

## Ветро-солнечный генератор для систем автономного электроснабжения

ГАЙТОВ Б.Х., КАШИН Я.М., КОПЕЛЕВИЧ Л.Е., САМОРОДОВ А.В., КАШИН А.Я., СХАШОК А.О., КИМ В.А.

*Рассматриваются проблемы создания и исследования ветро-солнечного генератора на базе двухвходовой электрической машины. Решаются вопросы конструкции и работы электромеханического преобразователя энергии, в котором возможно одновременное преобразование энергии, поступающей на «механический» и «электрический» входы машины. Ветро-солнечный генератор (ВСГ) на базе двухвходовой электрической машины представляет собой сложное электромеханическое устройство: совмещает в одном корпусе два девятифазных синхронных генератора переменного тока, два девятифазных выпрямителя и трехфазный синхронный генератор переменного тока. (Девятифазные синхронные генераторы нужны для снижения коэффициента пульсации.) Особенность рассматриваемой в статье машины – возможность её эффективного использования, например, в качестве преобразователя механической энергии вращения (энергии ветра), поступающей на механический вход машины, и электрической энергии постоянного тока (световой энергии Солнца, преобразованной фотоэлектрическими преобразователями в электроэнергию постоянного тока). Моделирование переходных процессов в машинах проведено в среде MATLAB, приведенные характеристики получены в результате математического эксперимента.*

*Ключевые слова:* электромеханические преобразователи энергии, возобновляемые источники энергии, ветро-солнечный генератор, двухвходовая электрическая машина, моделирование электромеханических и электромагнитных процессов

В альтернативной энергетике по-разному решается вопрос одновременного использования сразу нескольких возобновляемых источников энергии (ВИЭ), например ветра и Солнца.

Применение электрических машин (ЭМ) в традиционной энергетике решает задачу преобразования энергии ветра, Солнца и других ВИЭ в электрическую энергию в две ступени, а иногда и более: сначала – в механическую энергию турбины, затем – в электрическую энергию на зажимах генератора, приводимого во вращение турбиной, затем – преобразование в постоянный ток и инвертирование его в переменный [1–4]. Такая процедура представляется громоздкой и малоэффективной, особенно если речь идет о комплексном использовании нескольких ВИЭ в рамках одной энергосистемы.

Другим, не менее важным, является вопрос одновременного комплексного использования нескольких видов ВИЭ, что позволяет более эффективно организовать электроснабжение и уменьшить зависимость получения потребителями электроэнергии от одного источника. Такое суммирование энергии нескольких источников позволяет увеличить мощность получаемой, например, электрической энергии и одновременно в достаточной степе-

ни выровнять график выработки энергии, приняв в качестве первичных природные источники энергии, работающие, как правило, в противофазе.

Использование энергии ветра предусматривает преобразование механической энергии в электрическую энергию переменного тока, использование энергии Солнца – преобразование ее в электрическую энергию постоянного тока. Простое суммирование энергии постоянного и переменного тока невозможно, так как приводит к необходимости создания неоправданно сложной преобразовательной установки.

Научный и практический интерес представляет исследование перспективных электромеханических преобразователей для ВИЭ в составе систем автономного электроснабжения (САЭ).

Перспектива расширенного использования ВИЭ напрямую связана с приоритетным направлением развития электроэнергетики, а именно, с разработкой электроустановок на основе применения методов прямого преобразования видов энергии, т.е. с проблемой создания новых типов электромеханических преобразователей и систем управления ими.

Суммирование энергии от нескольких ВИЭ в одной установке энергетически выгоднее, чем от

нескольких установок, каждая из которых получает энергию от одного из ВИЭ [5–8]. Создание таких устройств, в частности электрических генераторов, в которых происходит суммирование энергии от нескольких ВИЭ, является актуальной задачей. Подобные машины должны иметь несколько входов, каждый из которых подключается к своему источнику энергии. В силу повсеместной доступности энергии Солнца и ветра целесообразно создавать двухвходовые ЭМ, т.е. машины, имеющие два входа для подключения двух различных источников энергии.

Работы, связанные с альтернативной энергетикой, в основном направлены на совершенствование использования электромеханических преобразователей энергии при преобразовании одного вида ВИЭ [1–12]. Разработка, проектирование и исследование специальных ЭМ рассматриваются в литературе без учета особенностей работы оборудования для ветро-солнечной энергетики [13–16], т.е. без учета перманентного изменения входных параметров ЭМ. Таким образом, на повестке дня стоит вопрос разработки электромеханического преобразователя энергии для использования в системах «ветер + солнце = электрическая энергия».

В Кубанском государственном технологическом университете на протяжении ряда лет ведутся работы, связанные с ВИЭ [17–22]. На рис. 1 приведена схема классического электротехнического ветро-солнечного комплекса, на рис. 2 – электротехнического ветро-солнечного комплекса на базе двухвходовой электрической машины (ДЭМ).

Двухвходовая электрическая машина [18] представляет собой электромеханическое устройство, в корпусе которого размещены два многофазных (например, девятифазных) синхронных генератора переменного тока, два многофазных (например, девятифазных) выпрямителя и трехфазный синхронный генератор переменного тока (многофазность синхронного генератора нужна для снижения коэффициента пульсации выпрямленного напряжения).

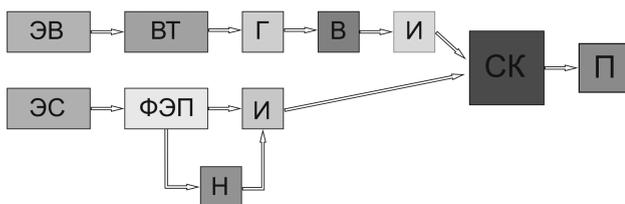


Рис. 1. Схема классической электростанции на базе фотоэлектрического преобразователя и ветротурбины: ЭВ – энергия ветра; ЭС – энергия Солнца; ВТ – ветротурбина; Г – генератор; ФЭП – фотоэлектрический преобразователь; Н – накопитель; И – инвертор; В – выпрямитель; СК – сумматор-контроллер; П – потребитель

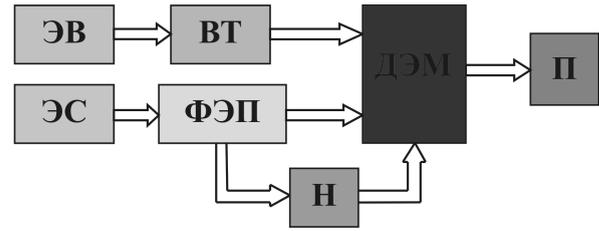


Рис. 2. Схема электростанции на базе фотоэлектрического преобразователя и ветротурбины с использованием двухвходовой электрической машины: ЭВ – энергия ветра; ЭС – энергия Солнца; ВТ – ветротурбина; ФЭП – фотоэлектрический преобразователь; Н – накопитель; ДЭМ – двухвходовая электрическая машина; П – потребитель

На рис. 3 приведена конструкция ДЭМ [18], на рис. 4 – ее электрическая схема. На рисунках: корпус 1; постоянный многополюсный магнит 2 индуктора подвозбудителя, жестко установленный в корпусе 1; магнитопровод 3 с двумя активными торцевыми поверхностями, в пазы которого со стороны постоянного многополюсного магнита 2 индуктора подвозбудителя уложена обмотка 4 якоря подвозбудителя, а с противоположной стороны – однофазная обмотка 5 возбуждения возбудителя и дополнительная обмотка 6 возбуждения возбудителя; внутренний аксиальный магнитопровод 7 с многофазной обмоткой 8 якоря возбудителя и однофазной обмоткой возбуждения 9 основного генератора; аксиальный магнитопровод 10 с многофазной обмоткой 11 якоря основного генератора; вал 12, закрепленный в подшипниковых узлах 13 и 14 и жестко связанный с постоянным многополюсным магнитом 2 индуктора подвозбудителя посредством диска 15 и с внутренним аксиальным магни-

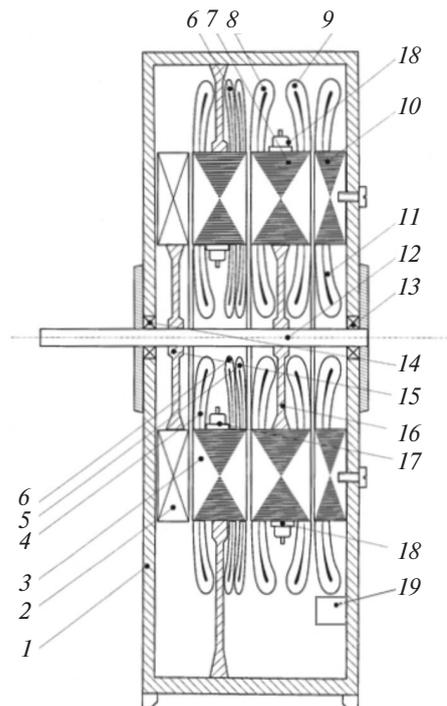


Рис. 3. Двухвходовая электрическая машина в разрезе

топроводом 7 посредством диска 16; девятифазные выпрямители 17 и 18; контакты 19 для подключения внешнего источника постоянного тока (например, солнечной батареи) к дополнительной обмотке 6 возбуждения возбудителя.

Однофазная обмотка 5 возбуждения возбудителя подключается к многофазной обмотке 4 якоря подвозбудителя через многофазный выпрямитель 17. Однофазная обмотка 9 возбуждения основного генератора подключается к многофазной обмотке 8 якоря возбудителя через многофазный выпрямитель 18. С трехфазной обмотки 11 якоря основного генератора трехфазная ЭДС может подаваться в сеть.

Двухвходовая машина работает следующим образом. При вращении вала 12 внешним механизмом (например, ветротурбиной) вместе с ним приводятся во вращение постоянный многополюсный магнит 2 индуктора подвозбудителя и магнитопровод 7 с обмотками 8, 9 и выпрямителем 18. Создаваемый постоянным многополюсным магнитом 2 магнитный поток взаимодействует с многофазной обмоткой 4 якоря подвозбудителя, уложенной в пазы магнитопровода 3 со стороны постоянного многополюсного магнита 2, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется девятифазным выпрямителем 17 и подается на однофазную обмотку 5 возбуждения возбудителя, уложенную в пазы внутреннего аксиального магнитопровода 3 со стороны магнитопровода 7. При этом в однофазной обмотке 5 возбуждения возбудителя создается магнитный поток.

Магнитный поток, созданный однофазной обмоткой 5 возбуждения возбудителя, складывается с направленным согласно магнитным потоком, создаваемым дополнительной обмоткой 6 (появление тока в обмотке 6 обеспечивается подачей на нее через контакты 19 постоянного напряжения, на-

пример, от солнечных батарей). По принципу суперпозиции магнитных полей магнитные потоки, создаваемые обмотками 5 и 6, суммируются. Результирующий магнитный поток наводит во вращающейся обмотке 8 якоря возбудителя, уложенной в пазы аксиального магнитопровода 7 со стороны аксиального магнитопровода 3, многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется многофазным (на рис. 4 – девятифазным) выпрямителем 18 и подается на однофазную обмотку 9 возбуждения основного генератора, уложенную в пазы аксиального магнитопровода 7 со стороны аксиального магнитопровода 10. При этом в однофазной обмотке 9 возбуждения основного генератора создается магнитный поток, который наводит в обмотке 11 якоря основного генератора трехфазную ЭДС для подачи в сеть.

Представляется целесообразным, построив математическую модель ДЭМ, провести на ее основе математический эксперимент по исследованию динамических и регулировочных характеристик машины. Математическая модель была построена в среде MathWorks [29] (рис. 5). В таблице приведены назначения блоков схемы на рис. 5.

При составлении модели были приняты допущения: сопротивление обмоток ДЭМ не зависит от ее температуры; взаимдукция между всеми обмотками одного узла одинаковая; постоянный магнит (поз. 2 на рис. 3 и 4) заменен в математической модели устройством с обмоткой возбуждения; параметры обмоток по продольной и поперечной осям приняты одинаковыми.

Заданное значение скорости ветра подается на вход блока 1 и через блоки 4 и 5 поступает на вход  $n_1$  блока 7. Вход  $n_1$  блоков 7, 12 и 16 моделирует механический вход ДЭМ – вал 12. Электрический сигнал из блока 2 подается на вход  $n_2$  блока 7 (для регулирования степени намагничивания многопо-

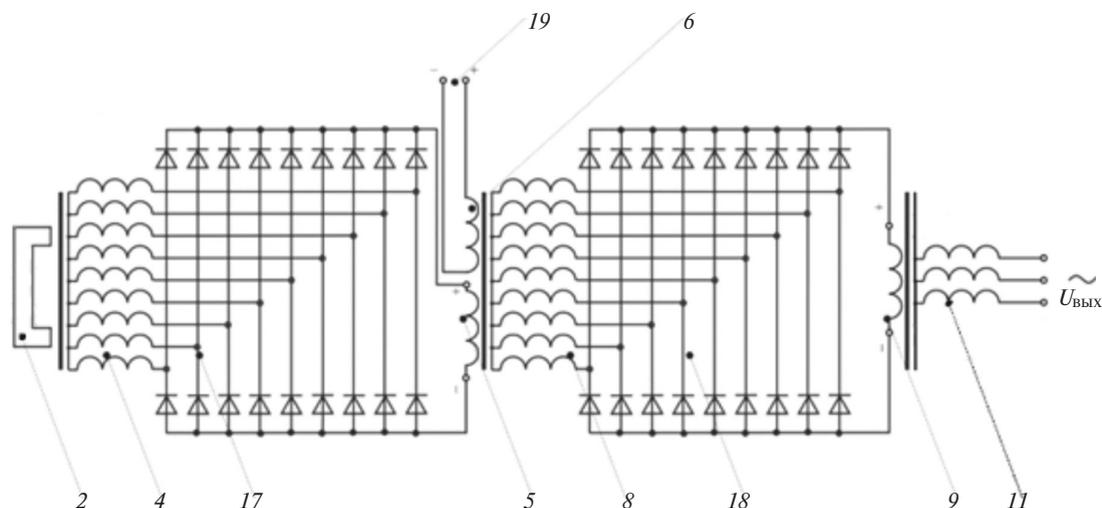


Рис. 4. Электрическая схема ДЭМ

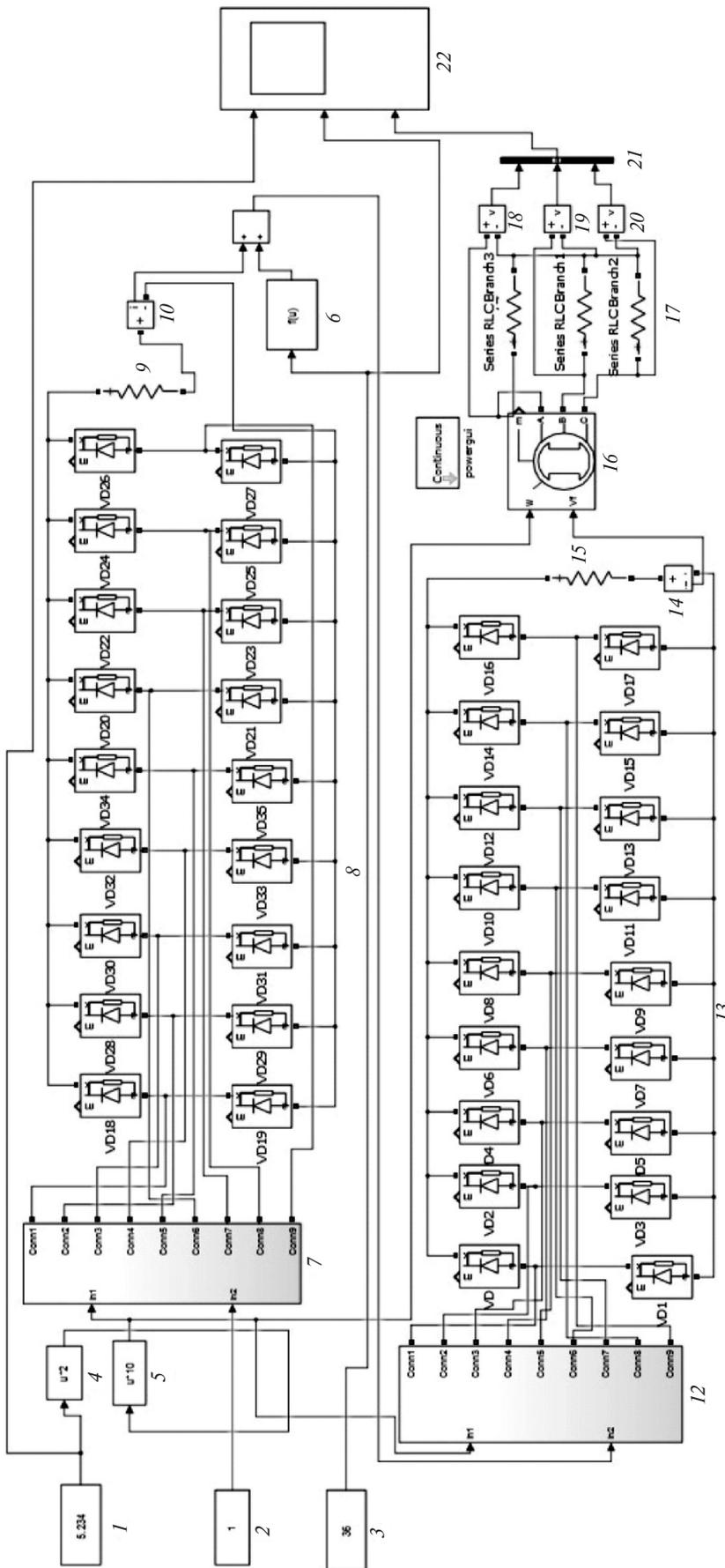


Рис. 5. Структурная схема модели ВСГ

№ блока	Название блока	Назначение блока
1	Constant	Предназначен для задания скорости ветра
2	Constant	Предназначен для задания параметров намагничивания многополюсного магнита 2 индуктора подвозбудителя
3	Constant	Предназначен для задания параметров напряжения солнечной батареи
4, 5	Fcn	Предназначен для моделирования ветротурбины
6	Fcn	Модель дополнительной обмотки 6 возбуждения возбудителя
7	Модель девятифазного синхронного генератора	Модель многофазной обмотки 4 якоря подвозбудителя
8	Модель девятифазного выпрямителя	Модель многофазного (девятифазного) двухполупериодного выпрямителя 17
9	Активное сопротивление	Модель активного сопротивления двухполупериодного многофазного (девятифазного) выпрямителя 17
10	Current Measurement	Предназначен для измерения тока в однофазной обмотке 5 возбуждения возбудителя
11	Add	Предназначен для моделирования суммирования магнитных потоков, создаваемых токами в обмотках 5 и 6 возбуждения возбудителя
12	Модель девятифазного синхронного генератора	Модель многофазной обмотки 8 якоря возбудителя
13	Модель девятифазного выпрямителя	Модель многофазного (девятифазного) двухполупериодного выпрямителя 18
14	Current Measurement	Предназначен для измерения тока в однофазной обмотке 9 возбуждения основного генератора
15	Активное сопротивление	Модель активного сопротивления двухполупериодного многофазного (девятифазного) выпрямителя 18
16	Synchronous Machine SI Fundamental	Модель трехфазной обмотки 11 основного генератора
17	Блок нагрузки	Нагрузка основного генератора
18, 19, 20	Voltage Measurement	Предназначен для измерения параметров выходного напряжения (модели вольтметров для каждой фазы) основного генератора, снимаемого с трехфазной обмотки 11 якоря основного генератора
21	Bus creator	Выполняет функцию шины
22	Scope	Выполняет функцию осциллографа

люсного магнита 2 индуктора подвозбудителя). Выходной сигнал из блока 7 (модель многофазной обмотки 4 якоря подвозбудителя – рис. 4) поступает на вход блока 8 (модель многофазного двухполупериодного выпрямителя 17 – рис. 4), на котором девятифазный переменный ток преобразуется в постоянный. Выпрямленный ток поступает на вход блока 11, на второй вход которого подается ток из блока 6 (модель дополнительной однофазной обмотки 6 возбуждения возбудителя с контактами 19 – рис. 3, 4), на который поступает напряжение солнечной батареи с выхода блока 3.

На блоке 11 токи из блоков 8 и 6 суммируются (моделирование суперпозиции магнитных полей, созданных токами обмоток 5 и 6 возбуждения возбудителя) и подаются на вход  $n_2$  блока 12 (модель многофазной обмотки 8 якоря возбудителя – рис. 3, 4). На механический вход  $n_1$  блока 12 поступает сигнал из блока 5. Выходной ток из блока 12 (многофазной обмотки 8 якоря возбудителя – рис. 4) подается на блок 13 (модель многофазного двухполупериодного выпрямителя 8 – рис. 4), на котором девятифазный переменный ток преобразу-

ется в постоянный и поступает на вход  $n_2$  блока 16 (модель однофазной обмотки 9 возбуждения основного генератора – рис. 3, 4). На вход  $n_1$  блока 16 подается сигнал от блока 5. Выходное напряжение блока 16 подается на вход блока 17 (модель трехфазной обмотки 11 якоря основного генератора), которое измеряется блоками 18, 19, 20 и подается на осциллограф через шину.

На рис. 6–10 представлены характеристики ветро-солнечного генератора (ВСГ) на базе ДЭМ, полученные в результате математического эксперимента.

Анализ характеристик, полученных в результате математического моделирования и приведенных на рис. 6–10, позволяет сделать следующие заключения.

Увеличение тока, протекающего по дополнительной обмотке 6 возбуждения возбудителя (что соответствует увеличению напряжения на выходе солнечных батарей), приводит к увеличению значения выходного напряжения ДЭМ по нелинейному закону (рис. 6). Причем повышение напряжения солнечных батарей выше 24 В не приводит к более существенному росту выходного напря-

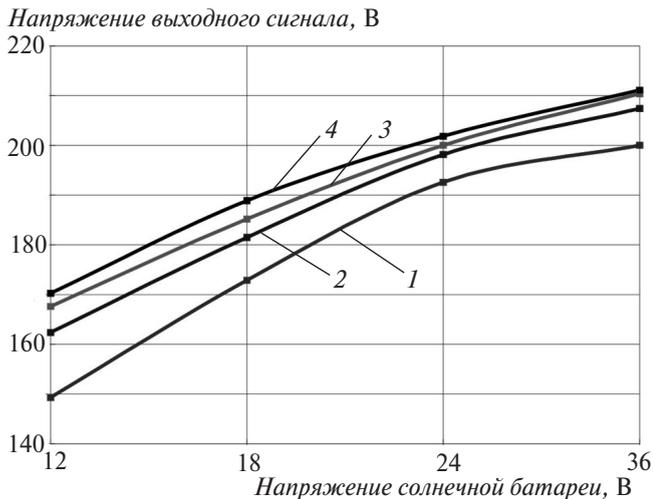


Рис. 6. Зависимость действующего значения установившегося выходного напряжения ДЭМ от напряжения солнечной батареи ( $I_{\text{намагн}} = 1$  А): 1 –  $V=3$  м/с; 2 –  $V=5,234$  м/с; 3 –  $V=7$  м/с; 4 –  $V=10$  м/с

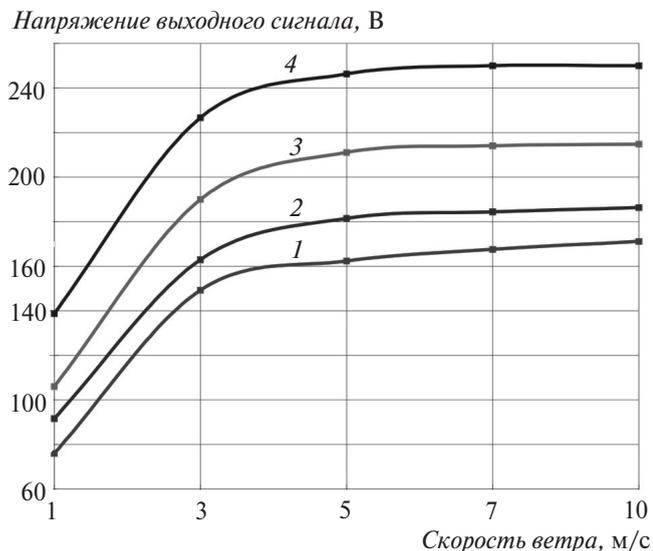


Рис. 7. Зависимость действующего значения установившегося выходного напряжения ДЭМ от скорости ветра ( $I_{\text{намагн}} = 1$  А): 1 –  $U_c = 12$  В; 2 –  $U_c = 24$  В; 3 –  $U_c = 36$  В; 4 –  $U_c = 48$  В

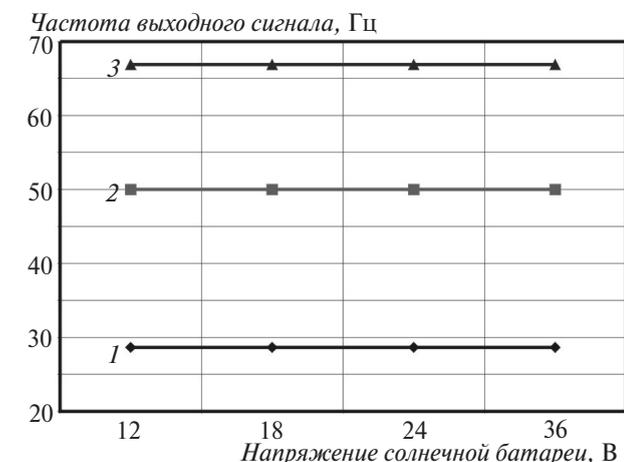


Рис. 8. Зависимость частоты выходного напряжения ДЭМ от напряжения солнечной батареи ( $I_{\text{намагн}} = 1$  А): 1 –  $V=3$  м/с; 2 –  $V=5,234$  м/с; 3 –  $V=7$  м/с

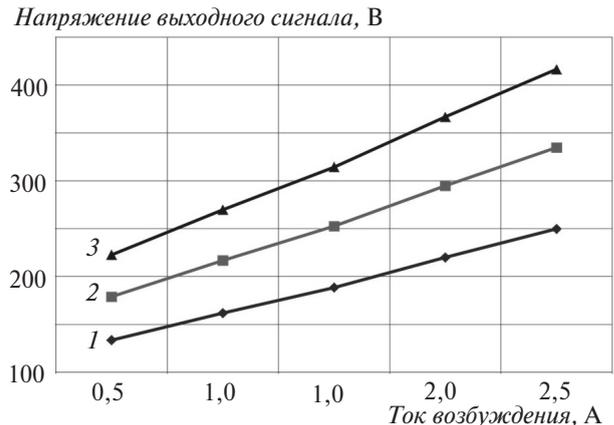


Рис. 9. Зависимость действующего значения установившегося выходного напряжения ДЭМ от параметров намагниченности постоянного магнита индуктора подвозбудителя ( $V=5,23$  м/с): 1 –  $U_c = 12$  В; 2 –  $U_c = 24$  В; 3 –  $U_c = 26$  В

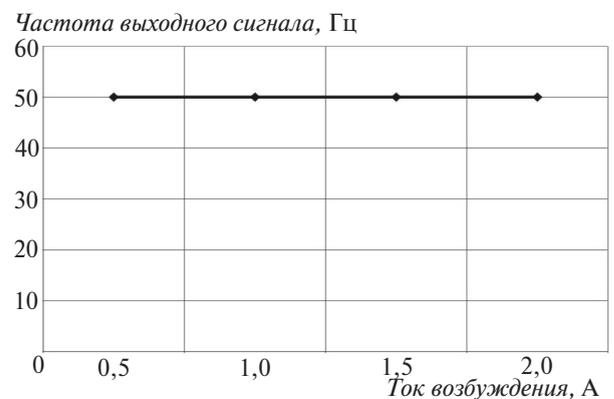


Рис. 10. Зависимость частоты выходного напряжения ДЭМ от намагниченности постоянного магнита индуктора подвозбудителя ( $V=5$  м/с;  $U_c = 36$  В)

жения, что объясняется насыщением магнитопровода 3 ДЭМ.

Увеличение скорости ветра свыше значения 5,23 м/с (рис. 7), что соответствует частоте вращения вала машины 1000 об/мин, принятой за номинальное значение, при различных значениях напряжения солнечной батареи приводит к незначительному росту выходного напряжения. Это также объясняется насыщением магнитопровода 3 ДЭМ.

Изменения напряжения солнечной батареи (рис. 8) и степени намагничивания многополюсного магнита индуктора подвозбудителя (рис. 10) не оказывают влияния на частоту выходного напряжения ДЭМ, т.к. она зависит от частоты вращения вала 12 машины, которая в свою очередь зависит от скорости ветра.

Значение выходного напряжения ДЭМ зависит также от степени намагничивания многополюсного магнита 2 индуктора подвозбудителя.

**Вывод.** Предложенная конструкция ветро-солнечного генератора на базе двухвходовой электрической машины является работоспособной. Моделирование ДЭМ в среде MATLAB позволяет прове-

ритель основные соотношения ее параметров и характеристик. Характеристики машины, полученные в результате математического моделирования, могут стать основой для проектирования машины и разработки инженерной методики ее расчета.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Краснодарского края в рамках научного проекта №16-48-230500 «р\_а».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.** Неисчерпаемая энергия. — Севастополь: Изд-во Севастопольского национального технического университета, 2003, 400 с.
2. **Сокольский А.К.** Ветроэнергетика за рубежом и в России — современное состояние и перспективы. — В сб.: Возобновляемые источники энергии. — М.: Московский государственный университет, 2005, с. 135–154.
3. **Соболева Е.К., Саразов А.В.** Использование энергии ветра и солнца в Волгоградской области: <http://web.snauka.ru/issues/2014/05/34221>[web.snauka.ru/issues/2014/05/34221](http://web.snauka.ru/issues/2014/05/34221)
4. **Kanjoo A., Maheri A., Dizqah A.M., Putrus G.A.** Multi-objective design under uncertainties of hybrid renewable energy system using NSGA-II and chance constrained programming. — International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 74, pp. 187–194.
5. **Shang C., Srinivasan D., Reindl T.** An improved particle swarm optimisation algorithm applied to battery sizing for stand-alone hybrid power systems. — International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 74, pp. 104–117.
6. **Hands S., Sethuvenkatraman S., Peristy M., Rowe D., White S.** Performance analysis & energy benefits of a desiccant based solar assisted trigeneration system in a building. — Renewable Energy, 2016, 85, pp. 865–879.
7. **Aubrée R., Auger F., Macé M., Loron L.** Design of an efficient small wind-energy conversion system with an adaptive sensorless MPPT strategy. — Renewable Energy, 2016, 86, pp. 280–291.
8. **Chinchilla M., Arnaltes S., Burgos J.C.** Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid. — IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21 (1), pp. 130–135.
9. **Kheshti M., Kang X., Song G., Jiao Z.** Modeling and fault analysis of doubly fed induction generators for gansu wind farm application. — Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2015, 38 (1), 7072632, pp. 52–64.
10. **Ran X., Miao S., Jiang Z., Xu H.** A framework for uncertainty quantification and economic dispatch model with wind-solar energy. — International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 73, pp. 23–33.
11. **Sharafi M., ElMekawy T.Y., Bibeau E.L.** Optimal design of hybrid renewable energy systems in buildings with low to high renewable energy ratio. — Renewable Energy, 2015, 83, pp. 1026–1042.
12. **Безруких П.П.** Состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики. — Электрика, 2008, № 9, с. 3–10.
13. **Балагуров В.А.** Проектирование специальных электрических машин. — М: Высшая школа, 1982, 272 с.
14. **Копылов И.П.** Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. — М.: Юрайт, 2011, 767 с.
15. **Ганджа С.А., Мартянов А.С.** Методика инженерного расчёта вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком. — Вестник Южно-Уральского государственного университета, 2013, т. 13, № 2, с. 85–87.
16. **Ганджа С.А.** Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором. — Вестник Южно-Уральского государственного университета, 2009, № 34, с. 68–72.
17. **Патент 2561504 (РФ).** Аксиальный двухвходовый бесконтактный ветро-солнечный генератор/Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов. — БИ, 2015, № 24.
18. **Патент 2450411 (РФ).** Аксиальная двухвходовая бесконтактная электрическая машина-генератор/Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Т.Б. Гайтова, А.Я. Кашин, Д.В. Пауков, А.В. Голошапов. — БИ, 2012, № 13.
19. **Зеленская Е.А., Гайтов Б.Х., Копелевич Л.Е., Самородов А.В., Кашин Я.М., Ладенко Н.В.** Ветро-солнечные генераторы для электроснабжения объектов нефтегазовой отрасли. — Газовая промышленность, 2014, № 6 (707), с. 114–117.
20. **Гайтова Т.Б., Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Кашин А.Я., Князев А.С.** Математическое моделирование перспективных генераторных установок для систем автономного электроснабжения. — Изв. вузов. Электромеханика, 2013, № 3, с. 16–23.
21. **Гайтова Т.Б., Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Ясьян Ю.П., Кашин А.Я.** Система автономного электроснабжения на базе аксиальных электромагнитных устройств. — Труды Кубанского государственного аграрного университета, 2011, № 33, с. 205–209.
22. **Гайтов Б.Х., Самородов А.В., Копелевич Л.Е., Кашин Я.М.** Двухмерная электрическая машина-генератор для автономных систем электроснабжения. — Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник), 2013, № 1–2, с. 66–69.
23. **Украинская альтернативная энергетика:** <http://blog.ae.net.ua/2010/06/vertikalnie-vetrogeneratory-protiv-gorizontalnih-vetrogeneratorov>
24. **Все о солнечных батареях и энергии Солнца:** <http://www.solpanels.com/vidy-solnechnyh-batarej>
25. **Электротехнический справочник**, т. 2. — М.: Издат. дом МЭИ, 2003, 518 с.
26. **SlarkEnergy:** <http://slarkenergy.ru/solar/battery/invertor.html>
27. **Типы современных литиевых батарей:** [http://elwo.ru/publ/spravochniki/tipy\\_sovremennykh\\_litievyykh\\_akkumuljatornykh\\_batarej/2-1-0-915](http://elwo.ru/publ/spravochniki/tipy_sovremennykh_litievyykh_akkumuljatornykh_batarej/2-1-0-915)
28. **Солнечная Энергоимперия.** Системы энергоснабжения: <http://solarempire.ru/raschet-energootdachi.html>
29. **MathWorks:** <https://www.mathworks.com/products/matlab-online.html>

[31.07.2017]

*А в т о р ы: Гайтов Борис (Багаудин) Хамидович окончил в 1961 г. Карагандинский политехнический институт. В 1986 г. защитил докторскую диссертацию. Профессор кафедры электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета.*

*Кашин Яков Михайлович окончил в 1982 г. Киевское высшее военное авиационное инженерное училище. В 1999 г. защитил кандидатскую диссертацию. Заведующий кафедрой электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета.*

*Копелевич Лев Ефимович окончил в 1972 г. Краснодарский политехнический институт. В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию. Доцент кафедры*

электротехники и электрических машин Кубанского государственного технологического университета.

**Самородов Александр Валерьевич** окончил в 1996 г. Кубанский государственный технологический университет (КГТУ). Защитил кандидатскую диссертацию в 2002 г. Сотрудник КГТУ.

**Кашин Александр Яковлевич** окончил Военное образовательное учреждение «Военный учебно-научный центр Военно-воздушной академии имени Н.У. Жуковского и Ю.А. Гагарина» в 2011 г. Помощник командира корабля (на самолетах АН-26).

**Схашок Альберт Олегович** окончил Кубанский государственный технологический университет в 2017 г. Инженер службы подстанции филиала ПАО «Кубаньэнерго».

**Ким Владислав Анатольевич** – студент Кубанского государственного технологического университета.

*Elektrichestvo (Electricity)*, 2018, No. 1, pp. 19–27

DOI:10.24160/0013-5380-2018-1-19-27

## A Combined Wind-and-Solar Generator for Autonomous Electric Power Supply Systems

**GAITOV BAGAUDIN Kh.** (*Kuban State Technological University (KSTU), Krasnodar, Russia*) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**KASHIN Yakov M.** (*KSTU, Krasnodar, Russia*) – Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

**KOPELEVICH Lev E.** (*KSTU, Krasnodar, Russia*) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**SAMORODOV Aleksandr V.** (*KSTU, Krasnodar, Russia*) – Scientific Researcher, Cand. Sci. (Eng.)

**KASHIN Aleksandr Ya.** (*Znamensk, Astrakhan region, Russia*) – Assistant to the commander of the aircraft (on AN-26)

**SHKASHOK Al'bert O.** (*Branch of PJSC «Kybanenergo», Krasnodar Territory, Ust-Labinsk, Russia*) – Substation engineer

**KIM Vladimir A.** (*KSTU, Krasnodar, Russia*) – Student

The article considers the problem of developing and studying a combined wind-and-solar generator constructed on the basis of an electrical machine driven by two power inlets. Matters concerned with the design and operation of an electromechanical energy converter able to simultaneously convert the energy applied to the machine's «mechanical» and «electrical» inlets. The combined wind-and-solar generator constructed on the basis of an electrical machine driven by two power inlets is rather a complicated electromechanical device combining the following components in one casing: two nine-phase synchronous alternators, two nine-phase rectifiers, and a three-phase synchronous alternator. (Nine-phase synchronous alternators are used to obtain a low ripple coefficient). The specific feature of the considered machine lies in the possibility of its efficient use as a converter of mechanical rotation energy (wind energy) applied to the machine's mechanical inlet and DC electric energy (light energy of the Sun converted by photovoltaic converters into DC electric energy). The transients occurring in the machine were simulated in the MATLAB environment; the characteristics presented in the article were obtained in the course of a mathematical experiment.

**Key words:** electromechanical energy converters, renewable energy sources, combined wind-and-solar generator, electrical machine with two power inlets, simulation of electromechanical and electromagnetic processes

### REFERENCES

1. **Krivtsov V.S., Oleinikov A.M., Yakovlev A.I.** *Neischerpayemaya energiya* (Inexhaustible electric power). Sevastopol', Sevastopol' National Technical University, 2003, 400 p.

2. **Sokol'skii A.K.** *Sbornik «Vozobnovlyayemye istochniki energii»* (Proceedings «Renewal springs of energy»). Moscow, Moscow State University, 2005, pp. 135–154.

3. **Soboleva E.K., Sarazov A.V.** *Ispol'zovaniye energii vetra i solntsa v Volgogradskoi oblasti* (Make use of energy in Volgograd region): <http://web.snauka.ru/issues/2014/05/34221web.snauka.ru/issues/2014/05/34221>.

4. **Kamjoo A., Maheri A., Dizqah A.M., Putrus G.A.** Multi-objective design under uncertainties of hybrid renewable energy system using NSGA-II and chance constrained programming. – *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, 74, pp. 187–194.

5. **Shang C., Srinivasan D., Reindl T.** An improved particle swarm optimisation algorithm applied to battery sizing for stand-alone hybrid power systems. – *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, 74, pp. 104–117.

6. **Hands S., Sethuvenkatraman S., Peristy M., Rowe D., White S.** Performance analysis & energy benefits of a desiccant based solar

assisted trigeneration system in a building. – *Renewable Energy*, 2016, 85, pp. 865–879.

7. **Aubrée R., Auger F., Macé M., Loron L.** Design of an efficient small wind-energy conversion system with an adaptive sensorless MPPT strategy. – *Renewable Energy*, 2016, 86, pp. 280–291.

8. **Chinchilla M., Arnaltes S., Burgos J.C.** Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid. – *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21 (1), pp. 130–135.

9. **Kheshti M., Kang X., Song G., Jiao Z.** Modeling and fault analysis of doubly fed induction generators for gansu wind farm application. – *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2015, 38 (1), 7072632, pp. 52–64.

10. **Ran X., Miao S., Jiang Z., Xu H.** A framework for uncertainty quantification and economic dispatch model with wind-solar energy. – *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2015, 73, pp. 23–33.

11. **Sharafi M., ElMekkawy T.Y., Bibeau E.L.** Optimal design of hybrid renewable energy systems in buildings with low to high renewable energy ratio. – *Renewable Energy*, 2015, 83, pp. 1026–1042.

12. **Bezrukikh P.P.** *Elektrika – in Russ. (Electrica)*, 2008, No. 9, pp. 3–10.

13. **Balagurov V.A.** *Proyektirovaniye spetsial'nykh elektricheskikh mashin* (Designing of special electrical machines). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1982, 272 p.

14. **Kopylov I.P.** *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin* (Designing of electrical machines). Moscow, Publ. «Yurait», 2011, 767 p.

15. **Gandzha S.A., Mart'yanov A.S.** *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta – in Russ. (Bulletin of South-Ural State University)*, 2013, t. 13, No. 2, pp. 85–87.

16. **Gandzha S.A.** *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta – in Russ. (Bulletin of South-Ural State University)*, 2009, No. 34, pp. 68–72.

17. **Patent RF No. 2561504.** *Aksial'nyi dvukhkhodovyi beskontaktnyi vetro-solnechnyi generator* (Axial two-thread noncontact wind-sun generator)/B.Kh. Gaitov, Ya.M. Kashin, A.Ya. Kashin, L.E. Kopelevich, A.V. Samorodov. *Bulletin of inventions*, 2015, No. 24.

18. **Patent RF No. 2450411.** *Aksial'naya dvukhkhodovaya beskontaktnaya elektricheskaya mashina-generator* (Axial two-thread noncontact electric machine-generator)/B.Kh. Gaitov, Ya.M. Kashin, T.V. Gaitova, A.Ya. Kashin, D.V. Paukov, A.V. Goloshchapov. *Bulletin of inventions*, 2012, № 13.

19. **Zelenskaya E.A., Gaitov B.Kh., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kashin Ya.M., Ladenko N.V.** *Gazovaya promyshlennost' – in Russ. (Gas industry)*, 2014, No. 6 (707), pp. 114–117.

20. **Gaitova T.B., Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Kashin A.Ya., Knyazev A.S.** *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of higher education institutions. Electromechanics)*, 2013, No. 3, pp. 16–23.

21. **Gaitova T.B., Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Yas'yan Yu.P., Kashin A.Ya.** *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – in Russ. (Proceedings of Kuban State Agrarian University)*, 2011, No. 33, pp. 205–209.

22. **Gaitov B.Kh., Samorodov A.V., Kopelevich L.E., Kashin Ya.M.** *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnikeskii vestnik) – in Russ. (Science. Technique. Technologies (polytechnic bulletin)*, 2013, No. 1–2, pp. 66–69.

23. **Ukrainskaya al'ternativnaya energetika** (Ukrainian alternative energy): <http://blog.ae.net.ua/2010/06/vertikalnie-vetrogeneratory-protiv-gorizontalnykh-vetrogeneratorov>

24. **Vse o solnechnykh batareyakh i energii Solntsa** (All about sunny batteries and energy of a Sun): <http://www.solnpanels.com/vidy-solnechnykh-batarej>

25. **Elektrotekhnicheskii spravochnik, tom 2** (Electrical engineering reference book, vol. 2). Moscow, Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2003, 518 p.

26. **SlarkEnergy**: <http://slarkenergy.ru/solar/battery/invertor.html>

27. **Tipy sovremennykh litiyevykh batarei** (Types of modern lithium batteries): [http://elwo.ru/publ/spravochniki/tipy\\_sovremennykh\\_litiyevykh\\_akkumuljatornykh\\_batarej/2-1-0-915](http://elwo.ru/publ/spravochniki/tipy_sovremennykh_litiyevykh_akkumuljatornykh_batarej/2-1-0-915)

28. **Solnechnaya Energoimperiya.** *Sistemy energosnabzheniya* (Sunny Energyempire. Systems of energy supply): <http://solarempire.ru/raschet-energootdachi.html>

29. **MathWorks**: <https://www.mathworks.com/products/matlab-online.html>

[31.07.2017]