

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.313.322

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОДЕЛЬ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА

© 2012 А.Л. Встовский, М.П. Головин, К.С. Федий, Н.А. Колбасина, Д.И. Морозов

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Поступила в редакцию 16.03.2012

В статье изложены особенности расчетной модели активного объема низкоскоростного торцевого синхронного генератора с постоянными магнитами и программного комплекса синтеза и многокритериальной оптимизации геометрических параметров, как компонента интегрированной среды проектирования свободнопоточных микроГЭС.

Ключевые слова: *торцевой генератор, микроГЭС, внешняя характеристика*

Развитие малой гидроэнергетики, возобновляемых источников энергии потребовало разработки низкоскоростных герметичных генераторов, способных работать в погруженном состоянии. Эту проблему решает низкоскоростной торцевой синхронный генератор (НТСГ), имеющий высокотехнологичную конструкцию и низкую материалоемкость. В Политехническом институте Сибирского федерального университета по проекту Минобрнауки РФ (Госконтракт № 02.740.11.0056) разработан торцевой синхронный генератор, в котором в качестве обмоточной структуры использован активный распределенный слой статора, предложенный В.М. Казанским в 1970 г., а возбуждение осуществляется от поперечно намагниченных постоянных магнитов [1]. Особенности этого типа генератора позволяют его реализовать в низкоскоростном герметичном исполнении, необходимом для свободнопоточной микроГЭС. Результаты испытаний первых опытных образцов микроГЭС с НТСГ показали их работоспособность, соответствие условиям эксплуатации. В то же время некоторые из основных эксплуатационных параметров могут быть повышены за счет уточнения расчетных моделей при более эффективном выборе электромагнитных и геометрических параметров.

Примеры повышения эффективности НТСГ: увеличение сечения магнита при оптимальном его размещении в ограниченном пространстве; снижение пазового рассеяния.

Необходимость повышения единичной мощности микроГЭС (от 1-3 кВт до 20-30 кВт) и возможность использования на крутосклонных реках со скоростью течения до 3,5-5 м/с потребовали существенных изменений параметров:

- использование провода не только круглого, но и прямоугольного сечения вследствие повышения токов обмотки статора;
- увеличение высоты паза, приводящее к возрастанию пазового рассеяния, и поиску компромисса между радиальным габаритом генератора, массой магнитов и внешней характеристикой генератора;
- увеличение воздушного зазора, обусловленное технологическими погрешностями изготовления генератора, и нахождение оптимального соотношения: зазор – массы магнитов и обмоточного провода.

Конкурентоспособность изделий достигается многократным сокращением трудоемкости конструкторско-технологического проектирования использованием интегрированной компьютерной среды [2], предполагающей наличие математических моделей процессов, и использование средств их оптимизации. Торцевая синхронная машина представлена трехзонной моделью, включающей обмоточную структуру статора, воздушный зазор, постоянные магниты ротора. В основу модели положены уравнения магнитостатики [3] для любой зоны машины. Структура активного объема торцевой электрической машины, используемая для построения расчетной

Встовский Алексей Львович, кандидат технических наук, профессор. E-mail: val_1942@mail.ru
Головин Михаил Петрович, кандидат технических наук, профессор. E-mail: mrgolovin@gmail.com
Федий Константин Сергеевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: kostyafedy@mail.ru
Колбасина Наталья Анатольевна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: aak@krasmail.ru
Морозов Денис Иванович, старший преподаватель. E-mail: danner@hotmail.ru

модели, представлена на рис. 1. Выражение для составляющей вектора магнитной индукции в воздушном зазоре (зона 3) расчетной модели, полученная из решений уравнений магнитостатики [4], имеет вид

$$B_{2y} = \mu_0 \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \mu_0 \sum \left(M_k \cdot \frac{k \cdot \pi}{\tau} \operatorname{ch} \frac{k \cdot \pi}{\tau} \cdot \delta \cdot \sin \frac{k \cdot \pi}{\tau} \cdot x \right) = C_{2y} \cdot \sin \frac{k \cdot \pi}{\tau} \cdot x \quad (1)$$

где M_k – постоянные интегрирования, определяемые из условия непрерывности потенциала; τ – полюсное деление по среднему диаметру; δ – величина воздушного зазора.

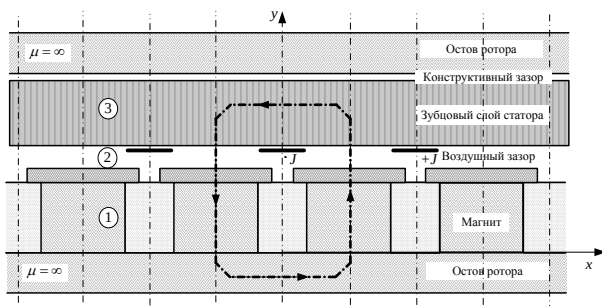


Рис. 1. Расчетная модель активной части генератора

Поле возбуждения B_{2y} , созданное магнитом ротора, и поле реакции якоря B_{3y} относительно неподвижны. Пространственно эти поля сдвинуты друг относительно друга на внутренний угол нагрузки Θ . Тогда поле реакции якоря этой же поверхности будет описываться выражением

$$B_{3y}(x, y) = \sum C_{3y} \sin \left(\frac{k \pi}{\tau} x + k \Theta \right), \quad (2)$$

где C_{3y} – постоянная интегрирования являющаяся функцией настила тока:

$$J = \frac{u_{\text{псл}} I_{\phi}}{t_l},$$

где $u_{\text{псл}}$ – число проводников в пазу статора, t_l – зубцовый шаг статора.

Полученное из уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа, значение фазного тока статора с учетом (1) и (2) после преобразований имеет вид

$$I_{\phi} = \frac{j \cdot \omega \cdot W_{\phi} \cdot B_{2y} \cdot l_{\delta} \cdot \tau}{r_l + j \cdot x_l + j \cdot \omega \cdot W_{\phi} \cdot l_{\delta} \cdot \tau \cdot u_{\text{псл}} \cdot (Y - X + Z) - z_H} \quad (3)$$

где Y, X, Z – функции внутреннего угла нагрузки Θ и геометрических параметров генератора:

воздушного зазора, полюсного деления, размеров магнита. Так как числитель представляет собой ЭДС магнитного поля ротора, то синхронное индуктивное сопротивление равно:

$$x_d = j \cdot \omega \cdot W_{\phi} \cdot l_{\delta} \cdot \tau \cdot u_{\text{псл}} \cdot (Y - X + Z) + j \cdot x_l \quad (4)$$

то есть представляет собой сумму индуктивного сопротивления реакции якоря и пазового рассеяния.

Основной характеристикой синхронного генератора является внешняя характеристика – зависимость выходного напряжения генератора от тока якоря при постоянной угловой скорости и характере нагрузки $U=f(I)$ (при $\Omega=\text{const}$, $\cos \varphi=\text{const}$). Тогда используя выражение для фазного тока (3) можно записать:

$$\dot{U} = -j \cdot \omega \cdot W_{\phi} \cdot \dot{B}_{3y} \cdot S - \left(\dot{I}_{\phi} \cdot r_l + \dot{I}_{\phi} \cdot j \cdot x_l + \dot{I}_{\phi} \cdot j \cdot \omega \cdot W_{\phi} \cdot l_{\delta} \cdot \tau \cdot u_{\text{псл}} \cdot (Y - X + Z) \right) \quad (5)$$

Электромеханическая мощность, развиваемая ротором синхронной машины с беспазовым статором, равна приращению действительной части потока вектора Пойнтинга при переходе через границу ротор – воздушный зазор, с учетом (1) и (2) выражение электромеханической мощности примет вид:

$$P = 2 p l_{\delta} \operatorname{Re} \int_0^b \mu_0 u_{\text{псл}} I_{\phi} \cdot (Y - X + Z) \sin(\Theta) \cdot H dx; \quad (6)$$

Используя это выражение, можно аналитически рассчитать угловую характеристику мощности P_H при различных значениях угла Θ , проанализировать влияние геометрических параметров на перегрузочную способность генератора. 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 (массы электротехнической стали, обмоточной меди, магнитов, общая масса машины, ее габаритные размеры);

Расчетная модель в сочетании с инструментами многокритериальной оптимизации позволяет создать программный комплекс проектирования синхронного генератора, являющийся компонентом интегрированной среды проектирования, исследования, подготовки производства свободнопоточных микроГЭС и их существенного компонента – торцевых синхронных генераторов. В настоящее время принципы решения задач многокритериальной оптимизации сводятся к следующим этапам:

- разработка целевой функции качества системы;

- формулирование критериальных ограничений;
- выбор из созданного множества точек Паретто варианта, удовлетворяющего критериальным ограничениям с сортировкой точек по степени приближения к оптимальному результату.

В программном модуле предоставлена возможность комбинировать в любых сочетаниях методы оптимизации, предварительно определив:

- непрерывные диапазоны их изменений

$$a_i^{\min} \leq \alpha_i \leq a_i^{\max}, \quad (11)$$

где α_i – варьируемый параметр; $\alpha_i^{\min}$, $\alpha_i^{\max}$ – начало и конец диапазона;

- необходимое количество функциональных ограничений в виде:

$$g(x_0, \dots, x_k) \geq 0, \quad (12)$$

где $g(x_0, \dots, x_k)$ – функция нескольких переменных.

- критериальные ограничения системы (критерии качества), их минимальные и/или максимальные значения в виде:

$$\begin{aligned} k &\leq f(x_0 \dots x_n) \rightarrow MIN, \\ k &\leq f(x_0 \dots x_n) \rightarrow MAX, \end{aligned} \quad (13)$$

где $f(x_0 \dots x_n)$ – функция заданная аналитическим выражением, k – максимальное (минимальное) значения критерия.

Для поиска оптимального варианта сочетания параметров машины использован метод многокритериальной оптимизации параметров Соболя-Статникова [4], который не требует сведения многокритериальной задачи к однокритериальной, что исключает неоправданное упрощение задачи, а также позволяет учесть опыт конструктора, определяя множество с минимальным количеством решений, удовлетворяющее заданным условиям. Входной поток для алгоритма оптимизации – коллекция работоспособных вариантов машин в виде совокупностей их параметров, полученных в результате использования расчетной модели генератора и перечисленных выше. Варьируемыми параметрами для синтеза коллекции являются: внутренний активный диаметр, активная длина машины, воздушный зазор, индукция в зазоре машины, плотность тока в обмотке статора. Критериальные ограничения приняты по аналогии с ранее испытанными образцами генераторов и исходя их конструктивных условий [5]. Критериями качества генератора выбраны следующие характеристики: номинальное напряжение, величина перегрузочной способности, суммарная масса генератора, масса

магнитов, наружный диаметр генератора, индуктивное сопротивление пазового рассеяния.

По этим принципам реализован программный модуль, обладающий следующей функциональностью: формирование исходной коллекции решений в заданной области изменений варьируемых параметров, усечение (ранжирование) исходной коллекции по заданным значениям критериев качества, вычисление значений целевой функции по приоритетам значимости критериев и определение оптимального варианта (рис. 2). Также предусмотрена возможность использования аппарата ЛП-последовательностей, применяемых для обхода многомерного пространства параметров, альтернативного равномерному распределению точек решений.

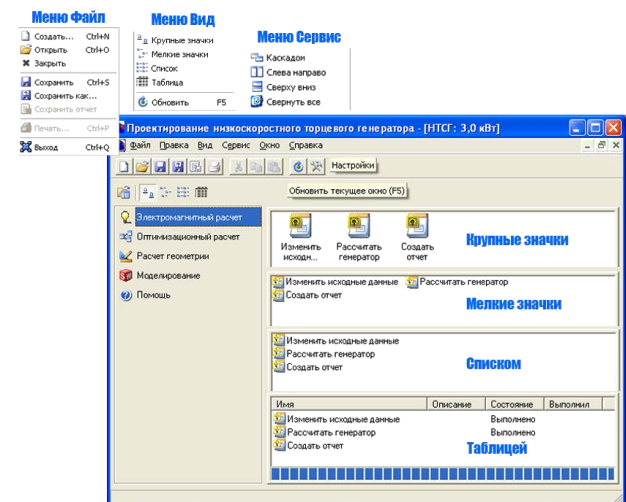


Рис. 1. Основные элементы интерфейса программы NTSGen

Количество точек ЛП-последовательности определяется по формуле:

$$c = \frac{L_{\max}}{p}, \quad (14)$$

где $L_{\max}$ – длина наибольшего диапазона значения параметра; p – шаг разбиения наибольшего диапазона, определяющий общее количество точек, а значит точность решения задачи.

Общее количество точек:

$$k = (\sqrt[n]{c} \operatorname{div} 1)^n, \quad (15)$$

где n – количество параметров; c – количество точек (14).

Количество отрезков в сетке для одного измерения определяется так:

$$d = \frac{k}{\sqrt[n]{c} \operatorname{div} 1}, \quad (16)$$

где k – общее количество точек (15); n – количество параметров; c – количество точек ЛП-последовательности (14). Значение параметра для одного решения:

$$k = a + \frac{b-a}{d} \cdot z, \quad (17)$$

где a – начало диапазона, b – конец диапазона, d – число определяется по (16), z – случайное число, обеспечивающее уникальных значений параметров.

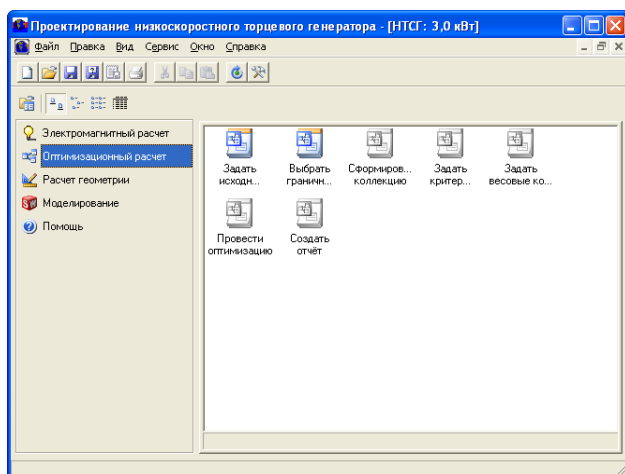


Рис. 3. Ввод исходных данных и граничных условий

На первом этапе пользователь устанавливает значения параметрических ограничений. Программа автоматически формирует множество решений, удовлетворяющих заданным ограничениям. На втором этапе, основываясь на коллекции допустимых решений, пользователь (конструктор) назначает диапазоны изменения критериев качества и приоритеты, которые устанавливают весомость каждого из критериев. При этом по умолчанию в качестве диапазонов изменения критериев качества из банка готовых решений выбираются максимальные и минимальные значения всех критериев (рис. 3). При равенстве приоритетов реализуется поиск компромисса. Так как критерии качества зачастую противоречат друг другу, пользователь должен установить критериальные ограничения. Далее программа автоматически выполняет проверку полученного множества на непустоту. При положительном результате проверки на выходе получается ранжированная коллекция, ранжирование которой можно повторить, назначая более строгие ограничения.

При определении коэффициента оптимальности точки по критерию, который должен стремиться к максимуму или минимуму, используются формулы:

$$R_i = D_i \cdot \frac{MAX_i - C_i}{MAX_i - MIN_i}, \quad R_i = D_i \cdot \frac{C_i - MIN_i}{MAX_i - MIN_i}. \quad (18)$$

В (19) и (20) MAX_i , MIN_i – максимальное или минимальное значение i -го критерия, C_i – значение i -го критерия точки, D_i – значение

приоритета критерия, MIN_i – минимальное значение i -го критерия. Интерфейс отвечает требованиям Windows-стандартов. Программа 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, никак не привязанных к текущим.

Таблица 1. Выходные параметры генератора

Выходные параметры	Многокритериальная оптимизация	Однофакторный анализ	% отклонения
индукция в воздушном зазоре, Тл	0,68	0,7	-2,9
активный диаметр, м	0,632	0,67	-6,01
активная длина, м	0,02	0,021	-5
напряжение, В	238,32	218,21	8,44
максимальная мощность, Вт	6451	5864	9,1
масса генератора, кг	36,235	40,26	-11,1
масса магнитов, кг	1,226	1,326	-8,16
индуктивное сопротивление, Ом	4,245	5,224	-23,06

В качестве примера, иллюстрирующего возможности предлагаемых моделей и методов, использован генератор мощностью 3 кВт с числом полюсов 24. Здесь метод многокритериальной оптимизации позволил значительно улучшить выходные параметры генератора по сравнению с использованной ранее методикой однофакторного анализа (табл. 1).

Применение метода многокритериальной оптимизации позволило снизить (знак минус) массу дорогостоящих магнитов на 7,6% и суммарную массу генератора на 7,4%, а также увеличить (знак плюс) энергетические показатели машины на 8,4% за счет снижения влияния сопротивления пазового рассеяния. Алгоритмы, разработанные на основе методик электромагнитного расчета и многокритериальной оптимизации, реализованы в виде программного комплекса, который позволяет автоматизировать твердотельное моделирование в CAD-среде, сокращая сроки разработки изделия от технического задания до комплекта рабочей документации. В состав программного компонента интегрированной среды проектирования свободнопоточной микроГЭС, кроме описанных в статье алгоритмов, будут на следующем этапе включены модули анализа отказоустойчивости наиболее нагруженных элементов генератора: жесткость диска остова статора и ротора, сопряженного с валом, долговечность подшипников ротора и др.

Выводы: созданный коллективом авторов инструментарий автоматизированной разработки микроГЭС, опыт их проектирования и испытаний позволили перейти к сертификации изделий и технологической подготовки промышленного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Патент 2246168 РФ, МПК7 Н 02 К 21/24. Торцевая электрическая машина / А.Л. Встовский, М.П. Головин и др.; опубл. 10.02.05, Бюл. № 2.
2. Головин, М.П. Автоматизация проектирования свободнопоточной микроГЭС / М.П. Головин, А.Л. Встовский и др. // Вестн. Краснояр. гос. техн. ун-та. Машиностроение. – Красноярск, 2005. Вып.40. С. 89-101.
3. Инкин, А.И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин: учеб. пособие. – Новосибирск: ЮКЭА, 2002. 464 с.
4. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1981. 328 с.

ELECTROMAGNETIC MODEL AND OPTIMIZATION PARAMETERS OF THE FACE GENERATOR

© 2012 A.L. Vstovsky, L.S. Golovin, K.S. Fediy, N.A. Kolbasina, D.I. Morozov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

In article features of calculation model of the active volume of the low-speed face synchronous generator with permanent magnets and a program complex of synthesis and a multicriteria optimization of geometrical parameters, as a component of the integrated medium of projection the free-stream microhydroelectric power stations are explained.

Key words: face generator, microhydroelectric power station, external characteristic

Aleksey Vstovskiy, Candidate of Technical Sciences, Professor.

E-mail: val_1942@mail.ru

Mikhail Golovin, Candidate of technical Sciences, Professor.

E-mail: mpgolovin@gmail.com

Konstantin Fediy, Candidate of Technical Sciences, Associate

Professor. E-mail: kostyafedy@mail.ru

Nataliya Kosbasina, Candidate of technical Sciences, Associate

Professor. E-mail: aak@krasmail.ru

Denis Morozov, Senior Teacher. E-mail: danner@hotmail.ru