

УДК 621.311.018.41

Башарат Али (асп., каф. АиТЭУ), В.А. Иванов, д.т.н., проф.

## АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРА ВВЭР-440 ПРИ УМЕНЬШЕНИИ ЧАСТОТЫ ТОКА В СЕТИ

При условии, когда все электростанции уже работают на максимальных уровнях мощности, и не имеется никакого резерва для увеличения мощности, чтобы регулировать частоту, частота энергосистемы уменьшается. Уменьшение частоты тока в системе вызывает снижение числа оборотов главных циркуляционных и питательных насосов и, как следствие, приводит к уменьшению расходов теплоносителя через активную зону реактора и питательной воды. В этом случае остается только один вариант регулирования частоты — разъединять несколько потребителей. Поскольку этот вариант нежелателен, то возникает вопрос: могут ли АЭС продолжать работу с уменьшенной частотой сети? В связи с этим возникает необходимость анализа безопасности, уровня уменьшения мощности реактора и возможности дальнейшей работы.

Для рассмотрения динамики первого и второго контура АЭС с реактором ВВЭР-440 была сделана математическая модель в программе Mathcad. Система дифференциальных уравнений была решена с использованием метода Эйлера. Для анализа приняты главные циркуляционные насосы ГЦН-317 и питательные насосы ПЭ-850-65. Эти насосы вращаются асинхронными двигателями, скорость вращения ротора которых изменяется практически пропорционально изменению частоты питающего тока. По мнению некоторых авторов, можно принять изменение оборотов двигателя, равным изменению частоты в энергосистеме, потому что погрешность от такого упрощения не превышает 5...10 %. Зависимость производительности ГЦН от частоты вследствие отсутствия статического противодействия носит прямолинейный характер с коэффициентом статизма, близким к единице. Такие характеристики ГЦН приводят к снижению расхода теплоносителя на 8...10 % при снижении частоты до 46...45 Гц. Для питательных насосов из-за существования статического противодействия уменьшение расхода для того же уменьшения частоты в сети больше и составляет 27...35 %.

В первом этапе анализ был сделан только для реактора, и считалось, что СУЗ не работает. При расчете температур для отдельных участков тепловыделяющего элемента активная зона реактора была разделена по высоте на 20 участков, и был использован метод численного интегрирования. Получены графики изменения температур теплоносителя, оболочки твэла и топлива. Результаты расчетов показали, что критический тепловой поток по длине канала зависит от коэффициента объемной неравномерности тепловыделения  $K_v$  и снижения частоты сети  $\Delta f_c$ . Для рассмотрения изменения критической и действительной тепловых нагрузок по высоте твэла и запаса до кризиса теплообмена по мощности были произведены расчеты при различных значениях  $K_v$  (от 3 до 2) и  $\Delta f_c$  (от 50 до 45). Для расчета критического теплового потока были использованы различные соотношения.

Результаты расчетов показали, что при уменьшении частоты сети от 50 до 48 Гц расход теплоносителя через реактор уменьшается на 4 %, и реактор может саморегулироваться благодаря отрицательному коэффициенту реактивности, и нейтронная мощность уменьшается только на 0.17 % ее номинального значения. Если  $K_v \leq 2.6$ , коэффициент запаса до кризиса теплообмена уменьшается на 1...3 % его номинального значения, но кризис теплообмена не происходит. При уменьшении частоты

от 50 до 47 Гц нейтронная мощность уменьшается на 0.25 %, и реактор может работать безопасно если  $K_v \leq 2.6$ .