

УДК 621.311.28 : 621.436
DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-90-97

РАЗРАБОТКА АГРЕГАТОВ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ИНДУКТОРНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ МОДУЛЬНОГО ТИПА

Н. М. Шайтор, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор, Севастопольский государственный университет; Институт природно-технических систем (ИПТС), Севастополь; ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Ю. И. Рясков, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

А. В. Горпинченко, кандидат технических наук, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Предложены новые конструктивные решения генераторных агрегатов с интегрированными индукторными генераторами модульного типа. Разработаны основы аналитических и численных методов расчета генераторов, относящихся к новому классу индукторных машин с распределенными магнитными и сосредоточенными электрическими системами.

Целью исследования является разработка интегрированных конструкций модульного индукторного генератора, включающая создание расчетной методики с расчетом минимальных удельных показателей массы и обоснованием областей эффективного использования генераторов с различными видами приводов.

Обоснованы области применения новых генераторных агрегатов, имеющих улучшенные массогабаритные показатели, эксплуатационные и экономические характеристики и отвечающих современным требованиям безотходных технологий и снижения стоимости. Достоверность полученных научных результатов обусловлена строгими математическими выводами аналитических зависимостей, проверкой решения задач по определению размеров и удельных показателей генераторов численными методами. Представленные результаты расчета подтверждены экспериментальными исследованиями.

Показано, что по сравнению с классическими индукторными машинами с сосредоточенными магнитными и распределенными электрическими системами показатели удельной массы предложенных генераторов могут быть многократно улучшены. Полученные результаты являются основой для промышленного изготовления опытных образцов новых генераторных агрегатов с целью их доработки и организации производства.

Ключевые слова: генераторный агрегат, аксиально-радиальная конфигурация, электромагнитное ядро, расчетное уравнение, удельная масса.

Введение

В настоящее время во всех развитых странах большое внимание уделяется проблеме эффективного и надежного электроснабжения, при этом используются генераторные агрегаты (ГА) с различными приводами. ГА могут выполняться в виде ветровых электрических установок (ВЭУ), гидрогенераторов (ГГ), паровых (ПТГ) и газовых (ГТГ) турбогенераторов. В большинстве случаев в качестве приводных двигателей передвижных ГА используются двигатели внутреннего сгорания (ДВС). При этом остается актуальной проблема снижения массогабаритных показателей и повышения экономичности ГА с различными приводами [1–4]. В сетях повышенной и высокой частоты в качестве источников электроэнергии ГА хорошо зарекомендовали себя индукторные

генераторы. Однако эти машины, содержащие сосредоточенные магнитные цепи и распределенные рабочие обмотки, отличаются неполным использованием электротехнического железа и меди [5–8]. В качестве альтернативы разрабатываются новые конструкции модульных аксиально-радиальных индукторных генераторов, исключающие применение пассивного железа и меди [9–12]. Поскольку альтернативные конструкции имеют сосредоточенные обмотки при распределенной магнитной системе, требуются и новые подходы к их расчету (Shaytor M.M., Afonin, A.A., Ryaskov Y.I. *Electromechanichna systema axialno-radialnoy konfigurazii* [Electromechanical system axial-radial configurations]. Patent UA, № 49630A, 2002).

Целью исследования является разработка интегрированных конструкций модульного индук-

торного генератора, включающая создание расчетной методики, с расчетом минимальных удельных показателей массы и обоснованием областей эффективного использования генераторов с различными видами приводов.

Новые конструктивные решения генераторных агрегатов

Техническая сущность разработанного ГА с приводом от ДВС, обеспечивающего улучшение массогабаритных показателей, эксплуатационных и экономических характеристик, показана на рис. 1.

Агрегат содержит поршень двигателя 1, расположенный в цилиндре 2, жестко связанный со штоком 3 и ползуном 4, находящимся в опорах скольжения 5. В отверстии ползуна установлен подшипник 6 и ось 7 эксцентрикового вала, а другая его ось 8 установлена в подшипник 9, находящийся в эксцентричном отверстии маховика 10, расположенного во внутренней обойме коренного подшипника 11. Эксцентриситеты осей эксцентрикового вала одинаковы и составляют четверть хода поршня. Наружная обойма коренного подшипника установлена в цилиндрическом картере двигателя 12.

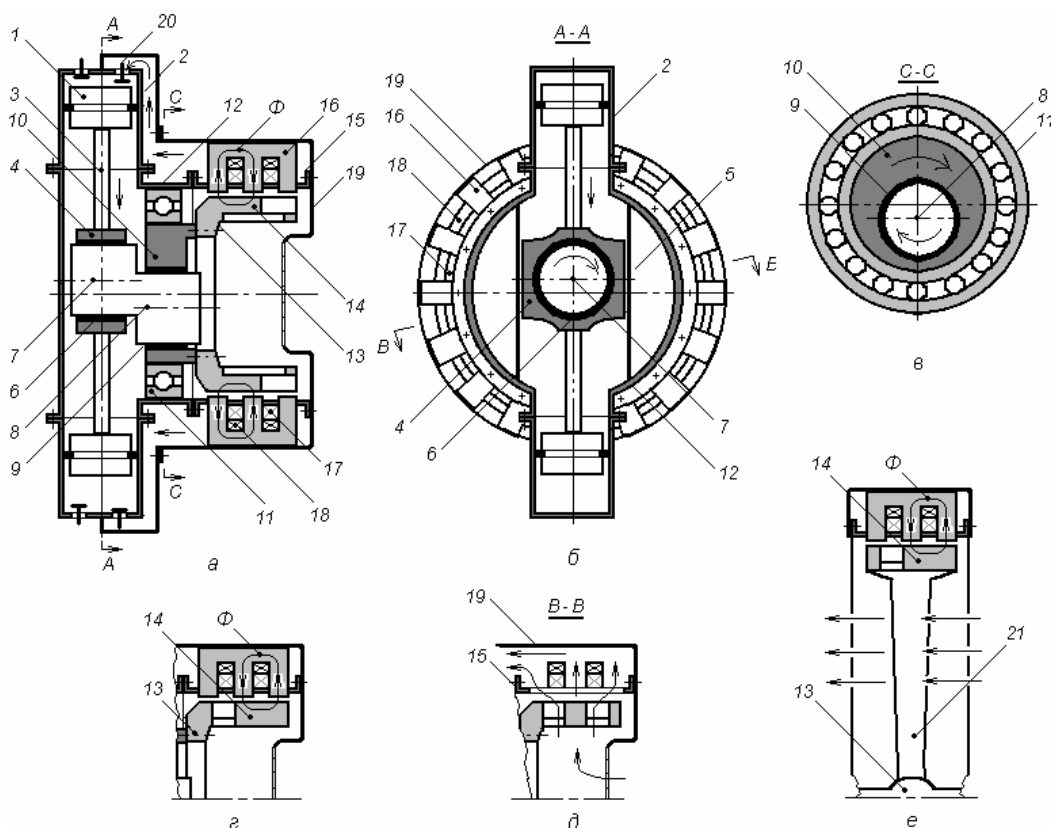


Рис. 1. Эксцентриковый поршневой ДВС с модульным индукторным генератором: а – продольный разрез агрегата; б – поперечный разрез; с – эксцентриковый вал в подшипнике; д – модуль генератора с приводом от ДВС; е – вентиляция обмоток генератора; ф – модуль генератора с приводом от турбины

Fig. 1. Eccentric piston internal combustion engine with the modular induction generator: a - longitudinal section of the machine; b - cross section; c - eccentric shaft in the bearing; d - module generator driven by the internal combustion engine; e - the ventilation of the windings of the generator; f - module generator driven by a turbine

Индукторный модульный генератор агрегата содержит ротор 13, жестко связанный с маховиком ДВС, выполненный в виде колеса турбины наддува с ферромагнитными зубцами 14. Статор генератора выполнен в виде цилиндра 15 с аксиальными прорезями под охлаждение и установленными между прорезями ферромагнитными элементами 16. В пазах упомянутых элементов расположены двухсекционные возбуждающая 17 и рабочая 18 кольцевые электрические обмотки с

последовательным электрическим соединением секций. Зубцы ротора, расположенные под левыми секциями обмоток, смещены на половину зубцового деления относительно зубцов, расположенных под правыми секциями обмоток. Обмотки закрыты защитным кожухом 19, сообщающим для ДВС с наддувом нагнетательную полость турбины наддува с впускными клапанами двигателя 20 (для ДВС без наддува, рис. 1, ф, сообщающая полость отсутствует). При этом ак-

сиальный цилиндр выполнен из материалов, не обладающих свойствами магнитной и электрической проводимости.

ГА работает следующим образом. В период такта рабочего хода ДВС (клапаны закрыты) давление газов, расширяющихся в камере сгорания, образованной днищем поршня и цилиндром 2, действует на поршень 1. Шток 3 и ползун 4 вместе с осью 7 эксцентрикового вала движется прямолинейно в опорах скольжения 5 (см. рис. 1, а, б). От оси 7 вращающее усилие передается на другую ось 8 эксцентрикового вала и на маховик 10. При этом первая ось эксцентрикового вала вращается в подшипнике 6 ползуна, а вторая его ось вращается в подшипнике 9 маховика, одновременно перемещаясь вместе с маховиком вокруг центральной оси коренного подшипника 11 (см. рис. 1, а–с).

При подаче постоянного электрического тока в обмотку возбуждения генератора 17 появляется магнитный поток Φ , который замыкается через воздушный зазор по зубцам 14 и ферромагнитным элементам 16. Маховик приводит во вращение ротор 13, при этом упомянутые элементы периодически совмещаются с пазами ротора и зубцами 14, что приводит к изменению магнитного потока Φ , индуктирующего в рабочей обмотке 18 переменную электродвижущую силу. Последовательность коммутаций потока в левых и правых секциях обмоток обеспечивается смещением зубцов ротора, расположенных под соответствующими секциями, на половину зубцового деления (см. рис. 1, а, д). При этом пульсации тока в последовательно включенных

секциях обмотки возбуждения компенсируются, что препятствует размагничиванию генератора.

Охлаждающий воздух через отверстия защитного кожуха 19 поступает на ротор 13, откуда через аксиальные прорези цилиндра статора нагнетается на охлаждение электрических обмоток. Далее для ДВС с наддувом воздух поступает в камеру сгорания через впускные клапаны 20 (см. рис. 1, а, е), а для ДВС без наддува (см. рис. 1, е) – в окружающую среду.

Интегрированные агрегаты с приводами других типов имеют следующие особенности. Наиболее простую конструкцию имеют ГА ВЭУ, отличающиеся тем, что ротор модульного генератора непосредственно устанавливается на вал винта. В ГГ, ПТГ и ГТГ (см. рис. 1, ф) статор и ротор генератора и турбины объединены общей конструкцией, а срабатывание рабочего тела на лопатках 21 обеспечивается их профилированием. Достоинством интегрированных модульных электрических машин является уменьшение габаритов и массы при упрощении конструкции, снижение сил трения и износа в узлах трения, пониженный расход рабочего тела, экономичность в процессе эксплуатации [13–15].

Расчет модульных индукторных генераторов ГА

Электромагнитное ядро (ЭМЯ) генератора непосредственно предназначено для получения электрической энергии и включает в себя сосредоточенные кольцевые электрические обмотки и распределенную магнитную систему, представленную набором модулей (рис. 2, а).

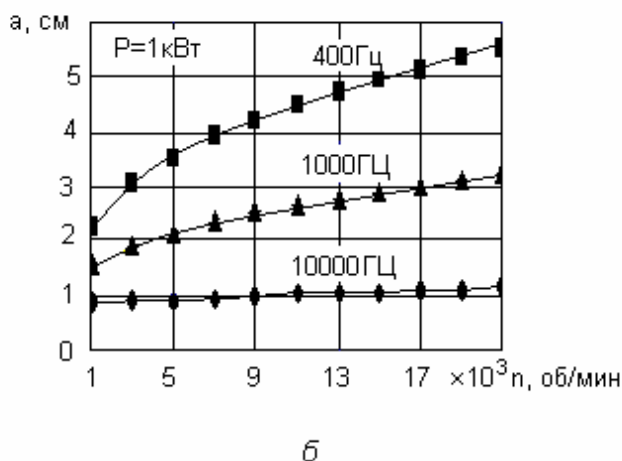
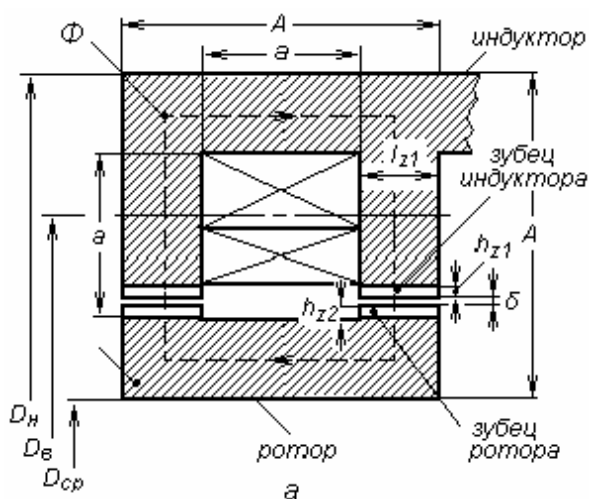


Рис. 2. Расчетный модуль индукторного генератора:
а – сечение модуля; б – габаритный размер модуля генератора мощностью 1 кВт

Fig. 2. Calculation module inductor generator:
а - the cross section of the module; б - overall size of 1 kW generator module

Его рассчитывают в два этапа.

На первом этапе устанавливают оптимальные геометрические соотношения модуля, а на втором этапе получают основное расчетное уравнение машины, с помощью которого производят расчет геометрических размеров и массы генератора [16, 17].

Выражение для магнитного потока записывается как

$$\Phi = F\Lambda_c / (C_2 + 1), \quad (1)$$

где $C_2 = \Lambda_c / \Lambda_\delta$ – постоянное по условиям допущения отношение магнитной проводимости стали к проводимости зазора; $F = jk_3 a^2$, j – результирующая МДС и плотность тока в обмотках, k_3 – коэффициент заполнения медью.

Магнитная проводимость ненасыщенного индуктора выражается следующим образом:

$$\Lambda_c = \mu_0 \mu S_u / l_u, \quad (2)$$

где $S_u = 0,5\pi D_{cp} a_z (A - a)$ – средняя площадь сечения стали; D_{cp} – средний диаметр магнитной системы; $a_z = b_{z1} / t_{z1}$ – отношение тангенциального размера зубца к зубцовому шагу; $l_u = 2(A + a)$ – средняя длина магнитной цепи.

Из выражения (1) с учетом (2) получают выражение для магнитного потока:

$$\Phi = C_3 a^2 (A - a)(A + a), \quad (3)$$

где $C_3 = 0,25\pi D_{cp} \mu_0 \mu j k_3 (C_2 + 1)$ – некоторая постоянная.

Исследование функции (3) на экстремум путем взятия производной $d\Phi(a)/da = 0$ приводит к уравнению $a^2 + Aa - A^2 = 0$, физический смысл в котором имеет положительный корень $a = 0,61A$. Отсюда получают тангенциальный размер зубца индуктора:

$$b_{z1} = 0,5(A - a) = 0,32a. \quad (4)$$

При проектировании машины задаются мощностью, частотой тока и частотой вращения, а величину воздушного зазора, индукцию в зазоре и плотность тока выбирают с учетом опыта проектирования. Полученное оптимальное соотношение (4) позволяет поставить задачу по определению размеров ЭМЯ в функции указанных величин.

Из выражения для магнитодвижущей силы (МДС) рабочей обмотки в соответствии с законом полного тока $F_p = I_n w_p = j_p S_p k_{zp}$ получаем номинальный ток обмотки:

$$I_n = j_p S_p k_{zp} / w_p, \quad (5)$$

где j_p – плотность тока; S_p – сечение меди; k_{zp} – коэффициент заполнения; w_p – число витков обмотки якоря.

Известно, что электродвижущая сила (ЭДС) рабочей обмотки индукторной машины определяется выражением

$$E = 2,22 f w_p (\Phi_{max} - \Phi_{min}) = 2,22 f w_p S_\delta B_\delta (1 - 1/k_\lambda), \quad (6)$$

где f – частота генерируемого напряжения; Φ_{max} – максимальный магнитный поток; Φ_{min} – минимальный магнитный поток; S_δ – сечение воздушного зазора; $k_\lambda = \Phi_{max} / \Phi_{min}$ – коэффициент модуляции потока.

С учетом выражений (5) и (6) находим расчетную мощность машины:

$$P' = EI_n = 2,22 j_p k_{zp} f S_\delta S_p B_\delta (1 - 1/k_\lambda), \quad (7)$$

заданную при проектировании.

В выражении мощности (7) сечение зазора под внутренними, наиболее напряженными зубцами,

$$S_\delta = z_1 b_{z1} l_{z1}, \quad (8)$$

где $z_1 = 60f/n$ – число пар зубцов статора; n – частота вращения машины, об/мин.; b_{z1} и l_{z1} – тангенциальный и аксиальный размеры зубца индуктора соответственно.

На основании аналитических и численных оптимизационных расчетов определяем соотношение между аксиальным и тангенциальным размером зубца статора выбираемой конфигурации. За критерий оптимизации принимаем минимальное значение коэффициента рассеяния и максимальное значение коэффициента модуляции потока. Исследования на ЭВМ показали, что для машин аксиально-радиального типа оптимально удовлетворяет соотношению $b_{z1} / l_{z1} = 1,75$. При подстановке соотношения

$$b_{z1} = 1,75 l_{z1} \quad (9)$$

в выражение (8), а выражения (8) – в уравнение (7) получаем:

$$P' = 2,22 j_p k_{zp} f z_1 1,75 (l_{z1})^2 S_p B_\delta (1 - 1/k_\lambda). \quad (10)$$

Сечение меди обмотки якоря с учетом (4) и (9):

$$S_p = a^2 - S_B = 29,9 (l_{z1})^2 - S_B, \quad (11)$$

где S_B – сечение обмотки возбуждения.

Из уравнения (10) с учетом сечения обмотки якоря (11) получаем основное расчетное уравнение машины рассматриваемого типа:

$$P' = 3,89 j_p k_{sp} f z_1 (l_{z1})^2 B_\delta (1 - 1/k_\lambda) \times \\ \times \left[29,9 (l_{z1})^2 - S_b \right]. \quad (12)$$

Оно связывает электромагнитные нагрузки и расчетные коэффициенты с аксиальным размером зубца статора l_{z1} . Все другие величины задаются в проектировочном задании или могут быть рассчитаны. В частности сечение обмотки возбуждения S_b рассчитывается из выражения для МДС обмотки возбуждения в соответствии с законом полного тока:

$$F_b = I_b w_b = j_b S_b k_{3b} = k_F k_E k_\sigma k_s B_\delta \delta' / \mu_0,$$

откуда

$$S_b = k_F k_E k_\sigma k_s B_\delta \delta' / \mu_0 j_b k_{3b},$$

где I_b , w_b , k_{3b} , k_s – соответственно, ток, число витков, коэффициент заполнения, коэффициент запаса обмотки возбуждения; k_F – коэффициент, учитывающий падение магнитного потенциала в стали; k_E – коэффициент, учитывающий внутреннее падение напряжения; k_s – коэффициент рассеяния магнитного потока; B_δ – магнитная индукция в зазоре; δ' – расчетный воздушный зазор.

Задача предварительного расчета ЭМЯ сводится к определению аксиального размера зубца статора решением основного расчетного уравнения (12) относительно l_{z1} . Производя подстановку $C_4 = 3,89 j_p k_{sp} f z_1 (l_{z1})^2 B_\delta (1 - 1/k_\lambda)$, получаем алгебраическое уравнение четвертой степени относительно неизвестной l_{z1} :

$$29,9 C_4 (l_{z1})^4 - C_4 S_b (l_{z1})^2 - P' = 0.$$

Производя другую подстановку $x = (l_{z1})^2$, $C_5 = 29,9 C_4$, $C_6 = C_4 S_b$, получаем квадратное уравнение

$$C_5 x^2 - C_6 x - P' = 0,$$

корни которого имеют вид

$$(l_{z1})_{1,2} = \pm \sqrt{x_1}; \quad (l_{z1})_{3,4} = \pm \sqrt{x_2},$$

где $x_{1,2} = \left(C_6 \pm \sqrt{(C_6)^2 + 4 C_5 P'} \right) / 2 C_5$.

Физический смысл в данном решении имеет только первый действительный положительный корень

$$l_{z1} = \sqrt{\frac{C_6 + \sqrt{(C_6)^2 + 4 C_5 P'}}{2 C_5}}.$$

Окончательно, с учетом ранее принятых обозначений, получаем выражение для определения аксиального размера зубца статора:

$$l_{z1} = \sqrt{\frac{C_4 S_b + \sqrt{(C_4 S_b)^2 + 119,7 C_4 P'}}{59,8 C_4}}. \quad (13)$$

В выражение (13) входят только известные величины, определяемые проектировочным заданием и опытом проектирования электрических машин. Используя соотношения (4) и (9), определяем все размеры ЭМЯ.

Методика расчета индукторного генератора нового типа включает в себя поэтапный итерационный расчет. На первом этапе производится расчет ЭМЯ генератора, при этом в качестве электромагнитных нагрузок выбираются значения магнитной индукции в зазоре и плотности тока обмоток, заимствованные из опыта проектирования индукторных машин.

На последующих итерациях производится уточнение электромагнитного расчета, в том числе насыщения магнитной цепи, магнитной индукции и расчетных коэффициентов, полученных на предыдущих итерациях расчета. На завершающем этапе полученные данные (2), (3), (4) позволяют определить главные размеры генератора с последующим расчетом обмоток, магнитной цепи, массы активных материалов, потерь, КПД и характеристик генератора.

Анализ полученных результатов и выводы

На рис. 2, *b* показаны рекомендуемые зависимости размера a расчетного модуля ГА от скорости вращения при различных электрических частотах для мощности генератора 1 кВт. На рис. 3 показаны удельные массы ЭМЯ в функции скорости вращения при различных электрических частотах для мощности 1 кВт (рис. 3, *a*) и для мощности 100 кВт (рис. 3, *b*).

Для каждой мощности и частоты машины существуют минимальные удельные массы ЭМЯ G_x / P' , приходящиеся на единицу расчетной мощности и соответствующие этим массам критические значения скоростей. С повышением частоты и снижением мощности критические скорости перемещаются в область больших значений, а кривые на рис. 2 приобретают более пологий вид.

Для получения минимальных удельных показателей массы, скорости вращения ГА, необходимо подбирать равными или по возможности близкими к критическим скоростям. Поэтому для полного использования машины при минимальных удельных показателях массы параметр a , определяющий размеры машины (рис. 2, б), необходимо выбирать в функции этих критических скоростей.

В таблице приведены результаты расчета минимальных значений удельных масс ЭМЯ ($G_{\text{я}}/P'$, кг/кВт) при заданных мощностях и электрических частотах, а также рекомендованы приводы, способные обеспечить скорости вращения новых ГА при прямой передаче вращения на вал, наиболее близкие к критическим скоростям.

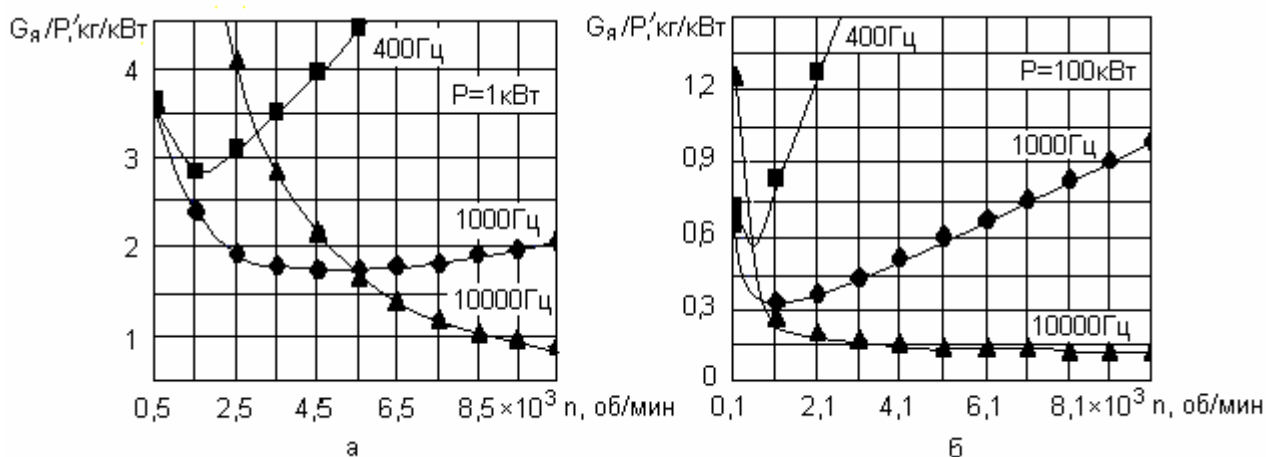


Рис. 3. Удельные массы модульных индукторных генераторов: а – мощностью 1 кВт; б – мощностью 100 кВт

Fig. 3. The specific gravity of a modular switched reluctance generators: а - 1 kW power; б – 100 kW power

Удельные массы электромагнитного ядра генераторов

Расчетная мощность при заданной частоте и критической скорости вращения		1 кВт	10 кВт	100 кВт	1 000 кВт	Рекомендуемые приводы
50 Гц	$G_{\text{я}}/P'$, кг/кВт	9,45	4,48	2,35	1,25	
	n , об/мин	90	50	30	10	
400 Гц	$G_{\text{я}}/P'$, кг/кВт	2,84	1,20	0,58	0,32	ДВС, ПТГ, ВЭУ, ГТ
	n , об/мин	1500	700	300	100	
1000 Гц	$G_{\text{я}}/P'$, кг/кВт	1,75	0,69	0,32	0,17	ПТГ, ДВС, ВЭУ
	n , об/мин	4500	2000	1000	500	
10 000 Гц	$G_{\text{я}}/P'$, кг/кВт	0,66	0,25	0,114	0,058	ГТГ и ПТГ
	n , об/мин	46000	22 000	14000	8000	

По показателям удельной массы модульные индукторные машины аксиально-радиальной конфигурации средней и большой мощности приближаются к показателям машин активного типа и могут конкурировать с ними. На повышенных и высоких частотах в пределах 400...10000 Гц в сравнении с классическими индукторными машинами альтернативные генераторы имеют неоспоримое преимущество, поскольку показатели их удельной массы улучшаются в 2,7-3,4 раза.

Полученные оптимистические результаты являются основой для промышленного изготовления опытных образцов генераторных агрега-

тов с целью их доработки и организации производства.

Библиографические ссылки

1. Грачев П. Ю., Горбачев Е. Е., Табачинский А. С. Перспективы применения инновационных генераторов переменного тока в автономных ВЭУ // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 5 (20). С. 259–264.
2. Желокова М. З., Максимова И. Ф. Мощные высокооборотные генераторы для малой энергетики // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2015. № 1. С. 74–90.
3. Ресурсосберегающие технологии для автономных электростанций на основе ДВС / Е. Н. Соснина,

О. В. Маслеев, А. Б. Дарьенков, Г. В. Пачурин // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12 (5). С. 823–831.

4. Шатворян Н. С., Самойленко А. Ю. Гибридные ДВС с электромеханической передачей мощности // Эксплуатация морского транспорта. 2015. № 1 (74). С. 43–45.

5. Конарковский А. Л., Конарковский Л. И. Индукторные генераторы и некоторые особенности их конструкции. Ч. 1 // Энергия – XXI век. 2015. № 3 (91). С. 53–74.

6. Русаков А. М., Солонин А. Н. Индукторные машины с обмоткой возбуждения. Опыт разработок // Технический оппонент. 2019. № 1. С. 12–19.

7. Tong W. [Mechanical design of electric motors]. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group Publ., 2014, 702 p.

8. Конарковский А. Л., Конарковский Л. И. Индукторные генераторы и некоторые особенности их конструкции. Ч. 2 // Энергия – XXI век. 2016. № 3 (95). С. 88–117.

9. Хходер Х., Верхова Г. В., Акимов С. В. Модульная технология проектирования гибких сложных систем // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11, № 9. С. 86–90.

10. German-Galkin S., Hrynkiwicz J. [Modulowa maszyna magnetokomutacyjna]. Przegląd Elektrotechniczny, 2014, no. 11, pp. 196-199.

11. German-Galkin S., Bormotov A. [Analytical and model study of a modular electrical machine in the electrical drive]. *American journal of scientific and educational research*, 2014, no. 1, pp. 614-625.

12. Смирнов А. Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ. М. : Форум, 2015. 192 с.

13. Квитко А. В., Петренко Ю. М., Тарасов М. М. Особенности расчета бесконтактных генераторов электроэнергии // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 112. С. 991–1002.

14. Герман-Галкин С. Г., Бормотов А. В. Аналитическое и модельное исследование модульной синхронной реактивной машины // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 9. С. 625–631.

15. Герман-Галкин С. Г., Лебедев В. В., Бормотов А. В. Модульная синхронная индукторная машина в системе электропривода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 11. С. 731–738.

16. Рясков Ю. И., Шайтор Н. М. Индукторные машины аксиально-радиальной конфигурации : монография. Севастополь : СевГУ, 2018. 137 с.

17. Шайтор Н. М., Горпинченко А. В., Рясков Ю. И. Повышение эффективности преобразования энергии в аксиально-радиальных индукторных генераторах // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4, № 1. С. 90–94.

References

1. Grachev P.Yu., Gorbachev E.E., Tabacinski A.S. [Prospects of application of innovative AC generators in Autonomous wind turbine]. *Innovations in agriculture*, 2016, no. 5, pp. 259-264 (in Russ.).

2. Zelokova M.Z., Maksimova I.F. [Powerful high-speed generators for low energy]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 2015, no. 1, pp. 74-90 (in Russ.).

3. Sosnina E.N., Makeev O.V., Dariankov A.B., Pachurin G.V. [Resource saving technologies for Autonomous power plants based on internal combustion engines]. *Modern high technologies*, 2015, no. 12, pp. 823-831 (in Russ.).

4. Shatvoryan N.S. Samoilenko A.Y. [Hybrid internal combustion engine with Electromechanical power transfer]. *Operation of Maritime transport*, 2015, no. 1, pp. 43-45 (in Russ.).

5. Konarkowski A.L., Konarkowski L.I. [Induction generators and some features of their design]. *Energy - XXI century*, 2015, no. 3, pp. 53-74 (in Russ.).

6. Rusakov A.M., Solonin A.N. [Inductor machine with excitation winding. Development experience]. *Technical opponent*, 2019, no. 1, pp. 12-19 (in Russ.).

7. Tong W. [Mechanical design of electric motors]. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group Publ., 2014, 702 p.

8. Konarkowski A.L., Konarkowski L.I. [Induction generators and some features of their design]. *Energy - XXI century*, 2016, no. 3, pp. 88-117 (in Russ.).

9. Khoder X., Verhova G.V., Akimov S.V. [Modular technology for flexible design of complex systems]. *T-Comm: Telecommunications and transport*, 2017, vol. 11, no. 9, pp. 86-90 (in Russ.).

10. German-Galkin S., Hrynkiwicz J. [Modulowa maszyna magnetokomutacyjna]. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, no. 11, pp. 196-199.

11. German-Galkin S., Bormotov A. [Analytical and model study of a modular electrical machine in the electrical drive]. *American journal of scientific and educational research*, 2014, no. 1, pp. 614-625.

12. Smirnov A.Y. *Inductorny mashiny. Proektirovanie i vychislitelny analiz* [Induction machine. Design and computational analysis]. Moscow, Forum Publ., 2015, 192 p. (in Russ.).

13. Kvitko A.V., Petrenko Y.M., Tarasov M.M. [Features of calculation of contactless generators of the electric power]. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban state agrarian University*, 2015, no. 112, pp. 991-1002 (in Russ.).

14. German-Galkin S.G., Bormotov A.V. [Analytical and model study of a modular synchronous jet machine]. *Mechatronics, automation, control*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 625-631 (in Russ.).

15. German-Galkin S.G., Lebedev V.V., Bormotov A.V. [Modular synchronous inductor machine in the electric drive system]. *Mechatronics, automation, control*, 2015, vol. 16, no. 11, pp. 731-738 (in Russ.).

16. Ryaskov Y.I., Shaytor N.M. *Induktornye mashiny aksial'no-radial'noi konfiguratsii* [Induction machines of axial-radial configuration]. Sevastopol, SevGU Publ., 2018, 137 p. (in Russ.).

17. Shaytor N.M., Gorpichenko V.A., Ryaskov Y.I. [Efficiency increasing of energy transformation in axial-radial inductor generators]. *Power plants and technologies*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 90-94 (in Russ.).

Development of Units with Integrated Modular Type Induction Generators

N.M. Shaytor, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
B.A. Yakimovich, DSc in Engineering, Professor, Sevastopol State University, Institute of Natural and Technical Systems (INTS), Sevastopol, Russia
Yu.I. Ryaskov, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia
A.V. Gorpichenko, PhD in Engineering, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

The paper proposes new constructive solutions for generating units with integrated modular type induction generators. The fundamentals of analytical and numerical methods for calculating generators, which are related to a new class of inductor machines with distributed magnetic and concentrated electrical systems, are developed. The aim of the study is to develop integrated designs of a modular inductor generator, including the creation of a calculation method, with the calculation of the minimum specific mass and justification of the areas of effective use of generators with different types of drives.

The areas of application of new generator sets with the improved weight and size, operational and economic characteristics and meeting the modern requirements of waste-free technologies and cost reduction are substantiated. The reliability of the obtained scientific results is due to the strict mathematical conclusions of analytical dependences, verification of the solution of problems to determine the size and specific parameters of the generators by numerical methods. The presented calculation results are confirmed by experimental studies.

It is shown that in comparison with the classical inductor machines with concentrated magnetic and distributed electrical systems, the specific mass of the proposed generators can be repeatedly improved. The obtained results are the basis for the industrial production of prototypes of generator sets in order to refine and organize their production.

Keywords: generator unit, axial-radial configuration, electromagnetic core, design equation, specific gravity.

Получено 05.09.2019

Образец цитирования

Разработка агрегатов с интегрированными индукторными генераторами модульного типа / Н. М. Шайтор, Б. А. Якимович, Ю. И. Рясков, А. В. Горпинченко // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 90–97. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-90-97.

For Citation

Shaytor N.M., Yakimovich B.A., Ryaskov Yu.I., Gorpichenko A.V. [Development units with integrated induction generators are of modular type]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 90-97 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-90-97.