

УДК 621.313

Ю.И. Рясков

Севастопольский военно-морской институт им. П.С. Нахимова

Ул. Дыбенко 1-А, г. Севастополь, Украина, 99035

МАГНИТОКОММУТИРУЕМЫЕ ИНДУКТОРНЫЕ МАШИНЫ С АКСИАЛЬНО-РАДИАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрен новый метод проектирования магнитокоммутлируемых машин, основанный на оптимальном соотношении стали и меди электромагнитного ядра. Представлены результаты синтеза таких машин с максимальной энергоплотностью при различных условиях.

Общей актуальной проблемой электромашиностроения является снижение себестоимости, улучшение качества и эффективности электротехнических изделий. Научными и практическими задачами, вытекающими из этой проблемы, являются разработка и исследование перспективных электрических машин, отвечающим требованиям безотходных технологий при снижении массогабаритных и стоимостных показателей.

Анализ путей решения данной проблемы заключается в следующем. В настоящее время в различных отраслях промышленности необходимы электрические машины переменного тока повышенной и высокой частоты (от 400 до 10 тыс. Гц). Например, источники для индукционной поверхностной закалки, сварки, нагрева и плавки металлов. Генераторы повышенной частоты также широко применяются в автономных транспортных электроэнергетических системах, особенно летательных аппаратов, судов с воздушным поддержанием. Известно, что увеличение частоты с 50 Гц до 400...500 Гц ведет к уменьшению массогабаритных показателей электроэнергетических систем 2...3 раза.

Использовать для этой цели обычные синхронные генераторы практически невозможно из-за необходимости устанавливать большое число полюсов на роторе. Поэтому, практически, синхронные генераторы выполняются на частоты не более 400 Гц.

Решение этой проблемы найдено в том, что обмотка возбуждения постоянного тока перенесена с ротора на статор, ротор в этом случае представляет собой зубчатый барабан. Так был получен индукторный генератор, который в отличие от синхронных машин не имеет системы вращающихся разнополярных полюсов, так как обмотки на роторе нет.

По своим свойствам и характеристикам индукторная машина аналогична синхронной машине, но уступает ей по массогабаритным показателям в 5 и более раз. Это объясняется, главным образом тем, что поток в зубцовом слое статора индукторной машины изменяется только от минимума до мак-

симула, не изменяя направления, в то время как в синхронной машине классического исполнения он изменяется и по значению и по направлению. Поэтому индукторные синхронные машины применяются только в тех случаях, когда требуемую частоту затруднительно получить с помощью обычной синхронной машины или машины с когтеобразными полюсами.

Требования к улучшению массогабаритных и стоимостных показателей выдвинули задачу создания новых типов электрических машин повышенной и высокой частоты. Авторским коллективом в составе д.т.н., проф. Афонина А.А., к.т.н., доц. Шайтора Н.М., инж. Ряскова Ю.И. предложена комплексная электромеханическая система аксиально-радиальной конфигурации магнитной системы, на которую получен патент Украины. Изобретение относится к индукторным электрическим машинам и может найти применение в качестве генератора, двигателя и преобразователя.

За счет особой конструкции такой машины возможно снижение массогабаритных и стоимостных показателей индукторных машин в 5...10 раз, и они по своим удельным характеристикам уже могут конкурировать с машинами других типов.

Например, простейший однофазный генератор такого типа представляет собой машину, у которой ротор – гладкий пластмассовый диск с ферромагнитными вставками, играющими роль зубцов. Магнитная система статора выполнена в виде зубчатых колец ячеистой структуры и располагается в подшипниковых щитах машины, а обмотка возбуждения постоянного тока и обмотка якоря переменного тока кольцевого типа уложены в зубчатые кольца магнитной системы. В результате магнитная система, при общих обмотках, распадается на ряд электромагнитных ячеек, число которых определяется необходимой частотой вырабатываемого напряжения при заданной частоте вращения ротора.

При вращении ротора ферромагнитные вставки периодически замыкают магнитные цепи ячеек, изменяется магнитная проводимость, в результате чего изменяется взаимная индуктивность между неподвижными обмотками якоря и возбуждения и обмотке якоря индуцируется переменная ЭДС необходимой частоты.

В такой машине значительно уменьшены пассивные части электрических и магнитных контуров, не участвующих непосредственно в процессе электромеханического преобразования энергии, что позволяет обеспечить достижение высоких удельных массогабаритных и энергетических показателей.

Обычные электрические машины содержат распределенные обмотки и сосредоточенную магнитную систему. Ядро магнитокоммутируемых машин, наоборот, содержит сосредоточенные рабочую и обмотку возбужде-

ния, а магнитная система, образующая индуктор, распределена вдоль периметра упомянутых обмоток.

Очевидно, что для расчета этих машин не применимы понятия «электромашинной постоянной и линейной нагрузки», на которых основывается расчет традиционных электрических машин. Поэтому возникла актуальная задача разработки новых методов проектирования для магнитокоммутируемых машин.

В связи этим предложен новый метод проектирования, основанный на оптимальном соотношении стали и меди электромагнитного ядра. Первый этап проектирования включает определение главных размеров машины для ненасыщенной магнитной цепи, начинающееся с расчета элементарной электромагнитной ячейки, являющейся «кирпичиком», из которых складывается вся машина.

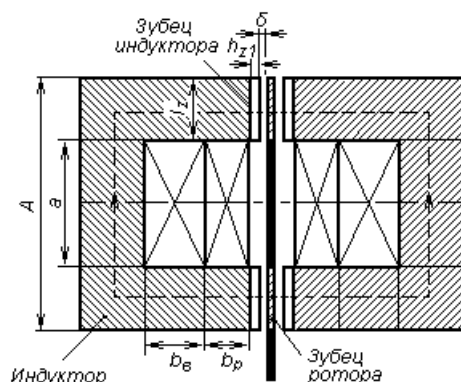


Рисунок 1 – Главные размеры электромагнитной ячейки

вается вся машина.

Для этого вначале находят сечение меди обмотки возбуждения, затем, на основе оптимального соотношения меди обеих обмоток (рабочей и возбуждения) и стали элементарной ячейки, определяют размер окна индуктора под медь a и сталь A (рисунок 1) и устанавливают радиальный и осевой размеры индуктора.

Сечение меди обмотки возбуждения S_{δ} (1) определяют, исходя из МДС, потребной для проведения магнитного потока через технологический зазор δ (рисунок 1), а падение магнитного потенциала в стали учитывают введением поправочного коэффициента κ_F :

$$S_{\delta} = \frac{\kappa_F B_{\delta} \delta'}{\mu_0 k_{3м} J} \quad (1)$$

Здесь $\kappa_F = 1,15 \dots 1,25$ – отношение МДС магнитной цепи к МДС зазора; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; B_{δ} – индукция в зазоре; δ' – расчетное значение воздушного зазора; $\kappa_{3м} = 0,5 \dots 0,6$ – коэффициент заполнения окна медью; $J = 3 \dots 10$ А/мм² – плотность тока в обмотках, величина которой выбирается в зависимости от условий охлаждения.

Внутренний диаметр индуктора, расположенного в первом радиальном слое определяют, исходя из минимально допустимой ширины зубца 4...5 мм.

Для ненасыщенной магнитной цепи оптимальное соотношение стали и меди элементарной ячейки (рисунок 1) со сторонами, соответственно a и A , получают из условия наибольшего магнитного потока.

Исследование функции магнитного потока на экстремум, путем взятия производной и решения уравнения $d\Phi/da=0$, дает условие получения наибольшего магнитного потока и мощности электромагнитной ячейки $a=0,61A$, отсюда поперечный размер индуктора $b=0,32a$.

Сечение меди рабочей обмотки (2) находят из выражения ЭДС и мощности машины

$$S_p = P k_\lambda Z_1 Z_2 \pi (k_\lambda - 1) k_{3M} J f S_\delta B_\delta, \quad (2)$$

где $P = EI_n \cos \phi$ — заданная расчетная мощность; $E = (1,15 \dots 1,3) U_n$ — ЭДС генератора; U_n — номинальное напряжение генератора; $k_\lambda = \lambda_{\max} / \lambda_{\min} = 2 \dots 4$ — отношение магнитных проводимостей при совпадении и несовпадении зубцов ротора (ферромагнитных вставок) и индуктора.

Сечение окна под медь обмоток со стороной a находят как

$$a^2 = S_p + S_B.$$

Или с учетом выражения для сечения воздушного зазора

$$S_\delta = \pi l_z D_B a_z = 19,2 a l_z f / n,$$

где D_B — внутренний диаметр индуктора, расположенного в первом радиальном слое; $l_z = (3 \dots 5)$ мм — минимально допустимая ширина зубца; $a_z = l_z / t_z = 0,35 \dots 0,5$ — отношение ширины зубца к зубцовому делению; f — частота напряжения генератора; n — частота вращения генератора, как

$$a^2 = c / a + S_B.$$

Отсюда получают кубическое уравнение (3), приведенное к "неполному" виду

$$a^3 - a S_B - c = 0, \quad (3)$$

где $c = [P k_\lambda / 42, 6 \pi (k_\lambda - 1) k_{3M} J B_\delta l_z] (n / f^2)$ — некоторый параметр, определяемый мощностью, скоростью вращения и частотой.

Для уравнения (3) существует решение, причем физический смысл в данном решении имеет только первый действительный корень.

В случае, если

$$(c/2)^2 - (S_B/3)^3 \geq 0,$$

следует воспользоваться решением Кардано:

$$a = \left((c/2) + \left[(c/2)^2 - (S_B/3)^3 \right]^{1/2} \right)^{1/3} + \left((c/2) - \left[(c/2)^2 - (S_B/3)^3 \right]^{1/2} \right)^{1/3}.$$

В противном случае необходимо прибегнуть к тригонометрическому решению

$$a = 2 \left[(S_g / 3) \cos(\alpha / 3) \right]^{\frac{1}{2}},$$

где $\cos \alpha = c / 2 \left[(S_g / 3) \right]^{\frac{1}{2}}.$

Таким образом, главная задача проектирования состоит в правильном выборе параметра a . Окончательно главные размеры слоя определяются наружным диаметром D_n и осевым размером l :

$$D_n = D_g + 2A = D_g + 3,28a;$$

$$l = N(h_{z1} + 2\delta) + a + h_{z2},$$

где N – число пакетов в осевом направлении машины; h_{z1} – высота зубца индуктора; h_{z2} – высота зубца ротора.

Высота зубца индуктора выбирается из условия $h_{z1} \geq a/2$ и определяется минимумом потока рассеяния и максимум отношения k_λ . Высота зубца ротора (толщина диска ротора) h_{z2} выбирается из условия $h_{z2} \geq a$ и определяется минимумом потоков рассеяния.

Для машины выполненной в несколько аксиальных и радиальных слоев, расчеты параметров ячейки a и A производят для каждого радиального слоя, причем в качестве внутренних диаметров последующих слоев принимают наружный диаметр внутренних слоев.

На основе такого метода была разработана методика расчета многослойных, дисковых магнитокоммутируемых однофазных и трехфазных генераторов. Проверка методики на ряде физических моделей показала, что погрешность расчетов не превышает 10%, что подтвердило возможность ее использования при эскизном проектировании.

На базе этой методики был разработан алгоритм и создана программа автоматизированного расчета таких машин на ПЭВМ с помощью объектно-ориентированной системы *Delfi*. При получении проектного задания из 37 параметров программа в автоматизированном режиме рассчитывает 120 выходных величин, включая геометрические размерения машины, удельные характеристики, КПД, расчеты обмоток, магнитной цепи и характеристики холостого хода.

С помощью этой программы был произведен синтез дискового однослойного индукторного генератора с максимальной энергоплотностью электромагнитного ядра. За параметр оптимизации была принята энергоплотность электромагнитного ядра (ЭМЯ), т.е. удельная мощность машины по массе электромагнитного ядра – $p_{яв}$, кВт/кг. Это величина обратная удельной массе ЭМЯ по мощности – $g_{яв}$, кг/кВт. Масса ЭМЯ состоит из массы меди и электротехнической стали машины, участвующие в электро-механическом преобразовании энергии.

Интересно, что энергоплотность ЭМЯ машин постоянного тока и асинхронных машин с воздушным охлаждением составляет 0,24 кВт/кг, синхронных машин несколько больше – 0,34 кВт/кг.

Удельная стоимость одного килограмма ЭМЯ – $у_{\text{яд}}$, в существующих ценах, составляет: МПТ – 21,2 грн/кг; АД – 13,5 грн/кг; СМ– 12,8 грн/кг.

Было установлено, что входными параметрами (факторами) магнито-коммутируемой машины, влияющими на параметр оптимизации являются: активная мощность машины P_n ; частота вырабатываемого напряжения f ; частота вращения генератора n ; индукция в воздушном зазоре B_δ .

Другие факторы не влияют на параметр оптимизации. Самым сильным фактором, влияющим на параметр оптимизации, при выбранных диапазонах варьирования, явилась активная мощность, затем идут частота вращения и частота напряжения. Самым слабым фактором явилась индукция в воздушном зазоре, но порядок значимости всех факторов – одинаков.

С помощью плана полного факторного вычислительного эксперимента, выбора линейной функции оптимизации, крутого восхождения по поверхности отклика параметра оптимизации была синтезирована машина со следующими параметрами (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры машины

Число фаз	P_n	f	n	B_δ	$p_{\text{яв}}$	$у_{\text{яд}}$	кпд	D_m	L_m	G_m
Размерн.	кВт	Гц	Об/мин	Тл	кВт/кг	Гр/кВт	о.е	м	м	кг
1 ф	1500	4740	10200	0,4	2,84	1,74	0,938	0,67	0,77	571
3 ф	1500	4740	10200	0,4	1,31	3,62	0,920	0,60	2.05	1237

В таблице 1 D_m, L_m, G_m – диаметр, длина и вес машины.

Данные таблицы 1 показывают, что можно сделать однофазный генератор с энергоплотностью ЭМЯ, превышающей не только индукторные машины барабанного типа, но и синхронные машины примерно в 8 раз. Трехфазный генератор с такими параметрами имеет энергоплотность ЭМЯ в 3,8 раза больше, чем у синхронной машины.

При наложении ограничения на частоту вращения до 3000 об/мин. (привод от АД, дизеля, паровой турбины) была синтезирована машина с параметрами, представленными в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры машины с частотой до 3000 об/мин

Число фаз	P_n	f	n	B_δ	$p_{\text{яв}}$	$у_{\text{яд}}$	кпд	D_m	L_m	G_m
Размерн.	кВт	Гц	Об/мин	Тл	кВт/кг	Гр/кВт	о.е	м	м	кг
1 ф	1500	2800	3000	0,42	1,66	2,90	0,922	1,03	0,76	975
3 ф	1500	2800	3000	0,42	0,73	6,42	0,905	0,95	2.07	2225

Таким образом, у такого однофазного генератора энергоплотность ЭМЯ в 4,9 раза больше, чем у синхронной машины, а у трехфазного генератора больше в 2,1 раза.

Результаты синтеза машины с частотой $f=400$ Гц приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры машины частотой 400 Гц

Число фаз	P_n	f	n	B_δ	$p_{яв}$	$u_{цяд}$	кпд	D_m	L_m	G_m
Размерн.	кВт	Гц	Об/мин	Тл	кВт/кг	Гр/кВт	о.е	м	м	кг
1 ф	1500	400	1620	0,6	0,81	5,62	0,912	0,95	1,17	1992
3 ф	1500	400	1620	0,6	0,39	11,32	0,874	0,83	3,06	4128

Из данных, приведенных в таблице 3 видно, что однофазный генератор на такую частоту имеет энергоплотность ЭМЯ в 2,4 раза большую, чем у синхронной машины, а трехфазная машина – всего в 1,15 раза. Следовательно, с уменьшением частоты вырабатываемого напряжения, магнитокоммутируемые генераторы теряют свое преимущество в удельных характеристиках по сравнению с традиционными машинами.

Выводы.

1. В настоящее время в промышленности, в транспортных энергетических системах существует потребность в электрических машинах переменного тока повышенной и высокой частот.
2. Используемые для этих целей индукторные генераторы барабанного типа из-за низкого коэффициента использования магнитного поля в несколько раз уступают по своим массогабаритным показателям синхронным машинам.
3. Магнитокоммутируемые машины с аксиально-радиальной конфигурацией магнитной системы позволяют улучшить удельные массогабаритные и стоимостные показатели индукторных машин в несколько раз, что делает их конкурентоспособными с электрическими машинами других типов.
4. В качестве машин повышенной и высокой частот, индукторные машины с аксиально-радиальной конфигурацией магнитной системы имеют хорошие удельные массогабаритные и стоимостные показатели, при снижении частоты ниже 400 Гц они теряют свое преимущество.

Таким образом, переход от машин с барабанным ротором к дисковым аксиально-радиальным машинам позволяет значительно улучшить удельные энергетические показатели, КПД и уменьшить массу индукторных машин. Направление электромеханики, связанное с разработкой этих электрических машин, является весьма перспективным, а дальнейшие исследования должны быть нацелены на рассмотрение и анализ сложной объемной картины магнитных полей в таких машинах.

Библіографічний список

1. Афонин А.А. Проблемы преобразования конфигурации электромеханических преобразователей энергии / А.А. Афонин // Техн. електродинаміка. — Київ, 2001. — № 2. — С. 49–53.

2. Шайтор Н.М. Выбор главных размеров индукторных генераторов с сосредоточенными концентрическими обмотками / Н.М. Шайтор // Сб. науч. тр. СИЯЭиП. — Севастополь, 2001. — Вып. 5. — С. 58–64.

3. Шайтор Н.М. Перспективы применения на судах магнитокоммутируемых индукторных генераторов / Н.М. Шайтор, Ю.И. Рясков // Автоматизация судовых технических средств: Науч.-техн. сб. — Одесса, 2001. — Вып. 6. — С. 118–120.

Поступила в редакцию 01.11.2002 г.