

КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВИЖНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИБР-2

Сизарев В.Д., Тимофеев С.В. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия),
Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я. (ИМАШ РАН, Москва, Россия)

Введение

В докладе представлены результаты вибродиагностики подвижного отражателя ПО-3 исследовательского реактора ИБР-2М с использованием как стандартных, так и новых современных методов и алгоритмов оценки технического состояния роторных машин на основе анализа статистических характеристик вибрационных сигналов. Мониторинг и вибрационная диагностика подвижного отражателя являются важными составляющими в комплексе работ по обеспечению надежности и ядерной безопасности реактора ИБР-2. Это направление для уникальной роторной машины ПО-3 реализуется с учетом положительного опыта ведения аналогичных работ на подвижных отражателях ПО-1, ПО-2 и ПО-2Р, выработавших свой ресурс. Как и прежде, для оценки текущего технического состояния ныне действующего подвижного отражателя и прогнозирования его работоспособности на дальнейшую перспективу, используются апробированные, широко используемые на практике методы анализа и современные алгоритмы диагностирования технического состояния, основанные на комплексном анализе вибрационных процессов и их характеристик.

Вибрационный мониторинг подвижного отражателя ПО-3, выполняющего функцию модулятора реактивности исследовательского реактора ИБР-2, осуществляется, практически непрерывно в процессе каждого цикла эксплуатации, начиная со стендовых испытаний и ввода в эксплуатацию в сентябре 2004 г. по настоящее время. Анализ параметров вибрационных процессов показал, что комплексное использование вероятностных характеристик вибросигналов совместно со спектральными характеристиками, в частности, стандартного отклонения, асимметрии, эксцесса, существенно расширяет диапазон возможностей обнаружения эксплуатационных повреждений на ранней стадии их зарождения. Приведены результаты использования нестандартной безразмерной вероятностной характеристики – S-дискриминанта вибрационного процесса, регистрирующего степень превышения значений параметров текущего вибросигнала заранее установленного порога клиппирования, относительно эталонных параметров, в том числе выбросов амплитуды в диапазоне частот вынужденных колебаний отражателя. Совместно с реализацией методов вибрационной диагностики ведется анализ радиоактивных примесей в масле системы смазки с привлечением метода гамма – спектрального анализа, который обеспечивает наблюдение за работой ПО с позиций оценки степени механического износа трущихся деталей. Результаты исследований, представленные в докладе, дают основание утверждать, что комплексный анализ статистических характеристик вибросигналов, анализ радиоактивных продуктов износа в масле увеличивают вероятность правильного распознавания причин роста виброактивности машинного оборудования и позволяют дать достоверную оценку технического состояния.

1. Подвижный отражатель – многоступенчатая роторная машина

ПО является роторной машиной с горизонтальным расположением двух соосно вращающихся роторов – основного и дополнительного. Роторы выполняют функции модуляторов реактивности. При совпадении лопастей роторов перед активной зоной генерируется импульс реактивности. После прохождения активной зоны реактор

переходит в подкритичное состояние. Максимальная скорость вращения основного модулятора реактивности (МРО) составляет 600 об/мин, дополнительного (МРД) – 300 об/мин. Проектная скорость вращения роторов обеспечивается от приводного двигателя через редуктор. Передняя опора (ближайшая к реактору) закреплена на жестком основании, задняя расположена в редукторе. Общий вид МРО и МРД представлен на рис. 1.

Роторы вращаются в замкнутом пространстве, ограниченном кожухом с мембраной. Внутренняя полость кожуха заполняется гелием концентрацией не менее 92 %. Фотографии отражателя в собранном виде представлены на рис.2: а) – вид со стороны передней опоры; б) – вид с боку, на котором видна часть редуктора.

Основными источниками возбуждения вибраций элементов ПО, как любой роторной машины, являются центробежные силы неточно сбалансированных валов с лопастями, микроударное взаимодействие цапф вращающихся валов в радиальных и радиально-упорных подшипниках, зубчатых пар цилиндрических и конических шестерен при угловом подведении крутящего момента от приводного двигателя через систему трансмиссионных валов.

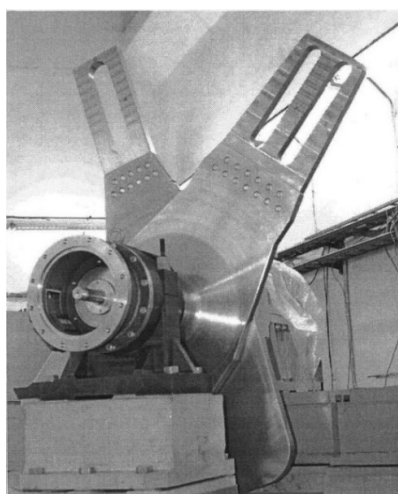
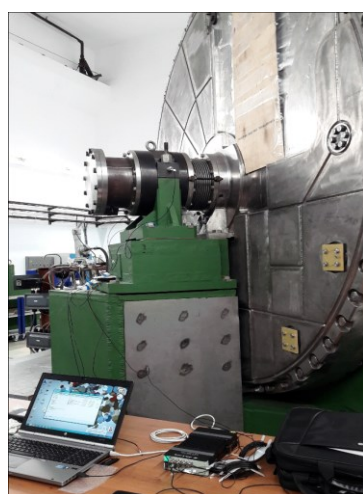
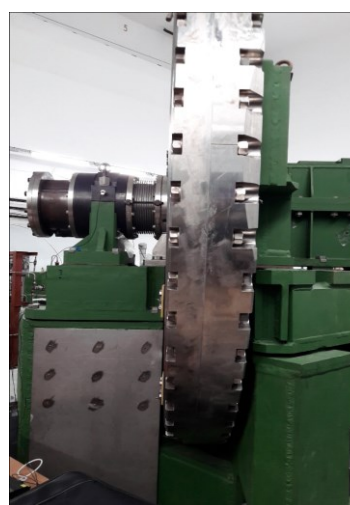


Рис. 1. Общий вид МРО и МРД без кожуха



а



б

Рис. 2. Отражатель: вид со стороны передней опоры (а) и сбоку (б)

В условиях полного отсутствия доступа к механизмам на протяжении всего времени жизненного цикла установки наиболее эффективным способом контроля

и отображения параметров состояния узлов подвижного отражателя в признаковом пространстве является виброакустический метод. Дублирующей системой вибродиагностики является нейтроноактивационный метод гамма-спектрального анализа радиоактивных примесей в масле. Основная цель этой системы заключается в проведении количественной и качественной оценки процессов износа вращающихся элементов отражателя.

2. Информационно-измерительная система сбора и обработки вибрационных сигналов

Информационно-измерительная система обеспечивает одновременную регистрацию вибрационных сигналов со всех контрольных точек, предварительно обрабатывает (может выдавать сигнал тревоги при превышении порогового значения уровня вибрации хотя бы в одной измерительной точке), а затем передает данные на компьютеризированные рабочие места – локальный сервер с местным РС и удаленный РС с передачей данных по Интернет связи для дальнейшего диагностического анализа. Задачи сбора, предварительной обработки и последующего диагностического анализа виброакустических процессов, сопровождающих функционирование механизмов подвижного отражателя, решались с помощью электронных и программных средств французской фирмы OldB-Metravib, программного комплекса WinПОС отечественной фирмы «МЕРА» и программного комплекса Института машиноведения РАН.

Создание подобной системы, как системы техобслуживания нового поколения, позволило вести наблюдение в реальном времени за работой модулятора реактивности на удаленном расстоянии. Вибрационный контроль за техническим состоянием отражателя, установленным в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, в настоящее время ведется с рабочей станции НИКИЭТ. Дистанционно выбирается требуемая конфигурация измеряемой информации.

Интерфейс программы обработки доступен пользователям Windows. В главном окне (рис. 3) в левой части экрана с помощью древовидной структуры составляется общая схема, на которой приведено название организации, тип машины с привязкой к ее функциональному назначению. Задаются соответствующие точки измерения, параметры и сигналы.

Подготовка к работе системы контроля функционирования отражателя и его работа состоит из следующих этапов, управляемых дистанционно:

- конфигурация рабочих параметров;
- конфигурация контролируемых параметров;
- конфигурация допустимых значений для каждого параметра;
- измерение сигналов и параметров (аппаратные параметры и сигналы);
- расчет сигналов и параметров (параметры и сигналы программного обеспечения);
- сравнение полученных значений с допустимыми.

В качестве примера на рис. 4 приведены каскадные спектры со списком (справа) параметров курсоров.

Получены первые результаты измерений, которые дают основание считать, что подобные системы вибромониторинга и диагностики могут быть распространены на все действующие АЭС и ЯЭУ практически любого назначения.

3. Результаты анализа вибросигналов

Для раннего обнаружения отклонений параметров технического состояния от нормального используется комплекс алгоритмов, основанный на статистических свойствах вибрационных процессов. Одной из таких характеристик является критериальный функционал на основе S-дискриминанта [6], фиксирующего превышение сигналом устанавливаемого заранее порога клиппирования P :

$$I_S = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_i)_{(t)} - P]}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(x_j)_{(0)} - P]} \cdot \left(\frac{K_{(t)}}{K_{(0)}} \right)$$

где

$x_i(t)$ – i -й отсчет амплитуды сигнала;

$P = \lambda \sigma_o$ – порог клиппирования;

σ_o – стандартное отклонение эталонного сигнала;

λ – коэффициент пропорциональности в диапазоне значений от 0 до 2,5;

K – количество выбросов, превышающих порог клиппирования на интервале наблюдения;

индексы (0) и (t) означают эталонный и текущий сигналы соответственно;

N – число отсчетов сигнала.

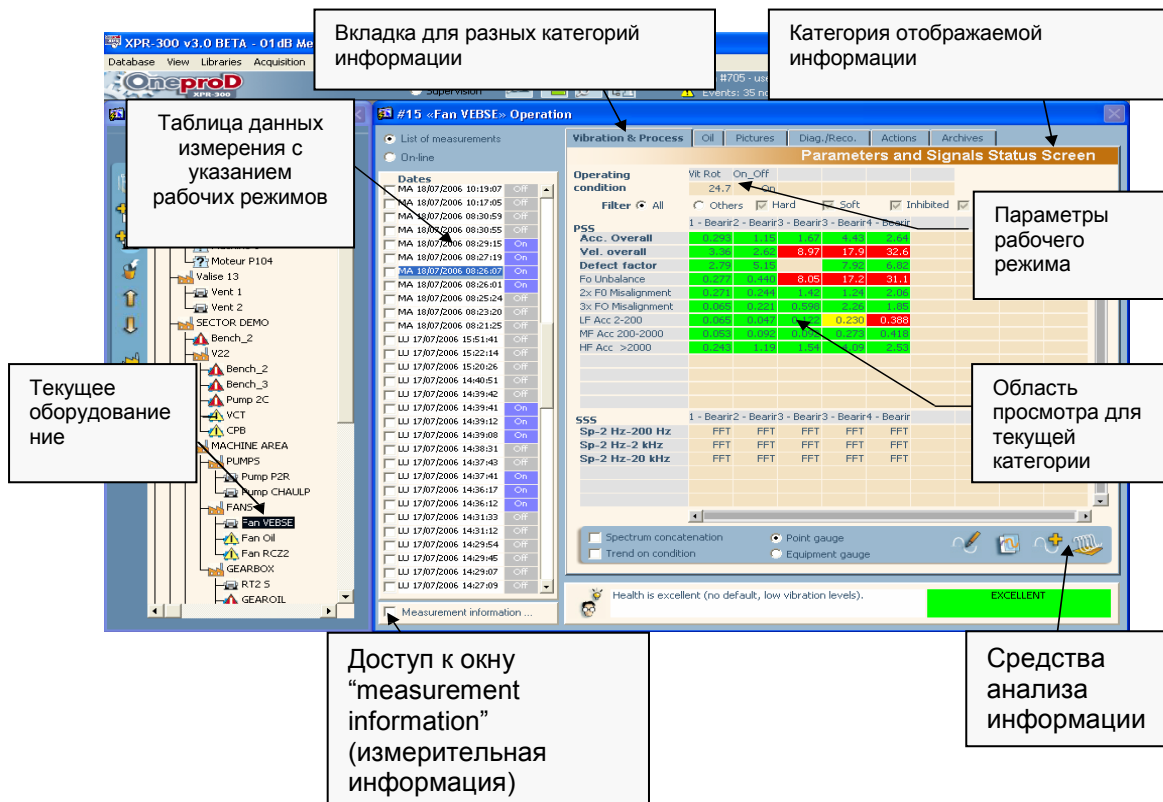


Рис. 3. Отображение главного интерфейса

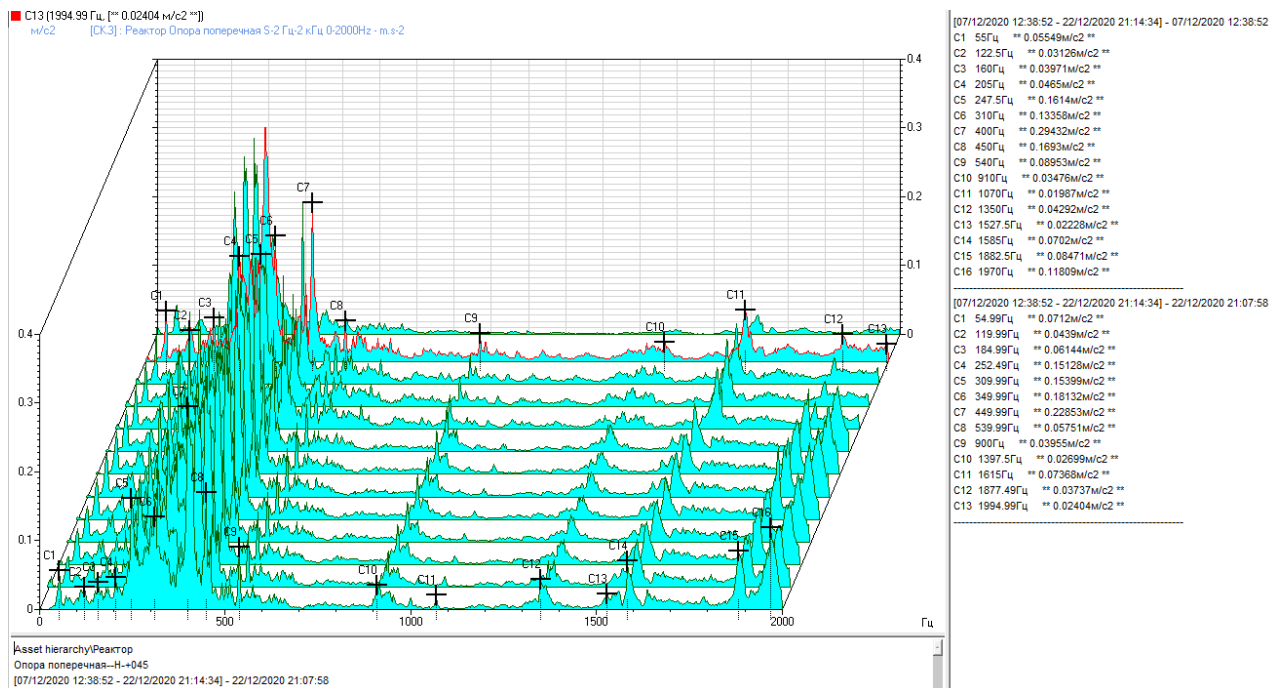


Рис. 4. Каскадный спектр поперечных колебаний передней опоры в диапазоне частот (1 – 2000) Гц в холодном (нижние 8 спектров и горячем состоянии (4 верхних спектра) на 100 цикле эксплуатации (07–22.12.2020 г)

В качестве других вероятностных параметров используются:

- стандартное отклонение – $\sigma = (\mu_2)^{1/2}$;
- коэффициент асимметрии $As = (\mu_3/\sigma^3)$;
- коэффициент эксцесса $E_k = (\mu_4/\sigma^4) - 3$;
- кurtosis $(\mu_4/\sigma^4) = E_k + 3$;
- пикфактор $PF = X_p/\sigma$; (пиковое значение – X_p) ;

где $\mu_i = \int_{-\infty}^{+\infty} (x-x_{cp})^i p(x)dx$ – центральный момент соответствующего порядка i ,
 $p(x)$ – плотность распределения.

Высокая чувствительность S-дискриминантов к выбросам амплитуды при ухудшении технического состояния машины и росту амплитудных значений вибраций на характерных частотах явилась основанием для их использования в алгоритмах раннего обнаружения зарождения дефектов и локализации источников повышенной виброреактивности. Метод локализации источников является весьма эффективным при проведении дискриминантного анализа вибраций в узких полосах частот. Таблица виброреактивности (изменчивости значений относительно эталона) позволяет в текущий момент времени визуально оценить ситуацию, связанную с отклонением технического состояния от нормы (когда $Is \gg 1$), и оперативно принять решение по дальнейшей эксплуатации объекта. Второй способ представления информации – построение трендовых характеристик параметров в полосах частот от времени наработки в графической форме.

В качестве иллюстрации на рис. 5 изображены графики трендов стандартного отклонения σ (корня из дисперсии – центрального момента 2-го порядка) поперечных колебаний передней опоры в различных полосах частот со временем наработки отражателя. График желтого цвета отображает тренд стандартного отклонения в полосе наибольшей виброреактивности поперечных колебаний передней опоры отражателя (1,5–2,0 кГц).

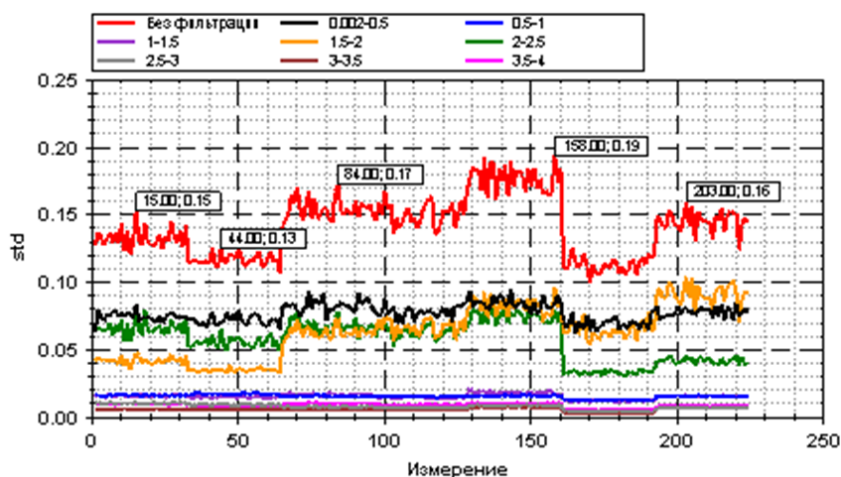


Рис.5. Тренды стандартного отклонения (Std) широкополосного (верхний график) и узкополосных вибросигналов со временем наработки

На рисунке 6 изображены графики трендов коэффициента эксцесса – центрального момента 4-го порядка поперечных колебаний передней опоры, из которого следует, что в последних двух измерениях, несмотря на низкий уровень вибрации, был отмечен рост эксцесса в полосе 3,5–4,0 кГц, обусловленный в основном наличием резонансных частот, реагирующих на импульсное возмущение (даже в отсутствии возбуждения на вынужденных частотах). Картину трендов, аналогичную эксцессу, дает тренд пик-фактора в тех же полосах частот (рис. 7).

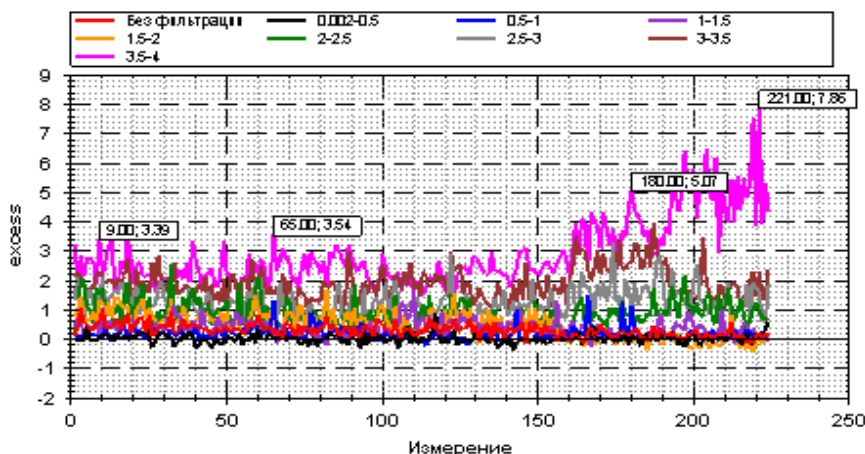


Рис.6. Тренды эксцесса со временем наработки в различных полосах частот

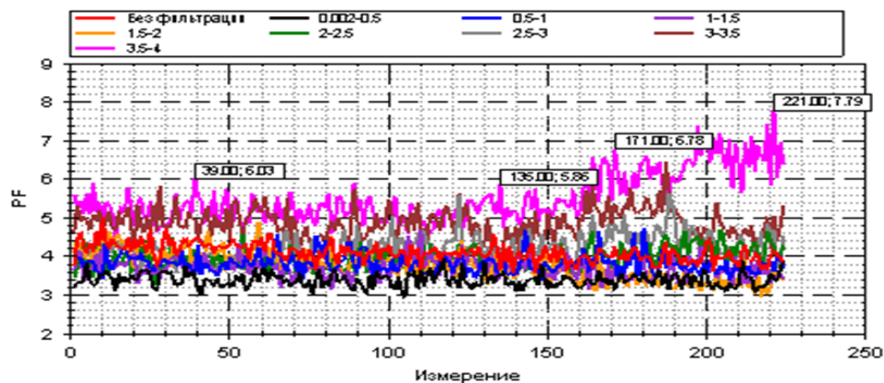


Рис.7. Тренды пик-фактора виброускорения поперечных колебаний передней опоры со временем наработки в различных полосах частот

На рисунке 8 изображены графики трендов коэффициента асимметрии (skewness) в тех же полосах частот. Графики показывают ничтожные изменения этого параметра, который чувствителен к проявлению в вибросигнале развитых дефектов.

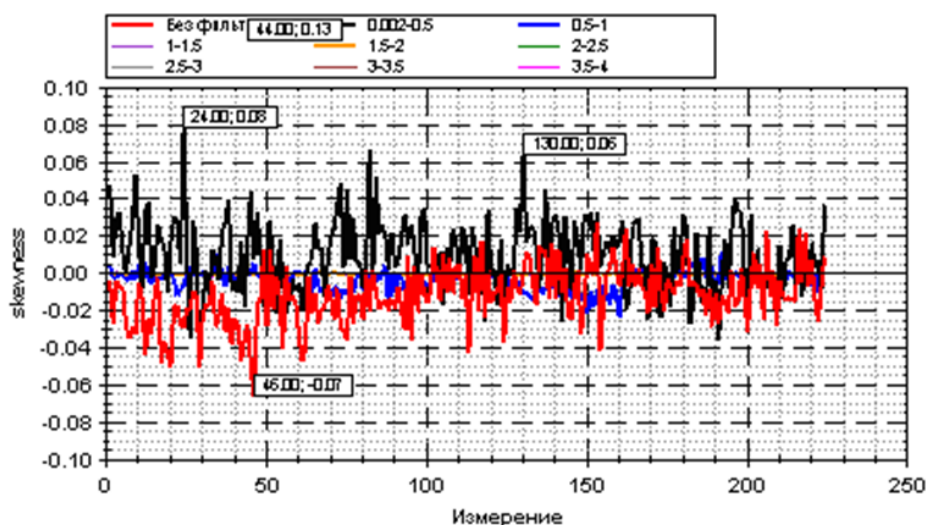


Рис. 8. Тренды коэффициентов асимметрии виброускорения поперечной составляющей передней опоры со временем наработки в различных полосах частот

Важной вероятностной характеристикой является кurtosis, который определяется как центральный момент 4-го порядка случайной переменной:

$$K = (1/\sigma^4) \int_{-\infty}^{\infty} (x - x_{cp})^4 p(x) dx,$$

где $x(t)$ – временная реализация вибросигнала;

x_{cp} – его среднее значение (математическое ожидание);

σ – стандартное отклонение (иначе, СКЗ);

$p(x)$ – плотность закона распределения.

На графике рис. 9 представлены временные зависимости кurtosis вибрационных процессов по всем трем координатам передней опоры и редуктора за время работы отражателя в течение 10 000 ч. Среди всех кривых заметно выделяется зависимость кurtosis поперечных колебаний корпуса редуктора. Нестационарность значения этого параметра здесь обусловлена особенностями места установки акселерометра. Причина появления нестационарных флуктуаций кurtosis поперечных колебаний редуктора кроется, по всей видимости, в том, что акселерометр, фиксирующий вибрации редуктора в данном направлении, расположен напротив цилиндрической пары шестерен основного вала и промежуточного. При работе шестерни, в силу своих технических особенностей, фактически имеют нулевой момент вращения, а, следовательно, пары в процессе совместного вращения при сопряжении зубьев шестерен могут набегать или отставать друг от друга, что способствует появлению случайных микроударов. Вместе с тем, наличие зазоров в сопряжении шестерен приводит к появлению тех же микроударов. Анализ результатов измерений в широкой полосе частот и на большой длительности временной реализации по другим направлениям свидетельствует о том, что признаков ухудшения состояния ПО на данном этапе не отмечено.

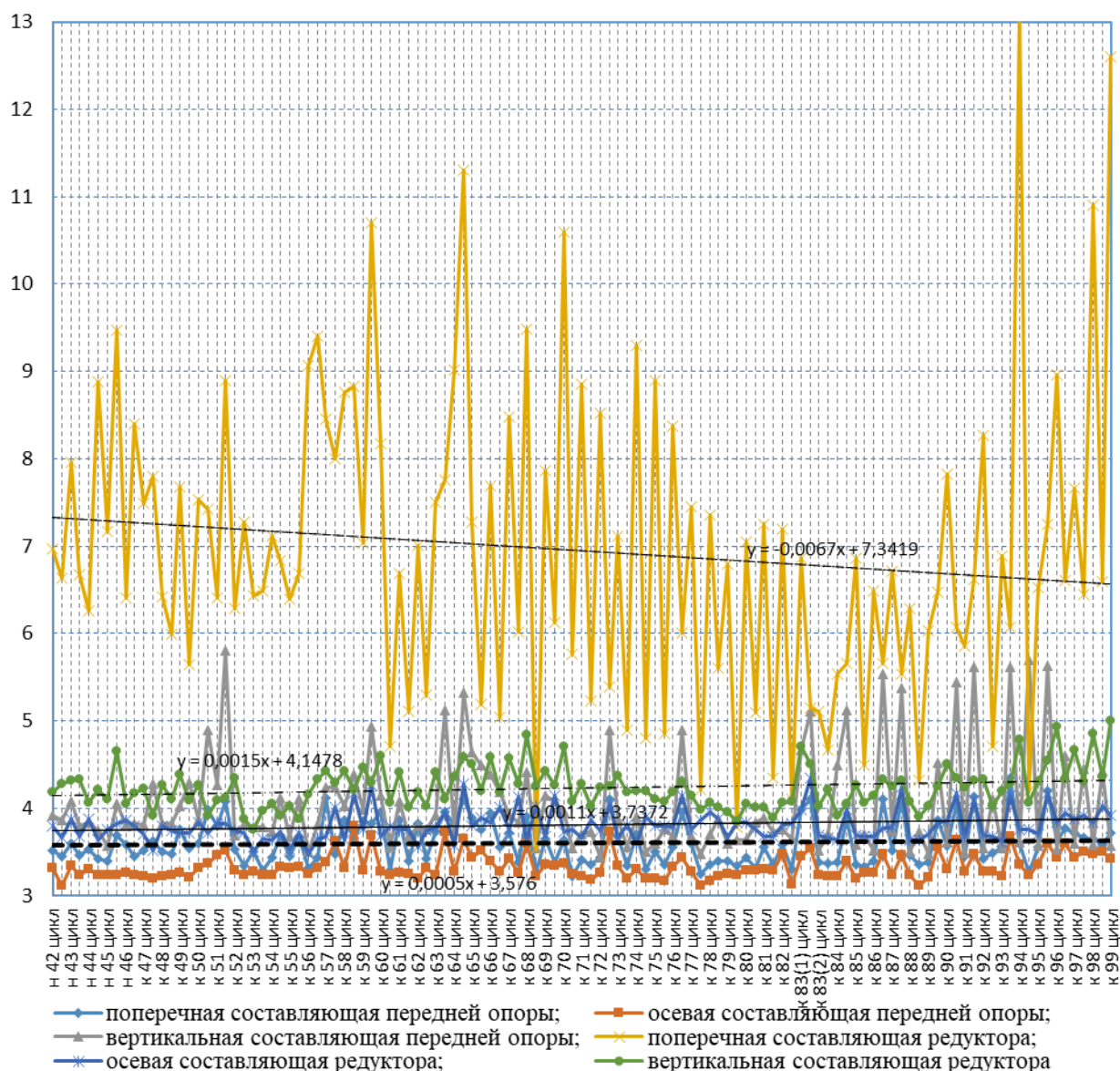


Рис. 9. Значения кurtосиса вибрационных процессов опорных конструкций ПО

Что касается таких вероятностных характеристик вибрационных процессов, как стандартное отклонение и асимметрия, то они в отсутствие развитых дефектов, меняются незначительно; эксцесс, а вместе с ним и пик-фактор, ведут себя аналогично, разве что имеют более высокие значения и изменения в полосе 3,0–3,5 кГц.

5. Результаты анализа примесей в масле

В настоящем разделе представлены результаты анализа продуктов износа в процессе эксплуатации отражателя ПО-2Р, выработавшего свой ресурс.

Схема отбора проб масла из системы смазки отражателя показана на рис. 10.

Спектры гамма-излучения проб масла измерялись на низкофоновом германиевом спектрометре высокого разрешения с калибровочной эффективностью. Чтобы учесть медленные изменения активности изотопов, связанные с режимом работы реактора, результаты проб выходного масла нормировались на величину текущей активности соответствующего изотопа во входном масле. В измеряемых спектрах основной интерес представляли элементы, входящие в состав изнашиваемых стальных деталей ПО: Fe, Cr, Co, Ni, Zn. При проведении измерений было отмечено, что относительная

активность металлических примесей Co-60, Fe-59, Zn-65, Mn-54, Co-58 и Cr-51 в пробах входного масла в зависимости от времени меняется. С учетом изменений относительной активности, связанных с режимом работы реактора, можно считать, что содержание примесей в масле на входе в ПО за период наблюдений оставалось достаточно стабильным. Разброс значений в измерениях активности проб масла не превышал $\pm 20\%$.

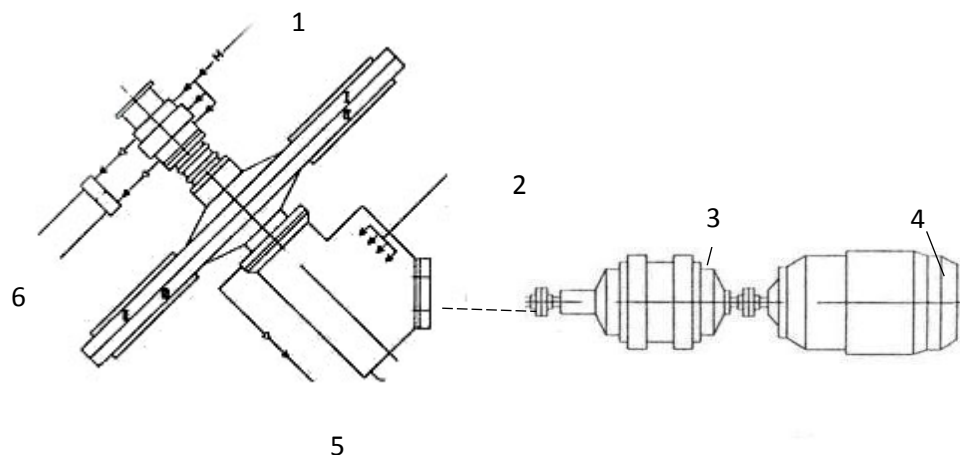


Рис.10. Схема отбора масла в системе смазки:
1 – вход масла в переднюю опору; 2 – вход масла в редуктор; 3 – магнитная муфта;
4 – приводной двигатель, 5 – выход масла из редуктора,
6 – выход масла из передней опоры

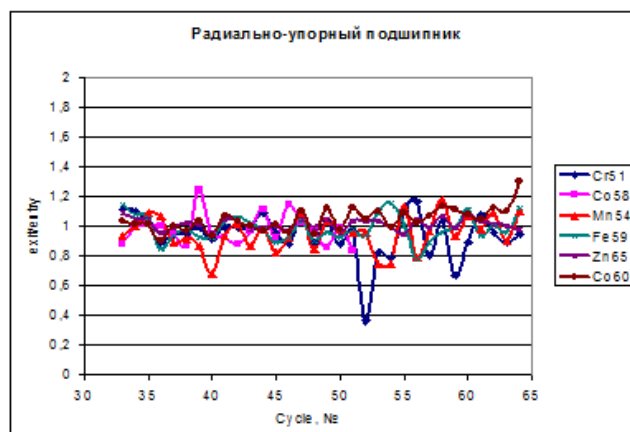
На рисунках 11а и б приведены результаты измерений проб масла на выходе из радиального и радиально-упорного подшипника подвижного отражателя ПО-2Р (2002 г). Можно констатировать, что в пределах $\pm 30\%$ активность масла на выходе подшипников постоянна и заметного увеличения содержания примесей в выходном масле подшипников не наблюдается.

Картина заметно иная в пробах масла, выходящего из редуктора ПО. На рисунке 11 в видно, что активность Co-60, Fe-59, Cr-51 и Mn-54 в выходном масле редуктора заметно выше, чем соответствующие активности во входном масле. Более того, наблюдается тенденция к увеличению этого отношения со временем. При этом активность Zn-65 и Co-58 остается неизменной. Можно сделать заключение, что эти микрочастицы принадлежат детали, изготовленной из хромистой стали. Подтверждением этого утверждения могут служить результаты сопоставления активностей наблюдаемых изотопов, с результатами, вычисленными с помощью формулы определения интенсивности гамма-линий:

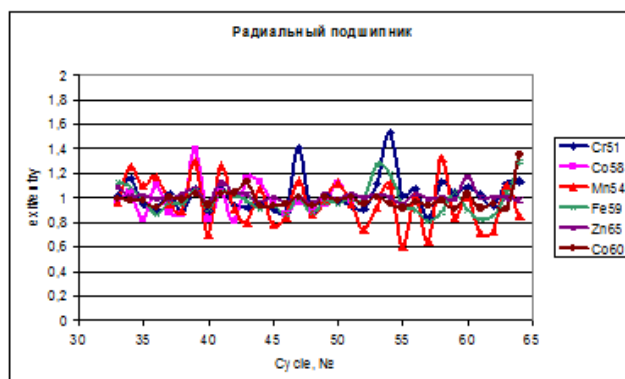
$$N = (N_A/A) \cdot M \cdot F \cdot \sigma \cdot I \cdot C \cdot \varepsilon \cdot t \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t_1)) / (1 - \exp(-\lambda \cdot t_2)) \quad (*)$$

где N – число импульсов в аналитической линии элемента за время измерения t ;
 N_A – число Авогадро; A – атомный вес элемента; M – масса примеси, грамм; F – эффективный поток нейтронов, нейтр./см²/с; σ – сечение реакции, барн; I – относительный выход аналитической линии γ – квантов на распад; C – относительное содержание активируемого изотопа в естественной смеси изотопов; ε – эффективность регистрации гамма-квантов детектором; $\lambda = 0,693/T_{1/2}$ – постоянная распада наблюдаемого изотопа, $T_{1/2}$ – период полураспада; $t_1 = 11$ суток – время работы реактора на мощности в одном цикле; $t_2 = 30$ суток – время повторения циклов работы реактора.

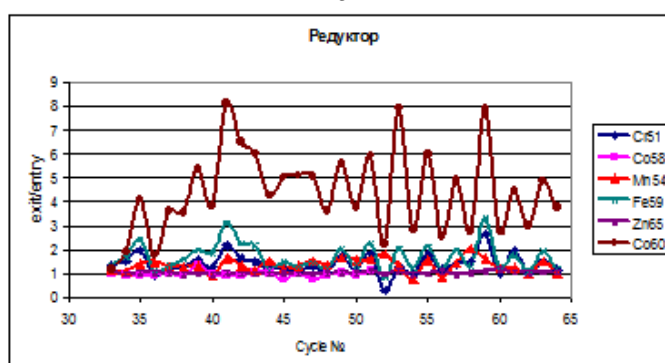
В таблице приведены значения параметров рассматриваемых металлов.



а



б



в

Рис. 11. Зависимость активности радиоактивных изотопов в масле от выработки ресурса:
а – основного радиального подшипника передней опоры,
б – радиально-упорного подшипника передней опоры, в –редуктора

Значения параметров изотопов

Изотоп	E_γ , кэВ	I	Σ , barn	C	$T_{1/2}$, дней	E
Cr-51	320,1	0,0983	15,900	0,044	27,7	0,043
Mn-54	834,8	1,000	0,083	0,059	312,5	0,021
Co-58	810,8	0,994	0,060	1,000	70,96	0,021
Fe-59	1099,2	0,565	0,501	0,003	44,50	0,017
Co-60	1173,2	0,999	18,650	1,000	1923,60	0,016
Zn-65	1115,5	0,508	0,760	0,489	243,90	0,017

Полагая, что все примеси активировались одинаковым потоком тепловых нейтронов, используя формулу (*), после очередного цикла эксплуатации (12500 ч) получим: $M_{Cr}/M_{Fe}=(0,004\pm 0,001)$, $M_{Co}/M_{Fe}=(0,001\pm 0,0001)$, $M_{Zn}/M_{Fe}=(0,002\pm 0,01)$.

Такое соотношение элементов соответствует химическому составу хромистой стали.

Кобальт-58 и марганец-54 образуются в реакциях на быстрых нейтронах из никеля-58 и железа-54. Используя формулу (*) и данные из табл. 2, получим: $M_{Ni}/M_{Fe}=(0,003\pm0,006)$, что свидетельствует практически о полном отсутствии никеля в примеси.

Незначительные, в пределах $\pm 20\%$, и нерегулярные отклонения активностей различных элементов в масле из основного радиально-упорного подшипника (см. рис. 11 а) и в масле радиального подшипника (см. рис. 11 в) по сравнению с активностью тех же элементов во входной напорной линии связаны, по-видимому, с погрешностью измерений и не показывают износа металла подшипников. Напротив, активность хрома-51, железа-59, марганца-54 (из реакции $^{54}Fe(n, p)^{54}Mn$) и особенно кобальта-60 в масле из редуктора в несколько раз и коррелированным образом превышает активность этих элементов во входном масле (см. рис. 11 с).

Из приведенных данных можно видеть, что наблюдаемая активность примесей в масле подвижного отражателя ИБР-2 обусловлена выносом металлических микрочастиц из редуктора ПО и связана с износом шестерен редуктора. Результаты измерений указывают на постоянное увеличение скорости износа. В примесях присутствует цинк и кадмий. Оба этих элемента входят в состав латуни сепараторов подшипников. К сожалению, анализ этих примесей затруднен из-за короткого периода полураспада кадмия-115 (2,23 дня) и значительной примеси цинка в чистом масле.

Использование для диагностики нейтронно-активационного метода, в совокупности с виброакустическими методами, позволило более точно обнаружить развитие процессов деградации деталей оборудования на ранней стадии их зарождения. После достижения проектного ресурса ПО-2Р был выведен из эксплуатации.

Заключение

В работе показана эффективность комбинированного использования различных методов диагностики технического состояния роторных машин, включающих комплекс вероятностных характеристик вибрационных процессов, а также нейтронно-активационного метода для оценки примесей в масле на примере подвижных отражателей ПО-2 и ПО-3.

Комплексный подход в технической диагностике позволяет получить наиболее достоверную картину технического состояния подвижного отражателя исследовательского реактора ИБР-2.

Список литературы

1. Sizarev V. D., Evropin S.V., Sokolova Asja G., Balitsky Felix Ja. Vibration condition monitoring as a mean of service life management of IBR-2 movable reflector modulator. Proc. of the Fifth Intern. Confer. Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, CM 2008/MFPT 2008. Edinburgh, Scotland, UK, 2008
2. Sizarev V. D. Diagnostics of the IBR-2 research reactor's movable reflector state based on the analysis of radioactive impurities in oil. Proc. of the Sixth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, CM 2009, Dublin, Ireland, 2009
3. Сизарев В.Д., Лущиков В.И. Диагностика процессов механического износа ядерного оборудования на основе анализа радиоактивных примесей в масле. Международный научно-технический сборник «Надежность и долговечность машин и сооружений». Киев: ИПП НАН Украины, вып. 32, стр.144–152, 2009

4. *Sokolova A.G.* New machinery condition monitoring technique based on multidimensional visualization of vibration S-discriminants / 10th European Conference on Non-Destructive Testing / Moscow 2010, June 7–11 / Report № 1-08-12. Pp. 1–7.
5. *Sokolova A.G., Balitsky F.Ya.* S-discriminants spectra as a base for new vibration monitoring technique sensitive to early stage of machinery deterioration / The Ninth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies – CM 2012 / MFPT 2012, 12–14 June 2012 / The Ibis Hotel, Earls Court, London, // UK // Full Papers / N 243 – Sokolova – *pdf* / P.1–11
6. *Sokolova A.G., Balitsky F.Ya.* S-discriminants. New approach to machinery condition monitoring and defects occurrence and development detecting / The Tenth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies – CM 2013 / MFPT 2013, 18–20 June 2013 / The Qubus Hotel, Krakow, // Poland // Full Papers / N 142 – Sokolova – *pdf* / P.1–10
7. *Sizarev V.D.* Diagnostics of the IBR-2 research reactor's movable reflector state based on the analysis of radioactive impurities in oil. Proc. of the Sixth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, CM 2009, Dublin, Ireland, 2009