

## Методика эскизного проектирования неявнополюсных синхронных генераторов

БАЛОВНЕВ Д.И.

*Предложена методика эскизного проектирования синхронных генераторов. Методика позволяет рассчитывать геометрические размеры активной части генераторов при отсутствии рекомендаций по выбору электромагнитных нагрузок. Представлены результаты оценки влияния на массогабаритные и энергетические показатели отдельных факторов и ограничений для серии генераторов. Даны рекомендации по выбору оптимальных значений размера воздушного зазора и линейной нагрузки. Приведены графики и исследовано влияние массы активных материалов на энергетические показатели. Представлены зависимости размера воздушного зазора от перегрузочной способности при различных значениях линейной нагрузки. Увеличение линейной нагрузки требует увеличения воздушного зазора при постоянной перегрузочной способности. А увеличение воздушного зазора приводит к увеличению МДС обмотки возбуждения и, как следствие, массы меди ротора генератора или к ухудшению теплового режима.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* автономная энергетика, синхронные генераторы, эскизное проектирование, оптимизация

Для электроснабжения автономных объектов, резервного электроснабжения, выработки и передачи излишков электроэнергии в сеть на предприятиях с целью повышения энергетической эффективности могут быть использованы неявнополюсные синхронные генераторы (НЯСГ) с воздушным охлаждением мощностью 100–500 кВт. Наиболее близким аналогом НЯСГ по конструктивному исполнению является синхронный турбогенератор, однако прямое и полное следование рекомендациям по проектированию турбогенераторов [1, 2] в данном случае не представляется возможным. Это связано с тем, что синхронные турбогенераторы изготавливаются на мощности 2,5–1000 МВт с применением интенсивного принудительного охлаждения, что позволяет достичь более высоких значений электромагнитных нагрузок, чем у НЯСГ с обычным воздушным охлаждением.

У турбогенераторов большой мощности роторы изготавливают из цельных поковок с вентиляционными каналами внутри и неравномерным распределением пазов по расточке ротора. Паза ротора турбогенератора имеют разную высоту. Эти различия в конструкции и системе охлаждения не позволяют использовать рекомендации по выбору предельных значений электромагнитных нагрузок больших турбогенераторов при проектировании НЯСГ в диапазоне мощностей 100–500 кВт.

На стадии эскизного проектирования НЯСГ необходимо использовать методики по быстрой оценке массогабаритных и энергетических характеристик с возможностью их оптимизации.

В статье предлагается методика эскизного проектирования НЯСГ, которая позволяет определять основные геометрические размеры магнитопроводов статора и ротора, массу активных материалов, потери и КПД, а также проводить поиск оптимального варианта при заданных критериях и ограничениях.

В качестве ограничений приняты величины, отражающие свойства используемых материалов. Из-за насыщения стали магнитопроводов индукция на каждом участке магнитной системы ограничена предельными значениями, рекомендованными в [3]. Температура нагрева обмоток статора и ротора ограничивается классом нагревостойкости изоляции. Исходя из механической прочности материалов, используемых в магнитной системе НЯСГ, ограничиваются минимальные значения ширины зубцов статора и ротора, а также внутренний диаметр магнитопровода ротора. При варьировании внешнего диаметра магнитопровода статора использован дискретный характер по значениям нормализованных диаметров, определяющих габарит машины.

На рис. 1 представлена конфигурация магнитной системы НЯСГ, используемая в методике эскизного проектирования. Данная магнитная система, шихтованная из отдельных листов, имеет простую форму пазов статора и ротора. На статоре приняты открытые прямоугольные паза, а на роторе – открытые трапециевидные, при этом зубец ротора является равномерным. В реальных генераторах используются полузакрытые трапециевидные паза, однако отсутствие шлицов не сказывает-

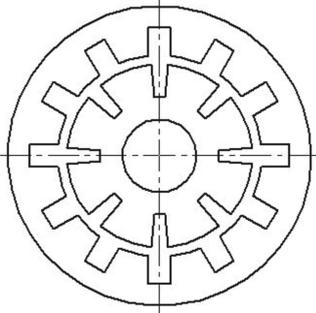


Рис. 1. Эскиз магнитной системы

ся на качестве расчета по предлагаемой методике, но при этом ее упрощает.

Исходными данными являются: номинальная мощность, номинальное напряжение, коэффициент мощности, частота вращения  $n$ , число фаз  $m$ , схема соединения обмотки статора.

Ядром методики, полное описание которой представлено в [4], являются расчетные выражения по определению геометрических размеров магнитопроводов статора и ротора, удовлетворяющих заданным ограничениям. Высоту спинки статора и ротора, зубцов статора и ротора определяем, учитывая предельные значения магнитной индукции на этих участках. Площади пазов статора и ротора определяются с учётом плотности тока в обмотках, уложенных в эти пазы. Воздушный зазор между статором и ротором является для синхронной машины одним из наиболее важных размеров, определяющих её технико-экономические характеристики. Существующие рекомендации по выбору воздушного зазора, например [2, 3], позволяют выбрать только его приблизительное значение. При автоматизированном проектировании НЯСГ лучше использовать математические зависимости для определения воздушного зазора на основе показателей, определяющих функциональную и техническую эффективность. К таким показателям относятся: отношение короткого замыкания, статическая перегружаемость. В методике предполагается выбор показателя для определения воздушного зазора с учетом условий работы НЯСГ.

После определения всех геометрических размеров магнитопроводов статора и ротора рассчитывают массу электротехнической стали и меди, а также все потери, КПД и перепады температуры в изоляции пазов статора и ротора по известным зависимостям, используемым при проектировании электрических машин.

Особенность данной методики – возможность не только рассчитывать геометрические размеры и показатели отдельных НЯСГ, но и строить зависимости влияния на массогабаритные и энергетические показатели отдельных факторов и ограниче-

ний. Также с помощью предлагаемой методики можно определять оптимальные значения воздушного зазора и линейной нагрузки.

Линейная нагрузка оказывает значительное влияние на технико-экономические показатели проектируемого НЯСГ. Поэтому для ее правильного определения на стадии предварительного расчета, кроме исходных данных, необходимо знать, какой генератор должен быть спроектирован – с высоким КПД или с минимальной массой электротехнической стали и меди? Используя методику эскизного проектирования, описанную выше, строят зависимости и на их основе определяют необходимое значение линейной нагрузки.

Для анализа влияния линейной нагрузки на массу и КПД на рис. 2–5 представлены результаты расчета серии НЯСГ мощностью 132, 160, 200 кВт напряжением 400 В, частотой вращения 1500 об/мин, высотой оси вращения 315 мм.

Значительное различие цен на электротехническую сталь и обмоточный провод вынуждает проводить разделение массы активных материалов на массу меди и массу стали. Возрастание линейной нагрузки приводит к монотонному снижению массы электротехнической стали, однако при этом происходит практически линейное возрастание массы меди, как показано на рис. 2.

Снижение массы электротехнической стали происходит по закону, близкому к гиперболическому, так как при неизменном наружном диаметре пакета статора длина магнитопроводов пропорциональна значению обратной линейной нагрузки, что и определяет характер изменения массы.

При проектировании НЯСГ необходимо учитывать не только стоимость его изготовления, значительную часть которой составляют стоимость элек-

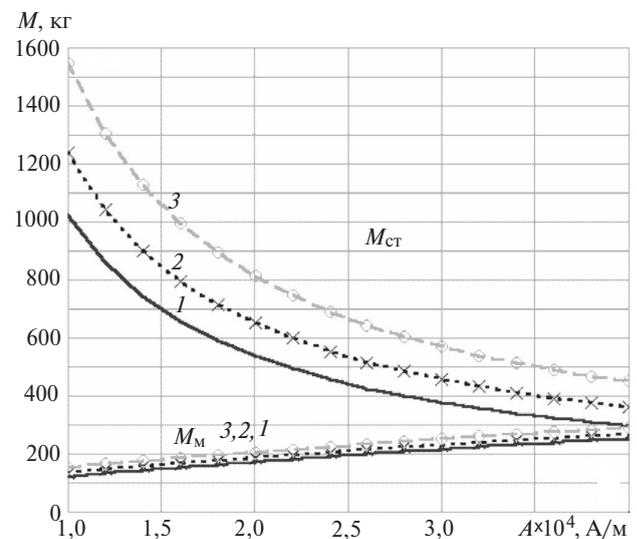


Рис. 2. Зависимость массы электротехнической стали и меди при изменении линейной нагрузки ( $M_{ст}$ ,  $M_{м}$ ): 1 –  $P_2=132$  кВт; 2 –  $P_2=160$  кВт; 3 –  $P_2=200$  кВт

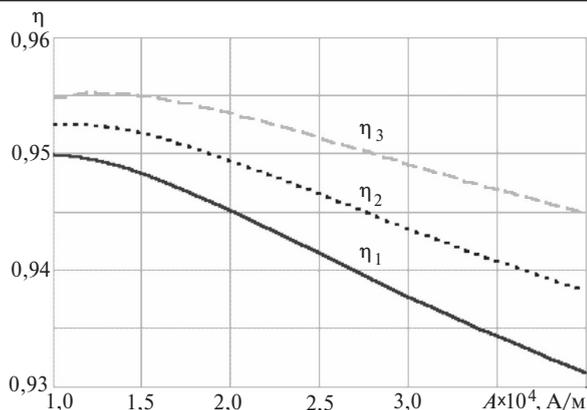


Рис. 3. Зависимость КПД при изменении линейной нагрузки:  $\eta_1 - P_2=132$  кВт;  $\eta_2 - P_2=160$  кВт;  $\eta_3 - P_2=200$  кВт

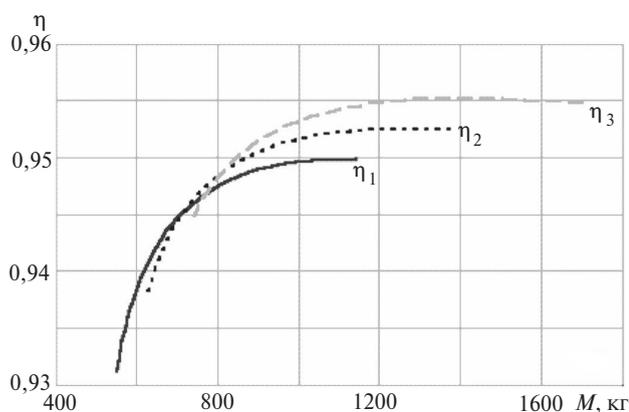


Рис. 4. Зависимость КПД от массы активных материалов:  $\eta_1 - P_2=132$  кВт;  $\eta_2 - P_2=160$  кВт;  $\eta_3 - P_2=200$  кВт

тротехнической стали и обмоточного провода, но и стоимость эксплуатации; чем выше КПД, тем дешевле электрическая энергия, вырабатываемая энергетической установкой.

Анализ зависимости КПД при изменении линейной нагрузки по рис. 3 показал, что при повышении мощности НЯСГ максимум КПД смещается в зону более высоких значений линейной нагрузки.

Зависимости на рис. 4 показывают качественную и количественную взаимосвязь между массой и КПД при изменении линейной нагрузки. При более детальном анализе с помощью данной методики возможно построение отдельных зависимостей, в том числе зависимость КПД от массы стали

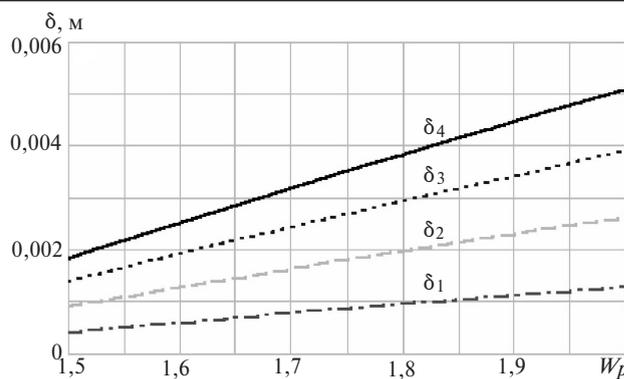


Рис. 5. Зависимость размера воздушного зазора от перегрузочной способности при различных значениях линейной нагрузки:  $\delta_1 - A=10000$  А/м;  $\delta_2 - A=20000$  А/м;  $\delta_3 - A=30000$  А/м;  $\delta_4 - A=40000$  А/м

и массы меди, так как масса электротехнической стали значительно превышает массу меди в НЯСГ, что подтверждается данными рис. 2.

Для быстрого определения размера воздушного зазора при проектировании НЯСГ по заданным значениям индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки удобно воспользоваться зависимостями на рис. 5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хуторецкий Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В. Проектирование турбогенераторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1987, 256 с.
2. Извеков В.И., Серихин Н.А., Абрамов А.И. Проектирование турбогенераторов: Учебное пос., 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2005, 439 с.
3. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов, 4-е изд., перераб. и доп./Под ред. И.П. Копылова. – М.: Изд-во Юрайт, 2011, 767 с.
4. Баловнев Д.И. Исследование и управление качеством электрической энергии синхронных генераторов автономных энергоустановок: Дисс. ... канд. техн. наук. – Смоленск, 2003, 219 с.

[22.12.2016]

А в т о р: Баловнев Денис Иванович окончил электромеханический факультет Смоленского филиала Московского энергетического института (МЭИ) в 1997 г. В 2003 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и управление качеством электрической энергии синхронных генераторов автономных энергоустановок». Доцент кафедры «Электромеханические системы» филиала «НИУ МЭИ» в Смоленске.

## A procedure for developing conceptual designs of nonsalient-pole synchronous generators

BALOVNEV Denis I. (Smolensk Branch of the «National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Smolensk, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci.(Eng.)

A procedure for developing conceptual designs of synchronous generators is proposed. Application of the procedure opens the possibility to calculate the generator active part’s geometrical dimensions when there are no recommendations on selecting the generator’s electromagnetic loads. Results from estimating the effect of certain factors and limitations on the mass and dimensions, and power performance indicators for

a series of generators are presented. Recommendations on selecting the optimal air gap and linear load values are suggested. Graphic curves of power performance indicators are given, and the effect of active materials weight on them is investigated. The dependences of air gap on the overloading capacity at different values of linear load are presented. It is shown that increasing the linear load entails the need to increase the air gap at a constant overloading capacity. In turn, the machine design involving a larger air gap results in the need to increase the field winding's MMF. As a consequence, the generator field winding should be made more copper-intensive, or the generator will have to operate at poorer thermal operating conditions.

Key words: independent power generation, synchronous generators, conceptual designing, optimization

## REFERENCES

1. Khutoretskii G.M., Tokov M.I., Tolvinskaya E.V. *Proyektirovaniye turbogeneratorov* (Design of turbogenerators). Leningrad, Energoatomizdat, 1987, 256 p.
2. Izvekoy V.I., Serikhin N.A., Abramov A.I. *Proyektirovaniye turbogeneratorov, 2-e izd.* (Design of turbogenerators, 2nd publ.). Moscow, Publ. of the Moscow Power Engineering Institute, 2005, 439 p.
3. Kopylov I.P., Klokov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin/Pod red. I.P. Kopylova, 4-e*

*izd.* (Design of electrical machines/Edit. by I.P. Kopylov, 4-th publ.). Moscow, Publ. «Yurait», 2011, 767 p.

4. Balovnev D.I. *Issledovaniye i upravleniye kachestvom elektricheskoy energii sinkhronnykh generatorov avtonomnykh energoustanovok: Diss. ... cand. tekhn. nauk* (Research and management of calculation of electric energy of synchronous generators of autonomous power installations: Diss. for the Degree of Cand. Sci. (Eng.)). Smolensk, 2003, 219 p.

[22.12.2016]

*Электричество*, 2017, № 11, с. 49–53

DOI:10.24160/0013-5380-2017-11-49-53

## Треугольные ячейки решетчатых схем замещения плоскопараллельных электромагнитных полей

БЛАНК А.В.

*Разработка любого электротехнического устройства связана с исследованием электромагнитного поля как в объеме самого устройства, так и в окружающем пространстве. Моделирование и расчет двумерных и трехмерных электромагнитных полей, как правило, осуществляется численно с помощью специализированных компьютерных программ. Вместе с тем, численные двумерные и трехмерные модели при постановке и решении задачи часто требуют множества предварительных расчетов, а главное — мощной компьютерной техники и значительного времени. В статье на основании законов и интегральных теорем электричества и магнетизма разрабатываются треугольные ячейки-многополюсники решетчатых схем замещения плоскопараллельных вихревых электромагнитных полей. Треугольные ячейки облегчают моделирование расчетных областей сложной конфигурации и расширяют область применения известных решетчатых схем замещения.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** теоретическая электротехника, законы электричества и магнетизма, плоскопараллельное электромагнитное поле, решетчатые схемы замещения

Для предварительных приближенных расчетов электромагнитных полей с меньшими затратами времени могут быть использованы решетчатые схемы замещения [1–5], в которых решение задачи теории электромагнитного поля сводится к расчету эквивалентной разветвленной электрической цепи с активными и реактивными сопротивлениями.

Элементом решетчатой схемы замещения является ячейка-многополюсник. В двумерных электромагнитных полях ячейка может быть прямоугольной (в декартовой системе координат [1, 2]) или криволинейной (в цилиндрической системе координат [3, 4]). На основе трех прямоугольных

ячеек формируется объемная ячейка-параллелепипед для расчета трехмерного электромагнитного поля [5].

Статья посвящена синтезу треугольной ячейки решетчатой схемы замещения двумерного электромагнитного поля. Треугольная ячейка расширяет область применения решетчатых схем замещения, поскольку упрощает моделирование расчетных областей сложной конфигурации. Представляется также очевидным, что на основе треугольных ячеек может быть создана объемная ячейка-тетраэдр трехмерного электромагнитного поля, более универсальная, чем ячейка-параллелепипед.