



ПОТАШНИК С.И., председатель правления ОАО "Укрэнерго"
ГРУБОЙ А.П., главный конструктор,
ШОФУЛА К., зав. отделом, **БАТУЛИН В.И.**, зам. зав. отделом,
КАЛИТИЕВСКАЯ О.М., зав. лабораторией, ГП завод "Электротяжмаш", г. Харьков.

ВИБРАЦИОННЫЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ГИДРОГЕНЕРАТОРА-ДВИГАТЕЛЯ ТИПА СВО 1255/255-40 УХЛ4 СТАЦИОННЫЙ № 1 ДНЕСТРОВСКОЙ ГАЭС

В статье приведены результаты вибрационных и акустических испытаний гидрогенератора-двигателя типа СВО 1255/255-40 УХЛ4 ст. № 1. Днестровской ГАЭС.

На протяжении 2008—2010 годов на гидрогенераторе-двигателе типа СВО 1255/255-40 УХЛ4 стационарный № 1 Днестровской ГАЭС проводились пуско-наладочные испытания. В процессе испытаний неоднократно в различных режимах снимались вибрационные и акустические характеристики гидроагрегата.

Определение вибрационного состояния гидрогенератора-двигателя осуществлялось путем измерения вибрации опорных конструкций гидроагрегата и стальных конструкций статора генератора в соответствии с требованиями ГОСТ 5616-89 и СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 [3]. Мерой вибрации узлов гидроагрегата являлся размах полигармонического виброперемещения (2А, мкм), размах виброперемещения оборотной и других частот. Частотный диапазон измерений составлял 1,5—150 Гц и 2—200 Гц. С помощью программного обеспечения "Диамант-2" рассчитывалась мощность спектра в нужной полосе частот.

Вибрационные обследования гидроагрегата выполнены с помощью коллектора данных (анализатор типа "Кварц"-КУ-060 фирмы "Диамех", Россия).

Виброисследовательский комплекс состоял из измерительного блока "Кварц", 16-ти канального коммутатора МС-16 и низкочастотных акселерометров типа РА 055. Частотный диапазон измерительного комплекса составляет 0,3 — 300 Гц.

Виброобследования выполнялись при следующих режимах работы гидроагрегата:

- холостой ход без возбуждения (Х.Х. б/в) при номинальной частоте вращения ротора;
- холостой ход с номинальным напряжением статора;
- синхронного компенсатора;
- генераторный и двигательный режимы при различных нагрузках.

Установка вибропреобразователей на агрегате во всех режимах производилась в таких местах:

- верхняя крестовина в вертикальном направлении ($ВК_{\text{верт.}}$);

- генераторный подшипник в поперечном направлении ($ГП_{\text{попер.}}$);
- опора подпятника в вертикальном направлении ($ОП_{\text{верт.}}$);
- турбинный подшипник в вертикальном направлении ($ТП_{\text{верт.}}$);
- турбинный подшипник в поперечном направлении ($ТП_{\text{попер.}}$);
- корпус статора в радиальном направлении.

Первые пуски гидроагрегата определили повышенный уровень вибрации генераторного подшипника в поперечном направлении (свыше 200 мкм по общему уровню) в режиме холостого хода без возбуждения. Преобладающей в спектре являлась вибрация оборотной частоты. Вибрация остальных опор не превышала 124 мкм по общему уровню (опора подпятника). Оборотная составляющая при этом не превышала 20 мкм. В нагруженных режимах вибрация опорных конструкций гидроагрегата снижалась.

По результатам испытаний было принято решение о необходимости проведения балансировки ротора генератора путем установки балансировочных грузов на спицы ротора. В декабре 2009 года была проведена балансировка ротора генератора. В процессе балансировки на 2 спицы были установлены грузы, приведенная масса которых составила 194 кг.

Сравнительные данные общего уровня (ОУ) вибрации и первой гармонической составляющей до и после проведения балансировки приведены в Табл. 1.

Как видно из Табл. 1 в результате балансировки агрегата общий уровень вибрации генераторного подшипника в поперечном направлении в режиме холостого хода без возбуждения снизился с 205 мкм до 145, из которых доля I гармоники — 36 мкм. Оборотная составляющая снизилась со 186 мкм до 36 мкм, т. е. в процессе балансировки величина механического дисбаланса снижена до минимального уровня.



Таблиця 1. Сравнение вибрационных характеристик подшипниковых опор гидроагрегата до и после балансировочных операций, 2А, мкм

| Режим работы г/а | Измеряемый параметр | До балансировки | | | | | После балансировки | | | | |
|-------------------------------------|---------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|--------------------|----------|----------|----------|----------|
| | | ВК верт. | ГП попер | ОП верт. | ТП верт. | ТП попер | ВК верт. | ГП попер | ОП верт. | ТП верт. | ТП попер |
| Х.Х. без возбуждения | ОУ | 117 | 205 | 124 | 66 | 37 | 73,5 | 145 | 148 | 79 | 52 |
| | 1 гарм. сост. | 80 | 186 | 20 | 16 | 24 | 18,4 | 36 | 11 | 14 | 6 |
| Х.Х., $U_{от} = U_{ном}$ | ОУ | 112 | 205 | 125 | 60 | 37 | — | — | — | — | — |
| | 1 гарм. сост. | 79 | 172 | 14 | 19 | 26 | — | — | — | — | — |
| Режим СК | ОУ | 94 | 202 | 62 | 31 | — | 48 | 70 | 38 | 19 | 21 |
| | 1 гарм. сост. | — | — | — | — | — | 14 | 27 | 7 | 2 | 5 |
| Двигательный режим $P = 405$ МВт | ОУ | 65 | 120 | 90 | 34 | — | 34 | 54 | 62 | 20 | 12 |
| | 1 гарм. сост. | — | — | — | — | — | 29 | 50 | 9 | 7 | 4 |

При переходе в режим синхронного компенсатора и нагрузке $P = 405$ МВт (двигательный режим) величина вибрации генераторного подшипника в поперечном направлении не превышает 27 и 50 мкм соответственно. Максимальный уровень вибрации подшипниковых опор гидроагрегата в режиме $P = 405$ МВт не превышает 62 мкм (опора подпятника в вертикальном направлении).

После проведения балансировочных операций вибрационное состояние подшипниковых опор гидроагрегата не превышает требования ГОСТ 5616-89 и СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (150 мкм).

Дальнейшие испытания (2010 год) гидроагрегата в двигательном и генераторном режимах при различных мощностях показали стабильность ви-

брационных характеристик с течением времени. В Табл. 2 приведен общий уровень вибрации опорных конструкций в диапазоне частот $2 \div 200$ Гц, амплитуда и фаза (А/Ф) оборотной составляющей в режимах выработки реактивной мощности (п.п. 2–5) и потребления (п. 6). В Табл. 3 даны уровни вибрации гармоник оборотной частоты генераторного подшипника в поперечном направлении в тех же режимах.

В процессе испытаний проводился контроль вибрации корпуса статора. Корпус – основной конструктивный элемент, служащий для восприятия и передачи на фундамент электромагнитных, механических и гидравлических усилий, возникающих при работе гидроагрегата. В нашем

Таблиця 2. Вибрация опорных конструкций гидроагрегата, мкм.

| № пп | Режим работы г/г | Измеряемый параметр | Место замера | | | | |
|------|---|---------------------|--------------|----------|----------|----------|-----------|
| | | | ГП попер. | ВК верт. | ОП верт. | ТП верт. | ТП попер. |
| 1 | Х.Х. б/в | ОУ (2 — 200 Гц) | 97,75 | 75,97 | 144,97 | 76,66 | 30,74 |
| 2 | Двигательный $P = 403$ МВт, $Q = 3$ МВар | ОУ (2 — 200 Гц) | 48,61 | 31,22 | 67,67 | 16,81 | 16,30 |
| | | А/Ф | 46/180 | 27/352 | 9/132 | — | — |
| 3 | Генераторный $P = 245$ МВт, $Q = 10$ МВар | ОУ (2 — 200 Гц) | 23,19 | 17,35 | 67,22 | — | — |
| | | А/Ф | 9/193 | 6/17 | 15/294 | — | — |
| 4 | Генераторный $P = 324$ МВт, $Q = 11$ МВар | ОУ (2 — 200 Гц) | 9,53 | 9,11 | 30,04 | 10,59 | 8,73 |
| | | А/Ф | 7/209 | 5/27 | 13/319 | — | — |
| 5 | Генераторный $P = 324$ МВт, $Q = 50$ МВар | ОУ (2 — 200 Гц) | 10,37 | 9,76 | 31,54 | 14,29 | — |
| | | А/Ф | 9/181 | 7/8 | 13/308 | — | — |
| 6 | Генераторный $P = 324$ МВт, $Q = -60$ МВар | ОУ (2 — 200 Гц) | 10,34 | 8,74 | 30,89 | — | — |
| | | А/Ф | 7/206 | 3/8 | 13/308 | — | — |

Таблиця 3. Гармонический анализ вибрации генераторного подшипника в поперечном направлении, мкм

| Измеряемый параметр | | Режим | | | | | |
|---------------------|------|----------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | | Х.Х. б/в | $P = 403$ МВт, $Q = 3$ МВар | $P = 245$ МВт, $Q = 10$ МВар | $P = 324$ МВт, $Q = 11$ МВар | $P = 324$ МВт, $Q = 50$ МВар | $P = 324$ МВт, $Q = -60$ МВар |
| Гармоники, Гц | 2,5 | 21,48 | 47,52 | 8,47 | 5,47 | 6,35 | 5,42 |
| | 5 | 13,66 | 2,38 | 4,27 | 1,94 | 3,22 | 3,10 |
| | 7,5 | 12,20 | 1,04 | 1,24 | 1,38 | 0,82 | 0,85 |
| | 10 | 3,69 | 0,75 | 0,63 | 0,48 | 0,30 | 0,57 |
| | 12,5 | 0,47 | 0,28 | 0,24 | 0,17 | 0,15 | 0,17 |
| ОУ 2 - 200 Гц | | 97,75 | 48,61 | 23,19 | 9,53 | 10,37 | 10,34 |



случае он состоит из отдельных секторов, которые условно принято называть "шестеркой".

В Табл. 4 приведена вибрация корпуса статора гидрогенератора — двигателя в генераторных режимах. Замеры проводились по центру "шестерки" в среднем сечении по ее высоте.

Вибрационное состояние гидроагрегата в режиме холостого хода без возбуждения определяет вибрация подпятника и генераторного подшипника, общий уровень которых достигает 145 мкм и 98 мкм, оборотные составляющие при этом равны 15 мкм и 21 мкм соответственно.

В нагрузочных режимах вибрация опорных конструкций снижается. Максимальный уровень вибрации подпятника и генераторного подшипника не превышает 68 мкм и 49 мкм, оборотные составляющие при этом составляют 11 мкм и 47 мкм соответственно. Преобладающей в спектре вибрации генераторного подшипника в поперечном направлении является вибрация оборотной частоты.

Уровень низкочастотной вибрации корпуса статора в нагрузочных режимах не превышает 17 мкм, при этом вибрация с частотой 100 Гц не более 4 мкм. Опыт эксплуатации показывает, что вибрация сердечника и корпуса статора, вследствие их жесткой связи, незначительно отличаются друг от друга (~ 20%). Показания системы вибромониторинга сердечника статора на отметке 58 м (верхняя крестовина) Днестровской ГАЭС в пределах 7 + 23 мкм.

В соответствии с ГОСТ 11929-87 на гидрогенераторе-двигателе определялся уровень шума (средний уровень звука) на расстоянии 1 м от наружного контура машины. Все измерения проводились с ориентацией микрофона на ось вращения ротора гидрогенератора-двигателя и перпендикулярно к ней. Для измерения уровня шума использовалась аппаратура датской фирмы "Брюль и Кьер": шумомер 2203 с конденсаторным микрофоном типа 4145 и октавным фильтром типа 1613.

В Табл. 5 приведены результаты измерения уровня шума в 6-ти точках, равномерно расположенных по окружности для 3-х режимов работы гидрогенератора-двигателя, где: точка 1 — по верхнему бьефу; точки 2, 3 и далее — по часовой стрелке от точки 1.

Уровень шума во всех нагрузочных режимах работы гидрогенератора-двигателя находится в пределах 81,2 — 84,3 дБА, что не превышает требований ГОСТ 5616-89 (норма 85 дБА).

Общий анализ данных проведенных испытаний показывает:

Таблица 4. Вибрация корпуса статора, мкм.

| Режим работы г/г | Измеряемый параметр | Место замера | |
|---|---------------------|--------------|-------|
| | | Ш1 | Ш3 |
| Генераторный $P = 245 \text{ МВт}, Q = 10 \text{ МВар}$ | ОУ (2 — 200 Гц) | 16,22 | 15,92 |
| Генераторный $P = 324 \text{ МВт}, Q = -60 \text{ МВар}$ | ОУ (2 — 200 Гц) | 15,20 | 16,35 |

где: Ш1 — "шестерка" №1 статора (с выводами обмотки);
Ш3 — "шестерка" №3 статора (3-я по часовой стрелке от ВК1).

Таблица 5. Уровень шума гидроагрегата, дБА

| Режим работы г/г | Точки | | | | | |
|--|-------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Двигательный $P = 403 \text{ МВт}, Q = 3 \text{ МВар}$ | 83,3 | 83,7 | 82,0 | 83,0 | 82,5 | 81,7 |
| Генераторный $P = 324 \text{ МВт}, Q = 11 \text{ МВар}$ | 81,5 | 84,3 | 82,2 | 83,0 | 82,9 | 81,8 |
| Генераторный $P = 245 \text{ МВт}, Q = 10 \text{ МВар}$ | 81,2 | 84,0 | 81,5 | 82,5 | 82,0 | 82,4 |

- максимальный уровень вибрации опорных конструкций гидроагрегата выявлен на подпятнике и генераторном подшипнике в режиме холостого хода и достигает 145 и 98 мкм соответственно. В режимах нагрузки вибрация снижается и не превышает 68 мкм.

Вибрационное состояние опорных конструкций соответствует требованиям ГОСТ 5616-89 и СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (норма 150 мкм).

- уровень низкочастотной вибрации корпуса статора не превышает 17 мкм, при этом вибрации с частотой 100 Гц не более 4 мкм.

Вибрационное состояние стальных конструкций соответствует требованиям ГОСТ 5616-89 и СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (норма 180 мкм для низкочастотной составляющей вибрации и 30 мкм для вибрации с частотой 100 Гц при нагрузке).

Уровень шума в нагрузочных режимах работы гидрогенератора-двигателя не превышает 84,3 дБА, что соответствует требованиям ГОСТ 5616-89 (норма 85 дБА).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вибрационные* испытания и измерение уровня шума гидрогенератора-двигателя типа СВО 1255/255-40УХЛ4 ст. №1 Днестровской ГАЭС, технический отчет ТХ 129.2807— Харьков, 2010
2. *Мамиконянц Л.Г., Элькин Ю.М.* Обнаружение дефектов гидрогенераторов. — М.: Энергоиздат, 1985.
3. *Нормативний* документ Мінпаливенерго України. Норми випробування електрообладнання, СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007, — Київ, 2007.

