



**КУЗЬМИН В.В.**, докт.техн. наук УИПА  
**ШОФУЛ А.К.**, зав. отделом,  
**КОШЕЛЕВ В.В., ЛИЦОВ В.И., БАТУЛИН В.И.,**  
**ЛОГВИНОВ В.П., БИТЮЦКИЙ Н.Л., КАЛИТИЕВСКАЯ О.М.**, инженеры,  
 ГП завод "Электротяжмаш",  
**ШПАТЕНКО В.С.**, инженер, ХПИ, г. Харьков.

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНКИ МОНОЛИТНОСТИ СЕРДЕЧНИКОВ СТАТОРОВ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

**В**ведение. Техническое состояние сердечника статора играет важную роль в обеспечении эксплуатационной надежности электрических машин, в частности, гидрогенераторов.

В связи с отсутствием эффективных систем контроля монолитности сердечников статоров в процессе эксплуатации гидрогенераторов (иногда измеряется только радиальная вибрация ярма), эти работы принято выполнять при испытаниях на нагревание в режиме кольцевого намагничивания.

Статья посвящена анализу действующих методов контроля монолитности таких статоров и разработке путей их совершенствования.

### 1. Обзор накопленных данных по результатам испытаний на нагревание сердечников статоров различных конструкций

Испытания на нагревание и определение удельных потерь проводятся на завершающей стадии изготовления нового статора (на заводе при посекторном, на ГЭС — при кольцевом методе шихтовки), либо при модернизации или капитальных ремонтах машин, находящихся в эксплуатации.

Сердечник собирается из сегментов электротехнической стали толщиной 0,5 или 0,35 мм, изготовленных методом штамповки. В процессе шихтовки и после окончания сборки сердечника выполняется его гидравлическая прессовка [1]. От качества прессовки зависит монолитность сердечника статора, а также вибрация и шум генератора, надежность и долговечность его эксплуатации.

Прессовка сердечника

производится при помощи переносных гидравлических устройств, давление при этом равно 2,0 МПа. В зависимости от общей высоты сердечника выполняются промежуточные прессовки через 10 — 12 пакетов.

После окончания шихтовки и установки нажимных плит производится предварительная прессовка сердечника в сборе, завинчиваются отжимные болты до упора и затягиваются гайки стяжных шпилек под давлением прессы 2,0 МПа.

По технологии, принятой на ГП завод "Электротяжмаш", после этой операции на сердечник

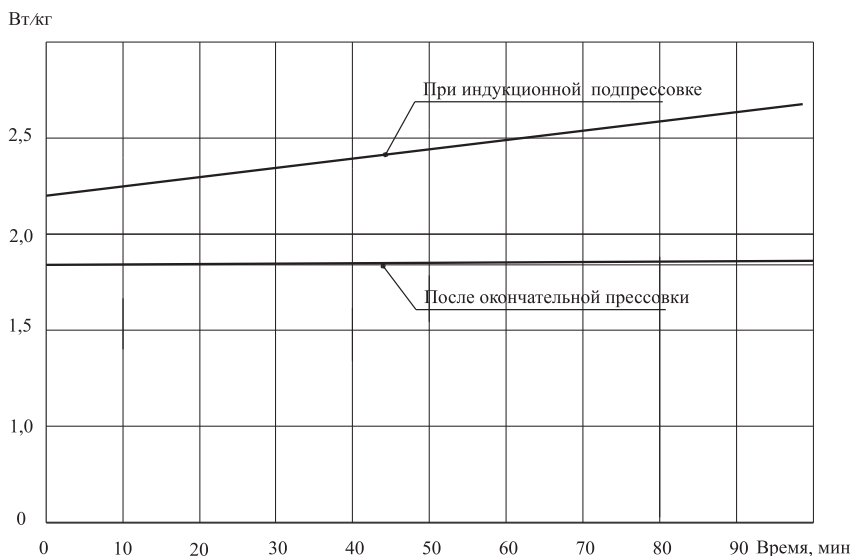


Рис. 1. Зависимость от времени удельных потерь в сердечнике статора гидрогенератора СВО 1190/210-96 при индукции в спинке  $B = 1,0$  Тл

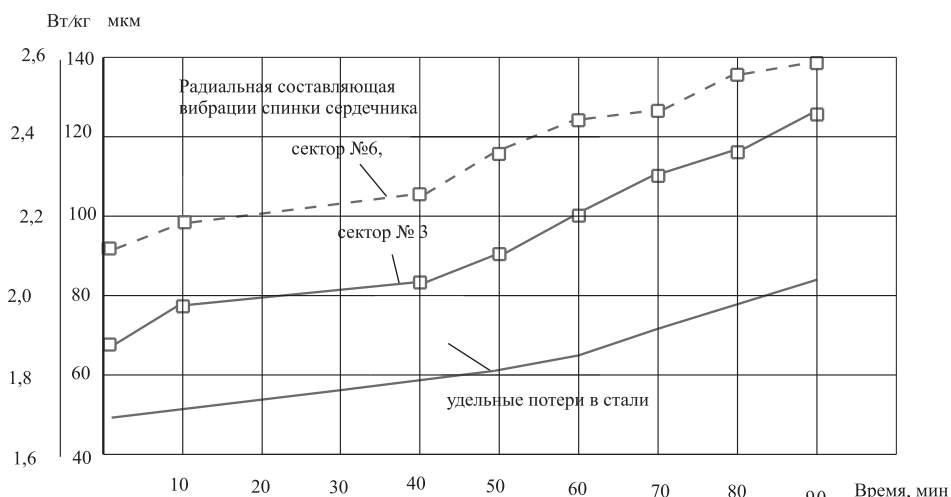


Рис. 2. Зависимость от времени удельных потерь и радиальной составляющей вибрации спинки сердечника гидрогенератора ВГДС 1025/245-40 при индукции в сердечнике 1,0 Тл



Таблиця 1. Величина удельных потерь в сердечнике статора гидрогенераторов при индукции в спинке сердечника 1,0 Тл на 5, 45 и 90-й минуте от начала режима

Тип гидрогенератора	При индукционной подпрессовке				После окончательной прессовки			
	Удельные потери, Вт/кг			Рост потерь за 90 мин, %	Удельные потери, Вт/кг			Рост потерь за 90 мин, %
	5 мин	45 мин	90 мин		5 мин	45 мин	90 мин	
СВЗ 1230/140-56	1,89	1,95	2,11	11,6	1,86	1,86	1,87	0,5
	1,88	1,97	2,09	11,2	1,86	1,90	1,91	2,6
	1,90	1,97	2,08	9,5	1,85	1,86	1,86	0,5
	1,92	2,04	2,14	11,4	1,86	1,86	1,86	0
СВ 1230/140-48	1,72	1,80	1,89	9,9	1,62	1,63	1,64	1,2
	1,71	1,82	1,91	11,7	1,70	1,71	1,72	1,18
	1,82	1,87	2,12	16,5	1,81	1,85	1,85	2,2
	1,76	1,92	2,14	22,0	1,81	1,82	1,85	2,2
	1,82	1,90	1,97	8,2	1,80	1,81	1,84	2,2

наматывается намагничивающая обмотка и выполняется его индукционная подпрессовка при индукции в спинке  $B = 1,0 \div 1,2$  Тл в течение  $7 \div 8$  часов по схеме кольцевого намагничивания. При этом измеряются индукция, потери, температура активной стали сердечника и корпуса. Анализ результатов измерения потерь при индукционной подпрессовке (Табл. 1) показывает, что потери в сердечнике в течение режима могут увеличиваться и за 90 минут рост удельных потерь может достигнуть 22,0 %.

После проведения режима индукционной подпрессовки выполняется окончательная затяжка гаек стяжных шпилек и повторное испытание сердечника на удельные потери и нагрев при индукции в спинке  $B = 1,0$  Тл в течение 90 минут. На Рис. 1 приведена зависимость удельных потерь в сердечнике статора гидрогенератора СВ0 1190/210-96 от времени при заводских испытаниях при индукционной подпрессовке и после окончательной прессовки. При удовлетворительной монолитности сердечника удельные потери в нём изменяются за время режима незначительно. Рост удельных потерь находится для различных гидрогенераторов в диапазоне  $0 \div 2,6$  % (Табл. 1).

Сборка сердечника гидрогенератора-двигателя ВГДС 1025/245-40 производилась в "кольцо" на месте монтажа. Гидравлическая прессовка сердечника выполнялась при давлении 2,0 МПа. Индукционная подпрессовка не применялась. При испытании сердечника на удельные потери и нагрев при индукции в спинке 1,0 Тл в 20 точках измерялась радиальная вибрация сердечника и полюк корпуса.

Как уровень вибрации, так и её зависимость от времени в разных местах по высоте и окружности сердечника значительно отличались от среднего значения. Максимальная вибрация до

140 мкм отмечалась на верхних пакетах сердечника (Рис. 2.), а вибрация на полках не превышала 60 мкм и от длительности режима зависела незначительно.

Результаты испытаний сердечников статоров гидрогенераторов производства ГП завод "Электротяжмаш" показывают, что индукционная подпрессовка значительно стабилизирует состояние сердечника и повышает его монолитность.

Характер зависимости радиальной вибрации спинки сердечника и удельных потерь от времени показывает, что в ходе режима происходит "утруска" сердечника, силы трения сегментов на призмах уменьшаются, вибрация сердечника увеличивается, в результате чего наблюдается рост потерь измеряемых по уровню активной мощности, потребляемой обмоткой намагничивания. В состав измеряемых таким образом потерь в сердечнике входят как потери на гистерезис и вихревые токи, так и механические потери, вызванные электродинамическими силами; механические потери увеличиваются с ростом вибрации сердечника.

При проведении индукционной подпрессовки под действием электродинамических сил и теплового расширения происходит перераспределение и выравнивание сцепления сегментов с призмами, и соответственно некоторое уменьшение усилия прессовки сердечника. С течением времени при индукционной подпрессовке потери и вибрация стабилизируются, что свидетельствует об окончании "утруски". С учётом изложенного можно сделать вывод, что рост потерь в сердечнике при индукционной подпрессовке характеризует степень монолитности сердечника. После окончания индукционной подпрессовки производится подтяжка гаек стяжных шпилек нормируемым моментом, чем обеспечивается достаточная степень прессовки сердечника. Проверка плотно-



сти прессовки зубцов и спинки с помощью ножа-щупа и ультразвука показывает значительно более равномерное её распределение по расточке статора. Стабильная величина потерь в сердечнике в течение режима при испытаниях на удельные потери и нагрев после окончательной прессовки свидетельствует о достаточной степени монолитности сердечника.

Исследования вибрационного состояния сердечников статоров гидрогенераторов в эксплуатационных режимах на Ташлыкской и Днестровской ГАЭС, на ГЭС Днепровского каскада показывают, что оно удовлетворяет требованиям нормативной документации – уровень радиальной вибрации (частота 100 Гц) не превышает 10 мкм при допустимом значении 30 мкм.

С учетом вышеизложенного можно констатировать, что применяемая на ГП завод "Электро-тяжмаш" методика индукционной подпрессовки сердечников статоров гидрогенераторов обеспечивает стабильную монолитность сердечника.

Критерием достаточной плотности прессовки сердечника является стабильность потерь в сердечнике (изменение не более 3,0% за время режима 90 минут) при испытании сердечника на удельные потери и нагрев при индукции в спинке 1,0 Тл.

## 2. Особенности вибромеханики статоров гидрогенераторов

### 2.1. Общая характеристика вибровозмущающих сил.

Выполненные в последние годы исследования [3,4] показали, что кроме традиционно учитываемых сил магнитного тяжения в воздушном зазоре на сердечник статора действует ещё ряд столь же значительных сил с частотой 100 Гц чисто внутреннего происхождения. Их характерные особенности приведены в Табл. 2.

Несмотря на то, что амплитуды перечисленных сил в установившихся режимах относительно стабильны, характер их распределения (эпюры) существенно изменяются при различных режимах работы гидрогенератора.

Таблица 2. Характеристики сил, действующих на сердечник статора

Направление и обозначение силы	Амплитуда силы пропорциональна	Зоны приложения	Режимы, в которых возбуждаются силы
<b>Радиальное</b> $F_{R\delta}$	квадрату индукции в зазоре ( $B_\delta$ )	Поверхность зубцов в расточке	Все режимы с роторным возбуждением Любые режимы при $B_a \neq 0$
$F_{Ra}$	квадрату индукции в ярме ( $B_a$ )	К радиальным кромкам листа	
<b>Осевое</b> $F_{za}$	квадрату индукции в ярме ( $B_a$ )	Крайние листы каждого пакета	Любые режимы при $B_a \neq 0$  Все режимы с роторным возбуждением
$F_{zz}$	квадрату индукции в зубце ( $B_z$ )	Крайние листы каждого пакета	
<b>Тангенциальное</b> $F_{\phi a}$	квадрату индукции в ярме ( $B_a$ )	Стягивает сердечник по окружности	Все режимы при $B_a \neq 0$

Проблема расчета влияния вибровозмущающих сил даже в каждом стационарном режиме работы гидрогенератора осложняется тем, что важнейшие параметры динамики сердечника (модуль упругости, характер связей и т.п.) изменяются как по "объёму" сердечника, так и с течением времени.

Исключением здесь является сила внутреннего "распора"  $F_{Ra}$ , приложенная к стальному листу с весьма высоким и стабильным модулем упругости, вследствие чего её влияние можно не принимать во внимание.

Для рассматриваемых далее режимов намагничивания сердечника статора определяющими для параметров его вибромеханики служат

- силы  $F_{za}$  и  $F_{\phi a}$  при кольцевом,
- силы  $F_{R\delta}$ ,  $F_{za}$ ,  $F_{zz}$  и  $F_{\phi a}$  при индукторном намагничивании.

### 2.2. Физические процессы в сердечнике статора при кольцевом намагничивании

При анализе процессов возникновения дефектов в сердечниках статоров гидрогенераторов [5] в качестве "возмутителей спокойствия" совершенно резонно рассматривают силы магнитного тяжения в воздушном зазоре, а среди сопутствующих конструктивных и технологических факторов первое место принадлежит ослаблению прессовки.

Как уже отмечалось выше, ослабление прессовки и здесь представляется "катализатором" наблюдаемых явлений, но никак не их возбудителем – при кольцевом намагничивании магнитное поле вне сердечника отсутствует, поэтому никаких радиальных сил магнитного тяжения, наблюдаемых в эксплуатации, здесь нет.

А шум и вибрация, как неразлучные спутники вибромеханики возникают в результате действия сил внутреннего происхождения.

Рассмотрим влияние виброакустических параметров на процедуру возникновения "добавочных" потерь в процессе испытаний, используя



классические соотношения для определения мощности потерь в системе колеблющихся тел.

### Потери на излучение звука

Мощность источника звука по шкале децибел  $N$  согласно [6] составляет

$$N = 10 \cdot \lg(I/I_0), \quad (1)$$

где  $I$  – искомая мощность (интенсивность) источника;  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Из последнего соотношения находим интенсивность

$$I = 10^{(N/10-12)} [\text{Вт/м}^2], \quad (2)$$

и соответственно мощность излучения

$$P_N = I \cdot S, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь излучения.

### Вибромеханические потери

Среднее значение потерь активной мощности в системе колеблющихся тел с учетом трения согласно [7] равно

$$P_v = \langle F \cdot v \rangle = \langle F \cdot \dot{x} \rangle, \quad (4)$$

где  $F$  – переменная составляющая силы в направлении  $x$ ,  $v = \dot{x}$  – скорость изменения  $x$ .

В общем случае при

$$F = F_m \cos(2\omega t) = \sigma_x S_x \cos(2\omega t),$$

$$x = x_m \cos(2\omega t - \psi),$$

$$v = \dot{x} = -2\omega \cdot x_m \sin(2\omega t - \psi),$$

Из (4) следует, что искомое значение

$$P = \frac{1}{2} \omega \sigma_x S_x \sin \psi, \quad (5)$$

где  $\sigma_x$  – максимум давления в направлении  $x$ ;  $S_x$  – площадь, на которую действует  $\sigma_x$ ;  $\psi$  – сдвиг фаз.

Если в расчёт брать уровень вибрации (2А) в направлении  $x$

$$b_x = 2 x_m$$

и промышленную частоту  $\omega = 314$  с<sup>-1</sup>, то последнее соотношение принимает вид

$$P = 78 \sigma_x S_x b_x \sin \psi. \quad (6)$$

Как показано в [8] для статоров гидрогенераторов давление осевого распора (в направлении  $Z$ ) равно

$$\sigma_z \approx 0,4 B_a^2, \quad [\text{МПа}], \quad (7)$$

где  $B_a$  – средний уровень индукции в магнитопроводе.

Это давление порождает силы, действующие в противоположных направлениях и приложенные к торцам магнитопровода, площадь которых

составляет (с учетом площади зубцов – коэффициент 1, 2)

$$S_z = S_z^+ + S_z^- \approx 2\pi (R_2^2 - R_1^2) \cdot 1,2, \quad (8)$$

где  $R_2$  и  $R_1$  – наружный и внутренний радиусы ярма.

В [3] показано, что для "длинных" магнитных цепей давление тангенциального притяжения  $\sigma_\phi$  определяется тем же соотношением (7)

$$\sigma_\phi \approx 0,4 B_a^2, \quad (9)$$

но его действие не может привести к возникновению радиальных вибраций наблюдаемого уровня, которая, по-видимому, является следствием локальных потерь устойчивости кольца магнитопровода. Согласно соотношению между внутренним  $\sigma_\phi$  и внешним давлением  $\sigma_R$  для тонкостенного цилиндра

$$\sigma_\phi \approx \sigma_R D / 2t$$

перейдем к рассмотрению динамики статора под действием радиального магнитного давления

$$\sigma_R \approx \frac{\sigma_\phi 2t}{D} = \sigma_\phi \frac{2(R_2 - R_1)}{(R_2 + R_1)} = \sigma_\phi 2 \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}, \quad (10)$$

где  $t$  – высота ярма;  $D$  – средний диаметр.

Площадь приложения – наружная сторона магнитопровода

$$S_R = 2\pi R_2 \cdot L_1 \cdot 0,85 = 1,7\pi R_2 \cdot L_1, \quad (11)$$

где  $L_1$  – высота сердечника; 0,85 – коэффициент заполнения (по площади).

В идеальных (предельных) случаях

- при отсутствии трения  $\sin \psi = 0$ ,  $P = 0$ ,

- при резонансе  $\sin \psi = 1$ ,  $P = P_{\max}$

В промежуточных случаях для целей оценки вклада механических потерь можно использовать промежуточное значение

$$\sin \psi = 0,5 \dots 0,6. \quad (12)$$

С учетом того, что обычно

$$\sigma_z = \sigma_\phi; \quad b_z \approx 0,5 b_R,$$

для оценки вклада механических потерь при  $\sin \psi = 0,5$  можно пользоваться следующим приближенным соотношением

$$\Sigma P = P_z + P_R \approx 250 h_a (1,2D + 3,6L) \sigma_z b_R [\text{Вт}]. \quad (13)$$

где  $h_a$  – высота ярма;  $D$  – его средний диаметр.

Примеры расчёта  $\Sigma P$ .

По данным Рис. 2 ( $B = 1,0$  Тл,  $b_R = 130$  мкм) для гидрогенератора ВГДС 1025/245-40 ( $h_a = 0,22$ ;  $D = 10,0$ ;  $L = 2,45$ ) согласно (13) получаем оценку прироста потерь в конце режима.



$$\Sigma P = 250 \cdot 0,22(1,2 \cdot 10 + 3,6 \cdot 2,45) \cdot 4 \cdot 10^5 \cdot 1,3 \cdot 10^{-4} = 27,1 \text{ кВт},$$

что совпадает с результатами измерений (даже без учета потерь на получение звука и некоторой неопределенности значения  $\sin \psi$ ).

$$\Delta Q = \Delta q \cdot M_a = 0,33 \cdot 96000 = 31,7 \text{ кВт} \quad (14)$$

Здесь  $\Delta q$  – прирост удельных потерь,  $M_a$  – масса ярма сердечника.

При резонансе ( $\sin \varphi = 1$ ) индукции 1,4 Тл и уровне вибрации 700 мкм (как приведено в [2] для гидрогенератора Саяно-Шушенской ГЭС) оценка механических потерь по (14) возрастает до 670 кВт, что действительно опасно для работоспособности статора.

Данные, приведенные в Табл. 1, с учетом изложенного анализа физики механических процессов свидетельствуют о том, что относительная величина роста удельных потерь при кольцевом намагничивании

$$C_q = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{\min}}, \quad (15)$$

где  $q_{\min}$  и  $q_{\max}$  – удельные потери в сердечнике в начале и конце режима, соответственно, может служить универсальным критерием качества сборки (монолитности) сердечника статора по всем влияющим факторам, включая

- плотность прессовки шихтованных пакетов,
- монолитность сборки корпуса статора,
- жесткость связей сердечника с корпусом.

### 2.3. Особенности вибромеханики статора при роторном возбуждении.

Приведенные в [2] данные испытаний, проведенных на Красноярской ГЭС в режимах холостого хода, включая режимы при пониженных напряжениях в обмотке статора, дают набор сведений по вибромеханике сердечника (шум, вибрация). При этом эшюры приложенных сил в режиме холостого хода по их амплитудам и по 3- D – распределению совершенно иные, чем при кольцевом намагничивании. Поэтому параметры вибромеханики статора в режиме холостого хода не могут характеризовать степень монолитности шихтованного сердечника.

Если при испытании сердечника статора с кольцевым намагничиванием при частоте 50 Гц возникает резонанс, что грозит серьезными повреждениями сердечника, то указанные испытания следует проводить при пониженной частоте, как это было реализовано на Саяно-Шушенской ГЭС.

### 3. Заключение

На основании приведенных результатов экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

3.1. Испытания сердечника статора гидрогенератора при кольцевом намагничивании представляет собой наиболее эффективный способ проверки качества его сборки и обеспечения требуемого уровня монолитности. В основе выполнения последнего требования лежат показатели технического уровня конструкции и технологии изготовления сердечника.

3.2. После завершения сборки сердечника перед испытаниями на удельные потери и нагрев целесообразно выполнять индукционную подпрессовку при индукции в сердечнике 1,0 – 1,2 Тл в течение 8 часов с контролем теплового и вибрационного состояния сердечника. При этом величина вибросмещения сердечника частотой 100 Гц в радиальном направлении во время испытаний не должна превышать 150 мкм.

3.3. Окончательные испытания на удельные потери и нагрев следует проводить при индукции 1,0 Тл в течение 90 минут с измерением удельных потерь в стали. Критерием достижения требуемой монолитности сердечника статора служит соблюдение ограничений по относительному росту потерь во время этих испытаний ( $C_q < 3\%$ ).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зунделевич Н.И., Прутковский С.А. Технология крупного электромашиностроения. Гидрогенераторы. Том 2. – Л.: Энергоиздат, 1981г.
2. Брызгалов В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанции.
3. Демидюк Б.М., Кузьмин В.В., Шпаченко В.С. О разработке физического содержательного подхода к анализу силовых и энергетических процессов в магнитопроводах электрических машин // "Вестник КДПУ". – 2007. – ч.1. – вып. 3.
4. Кузьмин В.В., Лившиц А.Л. и др. Электромеханические процессы в шихтованных магнитопроводах крупных электрических машин – новый подход к описанию явлений и разработке мероприятий по предотвращению появления дефектов. // Гидроэнергетика Украины. – 2010, – № 4. – С. 27–31.
5. Александров А.Е., Гуцин Е.В. и др. Обнаружение дефектов гидрогенераторов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Физическая энциклопедия (в 5 томах) – М.: 1988–1998.
7. Киттель Ч., Найт В., Рудерман М. Механика – М.: "Наука", 1983.
8. Кузьмин В.В., Шофул А.К., Шпаченко В.С. Вибромеханика статоров машин синхронных генераторов при кольцевом намагничивании // Электротехника и электромеханика. – 2008. – № 3.

© Кузьмин В.В., Шофул А.К., Кошелев В.В., Лицов В.И., Батулин В.И., Логвинов В.П., Битюцкий Н.Л., Калитиевская О.М., Шпаченко В.С., 2011

