

**ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОСКОРОСТНОГО
ТОРЦЕВОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА***

Рассмотрены особенности построения расчетной модели активного объема низкоскоростного торцевого синхронного генератора с продольным намагничиванием полюсов ротора постоянными магнитами, интегрированного программного комплекса, реализующего данную модель, и модуля многокритериальной оптимизации геометрических параметров для автоматизированного создания твердотельных параметризованных моделей.

Ключевые слова: низкоскоростной торцевой синхронный генератор, многокритериальная оптимизация.

В настоящее время энергетическая отрасль России в значительной степени не обеспечивает потребности населения и промышленности как в объеме предоставляемых услуг, так и в их качестве. Как отмечают специалисты, сегодня россияне используют промышленные и экономические ресурсы доперестроечных времен. Общий уровень износа электростанций и линий электропередач по стране в целом превышает 53 %, по Красноярскому краю – 60 %. Среднегодовой ввод генерирующих мощностей по России в 26,4 раза ниже соответствующего показателя в энергетике, например, Китая, но даже этот уровень обеспечивается в основном за счет районов, прилегающих к большим городам. Удовлетворение потребности в электроэнергии в Красноярском крае в бытовой сфере на 15 % ниже, чем в промышленности. Низкий уровень этого показателя обусловлен наличием значительного количества территорий с преобладанием малых населенных пунктов, удаленных от основных линий электропередач, особенно в районе Нижнего Приангарья и в среднем течении Енисея [1].

Для имеющихся систем энергообеспечения Красноярского края среди прочих особенностей характерны:

– большая степень изношенности энергооборудования: источников, распределительных сетей и систем энергопотребления зданий и сооружений;

– крайняя неэффективность сферы потребления электрической энергии: нерегулируемый электропривод, неэкономичные режимы систем освещения, значительные потери в системах распределения и потребления;

– отсутствие стимулов к энергосбережению.

Проблема электроснабжения маломощных потребителей электроэнергии, особенно удаленных от линий электропередач, может быть решена за счет использования малых рек с необходимым запасом гидроресурсов. Наиболее экономичными и легко заменяемыми являются свободнопоточные погружные микроГЭС. Погружные микроГЭС круглогодичного действия удобны для небольших поселков, геологических партий, фермерских хозяйств. Они могут рабо-

тать параллельно с дизельными электростанциями, существенно сокращая расход дизельного топлива или заменяя последние в случае аварии.

Необходимые гидрологические параметры для установки предлагаемой конструкции следующие: скорость течения реки – не менее 1,8 м/с; глубина реки – не менее 1,5 м, ширина участка с требуемой глубиной – не менее 10 м.

Спроектированная при заданных условиях турбина в зависимости от скорости течения реки обеспечивает выходные мощности от 10 до 30 кВт при напряжении трехфазного переменного тока 220/380 В с частотой 50 Гц.

На территории Красноярского края, обладающего колоссальными гидроресурсами (включая не только большие, но и малые реки), возможно применение свободнопоточных микроГЭС мощностью до 25...30 кВт и выше.

Турбина свободнопоточной микроГЭС в зависимости от скорости реки и мощности установки вращается со скоростью 80...200 об/мин. Ветроколесо аналогичной мощности имеет примерно ту же частоту вращения.

До настоящего времени производство свободнопоточных микроГЭС сдерживалось из-за отсутствия низкоскоростного генератора малой мощности.

Выпускаемые промышленностью генераторы переменного тока мощностью от 1 до 50 кВт рассчитаны на скорости 750...3 000 об/мин и для их механической связи с турбиной необходима установка повышающей передачи (мультипликатора) между турбиной и генератором – сложного и дорогого звена (стоимость мультипликатора составляет до 50 % стоимости всей установки), требующего обслуживания в процессе эксплуатации.

Авторами была разработана конструкция свободнопоточной погружной микроГЭС, в качестве базового элемента которой используется синхронный генератор новой конструкции, устраняющий повышающую механическую передачу между генератором и турбиной.

*Работа выполнена в рамках гранта Рособнаучки № 02.740.11.0056 «Разработка теории и методологии проектирования электроснабжения энергодефицитных территорий за счет энергии водных источников (2009–2011 гг.)» (шифр заявки 2009-1.1-228-014-019), а также проекта Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № КФ56 «Проектирование, изготовление, испытания установочной партии микроГЭС и их сертификация (2009–2010 гг.)».

Основные конструктивные особенности предлагаемого низкоскоростного торцевого синхронного генератора (НТСГ) заключаются в следующем [2]:

- возможность изготовления генератора на низкие (70...100 об/мин) частоты вращения за счет увеличения количества полюсов до 50...70;

- автономное выполнение зубцового слоя статора, позволяющее увеличить количество зубцов вследствие уменьшения поперечного размера зубца до толщины пластины стали, существенно снизить высшие гармоники магнитного поля, негативно влияющие на выходные характеристики машины, уменьшить массу и габариты генератора;

- эффективное использование электротехнической стали благодаря отсутствию штамповки с необходимостью выбора оптимального раскроя листа стали (часто в ущерб выходным характеристикам) и повышения электромагнитных нагрузок на участках магнитопровода;

- повышенные плотности тока в обмотках статора за счет применения хорошо охлаждаемой торцевой конструкции;

- замена обмотки возбуждения на возбуждение от постоянных магнитов, уменьшающее расход меди, габариты генератора и улучшающее условия охлаждения;

- рядовая укладка проводников обмотки, снижающая межвитковое напряжение и повышающая надежность двигателя;

- использование в качестве конструкционного материала пластмассы, что существенно упрощает технологию сборки;

- отсутствие скользящих электрических контактов;

- упрощение ряда технологических операций, безотходная технология и применение сравнительно простого станочного оборудования вместо дорогостоящего специализированного технологического оборудования, применяемого при производстве цилиндрических электрических машин;

- переход на другие типоразмеры электрических машин без замены основного оборудования.

Конструктивные решения по низкоскоростному торцевому синхронному генератору защищены патентами РФ 2246167, 2246168, конструкция свободнопоточной микроГЭС – патентом РФ 2247859 [3].

Конструкция автономной энергоустановки за счет использования в ней нового низкоскоростного торцевого генератора и ортогональной турбины транспортабельна, имеет сравнительно небольшие габариты и массу, упрощенную схему монтажа и эксплуатации.

В настоящее время существует большое количество методик расчета нетрадиционных конструкций электрических машин с постоянными магнитами, ориентированных на конкретный тип машины в зависимости от конструкции статора (составной магнитопровод И. П. Копылова, активный распределенный слой В. М. Казанского, гофрированные зубцовопазовые структуры Ф. М. Юферова) и ротора (ротор «звездочка», ротор с тангенциальными постоянными магнитами и др.).

В Сибирском федеральном университете разработан торцевой синхронный генератор, в котором у

качестве обмоточной структуры использован активный распределенный слой статора, предложенный В. М. Казанским, а возбуждение осуществляется от продольно намагниченных постоянных магнитов.

Применение торцевой конструкции генератора снижает массу и габариты машины, позволяет выполнять генератор низких скоростей вращения в виде многополюсной машины с количеством полюсов до 60...70.

Конкурентоспособность изделия на современном этапе достигается за счет многократного сокращения сроков проектирования и обеспечения заданных показателей качества. Выполнение этих требований можно обеспечить при реализации концепции информационной поддержки жизненного цикла изделия, основанной на использовании интегрированной компьютерной среды. Создание такой среды предполагает наличие математических моделей физических процессов, выполненных на уровне программных продуктов, которые обеспечивают синтез параметров и гибкие средства их оптимизации.

Расчетная модель в сочетании с инструментами многокритериальной оптимизации позволяет создать программный комплекс проектирования синхронного генератора, который должен стать компонентом интегрированной компьютерной среды проектирования, исследования, технологической подготовки производства свободнопоточных микроГЭС и их основного компонента – торцевых синхронных генераторов.

Особенности новой конструкции не дают возможности воспользоваться известными методиками расчета цилиндрической электрической машины. Отсюда возникает необходимость в разработке уточненной математической модели торцевого низкоскоростного генератора с учетом вышеперечисленных особенностей и взаимодействия активного распределенного слоя статора с продольно намагниченными постоянными магнитами ротора.

Структура активного объема торцевой электрической машины, используемая для построения расчетной модели, представлена в виде поперечного разреза (рис. 1). При этом каждая из конструктивных зон имеет вид сплошной расчетной полосы с гладкими параллельными границами и характеризуется усредненными однородными либо кусочно-однородными физическими свойствами. Затем все расчетные зоны в порядке их конструктивного чередования смешиваются своими смежными границами, образуя тем самым расчетную модель активного объема машины.

Расчетная модель генератора позволяет сформировать поток данных, необходимых для его проектирования и конструирования:

- энергетические характеристики (мощность, КПД, напряжение, ток статорной обмотки);

- массогабаритные показатели, необходимые для производителя и потребителя машины (масса электротехнической стали, обмоточной меди, магнитов, общая масса машины, ее габаритные размеры);

- геометрические параметры и конструктивные параметры машины (внутренний диаметр и активная длина статора и ротора, диаметр провода, количество витков обмотки статора, размеры магнита, высота ярма статора, воздушный зазор, число полюсов и т. д.).

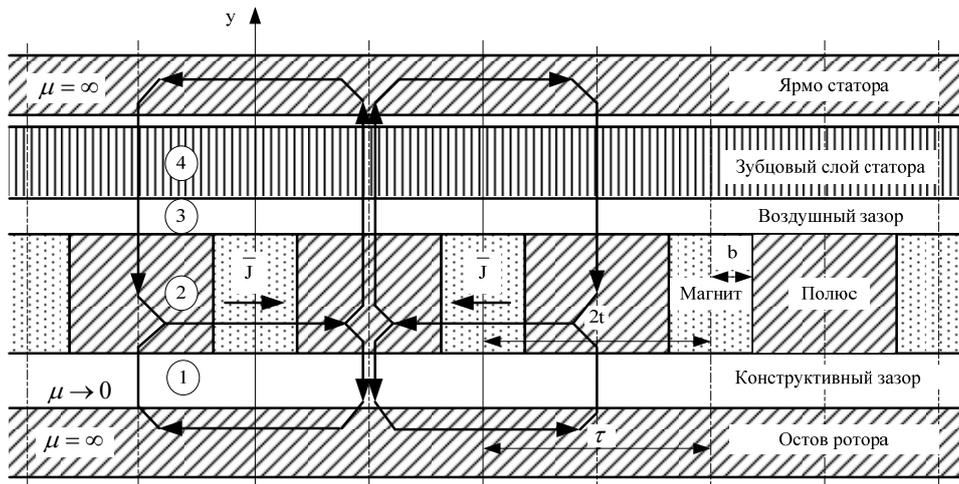


Рис. 1. Структура активного объема торцевой электрической машины

Для поиска оптимального варианта сочетания параметров машины использован метод многокритериальной оптимизации [4], который не требует сведения многокритериальной задачи к однокритериальной, что исключает ее неоправданное упрощение, а также позволяет учесть множество вариантов с минимальным количеством решений, удовлетворяющих заданным условиям.

Входным потоком для алгоритма оптимизации является коллекция работоспособных вариантов машин в виде совокупностей их параметров, как приведенных выше, так и полученных по результатам использования расчетной модели генератора (рис. 2).

Процесс формирования коллекции представляет собой набор последовательно вложенных друг в друга циклов, в которых перебираются все сочетания варьируемых параметров. Эти циклы могут быть реализованы в программном коде, поскольку любой варьируемый параметр всегда имеет заданные для него границы, за которые он выходить не может, а также ряд дискретных значений, которые он может принимать.

В качестве варьируемых параметров используются параметры, в наибольшей степени влияющие на эксплуатационные показатели машины: внутренний активный диаметр D_i , активная длина машины l_b , воздушный рабочий зазор δ , индукция в зазоре машины B_δ , плотность тока в проводниках обмотки статора j .

На первом этапе в случае если формируемая коллекция допустимых вариантов параметров машин не является пустым множеством, пользователь имеет возможность контролировать самые существенные показатели: номинальное напряжение U_n , перегрузочную способность P_{max} , суммарную массу генератора ΣG_r , массу магнитов G_m , наружный диаметр генератора D_n , индуктивное сопротивление пазового рассеяния X_n , после чего программа переходит к этапу поиска оптимального решения. При наличии в коллекции пустого множества решений границы варьируемых параметров формируемой коллекции расширяются.

На втором этапе коллекция допустимых решений отсекается с учетом функциональных ограничений.

Авторами была проведена оптимизация для торцевого синхронного генератора мощностью 1 кВт, определены граничные точки области изменения параметров рассматриваемой системы и выполнен поиск оптимальной геометрии. Критериальные ограничения приняты по аналогии с испытанными ранее опытными образцами торцевого синхронного генератора.

В результате синтеза переменных параметров генератора получена коллекция допустимых решений (рис. 2). На основании ее анализа были сделаны следующие выводы:

- увеличение зазора δ ведет к повышению суммарной массы генератора и падению максимальной мощности, при этом остальные параметры изменяются незначительно;
- увеличение индукции в рабочем зазоре B_δ повышает выходное напряжение и максимальную мощность, на остальные оптимизируемые параметры оно не оказывает значительного влияния;
- увеличение внутреннего активного диаметра D_i ведет к повышению выходного напряжения, суммарной массы генератора массы магнитов и наружного диаметра, при этом максимальная мощность и индуктивное сопротивление уменьшаются;
- увеличение активной длины l_b приводит к снижению индуктивного сопротивления и максимальной мощности, при этом значения остальных параметров увеличиваются;
- с повышением плотности тока j индуктивное сопротивление и масса магнитов остаются постоянными, напряжение и выходная мощность снижаются, а суммарная масса генератора и его наружный диаметр, напротив, увеличиваются.

Алгоритмы, разработанные на основе методик электромагнитного расчета и многокритериальной оптимизации, реализованы в виде программного комплекса, который позволяет автоматизировать создание твердотельных параметризованных моделей в CAD-среде, тем самым сокращая сроки разработки изделия от технического задания до комплекта рабочей документации.

Получение точек для оптимизации

Номинальная мощность: 5000 Номинальное напряжение: 220 Число пар полюсов: 20 Частота: 50

Сортировать: Сформировать: Сохранить: Усечь:

Использовать ЛПТ-последовательность Выходные данные: Печать:

Исходный Ранжированный Выходные данные

критериальные ограничения	Масса генератора: 62	Масса магнитов: 3	Мощность: 14336	Напряжение: 202	Наружный диаметр: 0,5	Индкт. сопротивление: 0	Запас: 0
	74	7	16357	270	0,8	2	128
Весовые коэффициенты	2	2	6	1	5	4	

Тех зазор	Индукция	Актив. диам	Длина	Плотность тока	Напряжение	Макс. мощность	Масса генер.	Масса магн.	Нар. диам.	Индуктив. сопр.	Коеф. запаса	Интегр. показате
0,001	0,72	0,52	0,052	4,9	203,177	14371,540	63,454	4,573	0,635	0,72	32,828	398,046
0,00105	0,72	0,52	0,052	4,9	203,391	14363,290	63,472	4,591	0,635	0,72	32,828	397,804
0,0011	0,72	0,52	0,052	4,9	203,595	14336,840	63,493	4,612	0,635	0,72	32,828	397,268
0,001	0,73	0,52	0,052	4,9	209,545	14631,914	63,496	4,615	0,635	0,72	32,828	402,078
0,00105	0,73	0,52	0,052	4,9	209,759	14631,231	63,515	4,634	0,635	0,72	32,828	401,941
0,0011	0,73	0,52	0,052	4,9	209,962	14612,173	64,107	5,226	0,635	0,72	32,828	397,215
0,001	0,74	0,52	0,052	4,9	216,002	14892,287	63,538	4,657	0,635	0,72	32,828	406,117
0,00105	0,74	0,52	0,052	4,9	216,215	14899,172	63,557	4,676	0,635	0,72	32,828	406,093
0,0011	0,74	0,52	0,052	4,9	216,418	14887,506	64,156	5,275	0,635	0,72	32,828	401,423
0,001	0,75	0,52	0,052	4,9	222,55	15152,661	63,580	4,699	0,635	0,72	32,828	410,163
0,00105	0,75	0,52	0,052	4,9	222,762	15167,113	64,180	5,299	0,635	0,72	32,828	405,875

Количество передач: 1152

Рис. 2. Коллекция допустимых решений

Программный комплекс позволяет вывести на печать полный список всех геометрических, силовых и электромагнитных параметров выбранного варианта генератора (см. рис. 2). Для повышения эргономичности пользовательского интерфейса в таблице результатов разными цветами выделяются варьируемые параметры, критерии качества и интегрированный показатель качества генератора (целевая функция оптимизации), а также осуществляется индикация вспомогательной информации, используемой при оптимизации, например информации о максимальных и минимальных значениях каждого из критериев качества, количестве решений в коллекции и пр.

Программный комплекс имеет модульную структуру и отвечает требованиям структурного программирования. В частности, весь основной функционал оформлен в виде подпрограмм, которые можно использовать в дальнейшем при решении задач оптимизации. Основным входным потоком является двухмерный динамический массив вещественных чисел, хранящий рассчитанные варианты генератора: варьируемые параметры и критерии качества. Такой вид хранения информации обладает некоторой абстрактностью, благодаря чему алгоритм оптимизации может быть легко подключен в виде внешнего модуля к любой другой программе. Единственным требованием к такой программе будет возможность предоставления ею коллекции численных решений в любой сфере знаний для поиска лучшего из них.

Графики зависимостей выходных параметров и характеристик генератора указывают на нелинейность изменения взаимозависимых параметров (рис. 3).

Так, например, при изменении активной длины в характерной точке перехода параметров с $l_8 = 0,034$ м на $l_8 = 0,035$ м у генератора с $P = 3$ кВт, $2p = 32$ происходит резкое падение индуктивного сопротив-

ления пазового рассеяния $X_{п.}$, вызванное уменьшением числа витков статорной обмотки и, соответственно, высоты зубца. Из-за необходимости округления числа проводников в пазе машины до четной величины, что обусловлено условием построения обмоточного модуля, это изменение, связанное с увеличением индукции, происходит скачкообразно.

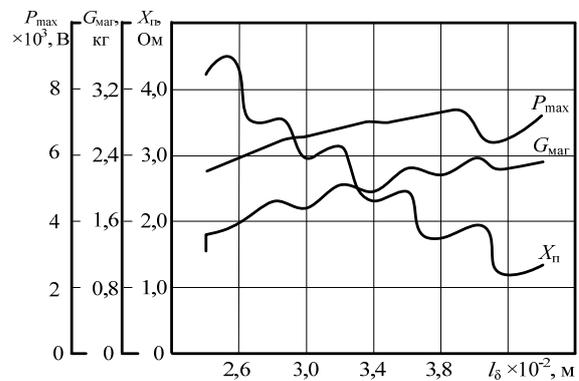


Рис. 3. Графики зависимостей выходных характеристик генератора от активной длины машины

Непропорциональность изменения числа витков и повышения индукции приводит к возрастанию массы магнитов G_M за счет увеличения высоты магнитов h_M и, соответственно, полюсов.

В свою очередь уменьшение числа витков способствует снижению ЭДС E_0 и выходного напряжения U_1 машины. Максимальное значение выходной мощности синхронного генератора уменьшается незначительно, так как со снижением выходного напряжения изменяется и индуктивное сопротивление пазового рассеяния $X_{п.}$.

Выходные параметры низкоскоростного торцевого синхронного генератора

Параметры	Многокритериальная оптимизация	Однофакторный анализ	Процент отклонения
Технологический зазор, м	0,001	0,001	0
Индукция в воздушном зазоре, Тл	0,69	0,7	-1,4
Активный диаметр, м	0,674	0,72	-6,4
Активная длина, м	0,02	0,021	-4,8
Напряжение, В	237,632	219,121	8,4
Максимальная мощность, Вт	6 381	5 964	7,0
Масса генератора, кг	40,069	43,262	-7,4
Масса магнитов, кг	1,318	1,426	-7,6
Индуктивное сопротивление, Ом	4,887	5,535	-11,7

Отсюда можно сделать выводы о нелинейности изменения большого количества взаимозависимых параметров генератора и о необходимости нахождения компромисса при поиске оптимальной геометрии машины.

На третьем этапе на коллекцию решений, полученную в результате усечения, накладываются критериальные ограничения с целью нахождения оптимального варианта, удовлетворяющего всем ограничениям в соответствии с приоритетами конструктора.

На четвертом этапе проводится проверка множества решений на непустоту.

Таким образом, метод многокритериальной оптимизации позволяет значительно улучшить выходные параметры низкоскоростного торцевого синхронного генератора при одновременном снижении себестоимости по сравнению с использованной ранее методикой однофакторного анализа (см. таблицу).

Библиографические ссылки

1. Итоги развития Красноярского края за 2004 г. : стат. отчет / Комитет статистики Красноярского края. Красноярск, 2005.
2. Автоматизация проектирования свободнопоточной микроГЭС / М. П. Головин [и др.] // Вестн. Краснояр. гос. техн. ун-та. Машиностроение. Вып. 40. Красноярск, 2005. С. 89–101.
3. Пат. 2247859 Рос. Федерация, МПК⁷ F 03 В 13/00. Погружная свободнопоточная микрогидроэлектростанция / М. П. Головин [и др.] ; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. техн. ун-т. № 2003127811/06 ; заявл. 15.09.03 ; опубл. 10.03.05, Бюл. № 7.
4. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М. : Наука, 1981.

D. I. Morozov, E. V. Karpenko, N. A. Kolbasina

OPTIMISING SYNTHESIS OF A LOW-SPEED BUTT ALTERNATOR CHARACTERISTICS

In the work the authors describe the features of construction of a design model of active volume of a butt alternator, with direct-axis magnetization of rotor poles, by constant magnets, and integrated program complex, realizing the given model, along with the module of polyoptimization of geometrical parameters for automated creation of solid-state parameterized models.

Keywords: low-speed butt alternator, polyoptimization.

© Морозов Д. И., Карпенко Е. В., Колбасина Н. А., 2012