

УДК 621.313.1.01.4(083.96)

**ПОТАШНИК С.И.**, председатель правления ОАО "Укрэнерго"  
**ГРУБОЙ А.П.**, главный конструктор,  
**ШОФУЛ А.К.**, зав. отделом, **КОШЕЛЕВ В.В.**, вед. инж,  
**ЛИЦОВ В.И.**, зам. зав. отделом, **ЛОГВИНОВ В.П.**, зав. лабораторией,  
**БИТЮЦКИЙ Н.Л.**, **БУЗИВСКИЙ О.В.**, **БЕРЧЕНКО Ю.Н.**, вед. инженеры,  
ГП завод "Электротяжмаш", г. Харьков.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГИДРОГЕНЕРАТОРА-ДВИГАТЕЛЯ СВО 1255/255-40УХЛ4 СТАНЦИОННЫЙ № 1 ДНЕСТРОВСКОЙ ГАЭС

**Д**нестровская ГАЭС предназначена для использования в качестве источника пиковой мощности и потребителя энергии в часы провала графика нагрузки в энергосистеме.

В двигательном режиме гидрогенератор-двигатель (Г-Д) преобразовывает забираемую из сети электрическую энергию вращения вала насос – турбины, подающей воду из нижнего в верхний бассейн ГАЭС для создания потенциальной энергии в виде накапливаемой в верхнем бассейне воды.

Обратимый Г-Д СВО 1255/255-40УХЛ4 станц. №1 Днестровской ГАЭС является уникальным по своей мощности и является одним из самых мощных Г-Д подобного типа в мире.

Г-Д спроектирован и изготовлен на государственном предприятии завод "Электротяжмаш" г.Харьков, Украина. В 2009–2010г на Г-Д проведены пуско-наладочные и приемочные испытания. В данной статье приведены основные результаты электрических и тепловых испытаний Г-Д на ГАЭС.

Номинальные параметры и основные технические данные Г-Д СВО 1255/255-40УХЛ4 указаны в Табл. 1.

Исполнение Г-Д вертикальное, зонтичного типа с одним направляющим подшипником, размещенным в масляной ванне крестовины над ротором и с опорой подпятника на крышку насос – турбины. Подшипник Г-Д двухрядный (по 20 сегментов в ряду) на гидравлической опоре. Сегменты подпятника с фторопластовым покрытием.

Таблица 1.

Наименование параметра	Генераторный режим	Двигательный режим
Номинальная мощность, МВА/МВт	360/324	430/416
Номинальное напряжение, В	15750	15750
Номинальный коэффициент мощности	0,90	0,979
Номинальная частота вращения, об/мин	150	150
Максимальная угонная частота вращения при сбросах нагрузки, об/мин	240	240
Частота, Гц	50	50
Номинальный ток статора, А	13200	15765
Ток возбуждения при холостом ходе, А	1170	1170
Номинальный ток возбуждения, А (расчетное значение)	1900	1850

Предельно-допустимые температуры активных частей указаны в Табл. 2.

Охлаждение активных частей Г-Д осуществляется воздухом, циркулирующим по замкнутому циклу.

Холодный воздух из ротора проходит каналы в ободу, охлаждает полюса и выбрасывается в воздушный зазор. Затем воздух через вентиляционные каналы в сердечнике статора попадает в корпус статора и через воздухоохладители в камеру холодного воздуха, оттуда снова двумя потоками идет к ротору.

Измерение температуры активных и конструктивных частей и охлаждающих сред выполняется с помощью термопреобразователей сопротивления (ТС). Для контроля температуры обмотки статора в пазах между стержнями установлено 36 ТС (Т01 – Т36), для контроля темпе-

Таблица 2.

Наименование активных частей	Метод измерения	Превышение температуры при температуре охлаждающего воздуха +35 °С	Абсолютная температура
Обмотка и активная сталь сердечника статора	По термопреобразователям сопротивления	85	120
Обмотка ротора	По измерению сопротивления при постоянном токе	95	130



Таблиця 3.

Напряжение статора, В	18237	17807	17443	16747	15737	14410	13343	11637	7287
Ток возбуждения, А	1881	1702	1546	1414	1221	1026	903	741	429

ратуры активной стали сердечника на дне паза 9 ТС (Т37 – Т45).

На выходе из воздухоохладителей установлено по одному ТС (всего 24 ТС), на входе в воздухоохладители 2 ТС. На каждом сегменте подпятника установлено по одному ТС (всего 40 ТС), на сегментах направляющего подшипника установлено два ТС. Установлены ТС для измерения температуры масла в ваннах подпятника и подшипника. В режиме нагрузки штатная система теплоснабжения постоянно регистрирует температуру Г-Д и сигнализирует при достижении уставок защит.

Температура обмотки ротора во время тепловых испытаний измерялась по методу сопротивления.

В крайних пакетах сердечника статора и на нажимных гребенках установлены медно-константановые термоэлектрические преобразователи.

В процессе монтажа и сборки Г-Д выполнялись электрические измерения и испытания.

Сопротивление изоляции обмотки статора измерялось на разных этапах сборки. При увлажнении изоляции выполнялась сушка обмотки с помощью калориферов и постоянного тока. Измерение сопротивления изоляции проводилось мегаомметром на 2500 В каждой параллельной ветви и после сушки составляло 1200 ÷ 1400 МОм при коэффициенте абсорбции 2,7 ÷ 2,9, что выше допустимых значений 160 МОм и 1,3 соответственно.

Сопротивление изоляции обмотки ротора измеренное мегаомметром на 1000 В составило около 1400 МОм.

Сопротивление изоляции термопреобразователей измерялось мегаомметром на 500 В и составляло 100 ÷ 800 МОм при допустимом значении 1 МОм. На разных этапах сборки статора измерялось сопротивление постоянному току параллельных ветвей обмотки статора и ротора. Значения сопротивления близки к расчетным значениям.

Характеристика холостого хода гидрогенератора-двигателя в генераторном режиме работы определена при снижении тока возбуждения от его номинального значения до нуля при номинальной частоте вращения.

Характеристика холостого хода приведена в Табл. 3.

В Табл. 3 приведены усредненные значения

линейных напряжений статора, приведенные к частоте 50 Гц путем пропорционального пересчета.

Значения тока возбуждения приведено с учетом сдвига характеристики холостого хода в начало координат. Прямолинейная часть характеристики холостого хода близка к расчетной, а в зоне насыщения опытная характеристика проходит ниже расчетной характеристики холостого хода, что объясняется отличием магнитных свойств электротехнической стали от принятых в расчете.

Определение характеристик генератора-двигателя осуществлялось при питании обмотки ротора от штатной тиристорной системы возбуждения фирмы "Альстом". Остаточное напряжение на обмотке статора при токе возбуждения, равном нулю, составило 100 В.

В режиме холостого хода при номинальном напряжении статора определен гармонический состав линейных напряжений в диапазоне частот от 0 до 5000 Гц через каждые 50 Гц.

По результатам измерений определен коэффициент искажения синусоидальности кривых линейных напряжений по формуле:

$$K = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100,$$

где  $U_1, U_2, \dots, U_n$  – действующее или амплитудное значение напряжения отдельных гармоник.

Расчет коэффициента телефонных гармоник  $K_T$  выполнен по формуле:

$$K_T = \frac{100}{U} \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i \lambda_i)^2},$$

где:  $\lambda_i$  – весовой коэффициент  $i$ -ой гармонической составляющей;  $E_i$  – значение  $i$ -ой гармонической составляющей линейного напряжения, В;  $U$  – значение линейного напряжения гидрогенератора-двигателя, В.

Результаты определения коэффициента искажения синусоидальности кривой линейного напряжения  $K$  и коэффициента телефонных гармоник  $K_T$  приведены в Табл. 4.

По результатам измерений и расчетов значение коэффициента несинусоидальности кривой линейного напряжения составило 0,43%, что не

Таблиця 4.

о.е.

Коэффициент	Обозначение ветвей		
	$U_{UV}$	$U_{VW}$	$U_{WU}$
$K$	0,43	0,42	0,43
$K_T$	0,31	0,30	0,31



Таблиця 5.

Ток статора, А	1620	7540	10030	11030	13100
Ток возбуждения, А	119,4	553,4	734,8	808,6	959,5

превышает допустимого значения – 5 %, а значение коэффициента телефонных гармоник составило 0,31%, что ниже допустимого значения 1,5%.

В режиме установившегося трехфазного короткого замыкания определена характеристика трехфазного короткого замыкания  $I_{ст} = f(i_f)$ . Результаты измерения электрических параметров при определении характеристики приведены в Табл. 5.

Опытная характеристика близка к расчётной. Значение тока возбуждения  $i_{fk}$ , соответствующее номинальному току статора в режиме трехфазного короткого замыкания, составило 965 А, при расчётном значении 954 А.

Номинальный ток возбуждения гидрогенератора-двигателя в генераторном и двигательном режимах работы определен методом графического построения с использованием опытных характеристик холостого хода и установившегося трехфазного короткого замыкания, а также расчётного индуктивного сопротивления Потье –  $X_p$ . Построения выполнены для генераторного и двигательного режимов в соответствии с [1]. Значение номинального тока возбуждения составило 2050 А для генераторного режима работы и 1990 А – для двигательного.

Номинальное напряжение возбуждения (напряжение на кольцах ротора при номинальных значениях мощности, коэффициента мощности, напряжения статора и температуры обмотки 130 °С) в генераторном режиме составляет 408 В, а в двигательном – 396 В.

Таким образом, для гидрогенератора-двигателя СВО 1255/255-40 УХЛ4 станц. №1 Днестровской ГАЭС по результатам испытаний устанавливаются номинальные токи возбуждения: для режима генератора – 2050 А, для режима двигателя – 1990 А.

Номинальное изменение напряжения в генераторном режиме работы определено методом графического построения, его значение в относительных единицах составило 0,175.

Методом графического построения определена также регулировочная характеристика гидрогенератора-двигателя в генераторном режиме.

Таблиця 6.

Ток статора, о.е.	0,25	0,5	0,75	1,0
Ток статора, А	3300	6600	9900	13200
Ток возбуждения, А	1420	1620	1840	2050

Регулировочная характеристика приведена в Табл. 6.

Индуктивные сопротивления определены по ГОСТ 10169-77.

В опытах определяются индуктивные сопротивления в (Ом) и пересчитывается в относительные единицы по формуле:

$$X = x_{Ом} / Z_{\delta}$$

где  $Z_{\delta} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n}$  .

Для генераторного режима –

$$Z_{\delta г} = \frac{15750}{\sqrt{3} \cdot 13200} = 0,689 \text{ Ом,}$$

для двигательного режима –

$$Z_{\delta дв} = \frac{15750}{\sqrt{3} \cdot 15765} = 0,577 \text{ Ом.}$$

Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси ( $X_d$ ) определено по опытным характеристикам холостого хода и короткого замыкания как частное от деления напряжения холостого хода, взятого по прямолинейной части характеристики холостого хода, на ток симметричного короткого замыкания, получаемый по характеристике короткого замыкания при том же токе возбуждения.

Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси ( $X_d$ ) составляет 1,021 о.е. для генераторного режима и 1,255 о.е. – для двигательного режима.

Индуктивное сопротивление обратной последовательности определено из опыта установившегося двухфазного короткого замыкания при замыкании двух фаз между собой и вращении машины с возбуждением с номинальной частотой.

Опытное ненасыщенное значение  $X_2$ , определенное из опыта, составляет для генераторного режима – 0,238 о.е., для двигательного – 0,283 о.е.

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности определено из опыта установившегося короткого замыкания двух фаз на нейтраль при вращении генератора с номинальной частотой.

Опытное ненасыщенное значение  $X_0$  в генераторном режиме составляет 0,132 о.е., в двигательном режиме – 0,158 о.е.

Проведение тепловых испытаний Г-Д с учетом требований [2] (длительность теплового режима из холодного состояния около 4 – 5 часов) на данном этапе строительства Днестровской ГАЭС невозможно.

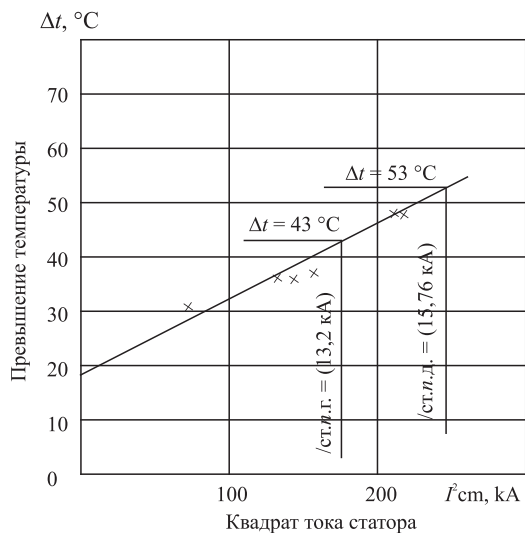


Рис. 1. Зависимость максимального превышения температуры обмотки статора над температурой холодного воздуха на выходе из воздухоохладителей

В связи с тем, что верхнее водохранилище введено в работу по временной схеме и имеет ограниченный объем, длительность работы в двигательном и генераторном режиме при нагрузке близкой к номинальной ограничена временем около 2-х часов. В связи с этим для получения установленных значений температуры активных и конструктивных частей в режиме нагрузки программой предусматривался предварительный подогрев Г-Д. Такой подогрев осуществлялся при работе Г-Д с 21.00 до 23.00 в генераторном режиме и с 02 часов до 04 00 часов в двигательном режиме. При таком графике работы тепловой режим для обмотки, активной стали и обмотки ротора за 2 часа практически установившийся. Температура сегментов подпятника и подшипника устанавливается за 1,0 ÷ 1,5 часа.

В Табл. 7 приведены электрические параметры тепловых режимов и средние и максимальные значения температуры обмотки статора, сердечника статора, обмотки ротора, холодного и горячего воздуха.

Анализ показаний термопреобразователей, измеряющих температуру обмотки статора (Т01 – Т36), показывает, что обмотка нагрета равномерно, как по окружности, так и по высоте статора. Максимальная разница в показаниях ТС составляет 12,3 °С в наиболее нагруженном двигательном режиме № 5, отклонение максимальной температуры от среднего значения около 4 °С. Максимальную температуру обмотки статора показывает термопреобразователь сопротивления Т12.

Для определения теплового состояния Г-Д в номинальном режиме построены зависимости превышений максимальной температуры обмотки и сердечника статора от квадрата тока статора.

На Рис. 1 построена зависимость максимального превышения температуры обмотки статора по термопреобразователю сопротивления Т12 над средней температурой охлаждающего воздуха на выходе из воздухоохладителей. По этой зависимости определено превышение температуры обмотки в генераторном режиме при  $P = 324$  МВт,  $\cos \varphi = 0,9$ ,  $I_{ст.л.г} = 13200$  А, которое составляет 43 °С, и в двигательном режиме при  $P = 416$  МВт,  $\cos \varphi = 0,979$ ,  $I_{ст.л.д} = 15765$  А – 53 °С. Наибольшее допустимое в эксплуатации превышение температуры (с округлением +5 °С) составляет в генераторном режиме 45 °С и двигательном режиме 55 °С. Соответственно допустимая в эксплуата-

Таблица 7. Основные параметры тепловых режимов Г-Д станц. № 1.

Номер режима	Наименование режима	Активная мощность, МВт	Реактивная мощность, МВар	Напряжение статора, кВ	Ток статора, кА	Ток ротора, А	Напряжение ротора, В	Cos φ Коэфф. мощности	Температура, °С							
									Средняя					Максимальная		
									Хол. воздух	Гор. воздух	Обмотка ротора	Обмотка статора	Сердечник статора	Обмотка статора	Сердечник статора по ТС	Сердечник статора по ТП
1	Генераторный	325,4	50,8	16,7	11,48	1920	332,5	0,988	26,8	42,5	76,8	58,4	58,1	63,2	54,5	56
2	Генераторный	325,0	11,0	16,3	11,6	1740	294,0	0,999	27,2	42,3	69,5	59,2	58,0	63,4	54,7	60
3	Генераторный	324,7	-60,0	15,7	12,5	1461	237,5	-0,98	26,6	42,9	57,3	58,8	57,2	63,4	59,3	60
4	Генераторный	247,6	10,3	16,75	8,5	1695	285,0	0,999	25,6	41,6	67,8	53,2	52,9	57,3	56,0	56
5	Двигательный	408,0	46,0	16,1	14,7	1959	345,0	0,994	27,4	46,0	82,4	67,9	66,5	75,7	69,1	65
6	Двигательный	400,0	0,6	15,75	14,6	1770	301,5	1,0	25,3	46,5	72,0	65,6	64,0	73,6	66,9	63

Примечание: Режимы 1, 2, 4, 5 с выработкой реактивной мощности, режим 3 с потреблением реактивной мощности.



ции температура, при температуре охлаждающего воздуха на выходе из воздухоохладителей 35 °С, составляет 80 °С в генераторном режиме и 90 °С в двигательном, при допустимом значении 120 °С. Запас по нагреву обмотки статора составляет 40 °С для генераторного режима и 30 °С для двигательного режима.

Максимальная разница температуры активной стали сердечника по ТС составляет 7,3 °С, отклонение максимального значения от среднего 2–3 °С, что подтверждает равномерность нагрева сердечника.

По зависимости максимального превышения температуры активной стали сердечника от квадрата тока статора (Рис. 2) определено максимальное превышение температуры активной стали сердечника (ТС Т37) для генераторного режима – 37 °С, для двигательного режима 44 °С. Наибольшее допустимое в эксплуатации превышение температуры составляет в генераторном режиме 40 °С, в двигательном 45 °С.

Наибольшая допустимая в эксплуатации температура активной стали сердечника при температуре охлаждающего воздуха 35 °С составляет 75 °С в генераторном режиме и 80 °С в двигательном режиме, при допустимом значении 120 °С. Соответственно запас по нагреву активной стали сердечника в генераторном режиме 45 °С и двигательном – 40 °С.

На Рис. 3 построена зависимость превышения температуры обмотки ротора от квадрата тока ротора. Превышение температуры при опытном значении номинального тока возбуждения для генераторного режима равно 2050 А составляет 60 °С.

При температуре охлаждающего воздуха 35 °С допустимая в эксплуатации температура составит

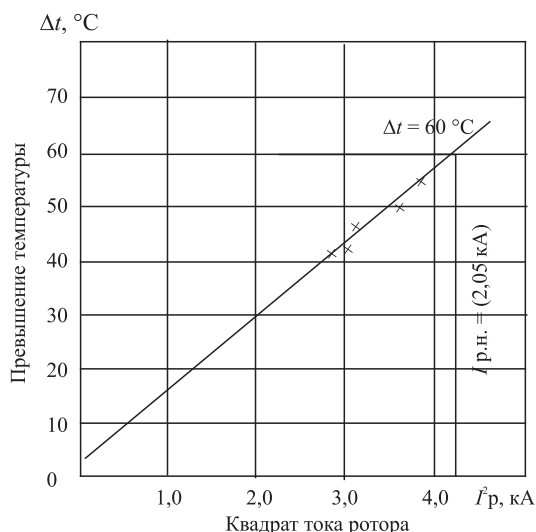


Рис. 3. Зависимость превышения температуры обмотки ротора от квадрата тока ротора

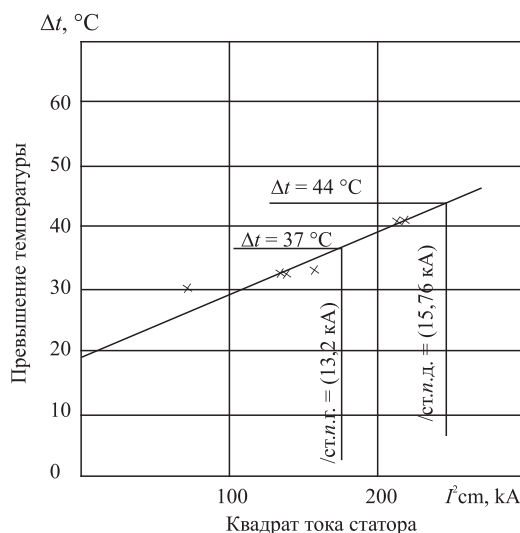


Рис. 2. Зависимость максимального превышения температуры сердечника статора над температурой холодного воздуха на выходе из воздухоохладителей

95 °С при допустимом значении 130 °С. Запас по нагреву составляет 35 °С.

Температура сегментов подшипника Г-Д во всех режимах не превышала 45 °С при температуре холодного масла 32–34 °С, при допустимом значении температуры сегментов 80 °С.

Максимальная температура сегментов подпятника в наиболее нагруженном насосном режиме составляла 57,4 °С (Т108) при температуре масла 34 °С при допустимом значении температуры сегмента 100 °С.

Некоторые сегменты (Т83, Т90, Т103, Т117, Т119) имеют заниженную температуру по сравнению со средним уровнем. Средняя температура сегментов внутреннего ряда в режиме 5 – 41,7, наружного ряда – 46 °С.

Максимальные отклонения от средней температуры для наружного ряда + 11,4 °С (Т108),

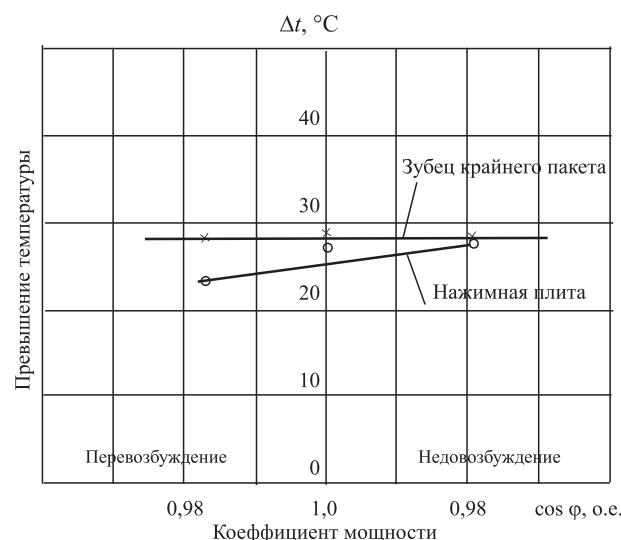


Рис. 4. Зависимость превышения температуры крайних пакетов над температурой холодного воздуха на выходе из воздухоохладителей от Cos φ в генераторном режиме при P<sub>n</sub> = 324 МВт

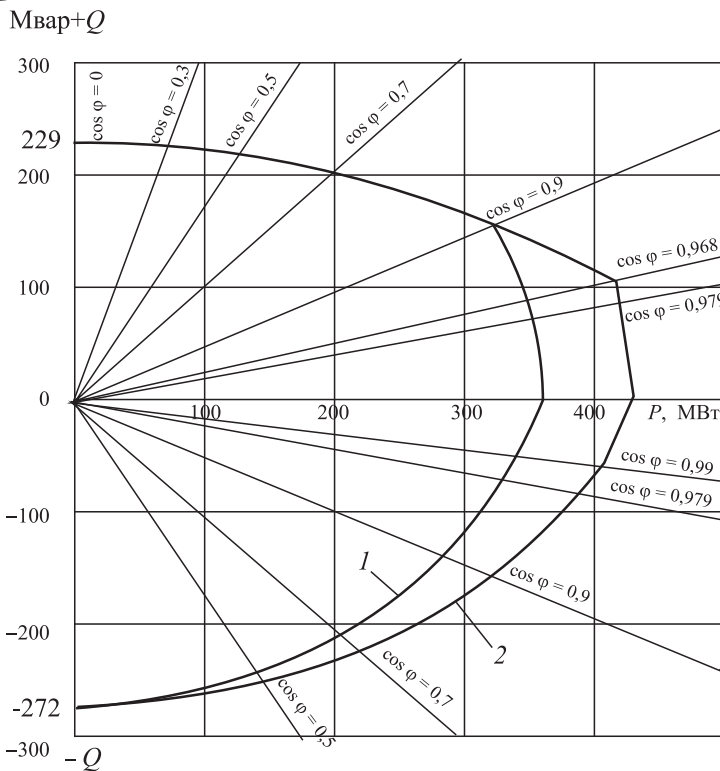


Рис. 5. Диаграмма мощности гидрогенератора-двигателя  
1 – генераторный режим, 2 – двигательный режим

минимальное – 9 °С (Т119), для внутреннего ряда максимальное 12,5 °С (Т100), минимальное – 4,7 °С (Т90).

Анализ результатов измерения температуры крайних пакетов сердечника статора и нажимной плиты показывает, что нагрев крайних пакетов в радиальном и аксиальном направлении равномерный и температура крайних пакетов не превышает уровня температуры сердечника, измеренной по ТС.

На Рис. 4 показано, что изменение режима нагрузки от  $\cos \varphi = 0,98$  с перевозбуждением до

$\cos \varphi = 0,98$  с недозовбуждением практически не влияет на температуру крайних пакетов. В связи с этим можно сделать вывод, что Г-Д может эксплуатироваться в режимах с недозовбуждением в соответствии с диаграммой нагрузок, приведенной на Рис. 5. Учитывая, что в режимах перевозбуждения при номинальном токе статора и номинальном токе ротора имеются тепловые запасы, можно сделать вывод, что Г-Д может эксплуатироваться во всем диапазоне допустимых нагрузок диаграммы (Рис. 4).

На основании вышеизложенного можно сделать выводы:

1. По результатам электрических и тепловых испытаний гидрогенератор – двигатель СВО 1255/255-40УХЛ4 соответствует требованиям технического задания БИЛТ.650051.015 ТЗ, ГОСТ 183-74, ГОСТ 5616-89 и руководства по эксплуатации БИЛТ.650242.001 РЭ.

2. Наибольшие допустимые температуры:

- обмотка статора 90 °С
  - активная сталь сердечника статора 80 °С,
  - обмотка ротора 95 °С.
3. Тепловые запасы активных частей:
- обмотка статора 30 °С,
  - активная сталь сердечника статора 40 °С,
  - обмотка ротора 35 °С.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний. – М. – 1984.  
2. Методические указания по проведению испытаний генераторов на нагревание. РД 34.45.309-92.

© Поташник С.И., Грубой А.П., Шофул А.К., Кошелев В.В, Лицов В.И., Логвинов В.П., Битюцкий Н.Л., Бузивский О.В., Берченко Ю.Н., 2011

