

Разработка генератора для малого капсульного гидроагрегата

МАРКОВ М.А.^{1,2}, КОРОВКИН Н.В.¹, ТРЕТЬЯКОВ В.С.², ЖИГЛИНСКИЙ С.В.²

¹СПБПУ, Санкт-Петербург, Россия

²АО «Силовые Машины», Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена разработке конструкции генератора для малого капсульного гидроагрегата. В качестве вариантов конструкции рассматривались синхронные агрегаты с бесщеточным возбуждением и щеточно-контактным аппаратом, с возбуждением от постоянных магнитов, а также индукторный генератор. Выполнены электромагнитный, вентиляционный и тепловой расчеты, а также расчет динамики и прочности основных узлов синхронного генератора с бесщеточным возбуждением. Решены основные технические задачи: уменьшение массогабаритных показателей генератора, снижение его материалоемкости, обеспечение меньшей себестоимости, увеличение КПД и повышение монтажной готовности и ремонтпригодности, снижение вентиляционных потерь, проработка системы вентиляции, а также повышение автономности работы. Показано, что количественные и качественные характеристики генератора могут быть значительно улучшены с применением концепции синхронной явнополюсной электрической машины. Показана возможность стабильной работы генератора при различных режимах его использования.

К л ю ч е в ы е с л о в а: гидрогенератор, синхронный генератор, улучшение прототипа, КПД генератора, снижение массы, расход воздуха на вентиляцию, мультипликатор, индукторный генератор

Малая гидроэнергетика в России активно развивается как вид возобновляемых источников энергии, что требует повышения эффективности использования малых гидроагрегатов и соответствия их современным требованиям экологичности. Поэтому актуальна разработка новых конструкций малых капсульных гидроагрегатов, обладающих наилучшими количественными и качественными характеристиками в сравнении с существующими аналогами [1].

Цель работы – создание конструкции горизонтального капсульного гидрогенератора с улучшенными параметрами, а также методики его конструирования, расчета и оптимизации. Для достижения поставленной цели выполнен анализ существующих решений, рассмотрены возможности совершенствования существующих концепций, разработана новая конструкция генератора и выполнена оптимизация его основных характеристик.

В отличие от крупных ГЭС, при проектировании малых ГЭС нет predetermined концепции проекта, которой должны придерживаться проектировщики, поэтому возможно применение широкого ряда технических решений и для конструкции гидроагрегата в целом, и для гидрогенератора. При горизонтальном расположении турбины возможны два технических решения:

1. Гидроагрегат классического исполнения (крупные капсульные гидроагрегаты) с постоянной частотой вращения турбины, где изменение мощности осуществляется поворотом лопаток направляющего аппарата. Агрегат состоит из поворотно-лопастной турбины и

тихоходного синхронного генератора [2, 3]. Недостатками данного решения являются значительные размеры капсулы и проточной части, связанные с тихоходностью агрегата, высокая сложность изготовления поворотно-лопастной турбины, разработанной в соответствии с современными экологическими стандартами.

2. Гидроагрегат в виде модульного блока турбина-генератор с переменной или постоянной частотой вращения турбины, мультипликатором и преобразователем. Применение мультипликатора для повышения частоты вращения позволяет поднять частоту вращения генератора и снизить его радиальные габариты. В случае соотношения максимального напора к минимальному более 1,25 целесообразно рассмотреть применение агрегата с переменной частотой вращения, позволяющего применить более простую и надежную пропеллерную турбину.

В этих вариантах компоновки, кроме варианта модульного блока, работающего на переменную частоту, предполагается использование синхронного явнополюсного генератора. Поэтому наибольший интерес представляет разработка синхронного генератора с переменной частотой вращения и с мультипликатором, являющимся промежуточным звеном между турбиной и генератором. Генератор должен быть соединен с электросетью через преобразователь частоты, рассчитанный на полную мощность агрегата [4, 5]. Такое техническое решение способствует значительному снижению габаритов генератора и гидроагрегата, так как мультипликатор повышает выходную угловую

скорость, а также при сохранении диаметра рабочего колеса турбины позволяет уменьшить диаметр статора генератора. Это обуславливает снижение затрат на капитальное строительство и общую цену проекта. Поэтому именно данное техническое решение было принято для дальнейшей проработки в качестве базового. На рис. 1 представлено сравнение габаритов проточной части малого и традиционного капсульных агрегатов для одинакового диаметра рабочего колеса.

Целью разработки является увеличение КПД гидроагрегата и повышение его конкурентоспособности [6], для чего было проведено сравнение эффективности применения явнополюсных синхронных генераторов с бесщёточной системой возбуждения (БВД), щёточно-контактным аппаратом (ЩКА) и с возбуждением от постоянных магнитов, а также индукторного генератора (табл. 1). Критериями оценки генератора каждого типа на данном этапе были приняты КПД, размеры, масса, цена, необходимость обслуживания, освоенность и независимый от сети пуск.

Преимущества параметров были выявлены у конструкции синхронного генератора с БВД. Важнейшие из них – КПД, размеры и независимый от сети пуск. Реализация синхронного генератора с ЩКА значительно уступает БВД из-за невозможности постоянного обслуживания ЩКА в капсуле генератора, а также не предполагает независимый пуск от сети. Синхронный явнополюсный генератор с постоянными магнитами уступает генератору с БВД в стоимости из-за высокой

стоимости постоянных магнитов ротора. Индукторный генератор, по предварительной оценке, уступает по многим параметрам генератору с БВД, хотя и является существующим техническим решением для ряда малых ГЭС России. Именно последнее обстоятельство определило выбор этой машины в качестве референсной.

Референсный индукторный генератор ГЗМ-1000 задействован в проектах для малых ГЭС с напором от 2 до 20 м с горизонтальным расположением генераторов. Гидроагрегат данного типа станций выполнен в аналогичной концепции, а именно, включает в себя турбину с переменной частотой вращения, мультипликатор, генератор и преобразователь частоты. В табл. 2 представлены основные характеристики референсного генератора [7].

Соответственно разрабатываемый генератор должен иметь характеристики не хуже, чем у референсного, работать с переменной частотой вращения, приводиться в действие от турбины через мультипликатор, работать на преобразователь, а также иметь собственный корпус для размещения внутри отдельной капсулы для удобства установки, обслуживания и ремонта. Эксплуатационные характеристики гидроагрегата также могут быть существенно улучшены за счет уменьшения его длины [8].

Важным аспектом в конструкции капсульного гидрогенератора является система вентиляции, так как именно вентиляционные потери оказывают значительное влияние на КПД генератора. В конструкции

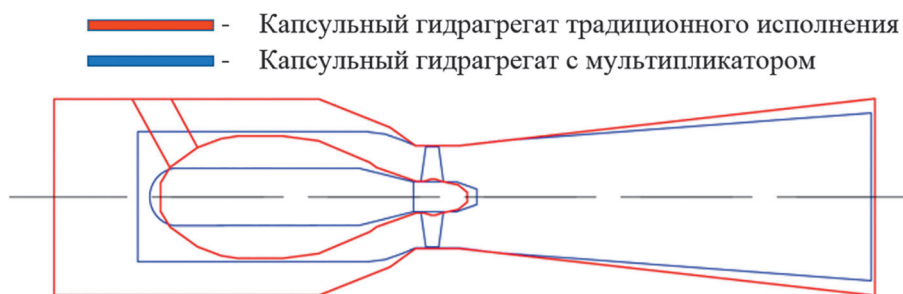


Рис. 1. Сравнение габаритов капсульных гидроагрегатов

Fig. 1. Size comparison of capsule hydro power units

Таблица 1

Выбор концепции генератора Selecting the generator concept

Параметр	Синхронный явнополюсный с БВД	Синхронный явнополюсный с ЩКА	Синхронный явнополюсный с пост. магн.	Индукторный
КПД	+	+	+	–
Размеры	+	+	+	–
Масса	–	+	+	–
Цена	+	+	–	+
Необходимость обслуживания	+	–	+	+
Освоенность	+	+	–	–
Независимый от сети пуск	+	–	+	–

Технические характеристики индукторного генератора типа ГЗМ-1000

Technical characteristics of the GZM-1000 inductor generator

Параметр	Значение
Максимальная мощность, кВт	2850
Длина генератора, мм	3130
Диаметр генератора / капсулы, мм	1370 / 1556
Номинальная частота вращения ротора / рабочая / макс. угонная, об/мин	1140 / 420 / 2160
Частота, Гц	153
КПД, %	96
Линейное напряжение (действующее значение), В	900
Количество фаз	18
Масса, т	15,9
cosφ,	0,97
Особенности	Работа в паре с мультипликатором, принудительная вентиляция

референсного генератора предусмотрена система принудительной вентиляции для охлаждения не только генератора, но и мультипликатора, потери которого оказывают негативное влияние на общий КПД энергоустановки.

Для количественного сопоставления характеристик референсного и разрабатываемого гидроагрегатов был сформулирован ряд критериев (функций цели), ориентированных на гидрогенератор. Улучшение значений этих критериев для гидрогенератора, по мнению авторов, соответствует более эффективному и конкурентоспособному гидроагрегату. Эти цели (в порядке значимости) представлены ниже:

F_1 – уменьшение массогабаритных показателей гидрогенератора и соответствующее ему снижение материалоёмкости, обеспечение меньшей себестоимости и увеличение удельной мощности гидрогенератора;

F_2 – увеличение КПД гидрогенератора и снижение вентиляционных потерь;

F_3 – повышение автономности работы гидрогенератора;

F_4 – повышение монтажной готовности и ремонтно-пригодности генератора.

Применение синхронного явнополюсного генератора вместо индукторного. В соответствии с табл. 1 были рассмотрены различные варианты конструкции гидрогенератора. В результате для детальной проработки был принят вариант синхронного явнополюсного генератора с БВД как наиболее перспективный. Предлагаемый гидроагрегат СГК 130/67-12 УХЛ4 (рис. 2) представляет собой синхронный горизонтальный капсульный генератор. Ротор агрегата имеет два подшипника: роликовый цилиндрический (направляющий), расположенный в подшипниковом щите со стороны мультипликатора, и роликовый двухрядный, расположенный в подшипниковом щите со стороны БВД генератора. Синхронный генератор имеет явнополюсную конструкцию ротора с числом полюсов $2p = 12$. Обмотка статора шестифазная: две звезды со сдвигом 30 эл. град. Статор генератора состоит из корпуса, сердечника и обмотки. Обмотка статора – катушечная. Изоляция влаго- и маслоустойчивая, не поддерживает горение, класс H [9].

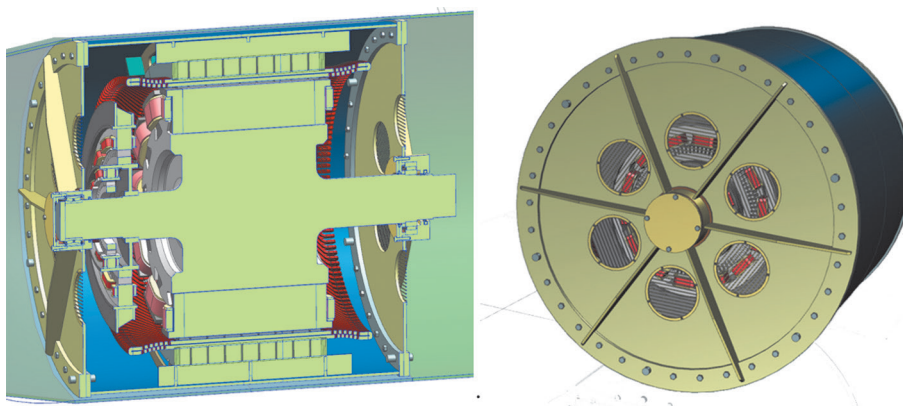


Рис. 2. 3D-модель общего вида синхронного капсульного генератора

Fig. 2. 3D-model of the general view of the synchronous capsule generator

В сравнении с референсной машиной уменьшение длины валопровода агрегата составило 42,5 % (по генератору на 1,25 м), максимальная мощность увеличена до 2945 кВт (на 3 %), снижение потерь на 1 %, КПД повышен до 97 %, масса снижена на 42,45 % и составляет 9,15 т. Сборка и испытания генератора возможны на заводе-изготовителе.

На рис. 3 представлено сравнение габаритов разработанного синхронного генератора и индукторного генератора. Применение данного технического решения сократило размер генератора и капсулы гидроагрегата на 1250 мм при сохранении диаметра капсулы и улучшении основных эксплуатационных параметров (длина валопровода, мощность, КПД и масса).

В табл. 3 для синхронного гидрогенератора приведено сравнение потерь и КПД при различных режимах работы: режим 1 для частоты вращения 1140 об/мин и режим 2 для частоты 798 об/мин. Суммарные потери у генератора в режиме 1 больше, чем в режиме 2, следовательно, в режиме 2 генератор выдает больший КПД. Принимаем средний КПД для рабочих режимов генератора в нормальном режиме работы 97 %.

Повышение ремонтопригодности генератора. Возможными решениями являлись: выполнение корпуса генератора как части капсулы (традиционный вариант СГК) и генератор с отдельным от капсулы корпусом. Рассмотрение обоих вариантов, анализ зарубежного и внутреннего рынков, а также проведение патентных исследований выявили преимущества генератора с отдельным от капсулы корпусом.

В предлагаемой конструкции корпус генератора крепится к капсуле гидроблока с помощью фланца, расположенного на переднем щите. Центрирование генератора в капсуле выполняется по посадочным по-

яскам в корпусе статора. 3D-модель данного решения представлена на рис. 4. Важными преимуществами данного решения являются: полная сборка генератора на заводе; удобство монтажа, обслуживания и ремонта.

Снижение вентиляционных потерь. Возможными решениями были: принудительная вентиляция с внешними охладителями и замкнутая система вентиляции. В процессе проектирования моделировались оба варианта конструкции. Конструкция с замкнутой системой вентиляции имеет внутри корпуса генератора вентилятор для дополнительного охлаждения. Для повышения конкурентоспособности, а также из-

Таблица 3

Потери и КПД синхронного гидрогенератора при различных режимах работы

Losses and efficiency of a synchronous hydro generator under different operating conditions

Параметр	Режим 1	Режим 2
Мощность, кВт	2945	2945
Напряжение, В	600	420
Ток статора, А	1416	2024
Частота вращения, об/мин	1140	798
Частота, Гц	114	79,8
Потери в железе, кВт	37,79	23,25
Потери в меди, кВт	14,73	29,97
Добавочные потери КЗ, кВт	5,25	5,43
Потери на возбуждение, кВт	11,07	15,07
Механические потери, кВт	31,74	15,55
Суммарные потери, кВт	100,59	89,26
КПД, %	96,70	97,06

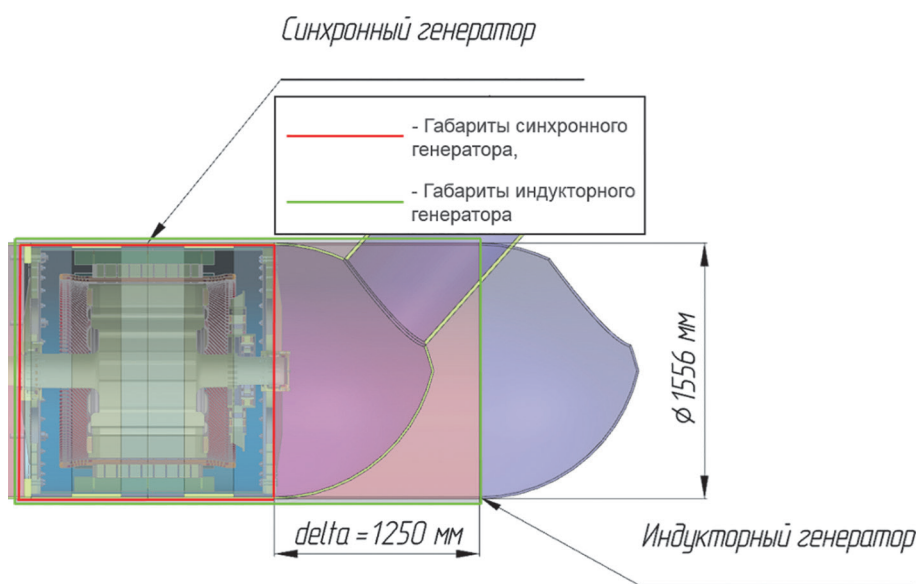


Рис. 3. Сопоставление габаритов синхронного и индукторного генераторов

Fig. 3. Comparison of dimensions of synchronous and inductor generators

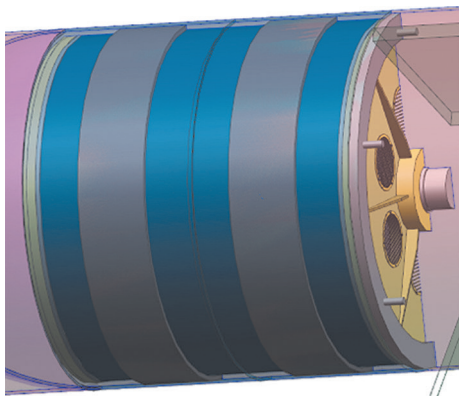


Рис. 4. 3D-модель корпуса гидрогенератора

Fig. 4. 3D-model of the hydro generator casing

за необходимости принудительно охлаждать мультипликатор гидроагрегата, была принята схема с внешними охладителями. Преимущество данного решения (рис. 5) – снижение расхода воздуха в генераторе. Так вентиляционный расчет показал сорокапроцентное снижение расхода воздуха на вентиляцию.

Повышение автономности работы генератора.

Возможные решения: применение явнополюсного синхронного генератора с БВД и применение явнополюсного синхронного генератора с ЩКА. В качестве решения была принята конструкция с БВД, представленная на рис. 6. Возбудитель и подвозбудитель к синхронному генератору представляют собой обращенный синхронный генератор.

Преимущества реализованного решения: отсутствие необходимости в постоянном контроле и своевременном обслуживании электропроводящих деталей токосъемного устройства, в конструкции системы возбуждения нет щёточно-контактного аппарата, который подвержен высокому износу. В результате удалось достичь эффекта возбуждения при отсутствии внешнего

электропитания ГЭС («Black start» в режиме выдачи мощности на изолированного потребителя), а также снижения затрат на обслуживание и повышение надёжности, уменьшение массогабаритных показателей системы возбуждения.

Для разработанного генератора было достигнуто повышение монтажной готовности, конструкция предполагает сборку и полные испытания на заводе-изготовителе.

К особенностям разработанной конструкции следует отнести: эксплуатационный ресурс подшипников генератора ~200 тыс. раб. час, что превышает ресурс работы мультипликатора 100 тыс. раб. час; повышение надежности за счет изоляции от подшипниковых токов, а также увеличения срока службы изоляции генератора ~320 тыс. раб. час, по формуле Монтзингера [10, 11].

Анализ результатов. Как видно из табл. 4, разработанная конструкция синхронного генератора превосходит показатели индукторного генератора по всем поставленным целевым функциям.

Практически по всем целевым функциям удалось достичь лучших в сравнении с референсной машиной результатов. Так как расчет генератора выполнялся в пользу уменьшения длины генератора по валу и массы ротора и статора, то диаметр предлагаемого генератора получился немного больше (8,17 %), чем у индукторного генератора, что также характерно для синхронных электрических машин. Следует отметить, что удалось повысить КПД генератора на 1 %, что немаловажно для гидроагрегатов с мультипликатором и преобразователями.

Основными преимуществами являются: уменьшение длины вала генератора на 42,5 %, снижение массы ротора на 4,66 т и общей массы генератора на 6,75 т.

В итоговой табл. 5 представлены численные показатели, демонстрирующие превосходство разработанной конструкции генератора над референсной машиной по ряду важнейших параметров.

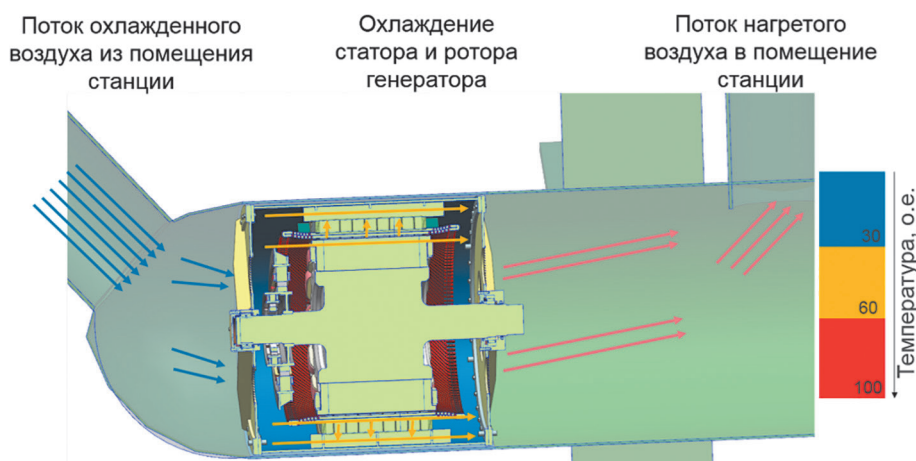


Рис. 5. Система вентиляции разработанного гидрогенератора

Fig. 5. Ventilation system of the designed hydrogenerator

Оценка разработанного генератора по целевым функциям
Evaluation of the developed generator by target function

Целевая функция		Синхронный генератор	Индукторный генератор
F_1	Массогабаритные показатели генератора: длина, мм диаметр, мм масса ротора, т масса, т удельная мощность, МВт/т	1800 1492 4,34 9,15 0,322	3050 1370 9 15,9 0,179
F_2	КПД, %	97,06	96
F_3	Автономность работы	Возможность возбуждения без внешнего электроснабжения	Отсутствует
F_4	Монтажная готовность и ремонтпригодность	Генератор размещен внутри капсулы	Генератор размещен внутри капсулы

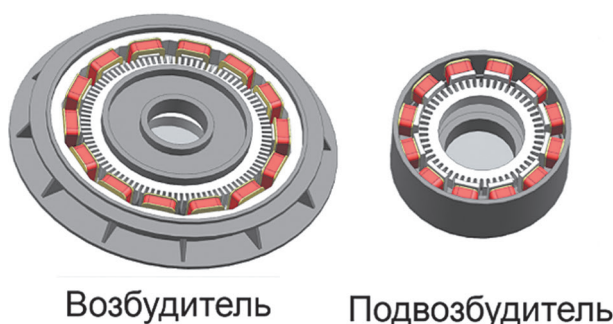


Рис. 6. 3D-модель возбуждителя и подвозбудителя гидрогенератора
Fig. 6. 3D-model of the exciter and exciter sub-exciter of a hydro generator

Результаты исследования дают возможность заводу-изготовителю начать разработку рабочего проекта на основе полученных данных. В рамках данного типа генератора возможна оптимизация различных узлов агрегата, а также его параметров. Авторы планируют осуществить оптимизацию основных параметров генератора с использованием методов искусственного интеллекта в проектировании электрических машин, которые уже успешно применялись авторами в оптимизации параметров турбогенератора [12, 13].

Выводы. В результате проведенного исследования была успешно создана конструкция горизонтального капсульного гидрогенератора с улучшенными параметрами, а также разработана методика его констру-

Анализ результатов разработки
Analysis of development results

Параметр	Синхронный генератор	Индукторный генератор
Маркировка / климатическое исполнение	СГК 130/67-12 УХЛ4	ГЗМ-1000 УХЛ4
Мощность генератора, МВт	2,945	2,85
Частота вращения, об/мин: рабочая мин./макс. угонная макс. (H=8,6 м)	420/1140 2160	420/1140 2160
Тип генератора	синхронный	индукторный
Длина вала генератора, мм	1800	3000
Ток возбуждения, А	172	50
Тип подшипников	роликовый цилиндрический (направляющий) / роликовый двухрядный	двухрядные сферические
Масса ротора, т	4,34	9
Масса генератора, т	9,15	15,9
КПД, %	97	96
Ток фазы, А	1416 (при 1140 об/мин)	9х720
Напряжение, В	600	690
Расход воздуха, м ³ /с	4	7,8
Класс изоляции	H (F)	F
Диаметр генератора/капсулы, мм	1492/1556	1370/1556
Длина генератора, мм	1800	3050

ирования, расчета и оптимизации. По всем функциям цели, которые были определены для данного генератора, концепция синхронной машины авторской разработки превосходит концепцию индукторной машины. В качестве основных конструктивных решений были реализованы: синхронная явнополюсная конструкция, отдельный корпус генератора от турбины, принудительная вентиляция с внешними охладителями, применение БВД в качестве возбудителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 55260.2.1-2012. Гидроэлектростанции. Ч. 2-1. Гидрогенераторы. Технические требования к поставке. М.: Стандартинформ, 2015, 43 с.
2. Schlemmer E. et al. HYDROMATRIX® and StrafloMatrix, Electric Energy from Low Head Hydro Potential. – 2007 International Conference on Clean Electrical Power, 2007, pp. 329–334, DOI: 10.1109/ICCEP.2007.384232.
3. Cui X., Binder A., Schlemmer E. Straight-Flow Permanent Magnet Synchronous Generator Design for Small Hydro Power Plants. – 2007 International Conference on Clean Electrical Power, 2007, pp. 323–328, DOI: 10.1109/ICCEP.2007.384231.
4. Морозов А.А. Турбинное оборудование гидроэлектростанций. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958, 519 с.
5. Boguslawsky I., Korovkin N., Hayakawa M. Large A.C. Machines: Theory and Investigation Methods of Currents and Losses in Stator and Rotor Meshes Including Operation with Nonlinear Loads. Tokyo: Springer, 2017, 550 p.
6. Домбровский В.В., Иванов Н.П. Проектирование гидрогенераторов: т. 2. Л.: Энергия, 1967, 360 с.
7. Сегозерская МГЭС [Электрон. ресурс], URL: <http://ntcvie.ru/index.php/ru/ob-ekty/item/25-segozerskaya-mges> (дата обращения: 19.07.2022).
8. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 2. Л.: Энергия, 1973, 648 с.
9. Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974, 504 с.
10. Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах: Возникновение и методы выявления дефектов. М.: Энергоиздат, 1981, 256 с.
11. IEC 60076-7:2018. Ed. 2.0: Power Transformers – Part 7: Loading Guide for Mineral-Oil-Immersed Power Transformers, 2018, 89 p.
12. Коровкин Н.В., Марков М.А. Оптимизация параметров турбогенератора ТВВ-360 по векторному критерию качества. – Известия РАН. Энергетика, 2020, № 4, с. 49–54.
13. Markov M.A., Korovkin N.V. Multi-Objective Optimization of the Operational Characteristics for Turbogenerator TVV-

360. – Proceedings of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2022, pp. 1230–1233.

Поступила в редакцию [22.09.2022]
Принята к публикации [17.11.2022]

Авторы:



Марков Максим Александрович – инженер-конструктор специального конструкторского бюро по проектированию гидрогенераторов (СКБ ПГ) завода «Электросила», АО «Силовые машины»; аспирант высшей школы высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.



Коровкин Николай Владимирович – доктор техн. наук, профессор, профессор высшей школы высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.



Третьяков Виктор Станиславович – заместитель главного конструктора по проектированию гидрогенераторов СКБ ПГ завода «Электросила», АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия.



Жиглинский Сергей Викторович – главный специалист СКБ ПГ завода «Электросила», АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия.

Development of the Generator for a Small Capacity Bulb Hydropower Unit

MARKOV Maksim A. (JSC “Power machines”; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia) – Design Engineer of the Special Design Bureau for the Hydrogenerators Design of the Electrosila Plant; Postgraduate Student.

KOROVKIN Nikolay V. (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia) – Professor of the Higher School of High Voltage Energy, Dr.Sci. (Eng.), Professor.

TRETIKOV Viktor S. (JSC “Power machines”, St. Petersburg, Russia) – Deputy Chief Designer for Hydrogenerator Design of the Special Design Bureau for the Hydro generators Design of the Electrosila Plant.

ZHIGLINSKIY Sergey V. (JSC “Power machines”, St. Petersburg, Russia) – Chief Specialist of the Special Design Bureau for the Hydro generators Design of the Electrosila Plant.

The generator design development matters for a small bulb hydropower unit is discussed. Synchronous units with a brushless exciter and a brush contact system, with excitation from permanent magnets, as well as an inductor generator were considered as design options. Electromagnetic, ventilation, and thermal analyses are performed, and the dynamics and strength of the main components of a synchronous generator with a brushless exciter are evaluated. The main technical problems have been solved: reducing the generator mass and dimension parameters, reducing its material intensity, decreasing the production cost, increasing the efficiency, and increasing installation readiness and maintainability, reducing windage losses, working out the ventilation system, and enhancement of operational autonomy. It is shown that the generator quantitative and qualitative characteristics can be improved significantly by applying the concept of a synchronous salient pole electrical machine. The possibility of stable generator operation in various modes of its use is shown.

Key words: hydroelectric generator, synchronous generator, prototype improvement, generator efficiency, generator mass reduction, ventilation air flowrate, multiplier, inductor generator

REFERENCES

1. **GOST R 55260.2.1-2012.** *Gidroelektrostantsii. CH. 2-1. Gidrogenerator. Tekhnicheskie trebovaniya k postavke* (Hydro Power Plants. Part 2-1. Hydrotreaters. Procurement Specifications). M.: Standartinform, 2015, 43 p.
2. **Schlemmer E. et al.** HYDROMATRIX® and StrafloMatrix, Electric Energy from Low Head Hydro Potential. – 2007 International Conference on Clean Electrical Power, 2007, pp. 329–334, DOI: 10.1109/ICCEP.2007.384232.
3. **Cui X., Binder A., Schlemmer E.** Straight-Flow Permanent Magnet Synchronous Generator Design for Small Hydro Power Plants. – 2007 International Conference on Clean Electrical Power, 2007, pp. 323–328, DOI: 10.1109/ICCEP.2007.384231.
4. **Morozov A.A.** *Turbinnoe oborudovanie gidroelektrostantsiy* (Turbine Equipment for Hydroelectric Power Plants). M.-L.: Gosenergoizdat, 1958, 519 p.
5. **Boguslawsky I., Korovkin N., Hayakawa M.** *Large A.C. Machines: Theory and Investigation Methods of Currents and Losses in Stator and Rotor Meshes Including Operation with Nonlinear Loads*. Tokyo: Springer, 2017, 550 p.
6. **Dombrovskiy V.V., Ivanov N.P.** *Proektirovanie gidrogeneratortov* (Design of Hydrogenerators): vol. 2. L.: Energiya, 1967, 360 p.
7. **Segozerskaya MGES** (Segozerskaya SHPP) [Electron. resource], URL: <http://ntcvie.ru/index.php/ru/ob-ekty/item/25-segozerskaya-mges> (Date of appeal 19/07/2022).
8. **Kostenko M.P., Piotrovskiy L.M.** *Elektricheskie mashiny. Ch. 2* (Electric Machines. Part 2). L.: Energiya, 1973, 648 p.
9. **Dombrovskiy V.V., Hutoretskiy G.M.** *Osnovy proektirovaniya elektricheskikh mashin peremennogo toka* (Basics of Designing AC Electric Machines). L.: Energiya, 1974, 504 p.
10. **Kulakovskiy V.B.** *Rabota izolyatsii v generatorah: Vozniknovenie i metody vyavleniya defektov* (Work of Insulation in Generators: Occurrence and Methods for Detecting Defects). M.: Energoizdat, 1981, 256 p.
11. **IEC 60076-7:2018.** Ed. 2.0: Power Transformers – Part 7: Loading Guide for Mineral-Oil-Immersed Power Transformers, 2018, 89 p.
12. **Korovkin N.V., Markov M.A.** *Izvestiya RAN. Energetika – in Russ. (News of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2020, No. 4, pp. 49–54.
13. **Markov M.A., Korovkin N.V.** Multi-Objective Optimization of the Operational Characteristics for Turbogenerator TVV-360. – Proceedings of the 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2022, pp. 1230–1233.

Received [22.09.2022]
Accepted [17.11.2022]