
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.4

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_51

АНАЛИЗ ШУМОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ ПРЯМОГО ЗАРЯДА НА МАНЕВРЕННЫХ РЕЖИМАХ ВВЭР**Г.В. Аркадов**

ORCID: 0009-0005-4464-9973 e-mail: arkgen47@gmail.com

Некоммерческое партнерство содействии развитию системной инженерии «Райз»
Москва, Россия**В.И. Павелко**Акционерное общество «Научно-технический центр «Дианром»
Москва, Россия**М.Т. Слепов**

ORCID: 0000-0001-5563-0526 e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии
на атомных станциях, Нововоронежская атомная станция
Нововоронеж, Россия

Исследовано влияние перемещения органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) на нейтронный шум датчиков прямого заряда (ДПЗ) при проведении маневренных режимов реакторной установки ВВЭР-1200. В исследуемых режимах частота шагов регулирующих ОР СУЗ резко возрастает по сравнению со стационарным 100 % режимом мощности распределительного устройства (РУ). Их воздействие на нейтронный поток носит высокочастотный, вплоть до 8 Гц, глобальный характер. Обнаружено резонансное возбуждение нейтронного поля на частоте акустической стоячей волны – 8,6 Гц при перемещении ОР СУЗ.

Ключевые слова: нейтронный шум, автоспектральная плотность мощности, когерентность, акустическая стоячая волна, датчик прямого заряда, ВВЭР-1200, маневренный режим, ксеноновые колебания.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Аркадов, Г.В. Анализ шумовой составляющей сигналов датчиков прямого заряда на маневренных режимах ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 51-61. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_51

ANALYSIS OF NOISE COMPONENT OF DIRECT CHARGE SENSOR SIGNALS IN MANEUVERABLE VVER MODES**G.V. Arkadov**

ORCID: 0009-0005-4464-9973 e-mail: arkgen47@gmail.com

Non-profit Partnership to promote the Development of system Engineering «Rise»
Moscow, Russia**V.I. Pavelko**Joint Stock Company «Scientific and technical center «Diaprom»
Moscow, Russia

M.T. Slepov

ORCID: 0000-0001-5563-0526 e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Branch of the Joint-Stock Company «Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants» Novovoronezh Nuclear Power Plant
Novovoronezh, Russia

Abstract. The influence of the movement of the control and protection system (CPS) control elements on the neutron noise of direct charge sensors during maneuvering modes of the VVER-1200 reactor is investigated. The frequency of the steps of the CPS control elements increases sharply in the studied maneuverable modes compared to the stationary full power (100%) mode of the switchgear. Their impact on the neutron flux is high-frequency, up to 8 Hz, global in nature. Resonant excitation of the neutron field at the frequency of the acoustic standing wave (8.6 Hz) when moving the CPS control elements was detected.

Key words: neutron noise, autospectral power density, coherence, acoustic standing wave, direct charge sensor, water-water energetic reactor, VVER-1200, maneuverable mode, xenon oscillations.

FOR CITATION: G.V. Arkadov, V.I. Pavelko, M.T. Slepov. Analysis of noise component of direct charge sensor signals in maneuverable VVER modes. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 51-61.
DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_51

Введение

Многолетние разработки маневренных режимов водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) находятся на стадии натурных экспериментов [1]. В июле 2022 г. были выполнены маневренные испытания на блоке 1 НВАЭС-2. Планировалось, что в течение суток реактор вначале будет переводиться с максимальной допустимой скоростью (3 % / мин) из состояния 96 % в состояние 77 % номинальной мощности, далее в течение 5 ч оно должно быть стационарным. Затем с максимальной допустимой скоростью (1 % / мин) производится подъем мощности вновь до 96 %, и данное стационарное состояние поддерживается в течение 19 ч. В итоге получаем суточный цикл: 96 % – 77 % – 96 %. Планировалось пять таких суточных циклов, следующих непрерывно один за другим. После завершения данного этапа испытаний планировался цикл 96 % – 56 % – 96 % в течение следующих пяти суток, непрерывно один за другим (рис. 1). Предполагалось, что всякий раз в одно и то же время суток (8.00 мск) мощность РУ будет снижаться с 96 до 77 % пять раз, а затем с 96 до 56 % также пять раз. Таким образом, в десятисуточных испытаниях достигаются маневренные режимы с заданной кривой изменения мощности с суточным периодом.

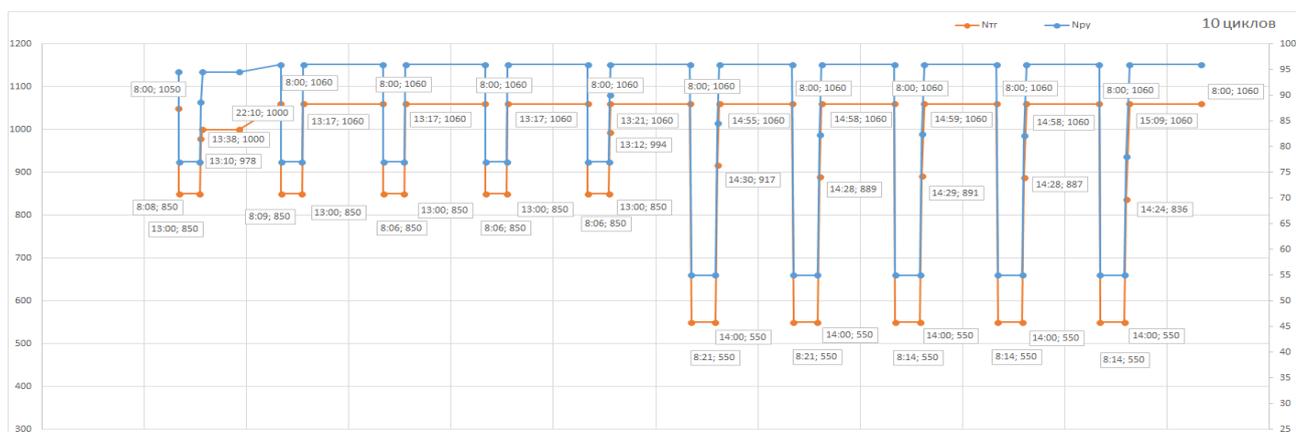


Рис. 1. Десять суточных циклов мощности турбогенератора и реактора

Fig. 1. Ten daily power cycles of the turbogenerator and reactor

Любое изменение мощности РУ вызывает ксеноновые колебания (КК). Их подавление – штатная операция при эксплуатации РУ любого типа ВВЭР. Для реализации планируемого суточного изменения мощности, очевидно, необходимо решать и задачу подавления КК. Но это не является единственной задачей, которую предстоит решить для достижения маневренного режима. Нисходящее воздействие на мощность РУ вызывает нисходящий тренд КК длиной в четверть периода (порядка 7 ч); т.н. свободные КК без последующих управлений мощностью имеют период от 28 до 30 ч (рис. 1). Таким образом, в течение первых пяти часов на пониженной мощности будет наблюдаться монотонный нисходящий тренд свободных КК. В соответствии с программой испытаний, в этот период необходимо удерживать постоянную мощность РУ на уровне 77 %, для чего необходимо производить подавление КК. Поэтому оно начинается сразу после достижения 77 % мощности РУ и производится с помощью перемещения регулирующих групп № 11 и № 12 вверх, а также водообменом борной кислотой (БК) или чистым дистиллятом (ЧД). Регулирующие группы перемещаются автоматически при помощи авторегулятора мощности (АРМ), при этом допускается также совмещение автоматического и ручного управления. Цель регулирования – подавление КК и удержание с высокой точностью стационарного уровня мощности 77 % с изменением при этом положения регулирующих групп ОР СУЗ и концентрации БК. После возврата с 77 на 96 % мощности РУ у свободных КК будет наблюдаться тренд вверх (увеличение мощности). Цель управления аналогична: удерживать стационарную мощность РУ, но уже на уровне 96 % и уже в течение 19 ч до окончания суток. В начале этого интервала времени мощность РУ увеличивается за счет перемещения 12-й группы ОР СУЗ вверх, а после достижения заданного уровня мощности 12-я группа вновь вводится в активную зону, и стабилизация мощности РУ производится водообменом с уменьшением концентрации БК [2].

Источники измерительной информации в испытаниях маневренных режимов

Две штатные системы контроля – система верхнего блочного уровня (СВБУ) и система внутриреакторного контроля (СВРК) – в режиме реального времени синхронно накапливают архивы штатных сигналов со скоростью не более одного измерения в 1 с (т.е. с частотой дискретизации не более 1 Гц). Персонал отдела технической диагностики Нововоронежской Атомной электростанции (ОТД НВАЭС) извлек из архивов этих систем выборку основных штатных сигналов за период 11 суток с 10 по 20 июля с частотой дискретизации 0,0167 Гц (т.е. одно измерение за 60 с), всего 16000 точек [3, 4]. Очевидно, что данная выборка не содержит быстрых компонент процессов, но отражает их общий характер на длительном (11 суток) интервале времени. Данный временной интервал покрывает весь интервал испытаний маневренных режимов. Выборка включает:

- мощность РУ;
- температуры теплоносителя (ТН) горячей и холодной ниток по петлям;
- концентрацию БК;
- положения 10, 11 и 12 групп ОР СУЗ;
- уровень ТН в компенсаторе давления (КД);
- аксиальный офсет (АО), вычисленный по сигналам датчиков прямого заряда (ДПЗ);
- скорректированные средние токи ДПЗ 06-23 (7 штук) с ОР СУЗ 12-й группы.

Специально для анализа маневренных режимов был составлен план регистрации «быстрых» процессов, в соответствии с которым с высокой частотой дискретизации (1 кГц) производилась синхронная многоканальная регистрация шумовых компонент сигналов:

- ДПЗ (14 шт. сигналов ДПЗ двух сборок каналов нейтронных измерений – КНИ);
- внезонных ионизационных камер – ИК (3 шт.);
- корпусных (4 шт.) и петлевых (8 шт.) акселерометров.

Длительность регистрации «быстрых» процессов составляет несколько часов. В данной работе рассматривается первая запись, длительность которой составила 400 мин, начало соответствует времени достижения стационарного состояния 77 %, а конец – стационарному уровню 96 %. В каждой записи коммутировалась новая пара КНИ [3, 4]. В первой из них в качестве первого КНИ выступала сборка 04-29, в качестве второго КНИ – сборка 04-27. Необходимо отметить, что КНИ 04-29 установлена в тепловыделяющей сборке (ТВС), где перемещается ОР СУЗ 12-й группы, а КНИ 04-27 находится в соседней ТВС. Для получения спектральных характеристик перечисленных сигналов процессы подвергались цифровой фильтрации и разреживанию так, чтобы верхняя частота составляла или 32 или 16 Гц.

Совместный анализ «быстрых» и «медленных» измерений

На интервале времени длительностью 400 мин, во вторые сутки испытаний, начиная с мощности 77 % и заканчивая мощностью 96 %, были произведены шумовые измерения с переносом сигналов в соответствии с предыдущим разделом [5, 6]. В «медленных» измерениях положение ОР СУЗ во времени на уровне мощности 77 % представляется «медленной» монотонно возрастающей ступенчатой функцией времени. В действительности система группового и индивидуального управления (СГИУ) генерирует довольно высокочастотные управления положением ОР СУЗ. Так, в шумах нейтронных датчиков внезонных (ИК) и внутризонных (ДПЗ) наблюдаются δ -образные возмущения нейтронного потока значительной по отношению к фону амплитуды (рис. 2). ДПЗ с номерами 7, 6, 5, 4, 3 синхронно реагируют на перемещения ОР СУЗ, что свидетельствует об общей причине их происхождения. Амплитуда одного выброса может превосходить СКЗ фона в десятки раз, что значительно увеличивает мощность (дисперсию) процесса [3, 4].

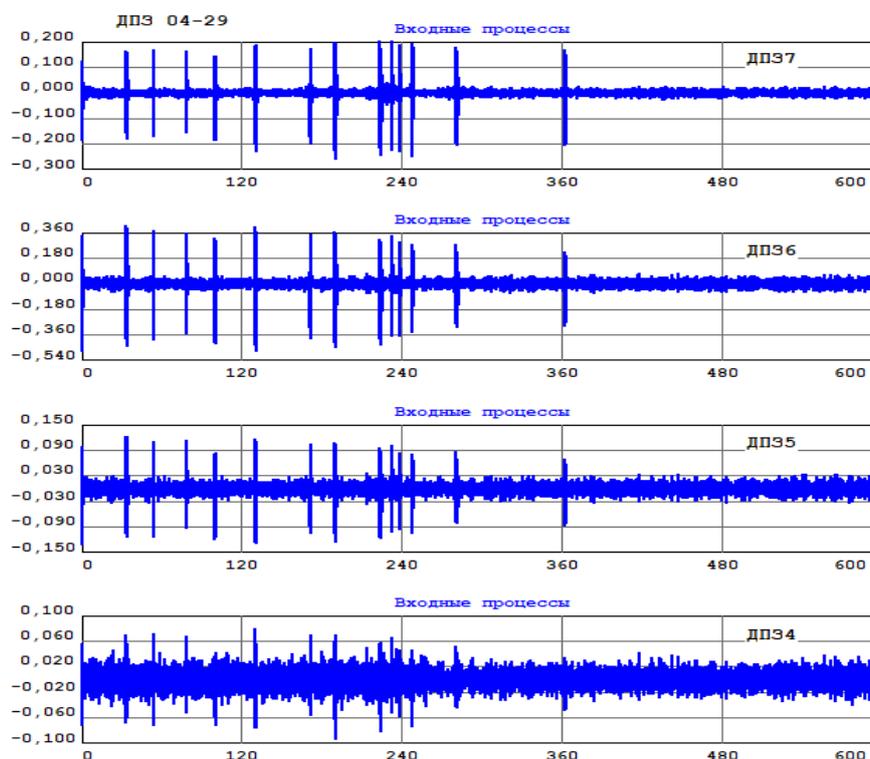


Рис. 2. Реализации шумов верхних ДПЗ (ДПЗ7,6,5,4 – сверху – вниз) в ТВС 04-29 с ОР СУЗ 12 группы на уровне мощности 77 % в течение 10 мин

Fig. 2. Implementation of noise from the upper direct charge sensors (DPZ 7,6,5,4 – top to down) in the fuel assembly 04-29 with the CPS control elements of group 12 at a power level of 77 % for 10 minutes

ОР СУЗ 12-й группы находится в той же ТВС, что и измеряемые ДПЗ КНИ № 04-29, т.е. расстояние между ПС СУЗ и ДПЗ7 составляет несколько см, а 18 направляющих каналов для перемещения ОР СУЗ в одной ТВС обладают центральной симметрией по отношению к вертикальной оси симметрии ТВС и равномерно распределены в поперечнике ТВС. Измерительный канал КНИ смещен от вертикальной оси симметрии ТВС так, что в нескольких см окрестности КНИ расположены четыре ПС СУЗ. Их перемещение, как локальное возмущение нейтронного поля, фиксируется ближайшими ДПЗ.

Для оценки одной спектральной характеристики сигналов ДПЗ выбирался участок в 10 мин, т.е. на всей длине реализации (400 мин) было получено 40 штук автоспектров плотности мощности (АСПМ), которые представляются в трехмерном виде «водопада» спектра (рис. 3), таким образом, на рис. 2 показаны выборки нейтронных шумов для получения всего одной АСПМ. На каждом таком десятиминутном интервале встречается разное число δ -образных возмущений, но в любом случае они определяют гребенчатую форму спектра. Например, на стационарном уровне мощности в 77 %, средняя интенсивность перемещений 12-й группы ОР СУЗ составляет величину порядка одного шага за минуту. Выбросы нейтронного поля из-за перемещения ОР СУЗ создают импульсную нестационарность. В процессе увеличения мощности РУ с 77 до 96 % за 6,5 мин ОР СУЗ совершил 31 перемещение, из них 14 перемещений с двойным шагом и 17 – с одинарным. Таким образом, всего 45 одинарных шагов или порядка семи шагов за одну минуту, т.е. каждая из сорока АСПМ на рис. 3 имеет индивидуальный образ. При этом не имеет значения, в каком месте реализации встретилось δ -образное возмущение и каково их число. После спектрального преобразования получим гармонический ряд частотных максимумов. Единственный шаг ОР СУЗ (единственный выброс) на интервале времени оценивания АСПМ 10 мин – слабо увеличивает общую дисперсию сигнала, а гребенчатая структура находится на уровне собственного нейтронного фона [7-9]. Но, уже начиная с момента совместного движения 11 и 12 групп ОР СУЗ появляется характерная гребенчатая структура в АСПМ сигнала ДПЗ и в функции когерентности сигналов ИК1-ИК2 (красная вертикальная стрелка на рис. 4).

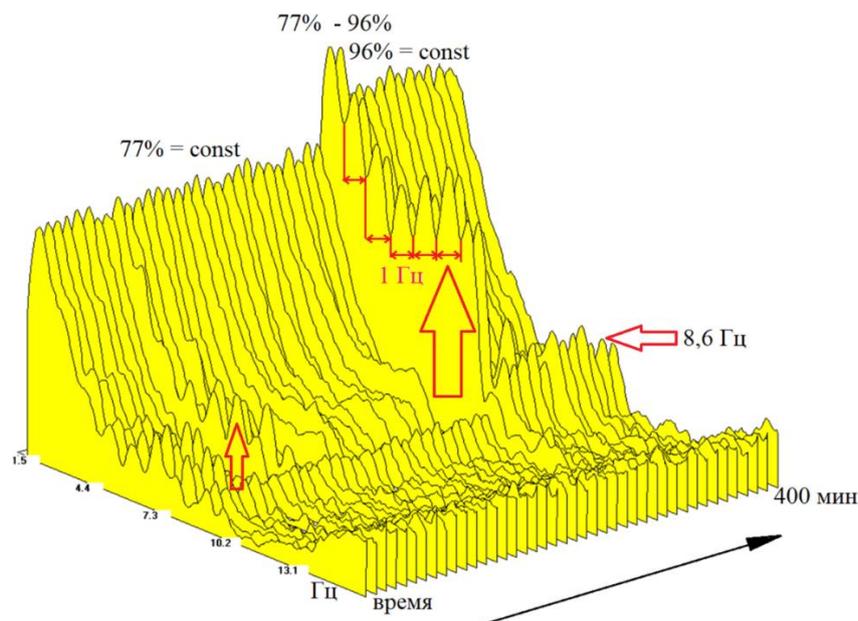


Рис. 3. Водопад спектров АСПМ в логарифмическом масштабе для сигнала ДПЗ6 в течение всего времени «быстрых» измерений

Fig. 3. Waterfall of power density autospectra on a logarithmic scale for the direct charge sensor DPZ6 signal during the entire time of «fast» measurements

Частота дискретизации СВРК величиной не более 1 Гц не дает информацию о высокочастотном возмущении со стороны ОР СУЗ, поэтому при исследовании маневренных режимов требуется дополнительно проводить высокочастотную регистрацию нейтронных шумов. Если развернуть во времени δ -образные возмущения (рис. 2), то оказывается, что они имеют длительность в точности 1 с и состоят из высокочастотного наполнения, в которых неоднократно повторяется элементарный шаг длительностью 0,125 с, или частота 8 Гц, что свидетельствует о высокочастотном полигармоническом возмущении нейтронного поля (рис. 5). Теперь гребенчатая структура обрела числовые параметры: спектральная характеристика шума ДПЗ или ИК имеет гребенчатый вид с шагом по частоте в точности 1 Гц, и эти гармоники достигают, по крайней мере, частоты 8 Гц (рис. 3).

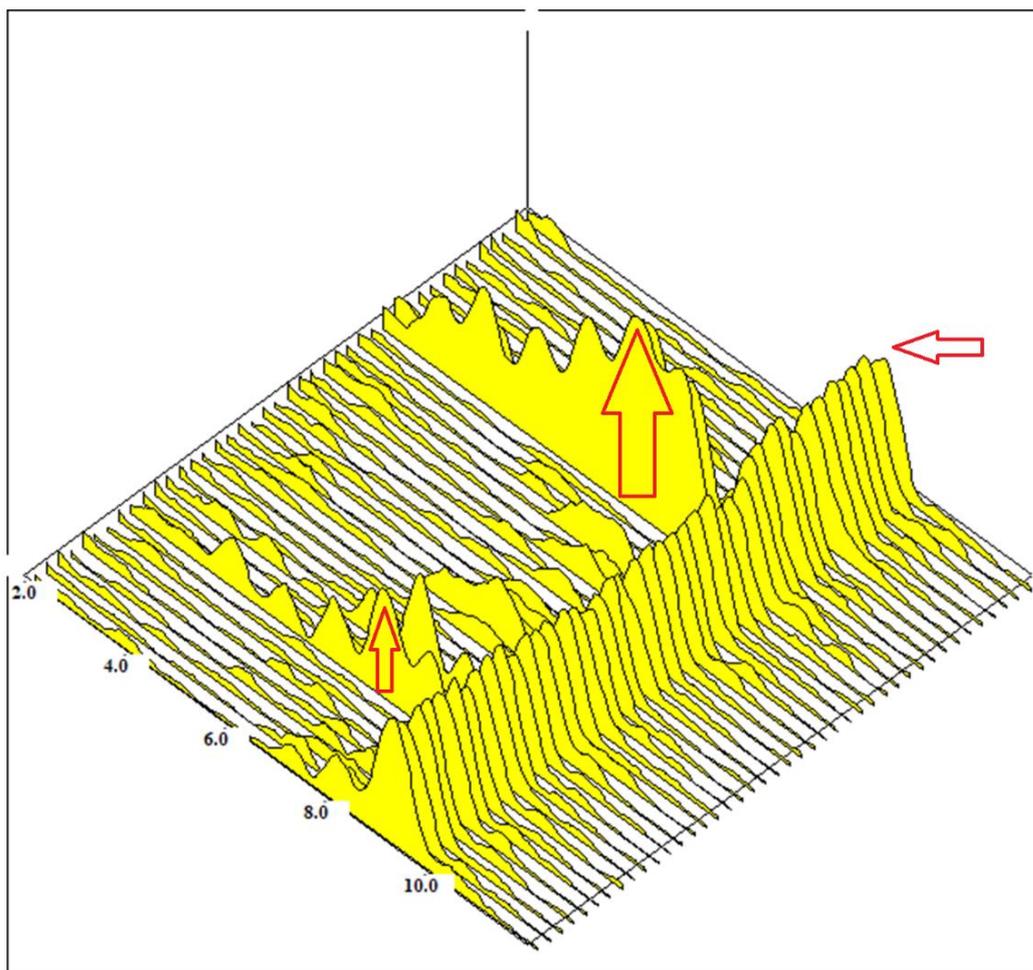


Рис. 4. Семейство функций когерентности сигналов удаленных друг от друга ИК1-ИК2 за все время измерений нейтронных шумов (400 мин)

Fig. 4. Family of coherence functions of signals distant from each other ИК1-ИК2 over the entire time of neutron noise measurements (400 min)

Нейтронно-шумовые поля принято подразделять на глобальные и локальные. Глобальные шумы пространственно независимы, описываются точечной нейтронной кинетикой и характерны для низкочастотных составляющих (например, с периодом менее 1 с). Возмущения нейтронного поля многократными перемещениями ОР СУЗ носят глобальный характер, т.е. фиксируются удаленными нейтронными датчиками. Например, формы соответствующих фрагментов сигналов удаленных ДПЗ7 и ИК идентичны друг другу (рис. 5), а в функции коге-

рентности сигналов ИК1-ИК2, также удаленных друг от друга, присутствует тот же гребенчатый вид с шагом 1 Гц (рис. 4). В данном эксперименте показано, что многократное высокочастотное возмущение нейтронного поля достаточной амплитуды средствами ОР СУЗ может также носить глобальный характер [3, 4, 9-11].

Таким образом, регулирующие группы ОР СУЗ представляют собой не только «тяжелые» по вносимой реактивности органы управления, но и довольно высокочастотные. Их перемещения эквивалентны высокочастотным гармоническим воздействиям, которые изменяют энерговыделение по всему объему активной зоны. При обосновании маневренных режимов необходимо учитывать число циклов воздействия с частотой до 8 Гц. Вблизи частоты 8 Гц находится глобальная корпусная акустическая волна (АСВ_{1К}), покрывающая своей полуволной всю активную зону и модулирующая плотность ТН, а значит, модулирующая и нейронный поток [12, 13].

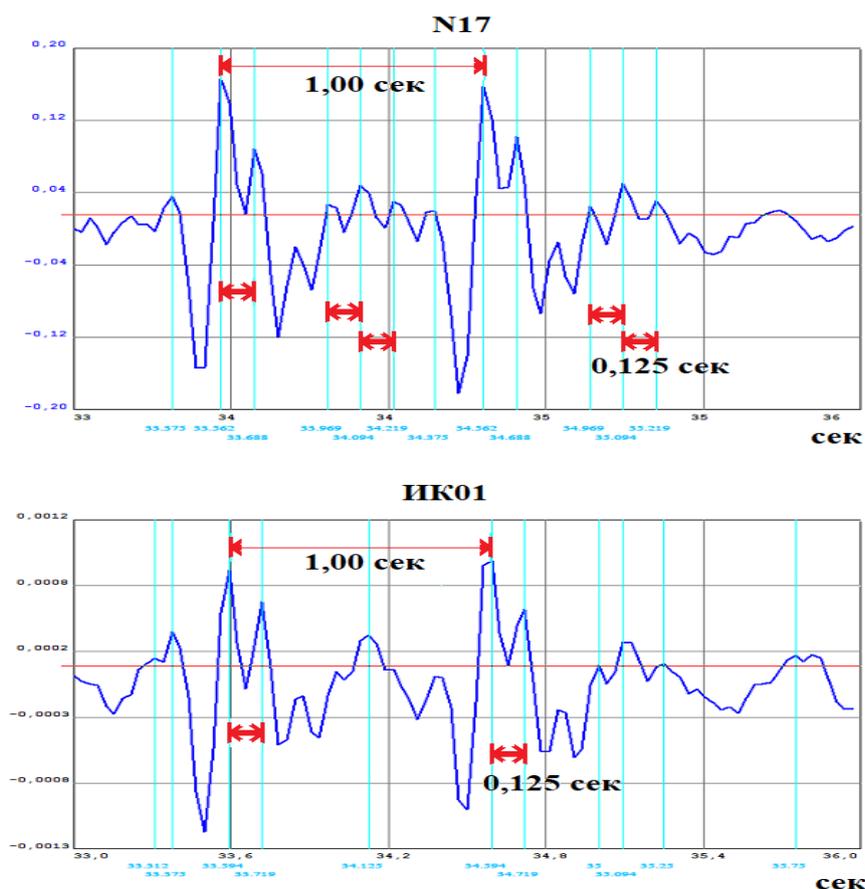


Рис. 5. Двойной шаг ОР СУЗ длительностью две секунды (периодическое возмущение) в сигнале ДПЗ7 (верхний график) и ИК (нижний график)

Fig. 5. Double step of CPS control elements lasting two seconds (periodic disturbance) in the signal of direct charge sensors DPZ7 (top graph) and ionization chambers (bottom graph)

Пошаговые возмущения нейтронного поля в результате перемещения ОР СУЗ со скоростью не более 2 см в секунду «раскачивают» этот барометрический эффект, входя с ним в резонанс. Слишком частое перемещение вверх ОР СУЗ может монотонно увеличивать дисперсию нейтронного потока из-за увеличения амплитуды АСВ_{1К}. Как следует из рис. 3, переход 77 % – 96 % резко увеличивает дисперсию нейтронного шума, а после достижения уровня мощности 96 % удерживается повышенная амплитуда АСВ_{1К} [3]. Чтобы соизмерить амплитуды выбросов сигналов разных ДПЗ друг с другом, на рис. 6 показаны «склеенные» во вре-

мени их реализации. Очевидно, что максимум выбросов наблюдается в горизонте ДПЗ6. Перемещение любой из регулирующих групп ОР СУЗ представляет собой глобальное возмущение нейтронного поля.

Помимо выбросов амплитуд нейтронного потока из-за перемещений ОР СУЗ, наблюдаются такие нестационарности, как «медленный» рост дисперсии (СКЗ) фона во времени при многократных шагах ОР СУЗ (рис. 6). На этих графиках СКЗ нейтронного фона много меньше амплитуды единичного выброса, но при многократных шагах ОР СУЗ в течение, например, кампании, СКЗ может достигнуть nepoзволительно больших величин [14, 15]. Мощность стоячих волн в ТН ГЦК определяется амплитудами пульсаций давления, производимых четырьмя ГЦН. При маневрировании мощностью РУ режим функционирования ГЦН остается неизменным, то есть и параметры АСВ1К остаются неизменными. АСВ1К по отношению к активной зоне является неизменной вынуждающей силой, модулирующей нейтронный поток на частоте 8,6 Гц. После многократного перемещения ОР СУЗ происходит рост амплитуды колебаний нейтронного потока на частоте 8,6 Гц, как результат резонансного возбуждения. Частота внешнего механического воздействия, точнее, гармоника 8 Гц, производимая перемещением ОР СУЗ, практически совпала с центральной частотой низкодобротного резонанса АСВ1К, который также представляет собой внешнее, но барометрическое воздействие на активную зону. Два разных физических явления – механическое и барометрическое – резонансно увеличили амплитуду нейтронного потока на частоте вблизи 8,6 Гц.

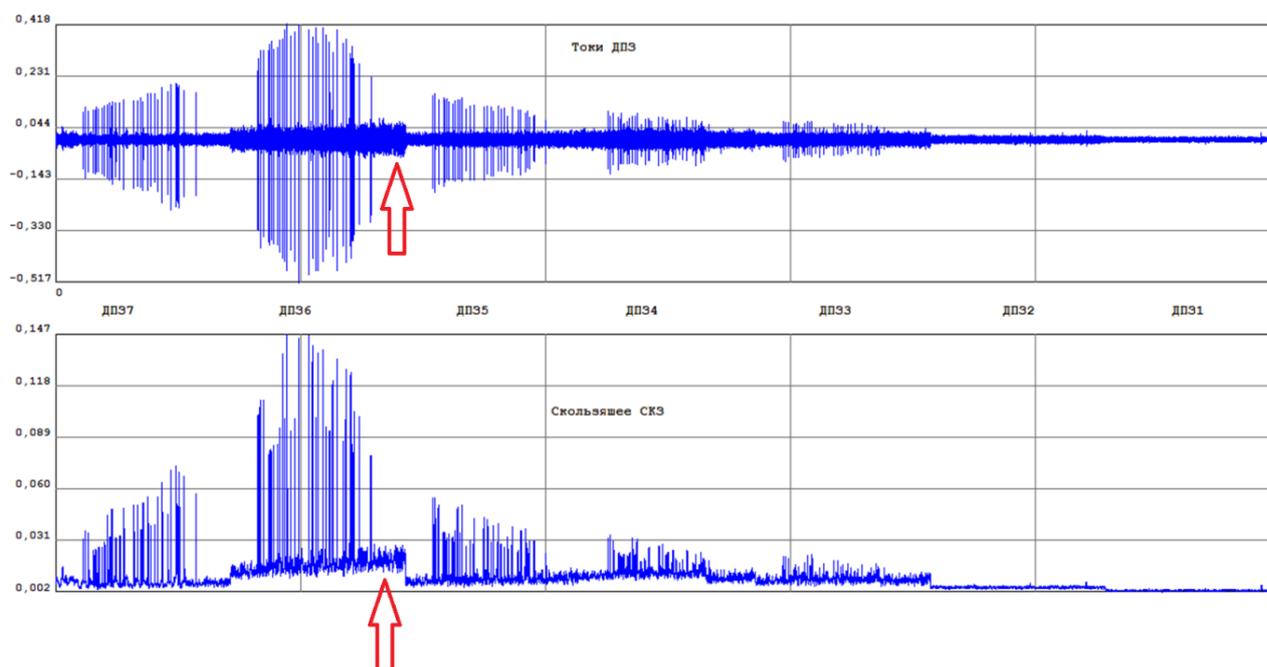


Рис. 6. «Склеенные» один за другим во времени реализации семи ДПЗ (ДПЗ7,..., ДПЗ1 – слева – направо) при переходе мощности РУ с 77 до 96 % за 6,5 мин каждая (верхний график). Их скользящие СКЗ (нижний график)

Fig. 6. «Склеенные» один за другим во времени реализации семи ДПЗ (ДПЗ7,..., ДПЗ1 – слева – направо) при переходе мощности РУ с 77 до 96 % за 6,5 мин каждая (верхний график). Их скользящие СКЗ (нижний график)

Резонансное возбуждение подразумевает взаимодействие совпадающих по частоте явлений: не только ОР СУЗ воздействует на нейтронное поле, но и, наоборот, нейтронное поле может создавать ненулевой градиент вертикальных сил с частотой 8,6 Гц, действующих на ОР СУЗ. В маневренных режимах за сутки физически производится два переходных процесса 96 % – 77 % и 77 % – 96 % и два стационарных уровня мощности – 77 % и 96 %. Однако для реализации этих четырех режимов в течение одних суток органы управления мощностью РУ

совершают многократные воздействия на активную зону, создавая тем самым непрерывный нестационарный шумовой нейтронный процесс. Свойства шумового нейтронного поля ВВЭР-1200 достаточно хорошо изучены, но только для стационарных режимов РУ [16, 17]. Таким образом, многократные перемещения ОР СУЗ резонансно возбуждают АСВ_{1к} (4-5, 5-6, 6-7, 4-6, 5-7, 4-7, 3-7), что приводит к монотонному увеличению амплитуды АСВ_{1к}. АСВ_{1к} – явление глобальное, но доминирующее вверху активной зоны. В нижней половине активной зоны резонансное возбуждение АСВ_{1к} на частоте 8,6 Гц не наблюдается (3-4). ПС ОР СУЗ 12-й группы, начиная свое перемещение с горизонта ДПЗ5, более всего изменяет когерентности сигналов ДПЗ5-ДПЗ6. Каждая из сорока функций когерентности сигналов ДПЗ5-ДПЗ6 имеет гребенчатый вид, реагируя тем самым локально и на малое число шагов ОР СУЗ. Когерентность ДПЗ5-ДПЗ6 может выполнять тестовые функции при проведении маневренных режимов. Сигналы ДПЗ одного КНИ, установленного в ТВС, в котором перемещается ОР СУЗ 12-й группы, чувствительны и к локальным, и к глобальным нестационарным нейтронным эффектам. К ним относится и высокочастотный эффект резонансного возбуждения АСВ_{1к}. Шумовые нейтронные измерения необходимо проводить совместно с другими штатными измерениями при проведении испытаний маневренных режимов.

Заключение

1. В исследуемых маневренных режимах частота шагов регулирующих ОР СУЗ резко возрастает по сравнению со стационарным 100 % режимом мощности РУ. Их воздействие на нейтронный поток носит высокочастотный, вплоть до 8 Гц, глобальный характер.

2. При перемещении ОР СУЗ происходит резонансное возбуждение нейтронного поля на частоте акустической стоячей волны – 8,6 Гц.

3. Скачки нейтронной мощности при перемещении ОР СУЗ вызывают скачки температуры топлива, температуры оболочки твэлов, что вызывает в них дополнительные напряжения. Требуется обоснование циклической механической прочности оболочек твэл при большом количестве перемещений ОР СУЗ, из-за чего твэл «проскальзывает» относительно дистанционирующих решеток, что усиливает эффект фреттинг-коррозии [18].

4. В маневренных режимах требуются дополнительные обоснования:

- надежности системы группового и индивидуального управления при резком повышении среднего числа шагов ОР СУЗ и, как следствие, повышения температуры электромагнитов СУЗ;
- теплотехнической надежности и ресурса поглощающего стержня ОР СУЗ и в части радиационной стойкости (не распухания), и в части *непревышения* допустимых пределов выгорания, и в части циклического механического нагружения при глубоком погружении в активную зону, и в части виброресурса [19];
- отсутствия такого формоизменения геометрии ТВС (в частности, прогиба ТВС), который бы препятствовал перемещению ОР СУЗ;
- циклического температурного нагружения ВКУ;
- вибростойкости ТВС при увеличении поперечного расхода ТН;
- *невсплытия* ТВС на сниженных уровнях мощности РУ при уменьшении средней температуры ТН и увеличении плотности ТН;
- достаточной эффективности аварийных ОР СУЗ при различных положениях регулирующих групп ОР СУЗ на пониженной мощности;
- допустимости суточного повышения неравномерности поля энерговыделения и неравномерности выгорания топлива по высоте.

5. В соответствии с экспериментальными результатами испытаний маневренных режимов необходимо верифицировать программный комплекс «Имитатор реактора», а также расчетно подтвердить *непревышение* порога по линейной тепловой нагрузке на твэл и *невозникновение* кризиса теплоотдачи [20].

6. Помимо штатных сигналов СВРК и СВБУ, для анализа маневренных режимов необходимо осуществлять многоканальные шумовые нейтронно-вибрационные измерения.

7. Построение приемлемого с практической точки зрения маневренного режима РУ с ВВЭР-1200 представляет собой многофакторную задачу оптимального управления, которая затрагивает фундаментальные проблемы безопасной эксплуатации, надежности, ресурса оборудования и экономичности его функционирования. Необходимо согласованно решать такие взаимно противоречивые экстремальные задачи, как:

- минимизация числа шагов регулирующих групп ОР СУЗ для поддержания стационарного уровня мощности в заданных пределах;
- минимизация объема водообмена;
- минимизация числа актов авторегулирования в системе компенсации давления.

Библиографический список

1. **Игнатенко, Е.И.** Маневренность реакторов типа ВВЭР. Библиотека эксплуатационника АЭС; вып. 6 / Е.И. Игнатенко, Ю.Н. Пыткин – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 88 с.
2. **Аверьянова, С.П.** Контроль локальной линейной мощности твэлов в активной зоне ВВЭР- 1000 с помощью офсет-мощностной диаграммы / С.П. Аверьянова., Г.Л. Лунин, В.Н. Проселков // Атомная энергия. 2002. Т. 93. № 1. С. 13-18.
3. **Аркадов, Г.В.** Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Серия: Библиотека технической диагностики атомных электростанций / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – М.: Наука, 2018. – 469 с.
4. **Аркадов, Г.В.** Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Серия: Библиотека технической диагностики атомных электростанций / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – М.: Наука, 2021 – 222 с.
5. **Терешонок, В.А.** Предупреждение и подавление аксиальных ксеноновых колебаний в активной зоне ВВЭР-1000 / В.А. Терешонок, В.С. Степанов, В.П. Поваров, О.В. Лебедев, В.В. Макеев // Теплоэнергетика. 2003. № 5. С. 11-15.
6. **Аверьянова, С.П.** Внедрение усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением активной зоны ВВЭР-1000 на Хмельницкой АЭС / С.П. Аверьянова, Ю.М. Семченков, П.Е. Филимонов, А.К. Горохов, В.Л. Молчанов, А.А. Коренной, В.П. Макеев // Атомная энергия. 2005. Т. 98. № 6. С. 414- 421.
7. **Аверьянова, С.П.** Испытание усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением ВВЭР-1000 в условиях маневренных режимов на Тяньваньской АЭС (Китай) / С.П. Аверьянова, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, П.Е. Филимонов, Лю Хайтао, Ли Йоу // Атомная энергия. 2007. Т. 103. № 5. С. 277-282.
8. **Аверьянова, С.П.** Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора» / С.П. Аверьянова, А.И. Ковель, В.В. Мамичев, П.Е. Филимонов // Атомная энергия 2008. Т. 105. № 4. С. 237-240.
9. **Аверьянова, С.П.** Ксеноновая устойчивость ВВЭР-1200 / С.П. Аверьянова, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2009. Т. 107. № 6. С. 348-351.
10. **Аверьянова С.П.** Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000 / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2010. Т. 109. № 6. С. 198-202.
11. **Аверьянова, С.П.** Работа ВВЭР-1200/130 в суточном графике нагрузки / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2012. Т. 113. № 5. С. 247-252.
12. **Аверьянова, С.П.** Развитие способов управления ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2013. Т. 114. № 5. С. 249-253.
13. **Глушенков, Р.С.** Исследование ключевых аспектов внедрения режима суточного регулирования мощности на АЭС Украины // Технологический аудит и резервы производства. 2015. Т. 2-1(22). – С.18-26. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41404.

14. **Аверьянова, С.П.** Метод офсет-мощностной фазовой диаграммы для управления энерговыделением реактора / С.П. Аверьянова, Н.С. Вохмянина, Д.А. Злобин, П.Е. Филимонов, В.И. Кузнецов, В.Б. Лаговский // Атомная энергия. 2016. Т. 121. № 3. С. 123-127.
15. **Выговский, С.Б.** Оптимизация алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для минимизации водообмена в 1-ом контуре при реализации суточных маневренных режимов / С.Б. Выговский, Р.Т. Аль Малкави, А.Г. Хачатрян, Ш.А. Абраамян // Глобальная ядерная безопасность. 2018. № 3(28). С. 49-63.
16. **Аверьянова, С.П.** Исследование ксеноновых переходных процессов на Нововоронежской АЭС / С.П. Аверьянова, Н.С. Вохмянина, Д.А. Злобин, П.Е. Филимонов, В.П. Поваров // Атомная энергия. 2018. Т. 124. № 4. С. 183-187.
17. **Филимонов, П.Е.** Испытания ВВЭР-1200 при эксплуатации в режиме суточного графика нагрузки на 6-м энергоблоке Нововоронежской АЭС / П.Е. Филимонов, Ю.М. Семченков, В.В. Малышев, Н.Ю. Долгополов, В.П. Поваров, И.Н. Гусев // Атомная энергия. 2020. Т. 129. № 3. С. 123-129.
18. **Поваров, В.П.** Экспериментальные исследования нейтронно-физических процессов в активной зоне ВВЭР-1200 / В.П. Поваров, В.Ф. Украинцев, Е.И. Голубев, М.М. Жук. – Нововоронеж: ООО РПГ «Девятое облако», 2021. – 264 с.
19. **Филимонов, П.Е.** Испытания нестационарных режимов работы ВВЭР-1200 на первом энергоблоке Белорусской АЭС / П.Е. Филимонов, А.А. Дубов, Ю.М. Семченков, А.М. Бондарь, Д.Ф. Воробьев // Атомная Энергия. 2021. Т. 131. Вып. 248. № 5. С. 243-249.
20. **Долгополов, Н.Ю.** Результаты испытаний маневренных режимов на энергоблоках АЭС-2006: сборник тезисов VI Международной научно-технической конференции «Ввод АЭС в эксплуатацию» / Н.Ю. Долгополов, П.П. Мезенцев. – М.: Атомтехэнерго. С.11-12.

*Дата поступления
в редакцию: 18.09.2023*

*Дата принятия
к публикации: 25.10.2023*