
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 681.84/.85

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_54

ВИБРОСОСТОЯНИЕ КОРПУСА И ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1200

Г.В. Аркадовe-mail: skrepka1964@gmail.comАкционерное общество «Научно-технический центр «Диапром»
Обнинск, Россия**В.И. Павелко**e-mail: viprvi@mail.ruАкционерное общество «Научно-технический центр «Диапром»
Обнинск, Россия**В.П. Поваров**e-mail: povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ruФилиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС
Нововоронеж, Россия**М.Т. Слепов**ORCID: 0000-0001-5563-0526 e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ruФилиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС
Нововоронеж, Россия

Приведены экспериментальные данные полученные в ходе эксплуатации различных систем технического диагностирования на первом и втором энергоблоках НВОАЭС-2. Благодаря новым конструкторским решениям по закреплению корпуса РУ ВВЭР-1200, а также новым узлам крепления ВКУ ВВЭР-1200, подтверждено снижение вибрационной нагрузки на корпус РУ ВВЭР-1200. Описаны нейтронно-вибрационные измерения блока 1 НВОАЭС-2, приведены функции когерентности сигналов «ИК-Акс».

Ключевые слова: ВВЭР-1200, реакторная установка (РУ), шахта внутрикорпусная (ШВК), автоспектральная плотность мощности (АСПМ), главный циркуляционный контур (ГЦК), акустическая стоячая волна (АСВ), система контроля, управления и диагностики, датчик абсолютных перемещений (ДАП), система контроля вибраций (СКВ).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Аркадов, Г.В. Вибросостояние корпуса и внутрикорпусных устройств реакторной установки ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, В.П. Поваров, М.Т. Слепов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1. С. 54-67. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_54

VIBRATION RESISTANCE STATE OF VESSEL AND IN-VESSEL EQUIPMENT OF PWR (VVER)-1200 REACTOR SYSTEM

G.V. Arkadove-mail: skrepka1964@gmail.comJoint Stock Company «Scientific and Technical Center «Diaprom»
Obninsk, Russia

V.I. Pavelko

e-mail: vippi@mail.ru

Joint Stock Company «Scientific and Technical Center «Diaprom»

Obninsk, Russia

V.P. Povarov

e-mail: povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP

Novovoronezh, Russia

M.T. Slepov

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

Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP

Novovoronezh, Russia

Abstract. Experimental data obtained during operation of various technical diagnostics systems at the first and the second power units of NVNPP-2 (Novovoronezh Nuclear Power Plant), are presented. Due to new design solutions for anchorage of RS PWR-1200 vessel, as well as new IVC PWR-1200 attachment nodes, a decrease of vibration load on RS PWR-1200 vessel was confirmed. Neutron-vibration measurements of power unit 1 of NVNPP-2 are described, coherence functions of «IC-Acc» signals are given.

Key words: PWR-1200, reactor system (RS), in-vessel pit (IVP), auto-spectral power density (ASPD), main circulation loop (MCL), acoustic standing wave (ASW), monitoring, control and diagnostics system, absolute displacement sensor (ADS), vibration monitoring system (VMS).

FOR CITATION: G.V. Arkadov, V.I. Pavelko, V.P. Povarov, M.T. Slepov. Vibration resistance state of vessel and in-vessel equipment of PWR (VVER)-1200 reactor system. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 1. Pp. 54-67. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_54

Введение

Принимая во внимание специфику освоения технических и программных средств, а также работы по их совершенствованию, выделим пять этапов внедрения системы диагностики на объект, находящийся в эксплуатации.

На первом этапе важно распознать главные физические источники (причины появления) резонансных спектральных особенностей, наблюдаемых вибрационных и шумовых сигналов. На втором необходимо найти их «пространственную протяженность» или ответить на вопрос: «привязан» ли данный резонанс к какому-либо конкретному элементу (узлу, блоку) объекта или является общекартинным явлением? На третьем следует изучить взаимовлияние элементов объекта друг на друга на частоте резонанса; на четвертом этапе – прокалибровать данную спектральную особенность, т.е. связать какие-либо параметры резонанса (амплитуду, эффективную ширину, местоположение на оси частот) с численными характеристиками идентифицированного физического явления (например, связать размах колебаний элемента в миллиметрах с амплитудой резонанса в единицах АСПМ (ед²/Гц)). Последний, пятый этап – установление таких пороговых значений численных характеристик резонанса, выход за которые угрожает работоспособности объекта. Существенно, что данный порог должен выявлять неисправность на самой ранней стадии ее зарождения.

Такое разбиение на этапы не носит строго последовательного характера: по каким-то резонансам уже пройдены несколько этапов, некоторые – не распознаны вовсе. Поэтому данная работа относится к первому этапу – физической интерпретации спектральных особенностей, хотя большое внимание уделяется и исследованию различных взаимосвязей.

Способы установки первичных преобразователей для регистрации вибрации корпуса РУ и ШВК реакторной установки ВВЭР-1200

Первое поколение систем виброшумовой диагностики контролировали вибрации корпуса РУ и ШВК с помощью четырех датчиков абсолютного перемещения, которые монтировались на нажимном кольце (ВВЭР-440 – позиция 1 на рис. 1) или на шпильках главного разъёма (ВВЭР-1000 – позиция 2 на рис. 1) в углах соответствующего квадрата. Эти вибродатчики относятся к классу высокочувствительных, способных измерять виброперемещения, начиная с единиц микрон. Высокие рабочие температуры, а также интенсивные радиационные поля делали их весьма ненадежными. Кроме того, они оказались не технологичными с точки зрения обслуживания, так как при снятии крышки реактора их приходилось демонтировать. Поэтому их заменили на четыре акселерометра, которые монтировались на четырех вертикальных стойках верхнего блока (ВВЭР-1000 позиция 3 на рис. 1 и ВВЭР-1200 позиция 4 на рис. 1) в углах соответствующего прямоугольника.

Рабочая температура и радиационные поля в местах установки акселерометров оказались благоприятными для длительной их эксплуатации. Тождественность такой замены типов вибродатчиков устанавливалась экспериментально на блоке 3 КАЭС, а затем на двух блоках Тяньваньской АЭС. Чувствительность акселерометров к колебаниям корпуса и ШВК оказалась выше, чем у ДАП при полном сохранении числа значимых резонансов и всех фазовых характеристик сигналов. Это означает, что стойки верхнего блока, на которых крепятся акселерометры, абсолютно жестко связаны с крышкой реактора, и они не искажают передачу вибрационной картины колебаний из горизонта фланца главного разъёма в горизонт установки акселерометров [8, 15].

Виброперемещения корпуса возникают под действием гидродинамического напора ТН и вибраций, исходящих от ГЦНА по металлу конструкции. При этом в совместные с корпусом колебания вовлекаются ВКУ и ТВС. К ним также чувствителен внутризонный нейтронный поток, регистрируемый датчиками прямого заряда (ДПЗ), и внезонный нейтронный поток, регистрируемый ионизационными камерами (ИК). Корреляции сигналов разной физической природы позволяют выделять совместные колебания корпуса-ШВК, ШВК-ТВС, корпуса-ШВК-ТВС. До выхода РУ на мощность, когда присутствуют только измерения вибродатчиками, совершенно определенно селективировать совместные колебания преждевременно [14].

Конструктивные особенности узлов крепления корпуса РУ и ШВК

Корпус РУ и ШВК представляют собой систему связанных масс, колебания которых вызваны внутренними гидродинамическими силами потока ТН. Они хорошо моделируются в цилиндрических координатах двумя коаксиалами (в технических приложениях их также называют обечайками), связанными между собой внутренними жесткостными элементами, а корпус связан со строительными конструкциями наружными кольцевыми распределенными жесткостями в двух горизонтах (рис. 2). Узлы крепления – элементы трехмерные и описываются соответствующими матрицами жесткости, но почти все имеют ярко выраженную направленность, т.е. существует координатный вектор, по направлению которого жесткость принимает экстремальное значение. Выделим также точечную (сосредоточенную) и распределённую жесткость. Например, кольцевая опора корпуса РУ – непрерывно распределенный по азимуту жесткостной элемент, а шпоночные узлы ШВК – точечные.

Рассматриваемые узлы крепления допускают зазоры между сочленяемыми элементами, что составляет наибольшую трудность при их моделировании. В проекте ВВЭР-1200 три горизонта узлов крепления ШВК получили дальнейшее развитие. Так, в верхнем узле крепления трубчатые упругие сегменты ВВЭР-1000 заменены на упругие элементы из расширенного графита, которые практически не теряют свои жесткостные характеристики за кампа-

нию. В нижнем узле крепления увеличено число виброгасителей с 8 до 12 шт. Жесткость среднего горизонта крепления ШВК определяется так называемым обжатием шахты при достижении номинальных температур ТН. В свою очередь, обжатие определяется постоянством по азимуту величины зазора в паре «ШВК-разделитель потока» в «холодном» состоянии и качеством исполнения поверхностей в этой паре. Недостаточная жесткость верхнего узла крепления может вызвать так называемые «плавающие» типы колебаний ШВК, соответствующие слабому закреплению верха ШВК, с очень низкой собственной частотой. Недостаточная жесткость среднего узла крепления снижает основной низший тип колебаний ШВК, соответствующий колебаниям балки с двумя закреплёнными концами. Недостаточная жёсткость нижних узлов крепления высвобождает низший маятниковый тип колебаний ШВК по типу колебаний балки с одним верхним креплением. Такие типы колебаний наблюдались в процессе длительного развития технологии ВВЭР.

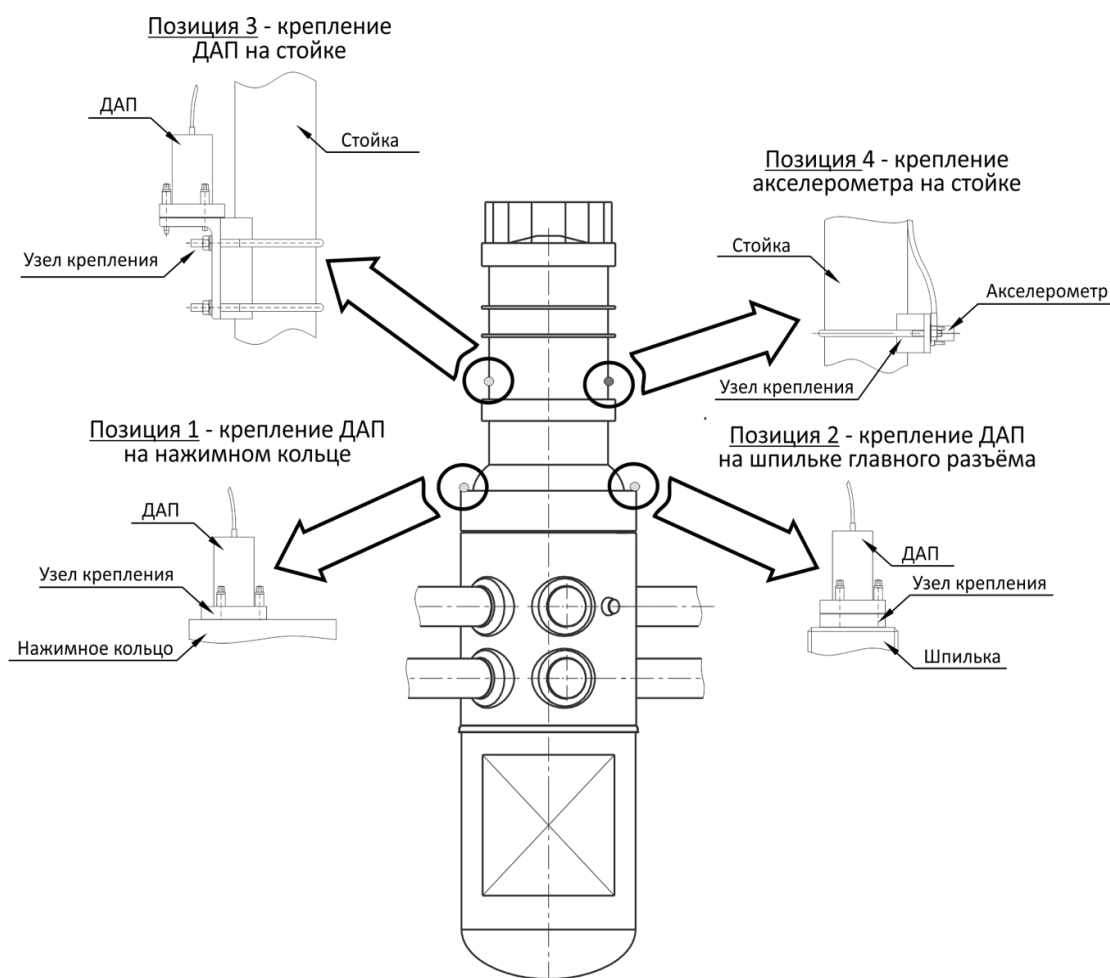


Рис. 1. Размещение ДАП на шпильках главного разъёма и акселерометров на стойках верхнего блока

Fig. 1. Arrangement of ADS on studs of the main connector and accelerometers on racks of the upper block

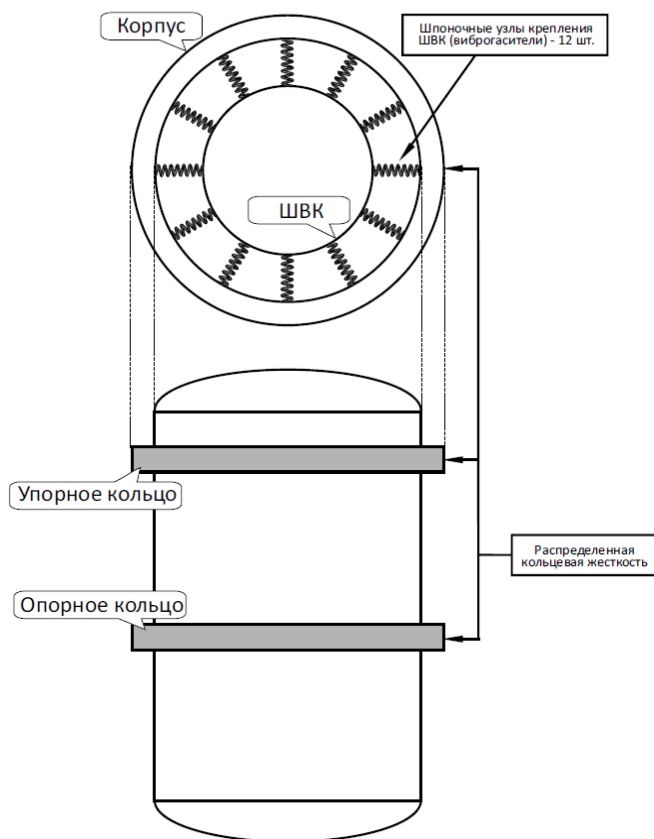


Рис. 2. Схематичное представление узлов крепления корпуса РУ и ШВК

Fig. 2. Schematic representation of the attachment nodes of RS vessel and IVP

Строго говоря, нельзя объявлять некоторые колебания ШВК как собственные колебания только ШВК в отрыве от колебаний корпуса. Также некорректно объявлять, что некоторые колебания ШВК «навязаны» извне колебаниями только корпуса РУ. В любом случае необходимо говорить о совместных колебаниях корпуса и ШВК. Тем не менее, в нейтронно-шумовых вибрационных моделях ШВК, как правило, допускается предположение об абсолютно жестком закреплении корпуса РУ в строительных конструкциях и, как следствие, виброперемещение ШВК относительно корпуса РУ объявляется собственным типом колебаний ШВК. В данном случае априори не принимается во внимание состояние внешних узлов крепления корпуса РУ и предполагается, что регистрируемые нейтронные шумы несут информацию только о собственных колебаниях ШВК и, в частности, о состоянии ее узлов крепления.

Такая модель, при которой виброперемещения собственно корпуса РУ считаются нулевыми, бессмысленна при размещении вибродатчиков на самом корпусе РУ. Вибродатчики, физически регистрируя виброперемещения корпуса РУ, несут информацию и о вибрациях ВКУ, именно в силу того, что рассматриваемые колебания являются совместными. Типы колебаний корпуса определяются не только состоянием (жесткостными характеристиками) его собственных опорных конструкций, но и жесткостными характеристиками узлов крепления ВКУ и, в частности, тремя горизонтами узлов крепления ШВК. Именно поэтому в сигналах вибродатчиков, установленных на корпусе РУ или на верхнем блоке корпуса РУ, проявляются и компоненты вибраций ВКУ.

Колебания корпуса РУ и ШВК при разном числе функционирующих ГЦНА

Рассмотрим активные эксперименты, позволяющие интерпретировать вибрационное состояние корпуса РУ и ШВК. При неполном числе функционирующих ГЦНА, что происходит всякий раз при разогреве и расхолаживании блока, гидростатический напор на корпус РУ и ШВК со стороны теплоносителя теплообменных петель может оказаться неуравновешенным. Только в двух случаях, когда функционируют два ГЦНА противоположных петель (первый и третий или второй и четвертый ГЦНА), результирующая статическая сила, воздействующая на корпус и ШВК со стороны ТН, будет нулевой. Этот вывод базируется на центральной симметрии ГЦК и противоположно направленных и равных по модулю сил со стороны ТН двух активных и двух пассивных петель, а также на допущении тождественности четырех петель. Во всех других случаях неполного числа функционирующих ГЦНА корпус реактора и ШВК будут уклоняться от своего состояния равновесия под действием ненулевой, неуравновешенной статической силы. В результате шахту вынуждают войти в «жесткое» зацепление с некоторыми виброгасителями (шпонками). К ним, прежде всего, относятся виброгасители, диаметрально противоположные по отношению к активной петле. Данное отклонение шахты от вертикали ограничивается другой парой диаметрально расположенных виброгасителей. Они располагаются в перпендикулярном направлении по отношению к активной петле [17].

Пусть активной петлей, по-прежнему единственной, станет петля, противоположно расположенная первой. Например, если вначале активным был ГЦНА1, а все остальные три ГЦНА не функционировали, то теперь активным стал только ГЦНА3 противоположной петли. Теперь шахта отклонится от вертикали в том же направлении, но в противоположную сторону. По-прежнему ограничивать перемещение будет та же пара перпендикулярно расположенных шпонок, но другими своими поверхностями. В итоге, суммируя по модулю перемещения шахты в одну и другую стороны, получим полный физически реализуемый размах колебаний шахты в одном направлении (в данном примере – по направлению «первая-третья» петля). Аналогичные переключения совершаются с ГЦНА2 и ГЦНА4, чтобы оценить размах колебаний шахты в направлении «петля2-петля4». Этими переключениями четырех ГЦНА совершается, во-первых, оценивание величин шпоночных зазоров в двух азимутальных направлениях, во-вторых, выявляются те частоты, с которыми может быть связан тип колебаний шахты, как балки с двумя закреплёнными концами. Это наиболее благоприятный, с точки зрения штатного закрепления шахты, тип колебаний. При износе виброгасителей и, соответственно, увеличения зазоров шпоночных соединений, высвобождается неблагоприятный тип колебаний с незакрепленным нижним концом. Его считают низшим типом колебаний шахты, хотя одновременное ослабление верхнего узла крепления шахты приводит к так называемому «плавающему» типу колебаний. Его собственная частота ещё ниже, чем собственная частота колебаний с одним верхним закреплённым концом [15]. Статическое перемещение ШВК будет ограничиваться величинами зазоров в узлах крепления ШВК. А турбулентные составляющие пульсаций давления ТН будут вызывать вибрации ШВК вокруг достигнутого статического состояния. Если при этом, некоторые зазоры узлов крепления будут выбраны, то есть станут нулевыми, то, вероятнее всего, вибрации будут происходить с соударениями в узлах крепления корпуса и ШВК. В процессе эксплуатации контактные пары шпоночных соединений изнашиваются, увеличивая тем самым соответствующие зазоры. Их контролируют периодически на ППР прямыми геометрическими измерениями пазов ШВК и шпонок на корпусе РУ. Измерение вибраций корпуса РУ при неполном числе функционирующих ГЦНА дает способ дистанционного косвенного контроля зазоров шпоночных узлов крепления, являясь, своего рода, экстремальным тестом (рис. 3). В номинальном режиме эксплуатации, при функционировании всех 4 ГЦНА, установившийся размах вибраций ШВК во всех направлениях может не «выбирать» зазоры, в отличие от принудительных отклонений ШВК при неполном числе функционирующих ГЦНА.

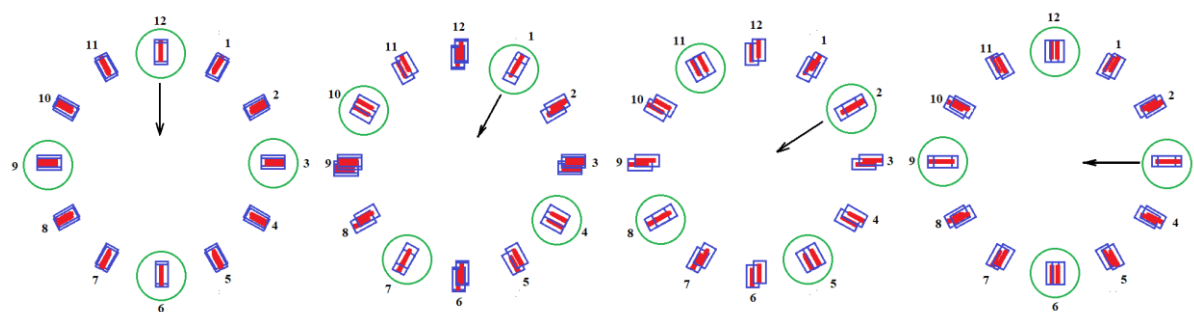


Рис. 3. Условное изображение 12-шпоночных узлов при четырех разных направлениях вынужденных колебаний:
направление «12-6» – левый циферблат, направление «1-7» – второй слева, направление «2-8» второй справа, направление «3-9» – крайний правый

Fig. 3. Conventional image of 12-key nodes with four different directions of forced oscillations:
direction «12-6» is the left dial, direction «1-7» is the second from the left, direction «2-8» is the second from the right, direction «3-9» is the far right

Колебания корпуса РУ, измеренные четырьмя акселерометрами

Эксплуатируемые на НВОАЭС-2 системы контроля вибрации (СКВ) обладают функцией автоматической регистрации многоканальных реализаций по заранее заданному временному графику. Благодаря этому, впервые были зарегистрированы многочисленные процессы при многократном изменении (увеличении и уменьшении) мощности РУ. При увеличении мощности РУ водопады спектров сигналов акселерометров, установленных на верхнем блоке РУ, дают характерную картину монотонного снижения центральных частот акустических стоячих волн (АСВ), а также неизменных частот вибрационных резонансов (рис. 4). Таким образом, корпус подвержен вынужденным колебаниям на частоте АСВ1п (6,7 Гц) и на частоте ее второй гармоники АСВ2п (11,2 Гц), а корпусная АСВ1к (8,7 Гц) влияет на его вибросостояние весьма слабо. Колебания на частоте АСВ2п являются доминирующими по мощности, а по амплитуде уступают лишь колебаниям на оборотной частоте ГЦНА. Низкодобротный резонанс АСВ2п покрывает вибрационные частоты совместных колебаний оборудования ГЦК, образуя практически глобальный обобщенный колебательный процесс. Амплитуда этих колебаний незначительна, (порядка 5 мкм). Также по незначительной амплитуде вынужденных колебаний корпуса РУ можно заметить влияние на его вибрационное состояние высших АСВ4п, АСВ6п, АСВ8п. Резонанс АСВ1п при достижении 100 % мощности РУ практически совпадает с вибрационным резонансом, но сколько-нибудь опасного эффекта увеличения его амплитуды не наблюдается. Таким образом, два доминирующих резонанса АСВ1п и АСВ2п имеют в своих частотных окрестностях вибрационные эффекты [8, 9]. Взаимные характеристики рассматриваемых четырех сигналов акселерометров дают уникальную картину колебаний корпуса РУ ВВЭР-1200 (рис. 4, 5). При последовательном обходе пар датчиков по замкнутому контуру – 1-2, 2-3, 3-4, 4-1 – получаем так называемый баланс фаз, состоящий в том, что их сумма всегда кратна 360° или нулевая. В данном случае имеем последовательность $0^{\circ}, 180^{\circ}, 0^{\circ}, 180^{\circ}$, свойственную однонаправленным маятниковым колебаниям. Таким образом, когда синфазные сигналы датчиков с номерами 1 и 2 увеличиваются, противофазные им сигналы датчиков с номерами 3 и 4 – уменьшаются, и наоборот (таблица на рис. 5). Ось, вокруг которой происходят маятниковые колебания, определяется с точностью $\pm 45^{\circ}$ и среднее ее положение совпадает с осью реактора «II-IV» [13]. Впервые в практике виброшумового анализа такая последовательность фаз наблюдается во всем исследуемом диапазоне частот. Обычно маятниковый тип колебаний реализуется на некоторой одной собственной частоте, захватывая очень малую окрестность вокруг данной ча-

стоты. Здесь же все регистрируемые частоты обладают одним и тем же свойством маятниковых колебаний. Очевидно, что это не собственные колебания. Практическая задача на собственные значения не может иметь решения на континууме частот.

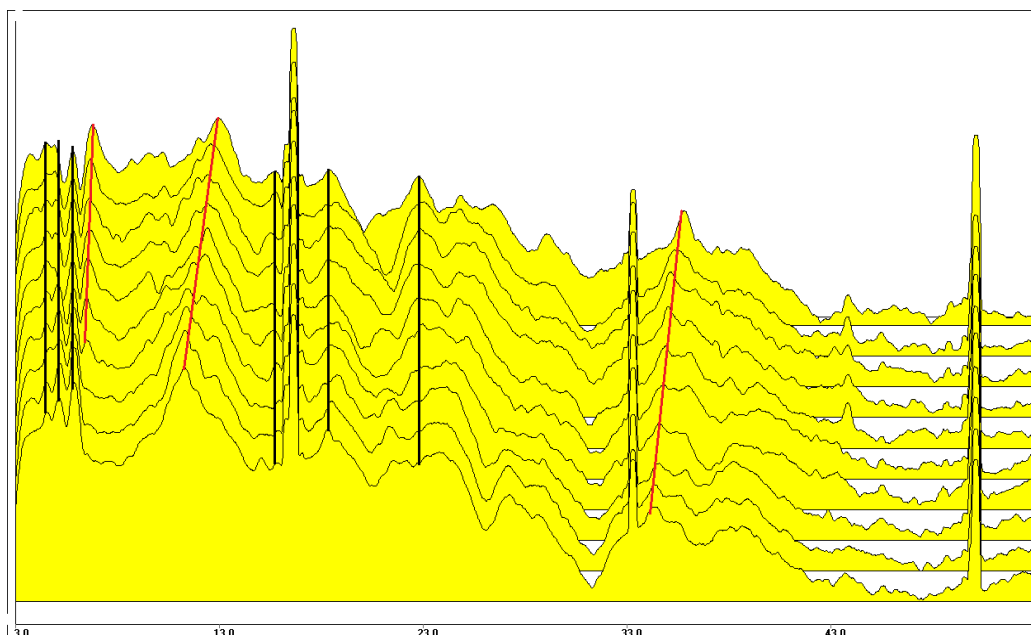


Рис. 4. Семейства АСПМ сигнала акселерометра S04, установленного на верхнем блоке при изменении мощности РУ (сверху вниз): МКУ, 9 %, 17 %, 32 %, 41 %, 57 %, 77 %, 94 %, 99 %, 100 %

Fig. 4. ASPM families of the accelerometer signal S04, installed on the upper block when the power of RS is changed (from top downward): MCR, 9 %, 17 %, 32 %, 41 %, 57 %, 77 %, 94 %, 99 %, 100 %

Накопленный опыт вибромониторинга колебаний корпуса РУ на различных блоках ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 свидетельствует о существовании большого числа типов колебаний с комбинациями характерных фаз ($0^0, 90^0, 180^0$). Среди них присутствуют и маятниковые, и круговые, и вертикальные, и так называемые стохастические типы колебаний с амплитудами много больше 5 мкм. Новые конструкторские решения по закреплению корпуса РУ ВВЭР-1200, а также новые узлы крепления ВКУ ВВЭР-1200 значительно снизили виброн нагруженность корпуса [14]. При заметном износе узлов крепления ШВК после многолетней эксплуатации будет преобладать тот или иной тип собственных колебаний, определяя тем самым горизонт крепления ШВК, который подвергся наибольшему изменению. В этом смысле стартовые спектральные характеристики вибрационных сигналов корпуса РУ блока 1 НВО АЭС-2, в которых не зафиксирован ни один тип собственных колебаний ШВК, представляются весьма благоприятными.

Нейтронно-вибрационные измерения блока 1 НВОАЭС-2

В состав СКВ, помимо прямых виброизмерительных каналов, входят измерительные каналы, которые косвенно чувствительны к виброперемещениям активной зоны, а значит и к виброперемещениям ШВК. Таковыми являются вне- и внутризонные нейтронные каналы на базе ионизационных камер и датчиков прямого заряда. Автоспектры сигналов ИК на 100 % уровне мощности РУ ВВЭР-1200 (рис. 7) обладают единственным значимым локальным максимумом на частоте АСВ1к (8,7 Гц). Это частота вынужденных АСВ1к колебаний ШВК совместно с реактивностным барометрическим эффектом [8, 12, 13].

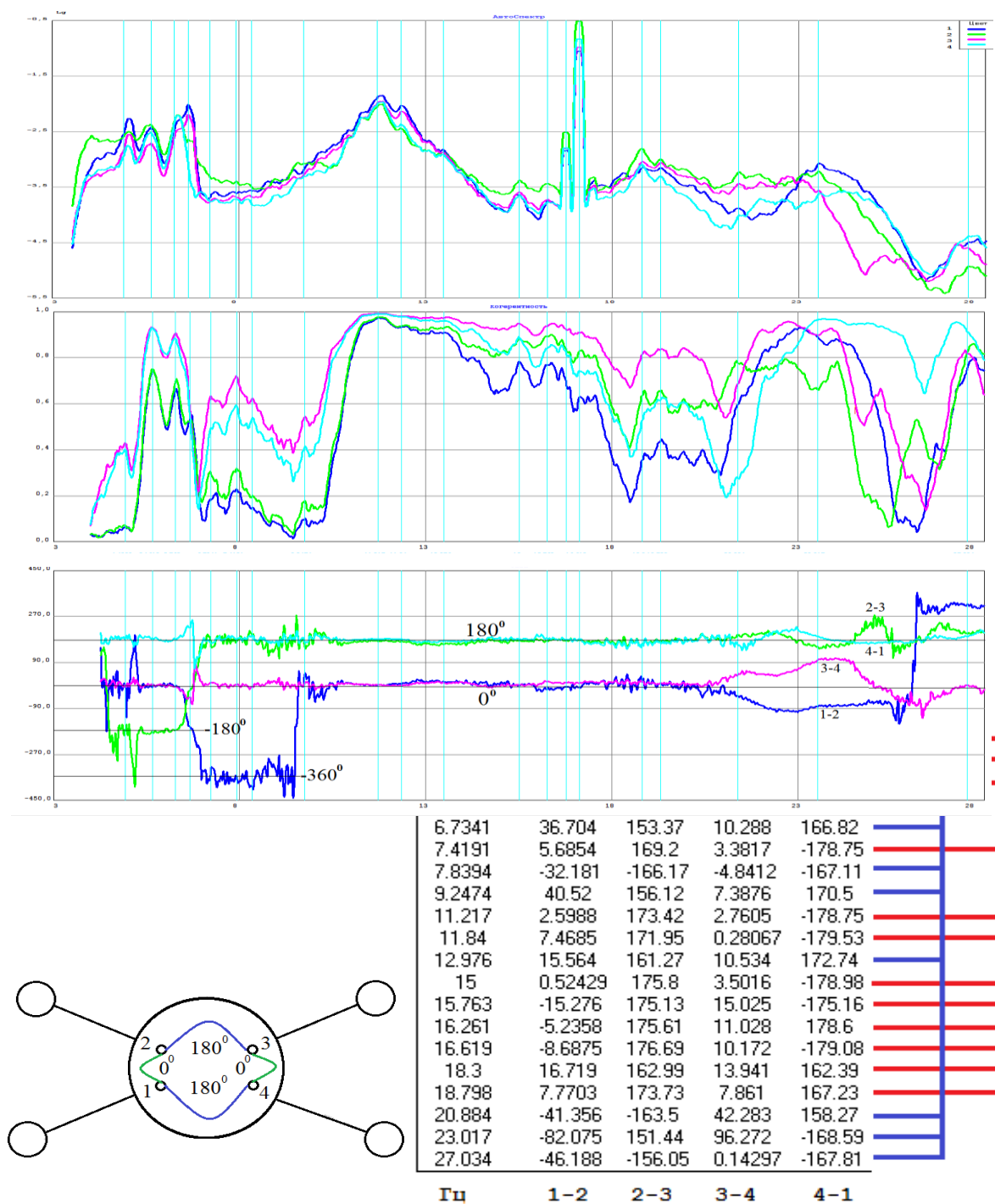


Рис. 5. АСПМ сигналов четырех акселерометров, установленных на верхнем блоке (верхнее семейство графиков), функции когерентности и фазы сигналов соседних акселерометров (1-2, 2-3, 3-4, 4-1), значения четырех фаз на отмеченных частотах. Красным цветом обозначено множество фаз $0^{\circ}, 180^{\circ}, 0^{\circ}, 180^{\circ}$, характерных для однонаправленных маятниковых колебаний. 100% мощность

Fig. 5. ASPM signals of four accelerometers installed on the upper block (upper family of graphs), coherence functions and phases of signals of neighboring accelerometers (1-2, 2-3, 3-4, 4-1), values of the four phases at the marked frequencies. The red color indicates a set of phases $0^{\circ}, 180^{\circ}, 0^{\circ}, 180^{\circ}$, specific to unidirectional pendulum oscillations. 100% power

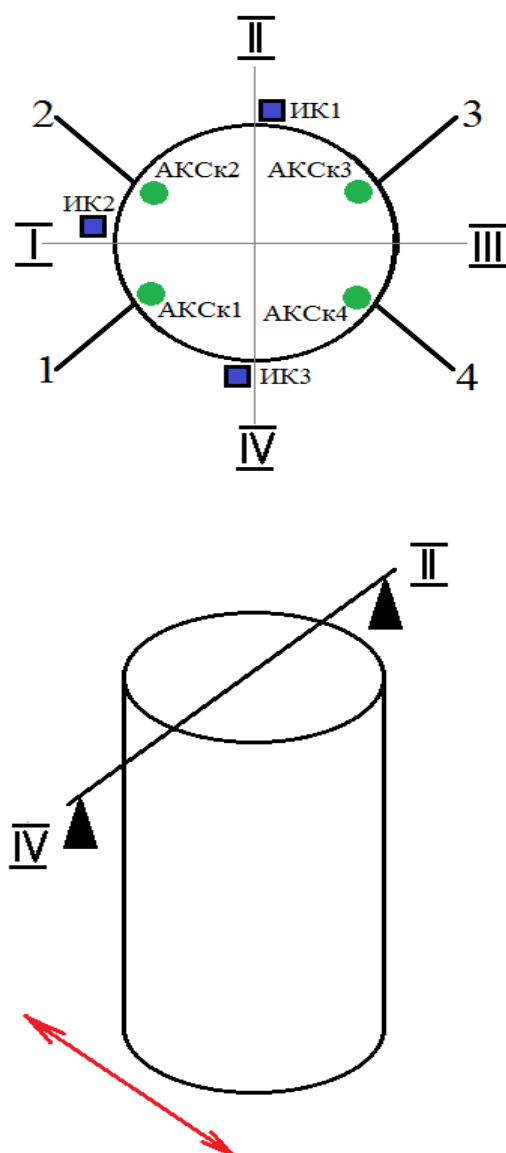


Рис. 6. Расположение ионизационных камер (ИК) и акселерометров на верхнем блоке и направление маятниковых колебаний корпуса РУ

Fig. 6. Location of ionization chambers (IC) and accelerometers on the upper block and direction of pendulum oscillations of the RS vessel

Реактивный эффект доминирует, так как вибрационное воздействие АСВ1к мало. Имея возможность проводить многократные, практически ничем не ограниченные во времени измерения, при неизменном стационарном состоянии РУ, можно извлечь другие незначительные по амплитуде резонансы (нижний график на рис. 7). Функции когерентности сигналов «ИК-ИК» их выделяют как малозначимые (рис. 8), так как вибрационные эффекты столь ничтожны, что маскируются глобальными нейтронно-температурными эффектами на низких частотах, а на высоких частотах их маскирует собственный «белый» шум ИК.

Продолжая далее поиск вибрационных резонансов ШВК, рассмотрим взаимные характеристики сигналов «ИК-акселерометр». Когерентность между сигналом акселерометра на верхнем блоке РУ и сигналом ионизационной камеры выделяет совместные колебания корпуса и ШВК (табл. 1). Здесь та же проблема – крайне низкая когерентность из-за ничтожности вибрационных эффектов. Однако после усреднения большого числа оценок весьма малые значения функции когерентности становятся значимыми.

При трех ионизационных камерах (ИК1, ИК2, ИК3) и четырех акселерометрах на корпусе РУ (АксК1, АксК2, АксК3, АксК4) получаются 12 всевозможных когерентностей пар сигналов разной физической природы «ИК-АксК». Существенно, что во всех когерентностях выделены резонансы только на частотах АСВ.

Таким образом, собственных колебаний ШВК не удалось обнаружить ни по каким параметрам сигналов: «ИК-ИК», «ИК-АКСк», «ИК-АКСп», «АКСк-АКСк», что свидетельствует о весьма малых виброперемещениях ШВК и, как следствие, весьма благоприятном вибростоянии ШВК.

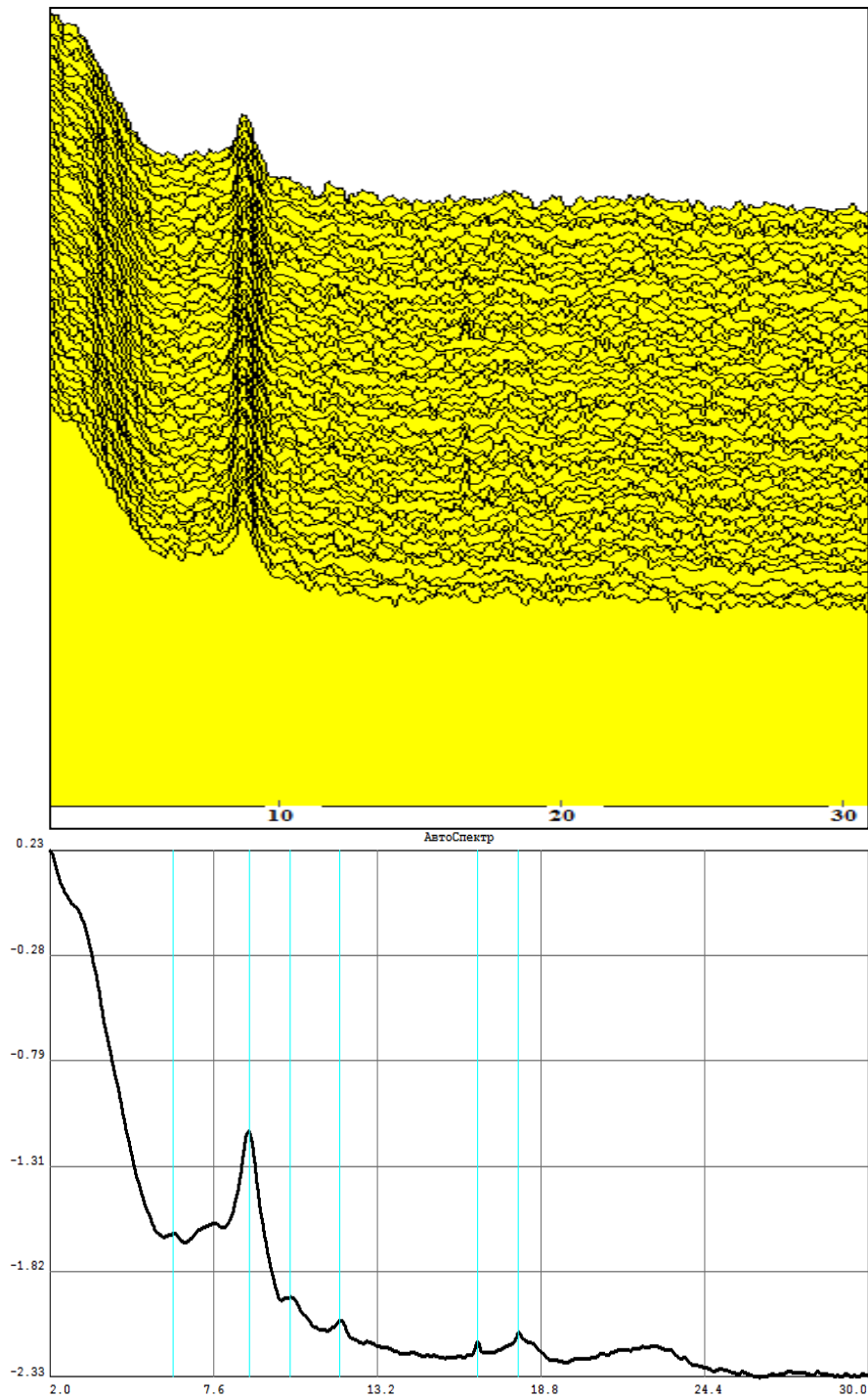


Рис. 7. Семейство АСПМ сигнала ионизационной камеры (ИК1) при многократных измерениях на 100% уровне мощности РУ и их средняя АСПМ (нижний график)

Fig. 7. The ASPM family of the ionization chamber (IC1) signal with multiple measurements at 100% power level of RS and their average ASPM (lower graph)

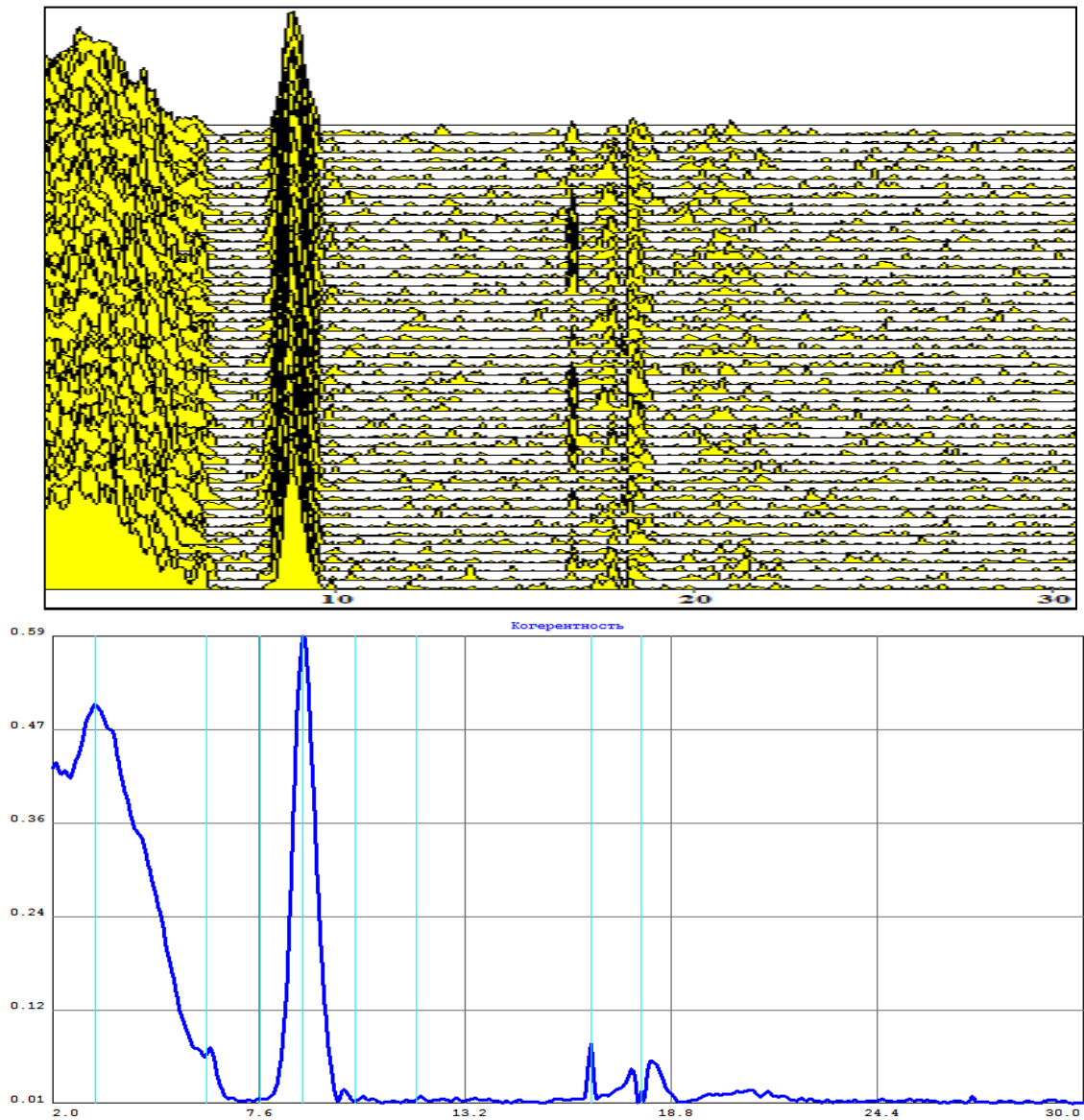
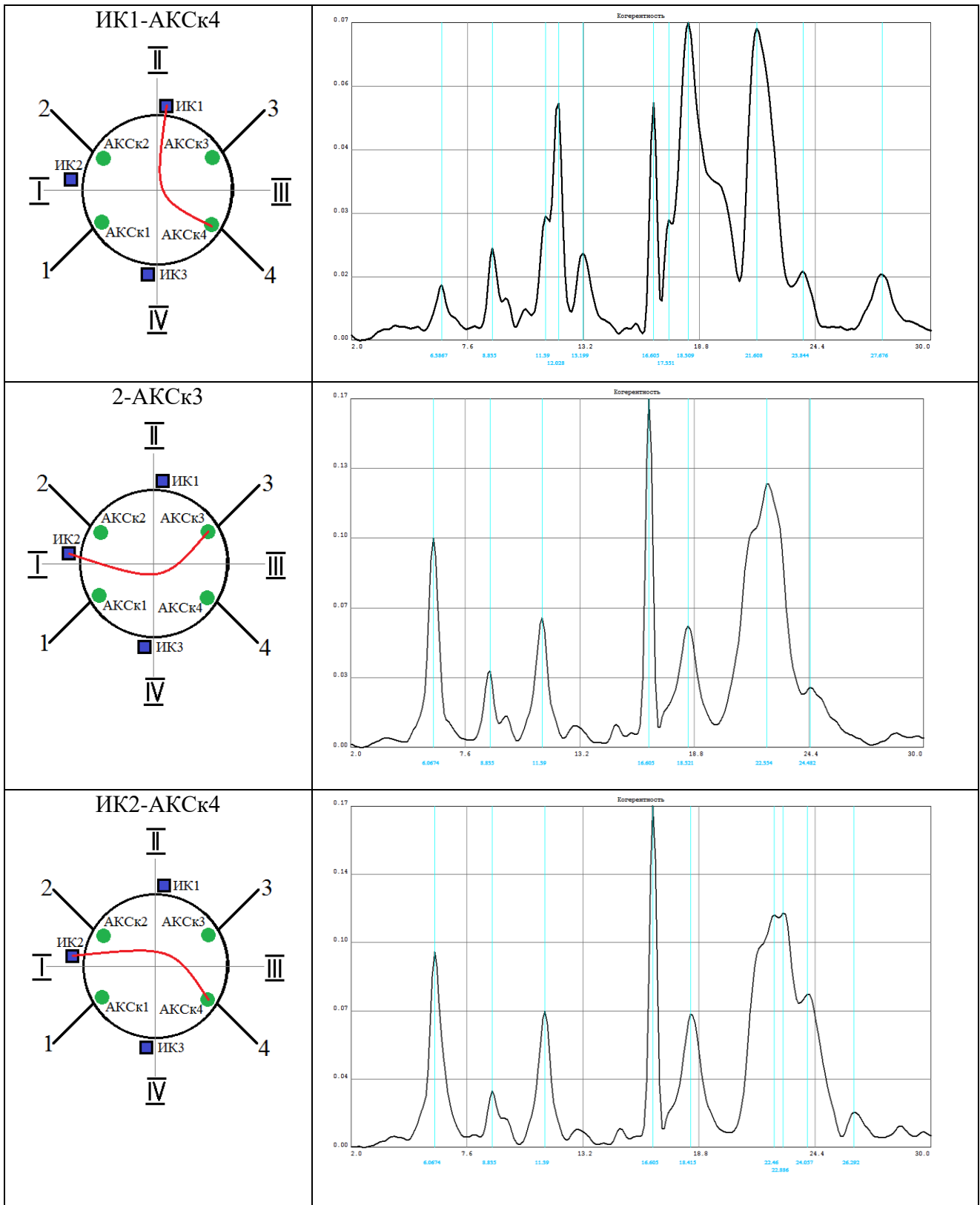


Рис. 8. Семейство функций когерентности сигнала противоположных ИК (ИК1-ИК3) при многократных измерениях на 100% уровне мощности РУ и их средняя когерентность (нижний график)

Fig. 8. Family of signal coherence functions of opposite IC (IC1-IC3) with multiple measurements at 100% power level of RS and their average coherence (lower graph)

Таблица 1
Функции когерентности сигналов «ИК-Акс»

Table 1
Coherence functions of «IC-Acc» signals



Заключение

Обобщены некоторые экспериментальные данные полученные в ходе эксплуатации различных систем технического диагностирования на первом и втором энергоблоках НВОАЭС-2. Экспериментально подтверждено снижение вибрационной нагрузки на корпус РУ ВВЭР1200 благодаря новым конструкторским решения по закреплению корпуса РУ ВВЭР-1200, а также новым узлам крепления ВКУ ВВЭР-1200.

Библиографический список

1. Государственный Стандарт Союза ССР. Техническая диагностика. Термины и определения. ГОСТ 20911-89. М.: Издательство стандартов, 1989. 13 с.
2. Государственный Стандарт Союза ССР. Приборы виброизмерительные. Термины и определения. ГОСТ 16819-71. М.: Стандартиформ, 2010. 8 с.
3. Государственный Стандарт Союза ССР. Акселерометры низкочастотные линейные. ГОСТ 18955-73. М.: Издательство стандартов, 1973. 14 с.
4. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Термины и определения. ГОСТ 24346-80. М.: Стандартиформ, 2010. 26 с.
5. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Обозначения и единицы величин. ГОСТ 24347-80. М.: Изд-во стандартов, 1986. 6 с.
6. Государственный Стандарт Союза ССР. Система стандартов по вибрации. Приборы для измерения вибрации вращающихся машин. Общие технические условия. ГОСТ 25275-82 М.: Издательство стандартов, 1993. 11 с.
7. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Динамические характеристики стационарных машин. Основные положения. ГОСТ 26043-83. М.: Издательство стандартов, 1984. 16с.
8. **Аркадов, Г.В.** Виброшумовая диагностика ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, А.И. Усанов. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 344 с.
9. **Аркадов, Г.В.** Системы диагностирования ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, Б.М. Финкель. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 391 с.
10. **Аникин, Г.Г.** Опыт внедрения систем виброконтроля на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР-440 / Г.Г. Аникин, В.И. Павелко // Теплотехника. 1999. № 6. С.12-17.
11. **Федоров, А.И.** Комплексные измерения диагностических параметров оборудования на блоке 1 НВАЭС-2 в процессе опытно-промышленной эксплуатации / А.И. Федоров, М.Т. Слепов // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2017-№3. – с. 77-87.
12. **Аркадов, Г.В.** Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – М.: Наука, 2018. – 469 с.
13. **Аркадов, Г.В.** Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – М.: Наука, 2021. – 221 с.
14. **Павелко, В.И.** Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200 / В.И. Павелко, М.Т. Слепов, В.У. Хайретдинов // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2016. №4. С.44-54.
15. **Аркадов, Г.В.** Виброакустика ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сборник трудов 11 международной научно-технической конференция 21-24 мая 2019 года ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия.
16. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. «Основные требования к обоснованию прочности внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР» (НП-102-17). Введены приказом №409 от 05.10.2017.
17. **Митенков, Ф.М.** Главные циркуляционные насосы АЭС / Ф.М. Митенков, Э.Г. Новинский, В.М. Будов – М., Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.
18. **Arkadov, G.V.** Vibration Acoustics Applied to VVER-1200 Reactor Plant / G.V. Arkadov, V.I. Pavelko, M.T. Slepov // Singapore: World Scientific, 2021. – 586 p.

Дата поступления

в редакцию: 29.10.2021