



УДК 621.313.33

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАССЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ

●●●●●

METHOD OF CALCULATING THE MASS OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR WITH EXCITATION FROM PERMANENT MAGNETS FOR HYBRID ENERGY COMPLEXES AND ITS IMPLEMENTATION

Кашин Яков Михайлович

кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой электротехники
и электрических машин,
Кубанского государственного
технологического университета;
профессор кафедры авиационного
радиоэлектронного оборудования,
Краснодарского высшего военного
авиационного училища летчиков
jlms@mail.ru

Князев Алексей Сергеевич

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры
авиационного радиоэлектронного оборудования,
Краснодарское высшее военное
авиационное училище летчиков
knyazev.aleksei.87@gmail.com

Кашин Александр Яковлевич

Командир корабля
(на самолетах АН-26)
jlms_1@mail.ru

Мараховский Евгений Александрович

студент,
Кубанского государственного
технологического университета

Аннотация. Дана конструкция перспективного ветрогенератора конической конструкции, методика расчета и расчет его массы.

Ключевые слова: конический магнитопровод, массогабаритные показатели, ярмо, якорь, индуктор, магниты.

Kashin Yakov Mikhailovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Head of the Department
of Electrical Engineering
and Electrical Machines,
Kuban state technology university;
Professor of the Department avionics,
Air Force institute for pilots
jlms@mail.ru

Knyazev Aleksey Sergeevich

Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer of the Department avionics,
Air Force institute for pilots
knyazev.aleksei.87@gmail.com

Kashin Aleksandr Yakovlevich

Aircraft commander
(to the Antonov An-26)
jlms_1@mail.ru

Marakhovsky Evgeny Aleksandrovich

Student,
Kuban state technological university

Annotation. The design of a promising conical-type wind generator is given, the calculation procedure and its mass calculation.

Keywords: conical magnetic circuit, overall dimensions, yoke, anchor, inductor, magnet.

Для гибридных энергетических комплексов, снабжающих электроэнергией локальные объекты, необходимы генераторы, обладающие высокой надежностью и хорошими массогабаритными показателями.

Авторами на протяжении ряда лет ведутся работы по разработке таких генераторов. Для этой цели проанализирован ряд генераторных установок, преобразующих кинетическую энергию ветра в электроэнергию переменного тока и разработан ветрогенератор переменного тока.

Известный аксиальный двухвходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор [1] содержит корпус, возбудитель и основной генератор, установленные на одном валу, закрепленном в корпусе в подшипниковых узлах. Возбудитель состоит из индуктора возбудителя и аксиального магнитопровода с обмоткой якоря возбудителя, основной генератор состоит из бокового аксиального магнитопровода с одной активной торцевой поверхностью, в пазы которого уложена обмотка якоря основного генератора, и внутреннего аксиального магнитопровода с двумя активными торцевыми поверхностями, в пазы которого со стороны бокового аксиального магнитопровода уложена обмотка возбуждения основного генератора. Боковой аксиальный магнитопровод с одной активной торцевой поверхностью жестко



установлен в корпусе, а внутренний аксиальный магнитопровод с двумя активными торцовыми поверхностями установлен посредством диска на валу с возможностью вращения относительно бокового аксиального магнитопровода с одной активной торцовой поверхностью. Индуктор возбуждителя в известном из [1] генераторе выполнен из постоянного многополюсного магнита и однофазной дополнительной обмотки возбуждения возбуждителя, причем постоянный многополюсный магнит индуктора возбуждителя выполнен с пазами, многосекционным, неподвижным и жестко установлен в корпусе, а однофазная дополнительная обмотка возбуждения возбуждителя уложена в пазы между секциями постоянного многополюсного магнита индуктора возбуждителя и подключена к источнику постоянного тока. Внутренний аксиальный магнитопровод с двумя активными торцовыми поверхностями с пазами установлен в корпусе между постоянным многополюсным магнитом индуктора возбуждителя с дополнительной обмоткой возбуждения возбуждителя и боковым аксиальным магнитопроводом с одной активной торцовой поверхностью с возможностью вращения относительно постоянного многополюсного магнита индуктора возбуждителя с дополнительной обмоткой возбуждения возбуждителя.

Генерируемое в известном аксиальном двухвходовом ветро-солнечном генераторе за счет преобразования механической энергии вращения напряжение пропорционально скорости вращения ротора относительно неподвижного корпуса:

$$U = C \cdot w_1 \cdot \Phi, \quad (1)$$

где C – конструктивный коэффициент, w_1 – скорость вращения ротора относительно неподвижного корпуса, прямо пропорциональная продольной составляющей скорости ветра; Φ – магнитный поток возбуждения.

Недостатком такого ветрогенератора является нестабильное по величине и частоте генерируемое напряжение.

Другим недостатком такого ветрогенератора является его низкая чувствительность к скорости ветра. При малой продольной составляющей скорости ветра известный аксиальный двухвходовый ветро-солнечный генератор не выходит на свою номинальную мощность, что приводит к уменьшению его КПД.

Более совершенной является ветроэлектрическая установка Fortis Alize фирмы «Fortis Wind Energy» (Нидерланды) [2], содержащая обтекатель, синхронный генератор с внутренним неподвижным статором с магнитопроводом якоря и наружным вращающимся ротором с постоянными магнитами, имеющими радиальную форму, лопасти, жестко закрепленные на переднем диске ротора, муфту, несущий вал, опорно-поворотное устройство, трос аварийного останова, демпфер, вал механизма свертывания, балку хвостовика, хвостовой стабилизатор, токосъемное устройство, опору головки, башню и лебедку ручного свертывания.

Однако, такая ветроэлектрическая установка также имеет низкие массогабаритные показатели из-за большого диаметра лопастей, нестабильное по величине и частоте выходное напряжение, низкую надёжность из-за наличия токосъемного устройства с подвижными контактами и недостаточной жесткости конструкции, связанной с отдельной сборкой напорной турбины (обтекателя и переднего диска для крепления лопастей) и наружного ротора ветрогенератора.

Кроме того, конструкция ротора известной из [2] ветрогенераторной установки вследствие сравнительно большого диаметра лопастей не обеспечивает минимального лобового сопротивления потоку ветра, а, следовательно, потери кинетической энергии при преобразовании ее в электрическую велики. Вследствие этого чувствительность ветрогенератора к скорости ветра низка, то есть минимальная скорость ветра, необходимая для преобразования его кинетической энергии в механическую энергию вращения ротора с последующим преобразованием в электрическую энергию, должна быть большой. При низкой скорости ветра КПД такого ветрогенератора низок.

Авторам удалось улучшить его массогабаритные показатели, стабилизировать выходное напряжение по величине и частоте, повысить чувствительности ветрогенератора к скорости ветра, повысить его коэффициент полезного действия (КПД) и надежность.

На рисунке 1 представлен общий вид разработанного многофазного ветрогенератора переменного тока [3] в разрезе.

Многофазный ветрогенератор переменного тока содержит: вал 13, внутренний статор и наружный ротор с постоянными магнитами 4 и обтекателем 11, лопасти 2.

Основание внутреннего статора выполнено в форме неподвижной платформы 24, жестко закрепленной на штанге-держателе 25, а боковая поверхность внутреннего статора образована наружной стороной выполненного в форме усеченного конуса магнитопровода 17 якоря с пазами, в которые уложена многофазная обмотка 16 якоря. Магнитопровод 17 якоря одной торцевой стороной жестко закреплен на неподвижной платформе 24, на которой установлен регулятор напряжения 18, а на противоположной торцевой стороне магнитопровода 17 якоря установлен передний подшипник 15, во внутреннем кольце которого установлен диск 14, жестко связанный с валом 13.

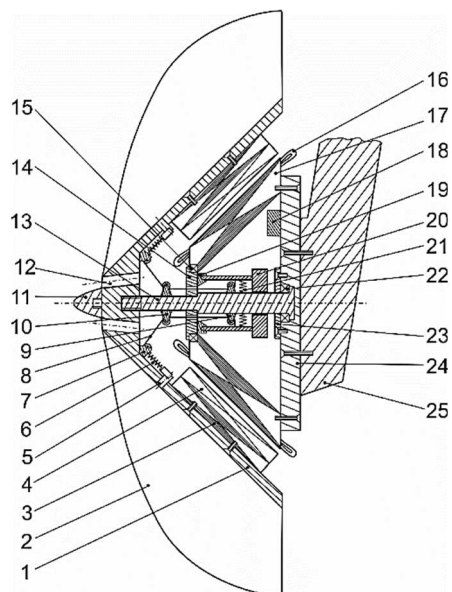


Рисунок 1

Наружный ротор выполнен в форме усеченного конуса, содержит ступицу 1, на внутренней поверхности которой жестко закреплен выполненный в форме усеченного конуса магнитопровод 3 индуктора с постоянными магнитами 4, выполненными в форме сегментов усеченного конуса, и жестко закреплен на валу 13, установленном в переднем 15 и заднем 22 подшипниках.

Задний подшипник 22 установлен в центре неподвижной платформы 24 и закреплен от перемещения в осевом направлении упорной шайбой 23.

В передней части ступицы 1 установлен обтекатель 11, вокруг которого в ступице 1 по окружности с центром на оси симметрии наружного ротора выполнены вентиляционные отверстия 12. В боковой части ступицы 1 выполнены отверстия, в которые установлены поворотные оси 5, жестко связанные с лопастями 2, закрепленными на внешней стороне ступицы 1.

На диске 14 со стороны неподвижной платформы 24 жестко установлены кронштейны 19, в которых закреплены центробежные грузы 20, связанные с поворотными осями 5 посредством тросов 8, пропущенных через ролики 7, установленные на внутренней поверхности ступицы 1, и ролики 9 и 10, жестко установленные на валу 13. Между поворотными осями 5 и роликами 7 установлены сжатые пружины 6, а между центробежными грузами 20 и валом 13 установлены растянутые пружины 21.

Поворотные оси 5 соединены с центробежными грузами 20 через тросы 8 таким образом, что при перемещении центробежных грузов 20 от вала 13 к внутренней поверхности магнитопровода 17 якоря лопасти 2 одновременно поворачиваются вместе с осями 5 на некоторый угол.

Многофазный ветрогенератор переменного тока работает следующим образом.

При набегании ветра на обтекатель 11 и лопасти 2, закрепленные на внешней стороне ступицы 1, его кинетическая энергия посредством лопастей 2 преобразуется в механическую энергию вращения: набегающий воздушный поток ветра посредством обтекателя 11 разделяется на два контура, при этом воздушный поток первого воздушного контура воздействует на лопасти 2 и приводит наружный ротор, жестко закрепленный на валу 13, установленном в переднем 15 и заднем 22 подшипниках, во вращение.

Воздушный поток второго воздушного контура, направленный обтекателем 11 через входные вентиляционные отверстия 12 во внутреннюю полость ветрогенератора, охлаждает расположенные во внутренней полости ветрогенератора узлы (передний 15 и задний 22 подшипники, магнитопровод 3 индуктора с постоянными магнитами 4, магнитопровод 17 якоря с многофазной обмоткой 16 якоря).

При вращении наружного ротора с жестко закрепленными на его внутренней поверхности магнитопроводом 3 индуктора с постоянными магнитами 4 магнитный поток постоянных магнитов 4 взаимодействует с многофазной обмоткой 16 якоря, уложенной в пазы магнитопровода 17 якоря, жестко закрепленного одной торцевой стороной на неподвижной платформе 24, которая жестко закреплена на штанге-держателе 25.

В результате этого взаимодействия в многофазной обмотке 16 якоря генератора наводится многофазная система ЭДС, которая через регулятор напряжения 18 подается в сеть.

Упорная шайба 23 удерживает задний подшипник 22 от перемещения в осевом направлении.

Благодаря выполнению магнитопроводов индуктора 3 и якоря 17 в форме усеченного конуса при вращении наружного ротора под действием центробежных сил возникает ускорение движения



воздушного потока через воздушный зазор в окружающую атмосферу, что способствует более эффективному охлаждению генератора.

Частота выходного напряжения определяется частотой вращения наружного ротора с магнитопроводом 3 индуктора с постоянными магнитами 4 относительно внутреннего статора с магнитопроводом 17 якоря с пазами, в которые уложена многофазная обмотка 16 якоря. Автоматическая стабилизация частоты вращения наружного ротора осуществляется следующим образом.

При номинальной частоте вращения наружного ротора предлагаемого многофазного ветрогенератора переменного тока центробежные грузы 20 под действием центробежных сил и сил упругости растянутых пружин 21 удерживаются относительно вала 13 в среднем положении. При этом лопасти 2 под действием сил упругости сжатых пружин 6 и при помощи тросов 8, жестко связанных с центробежными грузами 20, закрепленными на кронштейнах 19, закрепленных на диске 14, также удерживаются в среднем положении. Коэффициент упругости пружин 6 и 21 выбирается таким образом, чтобы центробежные грузы 20 находились в среднем положении при номинальной частоте вращения наружного ротора.

Если частота вращения наружного ротора становится выше номинальной, то центробежные силы, действующие на центробежные грузы 20, увеличиваются. При этом центробежные грузы 20 удаляются от вала 13, прижимаясь к внутренней поверхности магнитопровода 17 якоря, а растянутые пружины 21 растягиваются сильнее. При удалении центробежных грузов 20 от вала 13, тросы 8, протянутые через систему роликов 7, 9 и 10, жестко связанные с центробежными грузами 20 и поворотными осями 5, перемещаются, вследствие чего поворотные оси 5 поворачиваются и сильнее сжимают сжатые пружины 6. При этом лопасти 2, жестко связанные с поворотными осями 5, также поворачиваются, причём разворот лопастей 2 происходит таким образом, что угол атаки лопастей 2 уменьшается, вследствие чего воздушный поток первого воздушного контура оказывает на лопасти 2 меньшее воздействие, давление воздушного потока на лопасти 2 уменьшается, следовательно, частота вращения наружного ротора уменьшается до номинального значения.

Если частота вращения наружного ротора становится ниже номинальной, то центробежные силы, действующие на центробежные грузы 20, уменьшаются. При этом центробежные грузы 20 приближаются к валу 13, удаляясь от внутренней поверхности магнитопровода 17 якоря, а растяжение растянутых пружин 21 уменьшается. При приближении центробежных грузов 20 к валу 13, тросы 8, протянутые через систему роликов 7, 9 и 10, жестко связанные с центробежными грузами 20 и поворотными осями 5, перемещаются, при этом натяжение тросов 8 ослабевает, и сжатые пружины 6 разжимаются, вследствие чего поворотные оси 5 поворачиваются. При этом лопасти 2, жестко связанные с поворотными осями 5, также поворачиваются, причём разворот лопастей 2 происходит таким образом, что угол атаки лопастей 2 увеличивается, вследствие этого воздушный поток первого воздушного контура оказывает на лопасти 2 большее воздействие, давление воздушного потока на лопасти 2 увеличивается, и частота вращения наружного ротора увеличивается до номинального значения.

Для расчёта, представленного выше ветрогенератора и других синхронных генераторов конечного конструктивного исполнения для гибридных энергетических комплексов проанализированы методы расчёта генераторов радиального и аксиального конструктивного исполнения [4, 5 и др.]. Все методы и формулы, использованные для расчёта генератора, можно разделить на две группы:

- известные методы и формулы [6–12];
- методы и формулы, разработанные в ходе исследования с учётом изменения формы магнитной системы генератора [13–16].

Для расчёта массы разработанного ветрогенератора при установлении зависимости массы эквивалентных ЭМ с ПМ от угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора выведен ряд формул:

- формула (3) расчёта массы зубцов якоря (выведена при установлении зависимости массы эквивалентных ЭМ с ПМ [17],
- формула (4) расчёта массы ярма якоря;
- формула (5) расчёта массы постоянных магнитов;
- формула (6) расчёта массы ярма индуктора.

Для расчёта синхронного генератора с ПМ для гибридного энергетического комплекса выбраны следующие исходные данные:

1. Номинальная мощность $P_{ном} = 15000 \text{ В} \cdot \text{А}$;
2. Номинальное фазное напряжение $U_{ф} = 115 \text{ В}$;
3. Число фаз $m = 3$;
4. Номинальная частота вращения $n = 4000 \text{ об/мин}$;
5. Частота $f = 400 \text{ Гц}$;
6. Коэффициент мощности при номинальной нагрузке $\cos(\varphi) = 0,84$;
7. Предварительное значение линейной нагрузки $A_{гр} = 28000 \text{ А/м}$ (А по табл. 1);
8. Предварительное значение индукции в зазоре $B_{дгр} = 0,8 \text{ Тл}$ (B_{δ} по табл. 1);
9. Относительная ЭДС $E_{отн} = (1,05–1,25 - \text{меньшее значение при большей мощности})$.

Выберем $E_{отн} = 1,10$.



Таблица 1 – Значения линейной нагрузки и индукции в воздушном зазоре

Рном, кВ·А	20	30	40	60	80	90	100	Примечание
А, А/м	36000	40000	42000	45000	46000	47000	48000	Без перегрузки
А, А/м	30000	31000	32000	33000	35000	36000	38000	При двукратной перегрузке
Вд, Тл	0,8	0,82	0,85	0,88	0,9	0,95	1,0	Без перегрузки
Вд, Тл	0,82	0,85	0,88	0,91	0,95	1,0	1,1	При двукратной перегрузке

10. Коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_k = (0,8–0,9)$;
Выберем $\alpha_k = 0,85$;
11. Остаточное значение магнитной индукции ПМ $B_r = (1,1–1,25)$, Тл;
Выберем $B_r = 1,15$ Тл;
12. Коэффициентная сила ПМ $H_c = (840000–900000)$, А/м;
Выберем $H_c = 880000$;
13. Коэффициент перегрузки по току $k_{кз} = (2–3)$;
Выберем $k_{кз} = 2$;
14. Угол наклона воздушного зазора $\alpha = 135^\circ$.

Разработанная методика и формулы к ней представлены в [13, с. 102], расчет разработанного и изготовленного генератора для ГЭК представлен ниже.

1. Площадь поперечного сечения паза, м²:

$$Q_{II} = (h_{II} - h_{yc}) \cdot b_{Пвт} \quad (2)$$

$$Q_{II} = (0,00713 - 0,0007) \cdot 0,00554 = 0,00003562 \cdot$$

2. Масса зубцов якоря, кг (формула расчёта $m_{Z_{як}}$ выведена автором)

$$m_{Z_{як}} = (\pi \cdot (D_0 + (h_{II} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) \cdot h_{II} - Q_{II} \cdot Z) \cdot l_{акм_{вт}} \cdot k_{зс1} \cdot \rho_{ст} \quad (3)$$

где $\rho_{ст} = 7800$ кг/м³ – плотность стали.

$$m_{Z_{як}} = (3,1415 \cdot (0,1687 + (0,00713 + 0,00055) \cdot \cos(135^\circ)) \cdot 0,00713 - 0,0003562 \cdot 45) \cdot 0,0446 \cdot 0,95 \cdot 7800 = 0,6927.$$

3. Масса ярма якоря, кг (формула расчёта $m_{ЯР_{як}}$ выведена автором)

$$m_{ЯР_{як}} = \pi(D_0 + (2 \cdot h_{II} + h_{ЯР_{як}} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) \cdot h_{ЯР_{як}} \cdot l_{акм_{вт}} \cdot k_{зс1} \cdot \rho_{ст} \quad (4)$$

$$m_{ЯР_{як}} = 3,1415 \cdot (0,1687 + (2 \cdot 0,00713 + 0,0081 + 0,00055) \cdot \cos(135^\circ)) \cdot 0,0081 \cdot 0,0446 \cdot 0,95 \cdot 7800 = 1,269.$$

4. Масса магнитов, кг:

$$m_{МАГН} = \pi \rho_{МАГН} l_{МАГН} h_{МАГН} a_p (D_0 - (h_{МАГН} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) \quad (5)$$

где $\rho_{МАГН} = 7800$ кг/м³ – плотность магнита.

$$m_{МАГН} = 3,14 \cdot 7800 \cdot 0,0486 \cdot 0,0272 \cdot 0,85 (0,1687 - (0,0272 + 0,00055) \cdot \cos(135^\circ)) = 4,735.$$

5. Масса ярма индуктора, кг:

$$m_{ЯР_{инд}} = \pi(D_0 + (2 \cdot h_{магн} + h_{ЯР_{инд}} + \delta) \cdot \cos(\alpha)) \cdot h_{ЯР_{инд}} \cdot l_{магн} \cdot k_{зс2} \cdot \rho_{ст} \quad (6)$$

$$m_{ЯР_{инд}} = 3,1415 \cdot (0,1687 + (2 \cdot 0,0272 + 0,00883 + 0,00055) \cdot \cos(140^\circ)) \cdot 0,00883 \cdot 0,0486 \cdot 0,95 \cdot 7800 = 1,1756.$$

6. Масса обмотки якоря, кг:

$$m_{обм_{як}} = w_{фвт} \cdot m \cdot q_{ЯК_{эл_проект}} \cdot l_{вср} \cdot 8900 \cdot 1,05 \quad (7)$$

$$m_{обм_{як}} = 60 \cdot 3 \cdot 2,37 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1993 \cdot 8900 \cdot 1,05 = 0,7958.$$

7. Масса активных материалов, кг:

$$m_{АКТ_МАТ} = m_{Z_{як}} + m_{ЯР_{як}} + m_{МАГН} + m_{ЯР_{инд}} + m_{обм_{як}} \quad (8)$$



$$m_{\text{АКТ_МАТ}} = 0,6637 + 1,2455 + 4,7348 + 1,1756 + 0,7958 = 8,6154$$

8. Конструктивный коэффициент (коэффициент привеса):

$k_M = (1,2-1,5)$ зависит от мощности ЭМ, её типа, конструктивного исполнения, угла наклона воздушного зазора к оси вращения ротора.

Выберем $k_M = 1,25$.

9. Полная масса машины, кг:

$$m_{\text{ПОЛН}} = m_{\text{АКТ_МАТ}} \cdot k_M, \quad (9)$$

$$m_{\text{ПОЛН}} = 8,6154 \cdot 1,25 = 10,77.$$

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

Литература

1. Аксиальный двухходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов // патент на изобретение RUS 2561504, 16.06.2014.
2. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. – Севастополь : изд. Севастопольский национальный технический университет, 2003. – Кн. 1: Ветроэлектрогенераторы. – 400 с.
3. Многофазный ветрогенератор переменного тока / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // патент на изобретение RUS 2658316, 07.07.2017.
4. 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.
5. 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..
6. Балагуров, В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока : учебное пособие. – М. : Высшая школа. – 1982. – 272 с.
7. Балагуров В.А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. – М. : Энергоатомиздат. – 1988. – 280 с.
8. Балагуров В.А. Бесконтактные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, В.М. Гридин, В.К. Лозенко. – М. : Энергия. – 1975. – 127 с.
9. Ганджа С.А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором // журнал Вестник ЮУрГУ. – Челябинск : изд-во ЮУрГУ. – 2009. – № 34. – С. 68–72.
10. Ганджа С.А. Методика инженерного расчёта вентильных электрических машин с аксиальным воздушным потоком / С.А. Ганджа, А.С. Мартыанов // журнал Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ. – 2013. – Вып. № 2. – Т. 13. – С. 85–87.
11. Ганджа С.А. Определение оптимальных габаритных размеров для вентильных машин с аксиальным магнитным потоком (ВМАП) / С.А. Ганджа, А.С. Мартыанов // журнал Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ. – 2013. – Вып. № 2. – Т. 13. – С. 88–90.
12. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков. – М. : Издательство Юрайт. – 2011. – 4е изд. перераб. и доп. – 767 с.
13. 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. 95–106. – URL : <http://vestnik.adygnet.ru>
14. Сквозное проектирование синхронных электрических машин с постоянными магнитами / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев, А.В. Ракло // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер.: Естественно-математические и технические науки. – 2016. – Вып. 3 (186). – С. 114–121. – URL : <http://vestnik.adygnet.ru>
15. 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>
16. Состояние и перспективы развития авиационных ветроэнергетических комплексов для аварийных систем электроснабжения воздушных судов / Я.М. Кашин, А.С. Князев, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, К.З. Артеян // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер.: Естественно-математические и технические науки. – 2019. – Вып. – 1 (236). – С. 93–102. – URL : <http://vestnik.adygnet.ru>
17. Кашин Я.М. Эквивалентные электрические машины. Исследование эквивалентных радиальных и аксиальных синхронных генераторов с постоянными магнитами // Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, А.С. Князев // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2016. – № 1. – С. 3–12.

References

1. Axial two-way non-contact wind-solar generator / B.Kh. Gaitov, Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov // Patent for invention RUS 2561504, 16.06.2014.
2. Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. Inexhaustible Energy. – Sevastopol : prod. Sevastopol National Technical University, 2003. – Book 1: Wind Power Generators. – 400 p.



3. Multiphase ac wind generator / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyasev // Patent for invention RUS 2658316, 07.07.2017.
4. Stabilized DC axial-radial direct-current valve wind generator / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyasev // Patent for invention RUS 2689211, 22.03.2018.
5. Stabilized DC axial-conical direct-current valve wind generator / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyasev // Patent for invention RUS 2688925, 22.03.2018.
6. Balagurov V.A. Design of special AC electric machines : tutorial. – M. : Higher school. – 1982 – 272 p.
7. Balagurov V.A. Electric generators with permanent magnets / V.A. Balagurov, F.F. Galteev. – M. : Energoatomizdat. – 1988. – 280 p.
8. Balagurov V.A. Contactless DC motors with permanent magnets / V.A. Balagurov, V.M. Gridin, V.K. Lozenko. – M. : Energy. – 1975. – 127 p.
9. Ganja S.A. Optimal design of electric drives based on valve electric machines with axial clearance // Journal of YuUrSU. – Chelyabinsk : Ed. YuurSU. – 2009. – № 34. – P. 68–72.
10. Ganja S.A. Method of engineering calculation of valve electric machines with axial airflow / S.A. Ganja, A.S. Martianov // Journal of the UURSU. Series: Energy. – Chelyabinsk : Publishing Center of YuUrSU. – 2013. – Issue № 2. – Vol. 13. – P. 85–87.
11. Ganja S.A. Determination of optimal overall dimensions for Axial Magnetic Flux Valve Machines (VMAP) / S.A. Ganja, A.S. Martianov // Journal UURSU. Series: Energy. – Chelyabinsk : Publishing Center of YuUrSU. – 2013. – Issue № 2. – Vol. 13. – P. 88–90.
12. Kopylov I.P. Design of electric machines: textbook for universities / I.P. Kopylov, F.A. Goryinov, B.K. Klokov – M. : Yurait Publishing House. – 2011. – 4th ed. reslave. and additional. – 767 p.
13. 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>
14. Through designing synchronous electric machines with permanent magnets / Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, A.S. Knyazev, A.V. Raklo // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser.: Natural-Mathematical and Technical Sciences. – 2016. – Iss. 3 (186). – P. 114–121. – URL: <http://vestnik.adygnet.ru>
15. Mass-dimensional 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>
16. The state and prospects of development of aviation wind power systems for emergency power supply systems of aircraft / Ya.M. Kashin, A.S. Knyazev, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov, K.Z. Artinian // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser.: Natural-Mathematical and Technical Sciences. – 2016. – Iss. 1 (236). – P. 93–102. – URL : <http://vestnik.adygnet.ru>
17. Kashin Ya.M., Kashin A.Ya., Knyazev A.S. Equivalent electrical machines. Study of equivalent radial and axial synchronous generator with permanent magnets // Lead institutions of higher education of Thernosemee. – 2016. – № 1. – P. 3–12.