

**ГИДРОГЕНЕРАТОР МОЩНОСТЬЮ 333 МВт
ДЛЯ БОГУЧАНСКОЙ ГЭС
Кучинская З.М., к.т.н.**

**Отдел проектирования гидрогенераторов
ОАО “СИЛОВЫЕ МАШИНЫ” филиал “Электросила”
196105 Россия, Санкт-Петербург,
Московский пр., 139
тел.: +7 (812) 387 97 13, факс: +7 (812) 388 18 14,
e-mail: kuchinskaya@elsila.spb.ru**

ОАО “Силовые машины” филиал “Электросила” в Санкт-Петербурге является одним из крупнейших производителей гидрогенераторов, как в России, так и во всем мире. С середины прошлого века объединение начало производство мощных гидрогенераторов.

В ближайшие годы в России планируется ввод в эксплуатацию крупнейшей гидроэлектростанции, расположенной в восточной части Сибири, на реке Ангаре – Богучанской ГЭС.

Всего на ГЭС будет установлено 9 агрегатов. Установленная мощность ГЭС – 3000 МВт. Каждый гидрогенератор имеет единичную мощность 370 МВА/ 333 МВт; номинальное напряжение 15,75 кВ; номинальную частоту вращения 90,91 об/мин; угонную частоту вращения 190 об/мин. ОАО “Силовые машины” приступило к выпуску энергетического оборудования: филиал ЛМЗ в Санкт-Петербурге – к выпуску гидротурбин; филиал “Электросила” в Санкт-Петербурге – к выпуску гидрогенераторов.

Основные параметры гидрогенераторов Богучанской ГЭС представлены в таблице 1.

Таблица 1

Номинальные данные гидрогенераторов Богучанской ГЭС

№	Наименование параметра	Единицы	Значение
1	Номинальная мощность	МВА / МВт	370,0 / 333,0
2	Номинальное напряжение	кВ	15,75
3	Номинальный ток статора	А	13563
4	Номинальный коэффициент мощности		0,9
5	Номинальная частота сети	Гц	50
6	Номинальная частота вращения	1/мин	90,91
7	Угонная частота вращения	1/мин	190,0

Гидрогенераторостроение занимает особое место в электромашиностроении, поскольку, в силу специфики, гидрогенераторы не являются серийным и стандартным оборудованием. Основные исходные данные, определяющие параметры гидротурбин и гидрогенераторов, своеобразны для каждой конкретной ГЭС, и достаточно редко их можно унифицировать. Но создание девяти гидрогенераторов для Богучанской ГЭС равнозначно созданию серии генераторов. Это чрезвычайно важный момент, поскольку возможно усовершенствование конструкции, материалов, технологии на основе данных по испытаниям первых гидрогенераторов.

В течение всего периода существования филиалом “Электросила” изготовлено и реконструировано около 120 мощных (более 200 МВА) гидрогенераторов с косвенным воздушным охлаждением.

Гидрогенераторы для Богучанской ГЭС являются крупнейшими гидрогенераторами с косвенным воздушным охлаждением..

В таблице 2 приведены данные по мощным гидрогенераторам с косвенным воздушным охлаждением, изготовленным и реконструированным ОАО “Силовые машины” филиалом “Электросила” в Санкт-Петербурге.

Таблица 2

Мощные гидрогенераторы с косвенным воздушным охлаждением

№	ГЭС	Страна	Кол	S	P	U	n	Год*
			шт.	МВА	МВт	кВ	1/мин	
1	Братская	Россия	14	264,7	225	15,75	125	1960
2	Братская (реконстр.)	Россия	14	294,1	250	15,75	125	1976
3	Асуан	Египет	12	206,0	175	15,75	100	1966
4	Асуан (реконстр.)	Египет	12	235,0	200	15,75	100	2004
5	Джердап	Сербия	3	190,0	171	15,75	71,5	1969
6	Джердап (реконстр.)	Черногория	6	211,11	190	15,75	71,5	2006
7	Железные ворота	Румыния	3	190,0	171	15,75	71,5	1969
8	Зейская	Россия	6	253,0	215	15,75	136,4	1975
9	Собрадиньо	Бразилия	6	194,5	175	13,8	75	1978
10	Хоа Бинь	Вьетнам	8	266,7	240	15,75	125	1986
11	Усть-Илимская	Россия	8	282,5	240	15,75	125	1986
12	Пьедра-дель-Агила	Аргентина	4	390,0	370,5	15,75	125	1989
13	Агуамильпа	Мексика	3	341,0	323,95	13,8	150	1992
14	Бурейская	Россия	6	372,22	335	15,75	125	2001
15	Эль Кахон	Мексика	2	394,74	375	17,0	150	2005
16	Сангудинская	Таджикистан	4	186,1	167,5	15,75	100	2006
17	Богучанская	Россия	9	370	333	15,75	90,91	2009
18	Ла Иска	Мексика	2	394,74	375	17,0	150	2010

(*) – год начала ввода в эксплуатацию

На рис.1 и рис.2 представлены крупнейшие гидрогенераторы с косвенным воздушным охлаждением для ГЭС Эль Кахон в Мексике с номинальной мощностью по 375 МВт каждый (максимальная мощность составляет 416,7 МВт) и крупнейшие гидрогенераторы с косвенным воздушным охлаждением для Бурейской ГЭС в России мощностью по 335 МВт .



Рис.1
Эль Кахон ГЭС - Мексика



Рис.2
Бурейская ГЭС - Россия

Максимально достигнутая объединением ОАО “Силовые машины” филиалом “Электросила” мощность гидрогенераторов с косвенным воздушным охлаждением составляет 439 МВА для гидростанций в Мексике: ГЭС Эль Кахон и ГЭС Ла Иеска. По нашему мнению, для тихоходных гидрогенераторов (скорость вращения в пределах 50÷150 об/мин) мощностью свыше 600 МВА нецелесообразно применять косвенное воздушное охлаждение. В этом случае более эффективно применение непосредственного водяного охлаждения обмотки статора и форсированного воздушного охлаждения обмотки ротора. Такие гидрогенераторы были спроектированы и изготовлены в объединении для ГЭС России - Красноярской и Саяно-Шушенской.

Первоначально эскизный проект гидрогенераторов Богучанской ГЭС был выполнен в 1983 г. Спустя 25 лет, в связи с появлением новых материалов, новых технологий, для повышения конкурентоспособности генераторов, проект был пересмотрен.

Пересмотр проекта, приведший к улучшению ряда характеристик, основан на опыте филиала “Электросила” по созданию мощных гидрогенераторов, отличающихся высокой надежностью и конкурентоспособностью, что, в свою очередь, обусловлено рядом факторов.

- **Использование современных материалов.**

- Применение современной “утоненной” терморепактивной изоляции класса нагревостойкости “F” позволяет уменьшить габариты гидрогенераторов без снижения мощности.

- Применение при изготовлении сердечника статора электротехнической холоднокатаной стали с низкими удельными потерями, а также изоляционного лака, позволяет снизить суммарные потери в сердечнике статора и повысить коэффициент полезного действия.

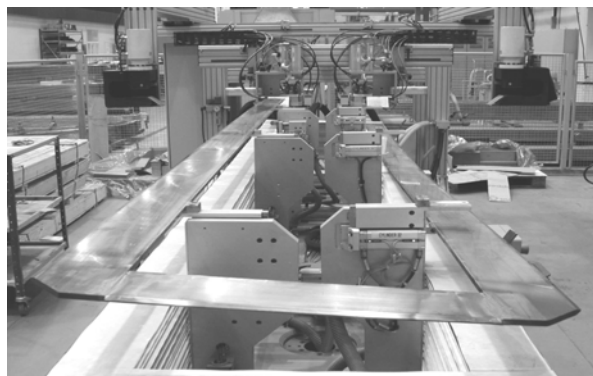
- Применение немагнитных нажимных щек полюсов ротора для мощных гидрогенераторов позволяет расширить зону работы при недовозбуждении с потреблением реактивной мощности от сети и также повысить коэффициент полезного действия.

- Максимальное использование технических характеристик фторопластового покрытия сегментов подпятника и подшипника позволяет увеличить удельную нагрузку на сегменты.

- **Применение современных технологий.**

- Сборка сердечника статора “в кольцо” на месте установки с применением “горячей растяжки” позволяет уменьшить вибрации и улучшить форму сердечника статора.

- Применение вакуумно-нагнетательной пропитки и паяных обмоток возбуждения полюсов ротора позволяет увеличить надежность и долговечность работы.



*Рис.3
Изготовление обмоток возбуждения*

Благодаря пересмотру проекта снижены массогабаритных характеристики и увеличен коэффициент полезного действия (КПД) гидрогенераторов Богучанской ГЭС.

В таблице 3 представлено сравнение проектных данных первоначального эскизного проекта (1983 г.) и рабочего проекта (2006 г.). Как видно из таблицы, при сохранении всех проектных данных снижены размеры и вес гидрогенератора в целом.

При пересмотре проекта сохранены все основные параметры; существенно повысился коэффициент использования, снижена мощность, необходимая для возбуждения гидрогенератора. Повышение коэффициента использования свидетельствует о сокращении габаритов гидрогенератора почти на 20% при сохранении неизменности мощности, т.е., о более эффективном использовании материалов. Пересмотр эскизного проекта привел к значительному увеличению значений КПД при различных нагрузках, примерно на 0,3%.

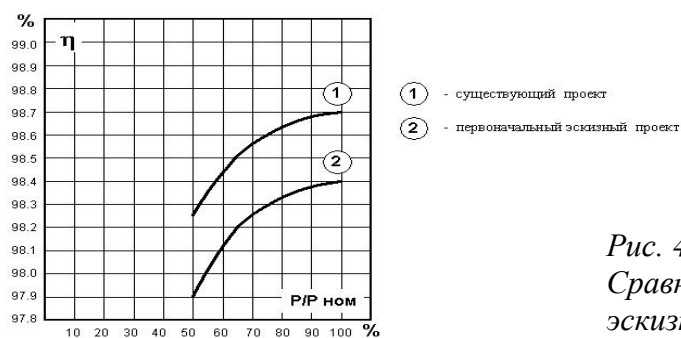
Сравнение эскизного и рабочего проектов гидрогенераторов Богучанской ГЭС, вследствие усовершенствования конструкционных материалов, технологии, методов проектирования, приведено в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение данных эскизного и рабочего проектов

№	Наименование параметра	Единицы	Значение	
			Эскизный	Рабочий
1	Проект		Эскизный	Рабочий
2	Год выпуска проекта		1983	2006
ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ				
3	Номинальная мощность	МВА / МВт	370,0 / 333,0	
4	Номинальное напряжение	кВ	15,75	
5	Номинальный ток статора	А	13563	
6	Номинальный коэффициент мощности		0,9	
7	Номинальная частота сети	Гц	50	
8	Номинальная частота вращения	1/мин	90,91	
9	Угонная частота вращения	1/мин	190,0	
10	Суммарный вес генератора	т	1740	1633
11	Коэффициент использования	кВА/(м ³ *1/мин)	8,01	9,47
12	Номинальный ток возбуждения	А	2200	1985
13	Номинальное напряжение возбуждения	В	465	410
14	КПД при номинальных условиях	%	98,4	98,7

На рис.4 приведено сравнение КПД гидрогенераторов Богучанской ГЭС в соответствии с эскизным и рабочим проектом.



*Рис. 4
Сравнение КПД
эскизного и рабочего проектов*

ОАО “Силовые машины”, филиал “Электросила”, в течение последних 30 лет для мощных гидрогенераторов применяет специальную конструкцию нажимных щек полюсов ротора, а именно, немагнитные составные нажимные щеки полюсов ротора. Основным преимуществом применения немагнитных нажимных щек полюсов ротора является расширение зоны работы в условиях потребления реактивной мощности из сети, а также снижение потерь и нагрева в торцевой зоне сердечников статоров и, соответственно, повышение КПД. Всего филиалом “Электросила” изготовлено около 4000 немагнитных нажимных щек. На рис.5 представлена конструкция полюсов ротора с немагнитными нажимными щеками.

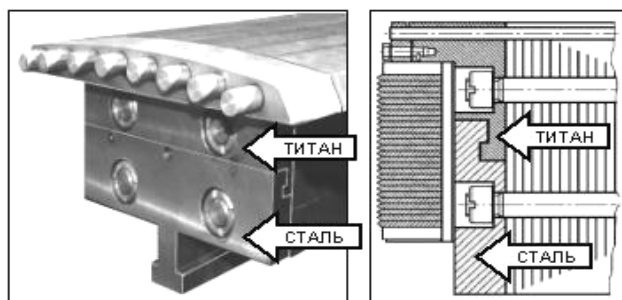


Рис.5
Полюса ротора гидрогенератора с немагнитными нажимными щеками

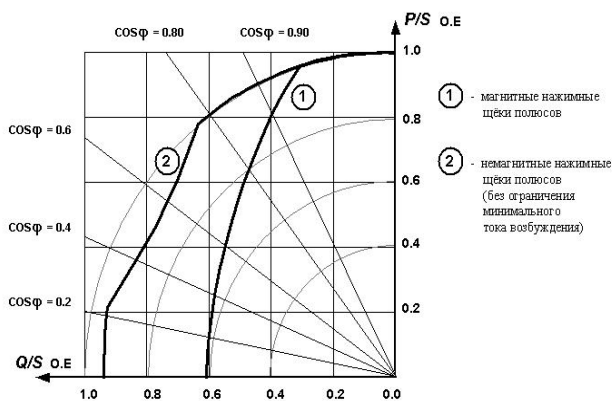
В таблице 4 приведены основные данные по мощным гидрогенераторам, имеющим немагнитные нажимные щеки полюсов ротора.

Таблица 4
Гидрогенераторы с немагнитными нажимными щеками полюсов ротора

№	ГЭС	Страна	Кол.	Р	п	Всего полюсов	Год*
				МВт	1/мин		
1	Саяно-Шушенская	Россия	10	720	142,8	420	1977
2	Пурнари	Греция	3	100	150	120	1978
3	Пьедра-дель-Агила	Аргентина	4	408,5	125	192	1989
4	Агуамильпа	Мексика	3	363,2	150	144	1992
5	Красноярская	Россия	10	500	93,8	640	1994
6	Бурейская	Россия	6	335	125	288	2001
7	Юлхья	Финляндия	1	21,78	115,4	52	2002
8	Усть-Среднеканская	Россия	3	142,5	100	180	2003
9	Се Сан 3	Вьетнам	2	130	125	96	2004
10	Эль Кахон	Мексика	2	416,7	150	96	2005
11	Балимела	Индия	2	75	375	32	2006
12	Сангтудинская	Таджикистан	4	167,5	100	240	2006
13	Ла Игера	Чили	2	80	600	20	2007
14	Ла Иеска	Мексика	2	416,7	150	96	2008
15	Богучанская	Россия	9	333	90,9	594	2009

(*) – год начала изготовления

На рис.6 показано преимущество применения для гидрогенераторов Богучанской ГЭС немагнитных нажимных щек полюсов ротора для расширения возможности работы в режимах с потреблением из сети реактивной мощности.



*Рис. 6
Работа гидрогенераторов
Богучанской ГЭС в режимах
недовозбуждения при потреблении
из сети реактивной мощности*

В последние годы в России на востоке страны, кроме Богучанской ГЭС, введена в эксплуатацию еще одна крупнейшая ГЭС – Бурейская с установленной мощностью 2000 МВт. В связи с этим, представляет определенный интерес сравнение этих двух схожих гидрогенераторов. В таблице 5 приведено сравнение параметров гидрогенераторов Бурейской и Богучанской ГЭС.

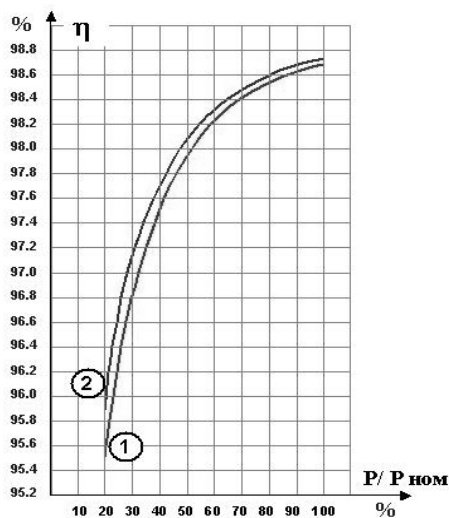
Несмотря на схожесть номинальных данных: мощность, напряжение, близкие частоты вращения, гидрогенераторы Богучанской ГЭС имеют более эффективное использование, о чем свидетельствует повышение коэффициента использования на 20%. Вес гидрогенератора для Богучанской ГЭС несколько выше, чем для Бурейской, вследствие более низкой скорости вращения.

Таблица 5

Сравнение параметров гидрогенераторов Бурейской и Богучанской ГЭС

№	Параметры	Единицы	ГЭС	
			Бурейская	Богучанская
1	Тип гидрогенератора		СВ 1313/265-48	СВ 1548/203-66
2	Количество гидрогенераторов	шт.	6	9
3	Номинальная мощность	МВА / МВт	372,22 / 335	370,0 / 333
4	Номинальное напряжение	кВ	15,75	
5	Номинальная частота вращения	1/мин	125	90,91
6	Номинальная частота сети	Гц	50	
7	Номинальный ток статора	А	13645	13563
8	Коэффициент использования	кВА/(м ³ *1/мин)	7,8	9,47
9	КПД при P _{ном.}	%	98,7	98,7
10	Общий вес генератора	т	1518	1633

Достаточно интересен следующий факт. Проект гидрогенераторов для Бурейской ГЭС из-за появления современных материалов и технологий также был пересмотрен с целью уменьшения габаритов и увеличения КПД. Были проведены расчетно-экспериментальные работы, полностью подтвердившие технические решения, принятые при проектировании гидрогенераторов Богучанской ГЭС. На рис. 7 приведено сравнение значений КПД в результате пересмотра проекта гидрогенераторов для Бурейской ГЭС.



1 эскизный проект

2 основной проект

Рис. 7
КПД гидрогенератора Бурейской ГЭС

Гидрогенераторы для Богучанской ГЭС полностью удовлетворяют всем требованиям Заказчика, а также международным и российским стандартам. Гидрогенераторы предназначены для работы в широком диапазоне нагрузок в соответствии с техническими условиями. В таблице 6 показано соответствие параметров гидрогенератора Богучанской ГЭС требованиям технического задания.

Таблица 6
Соответствие параметров гидрогенератора Богучанской ГЭС требованиям ТЗ

№	Параметры	Единицы	Значение	
			Требования	Данные Проекта
1	Номинальная кажущаяся мощность	МВА	370	370
2	Номинальная активная мощность	МВт	333	333
3	Номинальный коэффициент мощности		0,9	0,9
4	Номинальное напряжение	кВ	15,75	15,75
5	Допустимые отклонения по напряжению	%	±5	±5
6	Номинальный ток статора	А	13563	13563
7	Номинальная частота сети	Гц	50	50
8	Допустимые отклонения по частоте	%	±2	±2
9	Частота вращения			
9.1	- номинальная	1/мин	90,91	90,91
9.2	- угонная		190	190
10	Маховой момент гидрогенератора	т*м ²	152000	152000
11	КПД гидрогенератора при cos φ=0,9			
11.1	- при P = 1,0 P _{ном.}	%	98,5	98,7
11.2	- при P = 0,75 P _{ном.}		98,3	98,59
11.3	- при P = 0,5 P _{ном.}		97,9	98,25
12	Индуктивные сопротивления:			
12.1	- синхронное по продольной оси, X _d	о.е.	1,1	1,1
12.2	- синхронное по поперечной оси, X _q		0,75	0,71
12.3	- переходное по продольной оси, X' _d		0,35	0,35
12.4	- сверхпереходное по продольной оси, X'' _d		0,24	0,24

На рис. 8 приведено сравнение КПД гидрогенератора для Богучанской ГЭС, выполненного ОАО “Силовые Машины”, филиалом “Электросила” и КПД подобных

гидрогенераторов других фирм. Данное сравнение показывает, что гидрогенераторы для Богучанской ГЭС соответствуют мировому уровню.

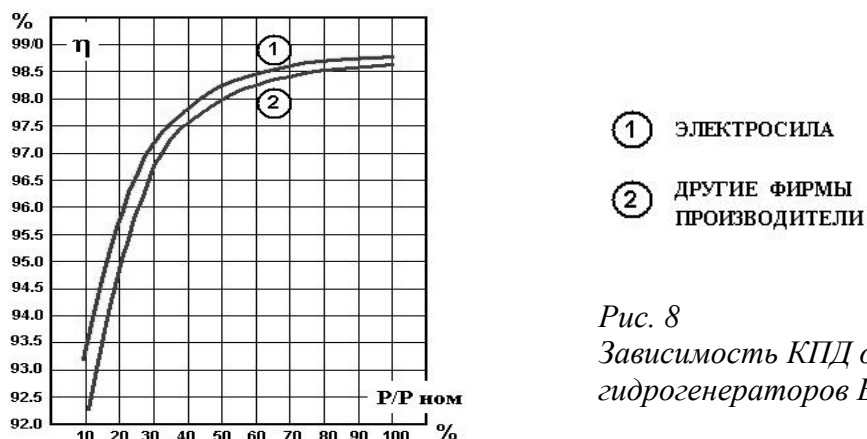


Рис. 8
Зависимость КПД от нагрузки для гидрогенераторов Богучанской ГЭС

Заключение.

- Создание 9 гидрогенераторов является созданием серийных машин.
- Применяемые технические решения основаны на опыте ОАО “Силовые Машины” филиала “Электросила” по проектированию и изготовлению мощных гидрогенераторов с косвенным воздушным охлаждением.
- Пересмотр эскизного проекта по сравнению с первоначальным проектом 1983г. позволил снизить массо-габаритные параметры генератора и существенно повысить значение КПД.
- Расчетное значение КПД выше значения, указанного в исходном эскизном проекте.
- Проектные решения основаны на применении современных технологий:
 - сборка сердечника статора на монтаже “в кольцо” с последующей “горячей растяжкой”;
 - применение немагнитных щек полюсов ротора;
 - технология вакуумно-нагнетательной пропитки при изготовлении полюсов, применение паяных обмоток возбуждения;
 - максимальное использование свойств металлопластикового покрытия сегментов подпятника и подшипников.
- Все проектные параметры удовлетворяют техническим требованиям.
- Гидрогенераторы для Богучанской ГЭС соответствуют мировому уровню развития гидрогенераторостроения.