



ГРУБОЙ А.П., главный конструктор,
ШОФУЛ А.К., зав. отделом, **БАТУЛИН В.И.**, зам. зав. отделом,
КИРЬЯНОВ А.Н., зам. зав. отделом, **КАЛИТИЕВСКАЯ О.М.**, зав. лабораторией,
 ГП завод "Электротяжмаш", г. Харьков.

ОБСЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОГЕНЕРАТОРА ТИПА СВКР 1340/150-96 СТ. №2 КРЕМЕНЧУГСКОЙ ГЭС ДО И ПОСЛЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

Гидрогенератор станц. № 2 Кременчугской ГЭС введен в эксплуатацию в 1959 году и проработал более 45 лет к моменту испытаний с параметрами соответствующими проектной документации.

За время эксплуатации на гидрогенераторе был выполнен значительный объем восстановительных работ, капитальных и текущих ремонтов, связанных в основном с восстановлением подпятника, сердечника статора, обмотки статора и элементов ее крепления.

Одной из основных причин возникновения и накопления дефектов на генераторе являлась работа с повышенными вибрациями статора и опорных конструкций, которые впервые были зафиксированы в конце 1970 г. при обследовании вибрационного состояния гидрогенераторов, выполненном специалистами ВНИИЭ (г. Москва).

Самыми существенными нарушениями генераторной конструкции, определяющими в течение длительного времени неудовлетворительное вибрационное состояние опорных узлов статора генератора, являлись искажение формы ротора, обусловленное ослаблением посадки обода ротора и, как следствие, асимметрия воздушного зазора и недопустимые постоянные и переменные силы магнитного тяжения между ротором и статором генератора. Также было обнаружено множество различной степени дефектов сердечника в зонах их разъемов: контактная коррозия, деформация сегментов, распушение пакетов, разрушение уплотняющих прокладок. При обследованиях и испытаниях генератора, выполненных специалистами ГП завод "Электротяжмаш" в 2002—2003 гг., было выявлено большое количество прогрессирующих дефектов и разрушений элементов статора, являющихся, прежде всего, следствием длительной работы генератора (не менее 25 лет) с перечисленными выше отклонениями, а в мае 2006 г. проведено обследование и испытание гидрогенератора до модернизации.

Для оценки вибросостояния гидроагрегата проводились измерения общего уровня (ОУ) вибрации. Мерой вибрации являлся размах вибро-

перемещения (мкм). Для определения уровня низкочастотных и 100 Гц составляющих вибрации выполнены измерения частотного спектра вибрации. Частотный диапазон измерений составлял 1,02 — 102 Гц. Испытания проводились в режимах холостого хода без возбуждения, холостого хода с номинальным напряжением статора и нагрузочных режимах при $P = 34,7; 44$ и 57 МВт. Установка вибропреобразователей на агрегате во всех режимах производилась в таких местах:

- верхняя крестовина в вертикальном направлении (ВК верт.);
- генераторный подшипник в поперечном направлении (ГП попер.);
- опора подпятника в вертикальном направлении (ОП верт.);
- турбинный подшипник в вертикальном направлении (ТП верт.);
- турбинный подшипник в поперечном направлении (ТП попер.);
- активная сталь статора на стыках в радиальном направлении.

В режиме холостого хода без возбуждения определялась фактическая величина разьединительной частоты вращения обода ротора с помощью четырех специальных датчиков относительных перемещений. Датчик представляет собой рычажный механизм с соотношением плеч 10:1, неподвижная часть которого крепится жестко к спицам остова, а подвижная — к ободу ротора. Они устанавливались на спицах № 1, 4, 7, 10.

Механическое состояние опорных конструкций характеризовала вибрация подпятника, общий уровень которой достигал 240 мкм при 55 мкм оборотной составляющей вибрации в режиме номинальной нагрузки. В режиме холостого хода общий уровень вибрации подпятника не превышал 70 мкм, при этом от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки оборотная составляющая вибрации практически не менялась. Изменение общего уровня происходит за счет увеличения гидравлических составляющих вибрации (лопастная, двойная-лопастная и др.).



В турбинном подшипнике происходят те же процессы, но при более низком уровне вибрации (до 150 мкм).

Максимальный уровень вибрации генераторного подшипника на холостом ходу без возбуждения – 65 мкм при 49 мкм оборотной составляющей. При подаче возбуждения оборотная составляющая сильно снижалась и достигала 14 мкм. Изменение вибрации с учетом фазы составило около 60 мкм. Преобладающими в спектре вибрации опорных конструкций являлись вибрации оборотной, лопастной, двойной-лопастной и т.д. Такое вибрационное состояние опорных конструкций гидроагрегата удовлетворяет требованиям ГОСТ 5616-89 и СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (Нормативный документ Мінпаливенерго України. Норми випробування електрообладнання, Київ-2007) за исключением подпятника.

Вибрационное обследование стальных конструкций статора проводилось в режимах холостого хода без возбуждения, холостого хода с номинальным напряжением статора и $P = 57$ МВт в диапазоне частот 1,02 – 102 Гц. Затем с помощью специальной программно-аппаратной системы выделялись низкочастотные составляющие, вибрации с частотой 100 Гц и другие спектральные составляющие.

Одним из существенных факторов надежности работы генератора является эксплуатационное состояние стыков составного сердечника статора. Оценка их состояния по результатам контроля вибрации в режимах холостого хода более надежна, особенно при различных уровнях возбуждения и холодном статоре (не выше 40 °С), так как в этом случае исключается влияние вибраций, возникающих из-за дробности числа пазов на полюс и фазу.

Особенностью конструкций зонтичных гидрогенераторов является то, что не существует жестких связей между ротором и статором и, следовательно, передача усилий от ротора к статору и наоборот может осуществляться только двумя путями: через железобетонные конструкции здания ГЭС и через магнитный поток в воздушном зазоре. Если учесть, что при передаче вибрации на статор через железобетонные конструкции здания ГЭС амплитуда ее уменьшается во много раз, то следует такой вывод: повышенная вибрация статора гидрогенератора может иметь место только на возбужденном генераторе. Таким образом, зная частоту вибрации активной стали статора, можно сделать вывод о причине повышенной вибрации и принять решение о мерах по ее устранению.

Максимальные размахи низкочастотных виброперемещений сердечника статора в режимах

холостого хода без возбуждения и с номинальным напряжением статора составили 22 и 183 мкм соответственно, а размах виброперемещений с частотой 100 Гц не превышал 2 мкм. Анализ спектрального состава полигармонической вибрации статора с оборотными частотами в режиме холостого хода с номинальным напряжением показал, что существенное значение имели размахи первых пяти гармонических составляющих. Преобладающими в спектре являлись вибрации с двойной и тройной оборотной частотой с уровнем до 140 мкм. Размахи составляющих вибрации с оборотными частотами по обеим сторонам каждого стыка сердечника статора мало отличались между собой.

При наборе нагрузки общий уровень низкочастотной вибрации резко возрастал и при нагрузке $P = 57$ МВт достигал нескольких миллиметров на восьми стыках из двенадцати, при этом размах вибрации с частотой 100 Гц – не более 5 мкм. Это можно объяснить зависимостью уровня низкочастотной вибрации от величины возмущающих сил, жесткости самого статора и его крепления к фундаменту.

В целом вибрационное состояние стальных конструкций статора генератора по низкочастотным составляющим значительно превышает требования СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (180 мкм), а по составляющим вибрации с частотой 100 Гц соответствует требованиям ГОСТ 5616-89 и СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (30 мкм – при номинальной нагрузке и 50 мкм в режиме холостого хода с возбуждением).

Перед выводом гидрогенератора в ремонт были сняты формы ротора и статора, проведен их анализ для оценки асимметрии воздушного зазора.

Общий анализ данных до модернизации показывает:

- максимальная вибрация опорных конструкций гидроагрегата по общему уровню в режиме холостого хода без возбуждения не превышает 70 мкм, а в режимах холостого хода с возбуждением и нагрузки – 240 мкм (подпятник). Вибрационное состояние опорных конструкций гидроагрегата превышает требования ГОСТ 5616-89 и СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (180 мкм);

- максимальный уровень вибрации сердечника статора по низкочастотной составляющей в режиме холостого хода без возбуждения не превышает 22 мкм, в режиме холостого хода с возбуждением – 183 мкм, а в режиме нагрузки достигает нескольких миллиметров. Вибрационное состояние сердечника статора по низкочастотным составляющим значительно превышает норму (180 мкм);



- рост низкочастотной вибрации сердечника статора в режиме нагрузки обусловлен ростом возмущающих сил, слабой жесткостью сердечника статора и его крепления к фундаменту;

- вибрация сердечника статора гидрогенератора с частотой 100 Гц не превышает 5 мкм;

- форма ротора соответствует оценке неудовлетворительно. При этом имеется большая разница величины воздушного зазора сверху и снизу ротора, что может объясняться отклонениями от вертикали осей линии вала агрегата и расточки статора. Необходима горячая перекалиновка обода с исправлением формы ротора;

- форма статора имеет недопустимую степень искажения, вызванную большой эллиптичностью формы (3,38 мм на сторону), а также смещением на 1,63 мм геометрической оси статора относительно оси вращения ротора. Степень искажения формы статора по средним значениям зазоров между верхом и низом составляет 30%, что значительно превышает норму (10%). Отмечено увеличение степени искажения формы статора со временем: за четыре года – 4,1%;

- разъединительная частота вращения обода ротора, характеризующая фактически радиальный натяг расклиновки, составляет 48,1 об/мин, что соответствует 77% номинальной скорости вращения ротора генератора (62,5 об/мин). Необходима горячая перекалиновка обода ротора новыми клиньями.

После вывода гидроагрегата в ремонт было проведено обследование технического состояния гидрогенератора. В результате обследования были обнаружены такие основные дефекты:

- наличие контактной коррозии активной стали на спинке сердечника, значительно усиливающейся у призм и разъемов сердечника;

- большое количество трещин на опорных зубьях остова ротора;

- около 60% призм имеют трещины (при этом 25 призм из 66 в различных частях по высоте призмы – 2–3 трещины);

- трещины, сколы и выкрашивания активной стали в непосредственной близости от призмы с образованием в местах повреждения зазоров между призмами и сегментами до 10 мм;

- нарушение монолитности и расслоение пакетов сердечника с образованием зазора между сегментами;

- волна пакетов сердечника в некоторых местах достигает 30 мм;

- практически все сварные швы приварышей имеют трещины;

- более 50 % планок крепления стяжных шпилек оборвано;

- в зоне 81, 82, 83 призм следы подгара железа.

В процессе модернизации по генератору выполнена перешихтовка сердечника статора в условиях завода, заменена обмотка статора на обмотку с современной терморезистивной изоляцией класса F. Проведена переизолировка сердечников и катушек полюсов ротора, шин токоподвода, выводных шин с использованием изоляции класса F, выполнен ряд других работ. На ГЭС выполнены работы по усилению остова ротора и перекалиновке обода ротора с корректировкой его формы.

После модернизации гидрогенератора на агрегате были проведены испытания с целью уточнения электрических и тепловых параметров, вибрационных и акустических характеристик, проверки соответствия гидрогенератора нормативной документации.

В режиме холостого хода без возбуждения вибрация генераторного подшипника, подпятника и турбинного подшипника достигает примерно одинаковой величины и составляет по общему уровню 48, 53 и 45 мкм соответственно. Наибольший уровень в спектрах при этом имеют вибрации оборотной частоты, максимальный уровень которых составляет 42 мкм (генераторный подшипник). Имеются в спектрах вибрации с другими частотами, но уровень их не превышает 5 мкм.

Такой уровень вибрации свидетельствует об удовлетворительной балансировке агрегата. При подаче возбуждения уровень вибрации генераторного подшипника изменяется незначительно: с учетом фазы вибрации от режима холостого хода без возбуждения к режиму холостого хода с номинальным напряжением статора на 26 мкм, а к режиму $P = 60$ МВт – на 32 мкм.

Максимальная вибрация опорных конструкций по общему уровню составляет 64 мкм в режиме максимальной нагрузки (подпятник) и 60 мкм в режиме холостого хода с номинальным напряжением статора (генераторный подшипник). При наборе нагрузки вибрация генераторного подшипника снижается и в режиме $P = 60$ МВт составляет 31 мкм.

Вибрационное обследование стальных конструкций статора проводилось в режимах холостого хода без возбуждения, холостого хода с номинальным напряжением статора и $P = 60$ МВт.

Максимальные размахи низкочастотных виброперемещений сердечника статора в режимах холостого хода без возбуждения и с номинальным напряжением составляют 10 и 77 мкм соот-



ветственно. Увеличение низкочастотной вибрации в режиме холостого хода с возбуждением говорит о наличии асимметрии магнитного поля в воздушном зазоре. Анализ спектрального состава полигармонической вибрации статора с оборотными частотами в режиме холостого хода с номинальным напряжением показал, что существенное значение имеют размахи первых трех гармонических составляющих. Преобладающими в спектре являются вибрации с двойной оборотной частотой. Ее уровень достигает 60 мкм. При наборе нагрузки и увеличении температуры активной стали до 48–51°C вибрации двойной оборотной частоты сердечника статора снижаются до 43 мкм.

Размах вибрации с частотой 100 Гц при температуре активной стали 32–37°C в режиме холостого хода с номинальным напряжением статора не превышает 2 мкм, а в режиме $P = 60$ МВт – 5 мкм.

На основании полученных результатов после модернизации можно сделать следующие выводы:

- максимальный уровень полигармонической вибрации опорных конструкций гидрогенератора во всех проведенных режимах не превышает 64 мкм. Такое вибрационное состояние опор соответствует требованиям ГОСТ 5616-89 и СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (для направляющего подшипника – 180 мкм, для подпятника – 150 мкм);

- максимальный уровень полигармонической вибрации сердечника статора по низкочастотным составляющим во всех режимах не превышает 77 мкм. Вибрационное состояние сердечника по низкочастотным составляющим не превышает требований СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (180 мкм);

- вибрация сердечника статора с частотой 100 Гц в режиме холостого хода с возбуждением и номинальной нагрузки составляет 2 и 5 мкм, что ниже требований ГОСТ 5616-89 и СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (30 мкм в режиме номинальной нагрузки и 50 мкм – в режиме холостого хода с возбуждением).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Обследование* технического состояния и испытания гидрогенератора СВКР-1340/150-96 ст. №2 Кременчугской ГЭС, технический отчет ТХ 129.2516 – Харьков, 2006.

2. *Тепловые*, электрические, виброакустические испытания и определение КПД гидрогенератора СВКР 1340/150-96М ст. № 2 Кременчугской ГЭС после модернизации, технический отчет ТХ 129.2752 – Харьков, 2009.

3. *ГОСТ 5616-89*. Генераторы и генераторы-двигатели электрические гидротурбинные. Общие технические условия. – М.: – 21 с.

4. *Нормативний* документ Мінпаливенерго України. Норми випробування електрообладнання, СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – Київ. – 2007. – 262 с.

5. *Глебов И.А., Домбровский В.В., Дукинтау А.А. и др.* Гидрогенераторы. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 368 с.

© Грубой А.П., Шофул А.К., Батулин В.И., Кирьянов А.Н. Калитиевская О.М., 2011

