК G 21C 7/00, опубл. 20.09.2001.
5. Turan J.-L., Siarry P., Mohand S. A fuzzy rule Base for the Improved Control of a Pressurized Water Nuclear Reactor // Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 121, Dec 1996

---



---

### РОБОТА ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС ІЗ РЕАКТОРОМ ВВЕР-1000 У МАНЕВРЕНОМУ РЕЖИМІ ПРИ МІНІМАЛЬНОМУ БОРНОМУ РЕГУЛЮВАННІ

О.А. Данилова, Д.В. Малимоненко

*Розроблено алгоритм роботи енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР-1000 у маневреному режимі. При цьому підтримується оптимальний аксіальний офсет поглинаючими стержнями системи керування й захисту реактора при мініальному борному регулюванні з метою скорочення рідких радіоактивних відходів.*

### POWER UNIT WORK AES WITH A REACTOR WWER-1000 IN A MANEUVERABLE MODE AT MINIMUM BORIC REGULATION

O.A. Danilova, D.V. Malimonenko

*The algorithm of power unit work AES is with a reactor of type WWER-1000 in a maneuverable mode is developed. An optimum axial-flow offset is thus supported by the suctive bars of control system and protect reactor at the minimum boric regulation for the purpose of reduction of the rare radioactive offcuts reducation.*