

УДК 621.22-047.43  
DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-4-39-44

## ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

*А.А. Ключац, К.П. Курленко, М.Ф. Носков, В.И. Татарников*

*Аннотация.* Вибрация гидроагрегата является комплексным показателем, определяющим надежность и экономичность оборудования. Этот показатель отражает обоснованность принятых в проекте конструктивных решений гидроагрегата, качество его изготовления, монтажа и ремонта, режимные условия работы машины. В настоящее время нет датчика, который бы охватывал рабочую полосу частот по вибрационному смещению в диапазоне 0,1–200 Гц, что не позволяет оценить его по принятым нормам. Предложен способ проведения контроля частотной полосы 0,1–2 Гц при помощи датчиков пульсаций давления, для которых также необходимы нормы допустимых пульсаций. Выявлено, что в способе оценки уровня вибрации по виброперемещению допустимы погрешности в результате двойного интегрирования сигнала и проникновения кавитационных помех в состав сигнала.

*Ключевые слова:* гидравлические электростанции; гидрогенератор; амплитудно-частотная характеристика; вибрационное смещение; кавитация.

---

## ВИБРАЦИЯЛЫК СЫНООЛОРДУН НАТЫЙЖАЛАРЫ БОЮНЧА ГИДРАВЛИКАЛЫК МАШИНАНЫН АБАЛЫН БААЛОО МАСЕЛЕЛЕРИ

*А.А. Ключац, К.П. Курленко, М.Ф. Носков, В.И. Татарников*

*Аннотация.* Гидроагрегаттын титирөөсү – бул жабдуулардын ишенимдүүлүгүн жана натыйжалуулугун аныктоочу комплекстүү көрсөткүч. Бул көрсөткүч долбоордо кабыл алынган гидроагрегаттын долбоордук чечимдеринин негиздүүлүгүн, аны даярдоонун, орнотуунун жана оңдоонун сапатын, машинанын иштөө шарттарын чагылдырат. Азыркы учурда 0,1–200 Гц диапазонунда титирөөнүн жылышуусу үчүн жумушчу жыштык тилкесин камтый турган датчик жок, бул аны кабыл алынган ченемдерге ылайык баалоого мүмкүндүк бербейт. 0,1–2 Гц жыштыгында басымдын пульсациялык датчиктерин колдонуу менен контролдоо ыкмасы сунушталат, бул үчүн да жол берилген пульсация ченемдери талап кылынат. Титирөөнүн жылышынын деңгээлин баалоо ыкмасында сигналдын кош интеграциясынын жана сигналдын курамына кавитациялык интерференциянын киришинин натыйжасында каталарга жол бериле тургандыгы аныкталган.

*Түйүндүү сөздөр:* гидравликалык станциялар; гидрогенератор; амплитудалык-жыштык мүнөздөмөсү; титирөөнүн жылышы; кавитация.

---

## THE PROBLEMS OF ASSESSING THE STATE OF THE HYDRAULIC MACHINE ON THE BASIS OF TEST RESULTS

*A.A. Klyukach, K.P. Kurlenko, M.F. Noskov, V.I. Tatarnikov*

*Abstract.* The vibration of the hydraulic unit is a complex indicator that determines the reliability and efficiency of the equipment. This indicator reflects the validity of the design decisions taken in the project for the unit, the quality of its manufacture, installation and repair, the operating conditions of the machine. At the moment, there is no sensor to study the vibration state of the hydraulic unit, which would cover the operating frequency band of the sensor by vibration displacement in the frequency range of 0.1–200 Hz. As a result, we do not receive perfect data processing of the vibration state of the hydraulic unit, which does not allow us to evaluate it according to accepted standards. In this paper, it is proposed to monitor the frequency band of 0.1–2 Hz using pressure pulsation sensors, for which the norms

of permissible pulsations are also required. It is revealed that in the method of assessing the vibration level by vibration displacement, there are permissible errors as a result of the double integration of the signal and the penetration of cavitation interference into the signal composition.

*Keywords:* hydroelectric power station; hydro generators; amplitude-frequency characteristic; vibration displacement; cavitation.

**Введение.** Одним из комплексных показателей качества надежности гидроагрегата (ГА) является его вибрация. Вибрации отражают качество изготовления гидроагрегата, качество монтажных операций и качество ремонта одновременно, а также условия работы. Экспериментальные данные – это результат эксперимента, который не может быть повторен ни в одной лаборатории. Исследование вибраций гидроагрегата актуально всегда, так как направлено на предупреждение аварийных ситуаций. Эффективный мониторинг вибрационного состояния гидроагрегата является одной из проблем современной гидроэнергетики. Необходимо отслеживать вибрации и соответствующие им предварительные состояния на раннем этапе проявления дефектов изготовления, монтажа и эксплуатации. На уменьшенном макете гидроагрегата можно только приблизительно рассмотреть возможные варианты вибрационного состояния гидроагрегата.

Одной из главных проблем современной гидроэлектроэнергетики является эффективный контроль состояния ГА под нагрузкой. Необходимо внедрять такие системы виброконтроля, которые позволят диагностировать состояние гидроагрегата в те моменты времени, когда дефекты и неисправности находятся на начальной стадии своего развития. Результаты исследований контроля вибрационного состояния не могут быть с высокой степенью достоверности воспроизведены в лабораторных условиях или в результате компьютерного моделирования [1]. Гидроагрегаты обладают самым высоким показателем надежности – не менее 0,93–0,95. [2]. Поэтому вибрационные испытания ГА в большем или меньшем объеме выполнялись на всех действующих ГЭС. Наибольшее внимание к проблеме вибрации появилось после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г., где и сейчас работают авторы статьи.

Систематически обобщать результаты вибрационных исследований начал Л.А. Владиславлев [3]. Им были подробно проанализированы характеристики вибрационного состояния гидроагрегатов, изготовленных в первой половине XX века. Для этих ГА была характерна высокая металлоёмкость оборудования, небольшие значения номинальной мощности. Автор в табличной форме собрал сведения об амплитуде колебаний и преобладающих частотах вибраций при работе машин на установившихся и переходных режимах.

Спектр вибраций ГА в основном зависит от природы и уровня действующих переменных сил, жесткости опорных креплений конструктивной схемы машины. Большая часть опубликованных статей содержит лишь констатацию общего уровня вибраций опорных узлов и выделению, в лучшем случае, двух или трех составляющих колебаний. Вместе с тем, ни одна силовая машина не имеет столь богатого частотного спектра вибраций, какой свойственен ГА. Колебания лежат в диапазоне частот меньше 1,0 Гц до частот, исчисляемых сотнями Гц и даже тысячами кГц. Это связано с эксплуатацией ГА на различных режимах, каждый из которых характеризуется своей особенностью гидродинамических сил. Опыт измерения вибрации виброперемещением выявил ряд проблем. Первой проблемой является то, что у датчиков типа акселерометров и велосиметров низкий диапазон частот измерений. Кроме того, для измерения виброперемещения требуется двойное интегрирование измеренных величин. Это приводит к дополнительным погрешностям, в основном, при измерениях на частотах, близких к оборотным частотам ГА.

Для вибромониторинга стабильности работы гидроагрегата по результатам измерения предлагается использовать методы статистического управления процессами. Контролируемые показатели делятся на два подмножества: независимые и коррелированные показатели. При этом авторы предложили проводить мониторинг независимых показателей вибраций гидроагрегата [4] с помощью

стандартных карт Шухарта и стандартного отклонения. Контрольная карта Шухарта – это внутрилабораторный контроль качества, который был впервые введен Вальтером Шухартом в 1924 г.

В работе В.Н. Клячкина [4] предлагается использовать карты Хотеллинга и карты обобщённой дисперсии для анализа отклонения величины вибрации от среднего значения. Также предложено использовать карты Шухарта для стандартного отклонения измеряемых вибраций.

Вибрации гидроагрегатов определяются множеством факторов. К основным относят конструктивную схему ГА, жесткость опорных конструкций, амплитуду и частоту действующих сил. Как правило, большинство исследователей измеряют лишь общую амплитуду вибраций, и выделяют не более трех составляющих. В реальности гидротурбина имеет очень богатый спектр колебаний. Колебания лежат в диапазоне от единиц до сотен Гц, а иногда и заходят в килогерцовую область.

**Результаты и обсуждения.** Из опыта измерения вибрации виброперемещением был выявлен ряд проблем. Первой и весомой проблемой является то, что в датчиках, с помощью которых проводятся измерения, а это акселерометры и велосиметры – низкий диапазон частот. Для оценки виброперемещения требуется интегрирование полученных параметров однажды и дважды. Такие операции приводят к дополнительным погрешностям, а также являются причинами отклонений при измерениях на частотах, близких к оборотным частотам ГА, что приводит к неудовлетворительным результатам измерений.

ОРГЭС производила проверки и испытания приборов различных фирм на многих ГЭС, при этом часто результат испытания приборов был неудовлетворительным. Так при вибрации (размаха виброперемещений) на оборотной частоте гидроагрегата порядка 100 мкм, что в пределах нормы, проверяемые приборы показывали 300–500 мкм, что является недопустимым состоянием. При этом показания таких приборов были неустойчивы.

В.Н. Клячкин в работе [5] предлагает улучшить метод контроля вибрации гидроагрегата путем установки датчиков в точках, где их показания возможно будут коррелированы. Если вибрации стабильны, то наносимый ими вред минимален и эту стабильность можно исследовать методом многомерного статистического контроля. Средний уровень процесса мониторят на основе алгоритма Хотеллинга. Этот метод является дальнейшим развитием метода главных компонент.

Для мониторинга рассеяния вибраций может быть применен алгоритм обобщенной дисперсии. Чувствительность вибрационных измерений к возможным нарушениям авторы оценивали с помощью средней длины серий – количества наблюдений от момента увеличения амплитуды колебания до момента появления максимальной амплитуды.

Вторая проблема – резонанс акселерометра, вызывающий проникновение ошибок в низкочастотную область (область I), показанную на рисунке 1.

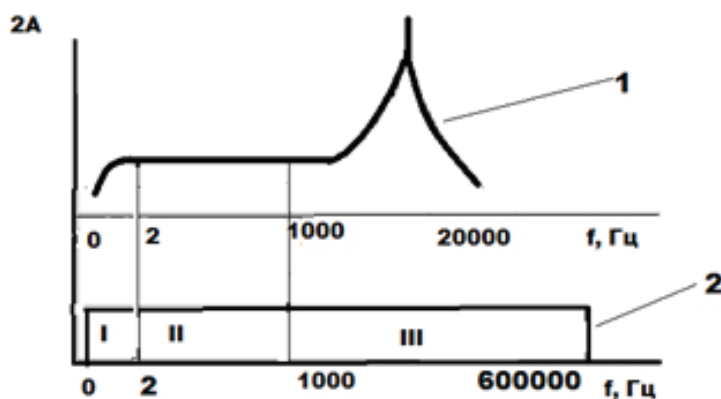


Рисунок 1 – Совмещенная амплитудно-частотная характеристика датчика акселерометра (1) и частотная характеристика ГА (2)

На некоторых напорах ГА во время измерений имеются фальсификаты, которые вызваны совпадением частот резонанса датчика и кавитационных процессов. Тогда, при увеличении чувствительности акселерометра в области резонанса, сигнал на выходе не будет точно пропорционален ускорению механических колебаний исследуемого объекта. Но, такое явление возможно в области III, перекрывающей частоту его собственного резонанса.

В рекомендациях фирмы Брюль и Къер [6] в качестве решения проблемы предложены механические фильтры при работе в области низких частот, но действие фильтров не показало удовлетворительных результатов.

Измерение вибрации проводили в полосе 1–200 Гц. Тогда, при анализе виброперемещения в охват входят информационные частоты:

- 1) оборотная частота;
- 2) двойная оборотная частота;
- 3) полюсная частота;
- 4) частота колон статора;
- 5) частота лопаток направляющего аппарата.

Из изложенного выше следует, что при снижении нижней границы измерений низких частот, даже до 0,6 Гц, и попытке измерения колебаний «жгута», выявляются размахи вибрации, не бывающие в ГА. В приведенных отчётах отсутствует анализ полосы 0,2–2 Гц.

В данной «полосе помех» представляет интерес эксплуатационный контроль, который показывает зависимость вибрации гидроагрегата от пульсаций давления с частотой жгута, пульсаций потока, нестационарности в проточной части агрегата, а также собственные частоты проточной части и пульсации высоких частот.

Для решения этой проблемы был предложен датчик пульсации давления, который может указывать слабые места агрегата. Следует отметить, что величина отклонений зависит от напора, кавитационных свойств ГА и режима нагрузки.

Далее была выявлена еще одна проблема, которая заключалась в неточности диагностирования, а именно, грубых ошибках, полученных из-за некорректных данных в области I (рисунок 1), которые приводят к искажению общего сигнала и, следовательно, к неточной оценке состояния по общему уровню.

Очень часто проектировщики гидротурбин не имеют опыта их эксплуатации. Проектировщики не понимают сущности кавитационных и гидравлических нагрузок в ГА, что приводит к созданию гидроагрегатов с неудовлетворительными техническими характеристиками по вибрациям. Это предположение было сделано авторами после лабораторных испытаний на Саяно-Шушенской ГЭС, проходивших в три этапа. В предлагаемой статье достаточно подробно представлены результаты измерений только по первому этапу, который авторы считают наиболее важным. Остальные этапы работы предполагается представить в следующем цикле публикаций.

На первом этапе для измерений использовали пьезоакселерометр. Частота сигнала виброперемещения лежала в полосе частот 0,2–200 Гц. Амплитуда виброперемещения показана на рисунке 2. Анализ приведенных данных показывает, что вибрации носят случайный характер, при этом амплитуда колебаний приблизительно равна 70 мкм. Оценку вибрационного состояния производили по стандарту, приведенному в документе [7, с. 208]. Временной интервал выбирался таким, чтобы на нем уложилось не менее 10 периодов оборотной частоты. Средний размах определяли как отношение суммы пиковых значений вибрации к половине числа пиков. Среднюю частоту определяли как отношение половины числа пиков за выбранный интервал времени к этому интервалу. Методические указания рекомендуют провести измерение и получить осциллограмму вибросигнала, содержащую не менее десяти оборотов ротора. Первая операция – это измерение амплитуды пиков. Вторая – определение среднего значения суммы положительных и отрицательных значений пиковых величин. Затем необходимо подсчитать число пиков, что не всегда возможно, как видно из графика. По среднему размаху и средней частоте,

используя рисунок 1, производили оценку состояния узла гидроагрегата. Это принято называть оценкой по общему уровню.



Рисунок 2 – Сигнал виброперемещения в полосе частот 0,2–200 Гц

Основное достоинство предложенного способа состоит в том, что сначала визуально выделяют узкие полосы частот, на которых замечено какое-либо воздействие. То есть мы не ищем дефект по средней частоте, а анализируем только интересующие нас части спектра. На втором этапе исследований предполагается сузить полосу частот до 2–200 Гц. Полосу помех предполагается вырезать фильтром. При этом среднее значение амплитуды колебаний составляет около 40 мкм. Авторы считают необходимым привести перечень работ [6–9], которые содержат существующие методики проведения виброиспытаний.

**Закключение.** Результаты исследований показали, что в способе оценки уровня вибрации по виброперемещению допустимы погрешности в результате двойного интегрирования сигнала и проникновения кавитационных помех в состав сигнала. Технически невозможно получить полную картину вибрационного состояния гидроагрегата и по нормам определить его оценку. Предложено разделить частотную характеристику на полосы и ввести нормы по контролю за эксплуатационным состоянием гидравлической машины для каждой полос. Это позволит:

1. Осуществлять отдельный контроль полосы частот 0,1–2 Гц датчиками пульсаций давлений. Потребуется нормы допустимых пульсаций.

2. Дать более конкретную оценку по АЧХ вибрационного сигнала. Для каждого диапазона обозначить предельное значение двойной амплитуды перемещения с целью точного определения причины повышенных вибраций и последующего их устранения.

3. Выработать нормы по виброскорости для диапазона частот 15–350 Гц, в котором контроль будет осуществляться по виброскорости, так как она наиболее четко представлена именно в этой полосе частот.

Поступила: 01.03.22; рецензирована: 11.03.22; принята: 15.03.22.

#### Литература

1. Прокопенко А.Н. Определение жесткостей подшипников гидроагрегата во всем диапазоне режимов / А.Н. Прокопенко, Л.Л. Смелков // Труды ОАО «НПО ЦКТИ». 2002. Вып. 291. С. 107–111.

2. *Иванченко И.П.* Комплексные показатели надежности гидроагрегатов / И.П. Иванченко, А.Н. Прокопенко // Надежность и безопасность энергетики. 2012. № 3(18). С. 63–66.
3. *Владиславлев Л.А.* Вибрация гидроагрегатов гидроэлектрических станций / Л.А. Владиславлев. М.: Изд. «Энергия», 1972.
4. *Клячкин В.Н.* Оценка стабильности гидроагрегата по результатам мониторинга вибраций / В.Н. Клячкин, А.В. Алексеева // Приборы и системы: управление, контроль, диагностика. 2019. № 3. С. 11–18.
5. *Клячкин В.Н.* Оценка стабильности вибраций на основе алгоритма обобщенной дисперсии / В.Н. Клячкин, А.В. Алексеева // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. № 4–3 (84). С. 491–493.
6. Эксплуатационный циркуляр Ц-04-84(Э). О контроле вибрационного состояния гидроагрегатов. М., 1984.
7. МЭК 994:1991 Указания по натурным измерениям вибраций и пульсаций в гидравлических машинах (турбинах, насосах ГАЭС и насос-турбинах).
8. *Завьялов П.С.* Анализ пульсационных характеристик высоконапорных радиально-осевых гидротурбин / П.С. Завьялов, А.В. Бондаренко, А.М. Гришин // Гидравлические машины. ХПИ. Вып.18. 1984. С. 94–97.
9. *Прокопенко А.Н.* Расчетно-экспериментальное обоснование зависимости вибрационных характеристик гидроагрегатов от конструктивных и режимных факторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.13 / А.Н. Прокопенко. СПб., 2014. 221 с.