УДК 621.314.58
ББК 31.264.5
М 54

Кашин Я.М.
Кубанский государственный технологический университет, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени А.К. Серова, Краснодар, Россия, jlms@mail.ru
Князев А.С.
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени А.К. Серова, Краснодар, Россия, knyazev.aleksei.87@gmail.com
Копелевич Л.Е.
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия, kkllev@mail.ru
Самородов А.В.
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия, alex.samorodoff@gmail.com
Горбунов И.А.
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия, Igor.gorbun0ff@yandex.ru

Методика определения габаритных размеров эквивалентных электрических машин с постоянными магнитами*

(Рецензирована)

Аннотация. *Представлена методика определения габаритных размеров эквивалентных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов. Построены зависимости габаритных размеров магнитопроводов и их соотношений от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора.*

Ключевые слова: *генератор, статор, ротор, активная зона, габаритный размер*

Kashin Ya.M.
Kuban State University of Technology, A.K. Serov Krasnodar Air Force Institute for Pilots, Krasnodar, Russia, jlms@mail.ru
Knyazev A.S.
A.K. Serov Krasnodar Air Force Institute for Pilots, Krasnodar, Russia, knyazev.aleksei.87@gmail.com
Kopelevich L.E.
Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia, kkllev@mail.ru
Samorodov A.V.
Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia, alex.samorodoff@gmail.com
Gorbunov I.A.
Kuban State University of Technology, Krasnodar, Russia, Igor.gorbun0ff@yandex.ru

Method for determining the overall dimensions of equivalent electric machines with permanent magnets

Abstract. *The article presents a method for determining the overall dimensions of equivalent electric machines with constant excitation from permanent magnets. Dependencies of the overall dimensions of magnetic cores and their ratios on the angle of inclination of the air gap to the axis of rotor rotation are constructed.*

Keywords*: generator, stator, rotor, core, overall size*

* *Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Краснодарского края в рамках научного проекта № 19-48-230009 р_а.*

Для определения зависимости габаритных размеров эквивалентных электрических машин с постоянными магнитами (ЭМ с ПМ) [1, 2] от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора введем прямоугольную систему координат с осями x и y таким образом, чтобы ось x совпала с осью вращения ротора рассматриваемой ЭМ, а ось y находилась в плоскости рассматриваемого сечения (рис. 1).

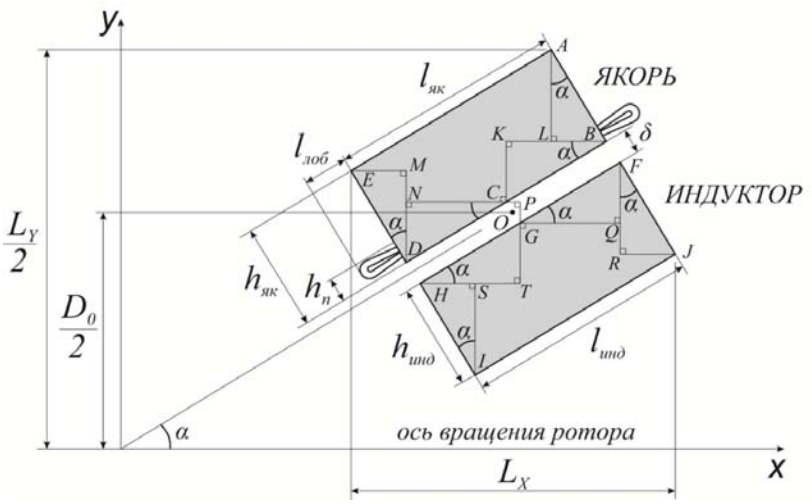

Рис. 1. К определению зависимостей габаритов ЭМ с коническим ротором от ее параметров

Угол наклона воздушного зазора равен α. Габаритные размеры ЭМ по осям x и y обозначим как L_X и L_Y соответственно. Тогда габаритные размеры L_X, измеряемые вдоль оси вращения ротора, будут равны:

$$\begin{cases} L_{X_M} = \left(h_{ЯК} + h_{ИНД} + \delta\right)\sin\left(\alpha\right) + l \cdot cos\left(\alpha\right), \\ L_{X_ОБМ_ЯК} = h_П \cdot \sin\left(\alpha\right) + (l + 2 \cdot l_{ЛОБ}) \cdot cos\left(\alpha\right), \\ L_{X_ЭМ} = MAX(L_{X_M}; L_{X_ОБМ_ЯК}; L_{X_ИНД_ЯК}), \end{cases} \quad (1)$$

где L_{X_M} – габаритный размер L_X магнитопроводов (якоря и индуктора); $L_{X_ОБ_ЯК}$ – габаритный размер L_X обмотки якоря с учетом вылета лобовых частей; $L_{X_ЭМ}$ – габаритный размер L_X всей ЭМ, определяемый как функция выбора наибольшего значения из L_{X_M}, $L_{X_ОБ_ЯК}$ и $L_{X_ИНД_ЯК}$.

Габаритный размер L_Y, измеряемый перпендикулярно оси вращения ротора, будет равен:

$$\begin{cases} L_{Y_M_ЯК} = D_O + (2 \cdot h_{ЯК} + \delta) \cdot cos\left(\alpha\right) + l \cdot \sin\left(\alpha\right), \\ L_{Y_M_ИНД} = D_O + (2 \cdot h_{ИНД} + \delta) \cdot cos\left(\alpha + 180^0\right) + l \cdot \sin\left(\alpha + 180^0\right), \\ L_{Y_ОБ_ЯК} = D_O + (2 \cdot h_П + \delta) \cdot cos\left(\alpha\right) + (l + l_{ЛОБ}) \cdot \sin\left(\alpha\right), \\ L_{Y_ЭМ} = MAX(L_{Y_M_ЯК}; L_{Y_M_ИНД}; L_{Y_ОБ_ЯК}), \end{cases} \quad (2)$$

где $L_{Y_M_ЯК}$ – габаритный размер L магнитопровода якоря; $L_{Y_M_ИНД}$ – габаритный размер L_Y магнитопровода индуктора; $L_{Y_ОБ_ЯК}$ – габаритный размер L_Y обмотки якоря с учетом вылета лобовых частей; $L_{Y_ЭМ}$ – габаритный размер L_Y всей ЭМ, определяемый как функция выбора наибольшего значения из $L_{Y_M_ЯК}$, $L_{Y_M_ИНД}$ и $L_{Y_ОБ_ЯК}$.

Если рассматривать габаритные размеры только магнитопроводов, то есть не учитывать вылет лобовых частей обмотки якоря, то для случая, когда габаритный размер ЭМ будет определяться габаритным размером магнитопровода якоря, то есть

$L_{Y_ЭМ}=L_{Y_М_ЯК}$, найдем соотношение габаритных размеров магнитной системы $L_{X_М}$ и $L_{Y_М}$.

$$\frac{L_{X_M}}{L_{Y_M}}=\frac{\left(h_{ЯК}+h_{ИНД}+\delta\right)\sin\left(\alpha\right)+l\cdot cos\left(\alpha\right)}{D_O+(2h_{ЯК}+\delta)\cdot cos\left(\alpha\right)+l\cdot\sin\left(\alpha\right)}. \quad (3)$$

В радиальных ЭМ, у которых α=0º, наружный диаметр якоря D_H находится в определенном соотношении с диаметром расточки якоря D:

$$D_H=k_{ДН}. \quad (4)$$

Поэтому для радиальных ЭМ выражение (4) можно записать:

$$\frac{L_{X_M}}{L_{Y_M}}=\frac{l}{D_H}=\frac{1}{k_{ДН}}\frac{l}{D}, \quad (5)$$

где $k_{ДН}$ – коэффициент наружного диаметра радиальной ЭМ, а величина $\frac{l}{D}$ представляет собой известное отношение длины магнитопровода l радиальной ЭМ к диаметру D расточки якоря. А, как известно, выбор величины $\frac{l}{D}$ очень важен при проектировании, так как от этого зависит множество других параметров радиальных ЭМ [3–11].

Для аксиальных ЭМ [12, 13 и др.], у которых α=90º, выражение (4) будет иметь вид:

$$\frac{L_{X_M}}{L_{Y_M}}=\frac{h_{ЯК}+h_{ИНД}+\delta}{D_O+l}. \quad (6)$$

Как видно из выражений (5) и (6), при увеличении длины активной зоны l величина отношения габаритных размеров магнитной системы $\frac{L_{X_M}}{L_{Y_M}}$ для радиальных ЭМ будет увеличиваться, а для аксиальных – уменьшаться.

Для определения полных габаритных размеров ЭМ, то есть получения функций $L_{X_ЭМ}=f(a)$ и $L_{Y_ЭМ}=f(a)$ с учетом вылета лобовых частей обмотки якоря должны быть известны следующие величины: D_O – диаметр эталонной окружности, δ – величина воздушного зазора, l – активная длина ЭМ, $l_{ЛОБ}$ – длина вылета лобовой части обмотки якоря (с одной стороны магнитопровода), $h_{ИНД}$ – высота магнитопровода индуктора, равная сумме высоты ярма индуктора $h_{ЯР_ИНД}$ и высоты постоянного магнита $h_{ПМ}$, $h_П$ – высота паза, $h_{ЯК}$ – высота магнитопровода якоря, равная сумме высоты паза $h_П$ и высоты спинки якоря $h_{СП_ЯК}$. Далее для различных значений угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора a необходимо решить системы уравнений (1) и (2).

В зависимости от конкретных значений этих величин функции $L_{X_ЭМ}=f(a)$ и $L_{Y_ЭМ}=f(a)$ могут иметь различный вид. В качестве примера были проведены предварительные расчеты. В качестве исходных данных были приняты:

D_O=120 мм, δ=1 мм, l=40 мм, $l_{ЛОБ}$=7 мм, $h_{ИНД}$=15 мм, $h_П$=6 мм, $h_{ЯК}$=20 мм.

В результате проведенных расчетов были получены зависимости, графики которых представлены на рисунках 2–5.

Из представленных на рисунках 2–5 графиков видно, что габаритные размеры L_X и L_Y при различных значениях угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора определяются различными элементами ЭМ – магнитопроводами якоря и индуктора, а также обмоткой якоря. Поэтому, для определения габаритных размеров эквивалентных ЭМ с ПМ при выбранном значении угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, необходимо предварительно определить требуемые значения D_O, δ, l, $l_{ЛОБ}$, $h_{ИНД}$, $h_П$, $h_{ЯК}$.

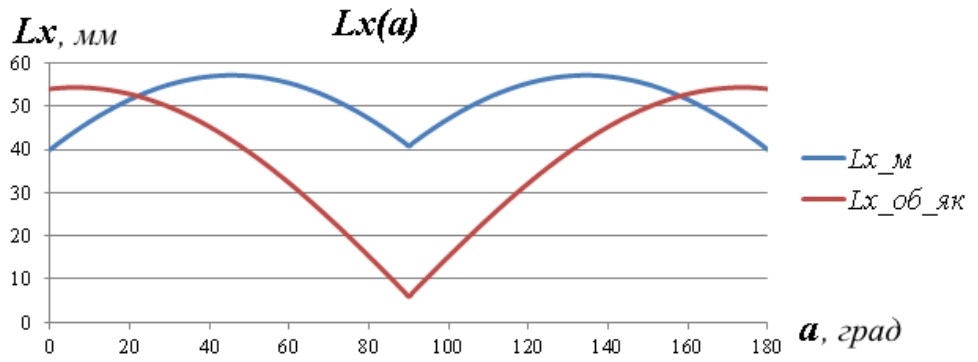

Рис. 2. Зависимость габаритного размера L_X магнитопроводов и обмотки якоря от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

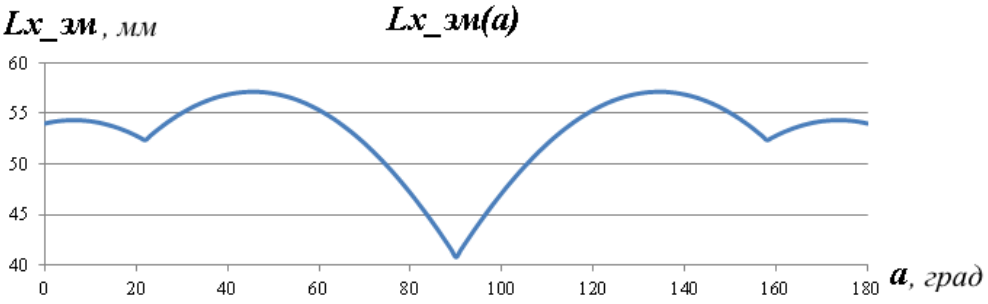

Рис. 3. Зависимость габаритного размера L_X ЭМ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

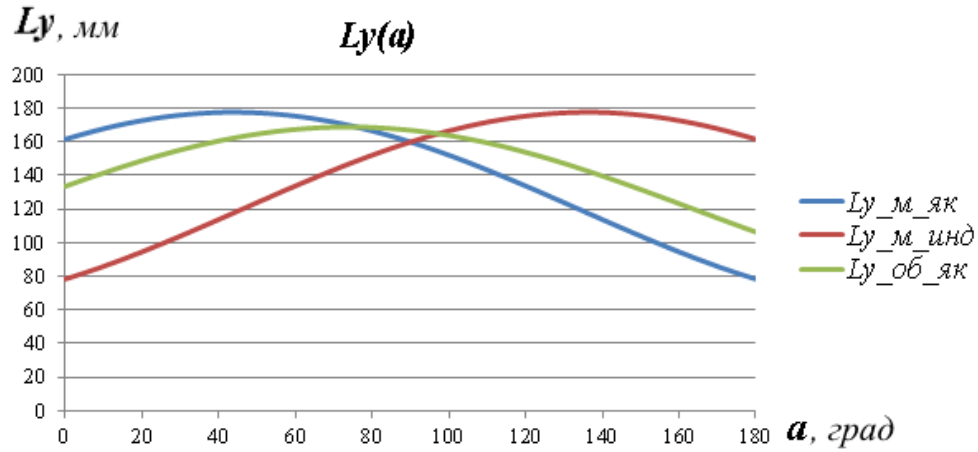

Рис. 4. Зависимость габаритного размера L_X ЭМ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

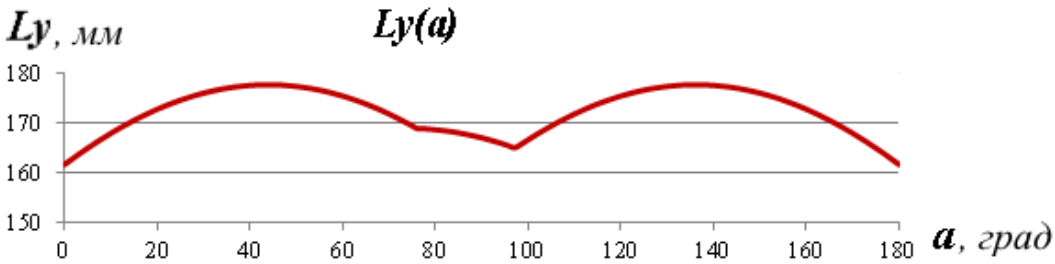

Рис. 5. Зависимость габаритного размера L_X ЭМ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

Если для рассматриваемого случая вычислить соотношение габаритных размеров ЭМ L_X/L_Y с учетом вылета лобовых частей обмотки якоря, то получим следующую картину (рис. 6):

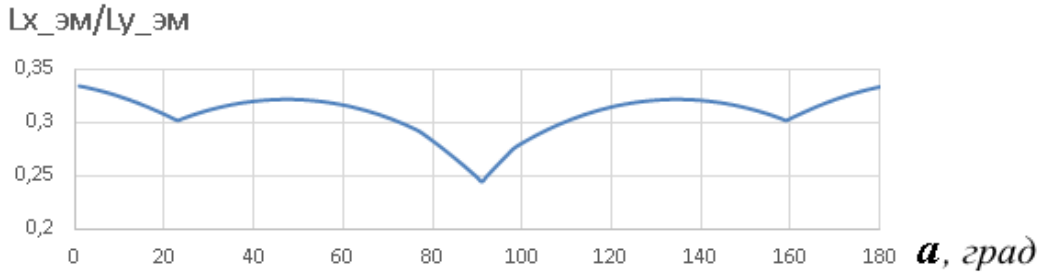

Рис. 6. Зависимость соотношения габаритных размеров L_X/L_Y ЭМ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

Таким образом, из полученных графиков наглядно видно, что выбор формы ЭМ, определяемой значением угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, является достаточно важной задачей, так как величина габаритных размеров эквивалентных ЭМ, обладающих одинаковой мощностью, очень сильно зависит от значения угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора.

На основе проведенных исследований разработан метод определения габаритных размеров эквивалентных ЭМ, который состоит из трех этапов:

1. Определение значений требуемых величин D_O, δ, l, $l_{ЛОБ}$, $h_{ИНД}$, $h_П$, $h_{ЯК}$ на основе исходных данных (заданная мощность, частота вращения, количество фаз и т.д.). Этот этап может быть выполнен с применением различных формул, методик расчета или путем выбора определенных значений, исходя из опыта или заданных условий работы ЭМ.

2. Определение областей допустимых значений габаритных размеров ЭМ – L_X и L_Y, исходя из заданных условий проектирования ЭМ, а также допустимых значений угла α наклона воздушного зазора к оси вращения ротора. Этот этап может быть выполнен исходя из определения максимально допустимых габаритных размеров, в которых должна быть размещена разрабатываемая ЭМ с учетом ее возможной формы.

3. Решение систем уравнений (1) и (2) для различных (допустимых) значений угла α наклона воздушного зазора к оси вращения ротора. Этот этап может быть выполнен вручную для нескольких наиболее предпочтительных значений угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора, но лучше и быстрее всего это может быть сделано на ЭВМ, например, в Excel или другой программе. В результате выполнения этого этапа получаем совокупность всех возможных значений габаритных размеров L_X и L_Y эквивалентных ЭМ при всех допустимых значениях угла α наклона воздушного зазора к оси вращения ротора.

Применим разработанный метод для расчета проектируемого для гибридного энергетического комплекса генератора:

1. Допустимая область значений угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора ограничивается диапазоном $135^o<\alpha<180^o$, причем желательно, чтобы из этого диапазона значение α располагалось ближе к 135º, так как чем ближе угол наклона воздушного зазора к оси вращения ротора α к 180º, тем больше форма ЭМ будет приближаться к радиальной, и аэродинамика генератора [14] будет ухудшаться, поэтому исходя из требования обтекаемой формы генератора предельное значение α выберем равным 155º.

Допустимая область значений диаметра эталонной окружности D_O ограничивается диаметром расточки якоря генератора, планируемого к установке в гибридном энергетическом комплексе, так как при превышении данной величины

габаритный показатель L_Y всей генераторной установки с генератором станет хуже, чем у известного аналога.

2. Значения требуемых величин определены по разработанным авторами методикам [15, 16] и составляют: D_O=168,7 мм, δ=0,55 мм, l=42,2 мм, $l_{ЛОБ}$=32 мм, $h_{ИНД}$=36 мм, $h_П$=7,13 мм, $h_{ЯК}$=15,2 мм.

3. В результате решения систем уравнений (1) и (2) для рассматриваемого случая при 135º<α<155º получим представленные на рисунках 7 и 8 зависимости, которые позволяют наглядно оценить габаритные показатели эквивалентных ЭМ с ПМ при разных значениях угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора.

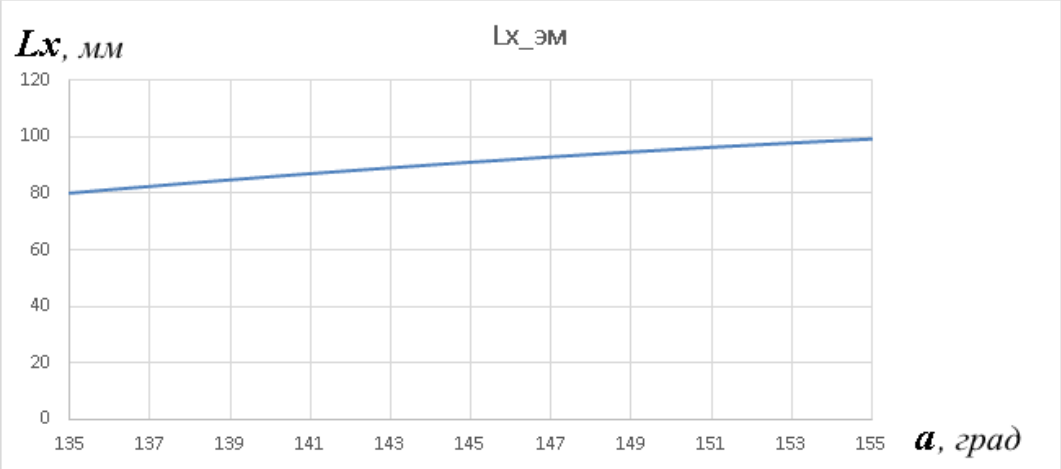

Рис. 7. Зависимость габаритного размера L_X ЭМ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

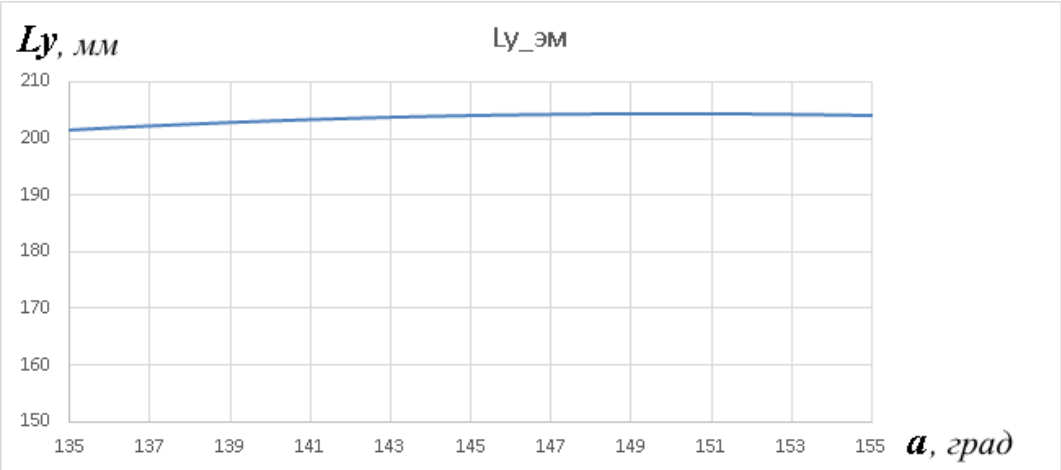

Рис. 8. Зависимость габаритного размера L_Y ЭМ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора

Вывод. Разработанная на основании совокупности известных методов и формул, используемых при расчете синхронных ЭМ с ПМ радиальной и аксиальной конструкциями, и выведенных авторами зависимостей методика определения габаритных размеров эквивалентных электрических машин с постоянными магнитами позволяет осуществить расчет габаритных размеров синхронных ЭМ с ПМ не только радиальной [2 и др.] и аксиальной [2, 12, 13 и др.] конструкциями, но и конической [17 и др.], аксиально-радиальной [18 и др.], аксиально-конической [19 и др.] конструкциями. Предложенная методика позволяет рассчитать габаритные размеры также других электрических машин соответствующей конструкции: двигателей-насосов [20, 21 и др.], индукционных регуляторов [22, 23 и др.], трансформаторов [24, 25 и др.], регуляторов фазы [26,

27 и др.]. Это подтверждается результатами расчета по представленной методике и исследований многофазного ветрогенератора переменного тока [17], являющегося синхронным генератором с возбуждением от постоянных магнитов, используемым для преобразования кинетической энергии ветра в электрическую энергию в гибридных энергетических комплексах.

Список литературы:

1. Массогабаритная оптимизация эквивалентных синхронных электрических машин / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер.: Естественно-математические и технические науки. 2017. Вып. 1 (196). С. 129–143. URL: http://vestnik.adygnet.ru
2. Результаты исследования эквивалентных радиальных и аксиальных синхронных генераторов с обмоткой возбуждения / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, М.С. Христофоров // Энергосбережение и водоподготовка. Москва: Изд-во ООО «ЭНИВ», 2017. № 5 (109). С. 47–52.
3. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учебное пособие. Москва: Высшая школа, 1982. 272 с.
4. Беляев Е.Ф. Расчет и проектирование электрических машин постоянного тока малой мощности. Пермь: ПГТУ, 2001. 72 с.
5. Дьяков В.И. Типовые расчеты по электрооборудованию: практ. пособие. 7-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 1991. 160 с.
6. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. В 2-х томах. Т. 1. Москва: Изд-во МЭИ. 2004. 652 с.
7. Игнатов В.А., Вильданов К.Я. Торцевые электродвигатели интегрального изготовления. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
8. Программа расчета размеров магнитной системы эквивалентных электрических машин / Я.М. Кашин, А.С. Князев, А.Я. Кашин, В.А. Ким: свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017619234, заявл. 17.06.2017; зарегистр. 17.08.2017.
9. Программа создания трехмерной модели синхронной электрической машины с постоянными магнитами в “AnsysMaxwell 16” / Я.М. Кашин, А.С. Князев, А.Я. Кашин, В.А. Ким: свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017619235 заявл. 27.06.2017; зарегистр. 17.08.2017.
10. КнязевА.С., А.Я. Кашин. Метод замещения для расчета ЭДС в аксиальных электрических машинах при неравномерном распределении магнитной индукции в радиальном направлении // Технические и технологические системы: материалы VI международной научной конференции, г. Краснодар, 10–12 октября 2014 г. / филиал ВУНЦ ВВС «ВВА». Красно-

References:

1. Weight and size optimization of equivalent synchronous electric machines / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser.: Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2017. Iss. 1 (196). P. 129–143. URL: http://vestnik.adygnet.ru
2. Results of research of equivalent radial and axial synchronous generators with excitation winding / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev, M.S. Khristoforov // Energy Saving and Water Treatment. Moscow: ENIV, 2017. No. 5 (109). P. 47–52.
3. Balagurov V.A. Design of special electric machines of alternating current: a manual. Moscow: Vysshaya Shkola, 1982. 272 p.
4. Belyaev E.F. Calculation and design of low-power DC electric machines. Perm: PSTU, 2001. 72 p.
5. Dyakov V.I. Typical calculations for electrical equipment: practical guide. 7th ed., revised. Moscow: Vysshaya Shkola, 1991. 160 p.
6. Ivanov-Smolensky A.V. Electric machines: a textbook for higher educational institutions. In 2 vol. Vol. 1. Moscow: Publishing House of MEI. 2004. 652 p.
7. Ignatov V.A., Vildanov K.Ya. End electric motors of integral manufacturing. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 304 p.
8. Program for calculating the dimensions of the magnetic system is equivalent to electric machines / Ya.M. Kashin, A.S. Knyazev, A.Ya. Kashin, V.A. Kim: RUS Certificate of official registration of computer programs No. 2017619234. Appl. 17.06.2017; reg. 17.08.2017.
9. Program for creating a three-dimensional model of a synchronous electric machine with permanent magnets in “AnsysMaxwell 16” / Ya.M. Kashin, A.S. Knyazev, A.Ya. Kashin, V.A. Kim: RUS Certificate of official registration of computer programs No. 2017619235. Appl. 27.06.2017; reg. 17.08.2017.
10. Knyazev A.S., Kashin A.Ya. Substitution Method for calculating EMF in axial electric machines with uneven distribution of magnetic induction in the radial direction // Technical and technological systems: materials of the 4th international scientific conference, Krasnodar, October 10–12, 2014 / branch of VUNTs VVS “VVA”. Krasnodar. P. 129–132.

дар. С. 129–132.

11. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. 3-е изд. Москва: Высш. шк., 2001. 327 с.
12. Кашин Я.М., Кашин А.Я., Князев А.С. Трехвходовая аксиальная генераторная установка: патент на изобретение RUS 2589730, 10.06.2016.
13. Синхронизированная аксиальная двухвходовая генераторная установка / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, М.С.Христофоров: патент на изобретение RUS 2647708, 19.03.2019.
14. Стабилизированный вентильный аксиально-конический ветрогенератор постоянного тока / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, А.В. Войнов: патент на изобретение RUS 26889251, 22.03.2018.
15. Методика расчета основных параметров синхронного генератора для гибридных энергетических комплексов и ее реализация / Я.М. Кашин, А.С. Князев, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер.: Естественно-математические и технические науки. 2019. Вып. 2 (241). С. 95–106. URL: http://vestnik.adygnet.ru
16. Методика расчета синхронных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов для ветро-солнечных генераторных установок / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер.: Естественно-математические и технические науки. 2017. Вып. 1 (196). С. 9–106. URL: http://vestnik.adygnet.ru
17. Кашин Я.М., Кашин А.Я., Князев А.С. Многофазный ветрогенератор переменного тока: патент на изобретение RUS 2658316, 07.07.2017.
18. Стабилизированный вентильный аксиально-радиальный ветрогенератор постоянного тока / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, А.В. Войнов: патент на изобретение RUS 2689211, 22.03.2018.
19. Стабилизированный вентильный аксиально-конический ветрогенератор постоянного тока / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, А.В. Войнов: патент на изобретение RUS 2688925, 22.03.2018.
20. Аксиальный центробежный двигатель-насос / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, М.И. Рябухин, Т.Б. Гайтова: патент на изобретение RUS 2284426, 27.09.2006.
21. Аксиальный двигатель-насос / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, М.И. Рябухин, Т.Б. Гайтова, А.Я. Кашин: патент на изобретение RUS 2340974, 10.12.2008.
22. Сдвоенный аксиальный индукционный регулятор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Н.А. Сингаевский, А.В. Самородов, Ф.М. Ариди, А.П. Майоров: патент на изобретение RUS

11. Kopylov I.P. Mathematical modeling of electric machines: a textbook for higher educational institutions. 3rd ed. Moscow: Vysshaya Shkola, 2001. 327 p.
12. Kashin Ya.M., Kashin A.Ya., Knyazev A.S. Three-input axial generator plant: Patent for invention RUS 2589730, 10.06.2016.
13. Synchronised axial two-inlet generator installation / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov, M.S. Khristoforov: Patent for invention RUS 2647708, 19.03.2019.
14. Stabilized DC axial-conical direct-current valve wind generator / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev: Patent for invention RUS 2688925, 22.03.2018.
15. Method of calculation of parameters of a winding of an anchor and winding coefficients of first harmonic of the synchronous generator with excitation from permanent magnets for hybrid power complexes and its implementation it / Ya.M. Kashin, A.S. Knyazev, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser.: Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2017. Iss. 2 (241). P. 95–106. URL: http://vestnik.adygnet.ru
16. Method of calculating synchronous electric machines with excitation from permanent magnets for wind-solar generator sets / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser.: Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2017. Iss. 1 (196). P. 95–106. URL: http://vestnik.adygnet.ru
17. Kashin Ya.M., Kashin A.Ya., Knyazev A.S. Multiphase ac wind generator: Patent for invention RUS 2658316, 07.07.2017.
18. Stabilized DC axial-radial direct-current valve wind generator / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev: Patent for invention RUS 2689211, 22.03.2018.
19. Stabilized DC axial-conic direct-current valve wind generator / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev: Patent for invention RUS 2688925, 22.03.2018.
20. Axial-centrifugal motor-pump / B.Kh. Gaytov, Ya.M. Kashin, M.I. Ryabyhin, T.B. Gaytova: Patent for invention RUS 2284426, 27.09.2006.
21. Axial-centrifugal motor-pump / B.Kh. Gaytov, Ya.M. Kashin, M.I. Ryabyhin, T.B. Gaytova A.Ya. Kashin: Patent for invention RUS 2340974, 10.12.2008.
22. Dual axial induction regulator / B.Kh. Gaytov, Ya.M. Kashin, N.A. Singaevski, A.V. Samorodov, F.M. Aridi, A.P. Mayorov: Patent for invention RUS 2170971, 20.07.2001.

2170971, 20.07.2001.

23. Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б. Аксиальный индукционный регулятор: патент на изобретение RUS 2256973, 20.07.2005.
24. Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б. Многофазный трансформатор: патент на изобретение RUS 2181512, 20.04.2002.
25. Гайтов Б.Х., Кашин Я.М., Гайтова Т.Б. Многофазный трансформатор: патент на изобретение RUS 2249871, 10.04.2005.
26. Многофазный трансформатор-фазорегулятор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Т.Б. Гайтова, В.И. Шипалов: патент на полезную модель RUS 29624, 20.05.2003.
27. Кашин Я.М. Многофазный фазочастотный трансформатор-регулятор: патент на изобретение RUS 2689121, 24.05.2019.

23. Gaytov B.Kh., Kashin Ya.M., Gaytova T.B. Axial induction regulator: Patent for invention RUS 2256973, 20.07.2005.
24. Gaytov B.Kh., Kashin Ya.M., Gaytova T.B. Multiphase transformer: Patent for invention RUS 2181512, 20.04.2002.
25. Gaytov B.Kh., Kashin Ya.M., Gaytova T.B. Multiphase transformer: Patent for invention RUS 2249871, 10.04.2005.
26. Multiphase transformer - the phase-shifter / B.Kh. Gaytov, Ya.M. Kashin, T.B. Gaytova, V.I. Shipalov: Patent for useful model RUS 29624, 20.05.2003.
27. Kashin Ya.M. Multiphase phase-frequency transformer-regulator: Patent for invention RUS 2689121, 24.05.2019.