

Электротехнические комплексы и системы Electrotechnical complexes and systems

Научная статья

УДК 62-9, 621, 629.039.58

DOI: 10.14529/power230107

РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХВХОДОВОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Я.М. Кашин, jlms@mail.ru

Л.Е. Копелевич, kklllev@mail.ru

А.В. Самородов, alex.samorodoff@gmail.com

В.А. Ким, vladk-kub@mail.ru

И.А. Горбунов, igor.gorbunoff@yandex.ru

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена двухвходовая генераторная установка (ДГУ) для электроснабжения различных объектов. Предметом статьи являются характеристики ДГУ, полученные путём реализации математической модели. ДГУ является электромеханическим преобразователем энергии с несколькими ступенями преобразования. Для математического описания свойств ДГУ в динамических режимах использована модель обобщённого электромеханического преобразователя энергии, позволяющая учитывать все связи в исследуемой ДГУ. Использование теории обобщённого электромеханического преобразователя энергии, которая основана на комбинированном подходе, включающем теорию электрических цепей и теорию поля, позволяет проводить исследование электромеханических преобразователей энергии как в динамических, так и в установившихся режимах. Именно для целей преобразования двух разнородных видов энергии в энергию трёхфазного переменного тока в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» разработаны двухвходовые генераторные установки (ДГУ), позволяющие в одном электромеханическом преобразователе энергии суммировать энергию двух разнородных возобновляемых источников энергии для выработки электрической энергии. Для исследования параметров и характеристик таких установок создана математическая модель, на основе которой проведён вычислительный эксперимент, что позволило получить представление об исследуемом объекте. Задачей математического моделирования ДГУ являлось получение ее динамических характеристик и на базе этих характеристик – получение регулировочных характеристик ДГУ, таких как зависимости напряжения и частоты выходного напряжения от внешних факторов и параметров ДГУ. К внешним факторам, влияющим на работу ДГУ, относятся: частота вращения ротора ветроагрегата, зависящая от скорости ветра, и напряжение на выходе фотоэлектрического преобразователя, зависящее от интенсивности солнечного излучения.

Ключевые слова: двухвходовая генераторная установка, математическая модель, возобновляемые источники энергии, электромеханические преобразователи энергии

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

Для цитирования: Регулировочные характеристики двухвходовой генераторной установки / Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 65–81. DOI: 10.14529/power230107

CONTROL CHARACTERISTICS OF A DUAL INPUT GENERATOR SET

Ya.M. Kashin, jlms@mail.ru

L.E. Kopelevich, kklllev@mail.ru

A.V. Samorodov, alex.samorodoff@gmail.com

V.A. Kim, vladk-kub@mail.ru

I.A. Gorbunov, igor.gorbunoff@yandex.ru

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Abstract. The article considers a dual input generator set (DGS) for power supply of various facilities. The subject of the article is the characteristics of DGS obtained by implementing a mathematical model DGS is an electromechanical energy converter with several conversion stages. For the mathematical description of the DGS properties in dynamic modes, the model of a generalized electromechanical energy converter is used, which makes it possible to take into account all the connections in the DGS under study. The use of the theory of a generalized electromechanical energy converter, which is based on a combined approach, including the theory of electrical circuits and field theory, makes it possible to study electromechanical energy converters both in dynamic and steady modes. It is for the purpose of converting two dissimilar types of energy into three-phase alternating current energy that the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kuban State Technological University” developed two-input generator sets (DGS), which allows summing up the energy of two dissimilar renewable energy sources in one electromechanical energy converter to generate electrical energy. To study the parameters and characteristics of such installations, a mathematical model was created, on the basis of which a computational experiment was carried out, which made it possible to get an idea about the object under study. The task of mathematical modeling of the DGS was to obtain its dynamic characteristics and, on the basis of these characteristics, to obtain the regulating characteristics of the DGS, such as: the dependences of the voltage and frequency of the output voltage on external factors and the parameters of the DGS. The external factors affecting the operation of the DGU include: the rotational speed of the wind turbine rotor, which depends on the wind speed, and the voltage at the output of the photoelectric converter, which depends on the intensity of solar radiation. The parameters of the diesel generator set that affect the operation of the installation are the parameters of the windings of individual parts of the diesel generator set.

Keywords: dual input generator set, mathematical model, renewable energy sources, electromechanical energy converters

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Administration of the Krasnodar Territory under Scientific Project No. 19-48-230009.

For citation: Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kim V.A., Gorbunov I.A. Control characteristics of a dual input generator set. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(1):65–81. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230107

Введение

Работа посвящена исследованию двухвходных генераторных установок (ДГУ) с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

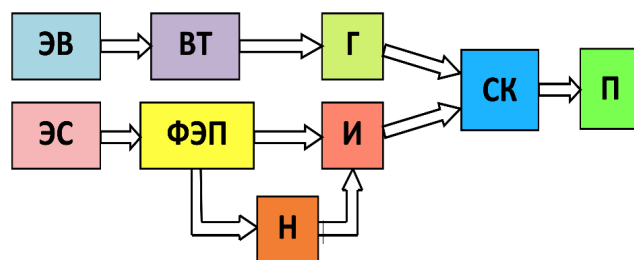
В настоящее время с расширением использования ВИЭ применение традиционных схем предусматривает преобразование световой энергии Солнца в электрическую энергию постоянного тока, которую затем инвертируют в энергию трёхфазного переменного тока. Параллельно с преобразованием световой энергии Солнца кинетическую энергию ветра преобразуют в энергию трёхфазного переменного тока. При использовании преобразования двух видов ВИЭ на одном участке (к примеру, в качестве резервного источника энергии на удалённом объекте АПК) возникает задача согласования этих двух видов ВИЭ [1–7].

На рис. 1 приведена структурная схема при преобразовании энергии Солнца и энергии ветра

с использованием классического оборудования (инвертор, электрический генератор).

Применение классической схемы использования ВИЭ предусматривает девять ступеней преобразования энергии, каждая из которых снижает КПД всей электростанции на базе ВИЭ. В этом случае ситуация осложняется ещё и тем, что при этом традиционно используются ШИМ-инверторы, которые негативно влияют на питающую электросеть. Это, в свою очередь, приводит к необходимости применения дорогостоящих фильтров и преобразователей электрической энергии.

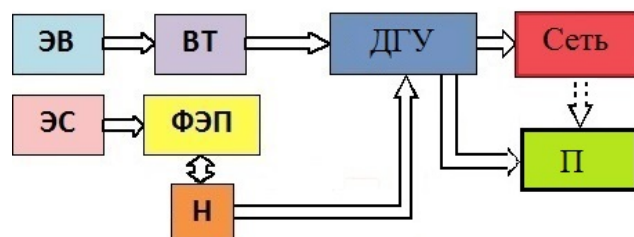
При электромеханическом же способе преобразования и сложения энергии от разнородных ВИЭ суммарная энергия преобразуется непосредственно в энергию трёхфазного переменного тока. Это упрощает и удешевляет систему преобразования энергии.



ЭВ – кинетическая энергия ветра; ЭС – энергия Солнца; ВТ – ветротурбина;
Г – генератор; ФЭП – фотоэлектрический преобразователь; И – инвертор; СК – сумматор-контроллер; П – потребитель

Рис. 1. Структурная схема при преобразовании энергии Солнца и энергии ветра с использованием классического оборудования

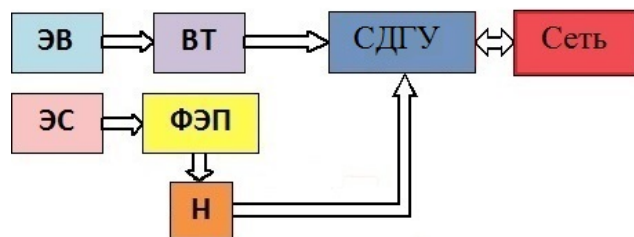
Fig. 1. Structural diagram for the conversion of solar energy and wind energy using classical equipment



ЭВ – кинетическая энергия ветра; ЭС – энергия Солнца; ВТ – ветротурбина;
ФЭП – фотоэлектрический преобразователь; Н – накопитель энергии;
ДГУ – двухвходовая генераторная установка; Сеть – внешняя трехфазная сеть переменного тока; П – потребитель

Рис. 2. Структурная схема при преобразовании энергии Солнца и энергии ветра на базе ДГУ

Fig. 2. Structural diagram for the conversion of solar energy and wind energy based on DGS



ЭВ – кинетическая энергия ветра; ЭС – световая энергия Солнца; ВТ – ветротурбина; ФЭП – фотоэлектрический преобразователь; Н – накопитель энергии;
СДГУ – синхронизированная двухвходовая генераторная установка

Рис. 3. Структурная схема при преобразовании энергии Солнца и энергии ветра на базе СДГУ

Fig. 3. Structural diagram for the conversion of solar energy and wind energy based on SDGS

Именно для целей преобразования двух разнородных видов энергии в энергию трёхфазного переменного тока в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» разработаны двухвходовые генераторные установки (ДГУ), позволяющие в одном электромеханическом преобразователе энергии суммировать энергию двух разнородных источников ВИЭ для выработки электрической энергии [8].

На рис. 2, 3 приведены структурные схемы при преобразовании энергии Солнца и энергии ветра с использованием ДГУ и СДГУ (синхронизированная двухвходовая генераторная установка) соответственно.

Для исследования параметров и характеристик таких установок создана математическая мо-

дель, на основе которой проведен вычислительный эксперимент, что позволило получить представление об исследуемом объекте. Задачей математического моделирования ДГУ являлось получение ее динамических характеристик и, на базе этих характеристик – получение регулировочных характеристик ДГУ, таких как зависимости напряжения и частоты выходного напряжения от внешних факторов и параметров ДГУ. К внешним факторам, влияющим на работу ДГУ, относятся: частота вращения ротора ветроагрегата, зависящая от скорости ветра, и напряжение на выходе фотоэлектрического преобразователя (ФЭП), зависящее от интенсивности солнечного излучения. Параметрами ДГУ, оказывающими влияние на работу установки, являются параметры обмоток отдельных частей ДГУ.

Исследование двухвходовой генераторной установки

ДГУ является электромеханическим преобразователем энергии с несколькими ступенями преобразования.

Для математического описания свойств ДГУ в динамических режимах использована модель обобщенного электромеханического преобразователя энергии (ОЭМПЭ), позволяющая учитывать все связи в исследуемой ДГУ [8–10].

Использование теории обобщенного электромеханического преобразователя энергии, которая основана на комбинированном подходе, включающем теорию электрических цепей и теорию поля [8–10], позволяет проводить исследование электромеханических преобразователей энергии как в динамических, так и в установившихся режимах.

Для реализации задач по преобразованию (суммированию) двух видов энергии (механической энергии и электрической энергии постоянного тока) в электрическую энергию переменного тока разработаны ДГУ и СДГУ (ДГУ с синхронизатором напряжения).

Электрическая схема СДГУ приведена на рис. 4, а конструкция СДГУ – на рис. 5 [7, 11, 12].

На рис. 4, 5 приняты следующие обозначения: 1 – постоянный многополюсный магнит индуктора подвозбудителя; 2 – многофазная (девятифазная) обмотка якоря подвозбудителя; 3 – первый многофазный (девятифазный) двухполупериодный выпрямитель; 4 – основная однофазная обмотка возбуждения возбудителя; 5 – контакты для подключения к внешнему ФЭП (солнечным панелям); 6 – дополнительная однофазная обмотка возбуждения возбудителя; 7 – многофазная обмотка якоря возбудителя; 8 – второй многофазный (девятифазный) двухполупериодный выпрямитель; 9 – однофазная обмотка возбуждения основного генератора; 10 – трёхфазная обмотка якоря основного генератора; 11 – магнитопровод подвозбудителя; 12 – магнитопровод возбудителя; 13 – магнитопровод основного генератора; 16 – постоянный магнит; 17 – магнитопровод дополнительной трёхфазной обмотки синхронизатора напряжения; 18 – дополнительная трёхфазная обмотка синхронизатора напряжения. Элементы СДГУ 1, 12, 16 жёстко связаны с валом 15. Конструктивные элементы 7, 8, 9, расположенные на элементах конструкции 1, 12, 16, связаны с валом 15 опосредованно. Вся конструкция СДГУ помещена в корпус 14. Исключение (отсутствие) элементов 16, 17, 18 позволяет из СДГУ получить ДГУ.

Ротор ДГУ приводится во вращение от внешнего источника механической энергии (например, ветра). Вращающий момент, создаваемый ветротурбиной, вызывает вращение постоянного многополюсного магнита 1 индуктора подвозбудителя, жёстко закреплённого на валу установки. При вращении постоянного многополюсного магнита 1 индуктора подвозбудителя магнитный поток постоянного многополюсного магнита [7] индуктора подвозбудителя взаимодействует с многофазной обмоткой 2 якоря подвозбудителя, уложенной в пазы неподвижного магнитопровода, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется первым многофазным двухполупериодным выпрямителем 3 и подается на основную однофазную обмотку 4 возбуждения возбудителя, уложенную в пазы неподвижного магнитопровода. При этом в основной однофазной обмотке 4 возбуждения возбудителя создается магнитный поток. Одновременно на входные зажимы 5 дополнительной однофазной обмотки 6 возбуждения возбудителя подается напряжение постоянного тока (световая энергия Солнца, преобразованная в ФЭП в электроэнергию постоянного тока). Протекающий по дополнительной однофазной обмотке 6 возбуждения

Ротор ДГУ приводится во вращение от внешнего источника механической энергии (например, ветра). Вращающий момент, создаваемый ветротурбиной, вызывает вращение постоянного многополюсного магнита 1 индуктора подвозбудителя, жёстко закреплённого на валу установки. При вращении постоянного многополюсного магнита 1 индуктора подвозбудителя магнитный поток постоянного многополюсного магнита [7] индуктора подвозбудителя взаимодействует с многофазной обмоткой 2 якоря подвозбудителя, уложенной в пазы неподвижного магнитопровода, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется первым многофазным двухполупериодным выпрямителем 3 и подается на основную однофазную обмотку 4 возбуждения возбудителя, уложенную в пазы неподвижного магнитопровода. При этом в основной однофазной обмотке 4 возбуждения возбудителя создается магнитный поток. Одновременно на входные зажимы 5 дополнительной однофазной обмотки 6 возбуждения возбудителя подается напряжение постоянного тока (световая энергия Солнца, преобразованная в ФЭП в электроэнергию постоянного тока). Протекающий по дополнительной однофазной обмотке 6 возбуждения

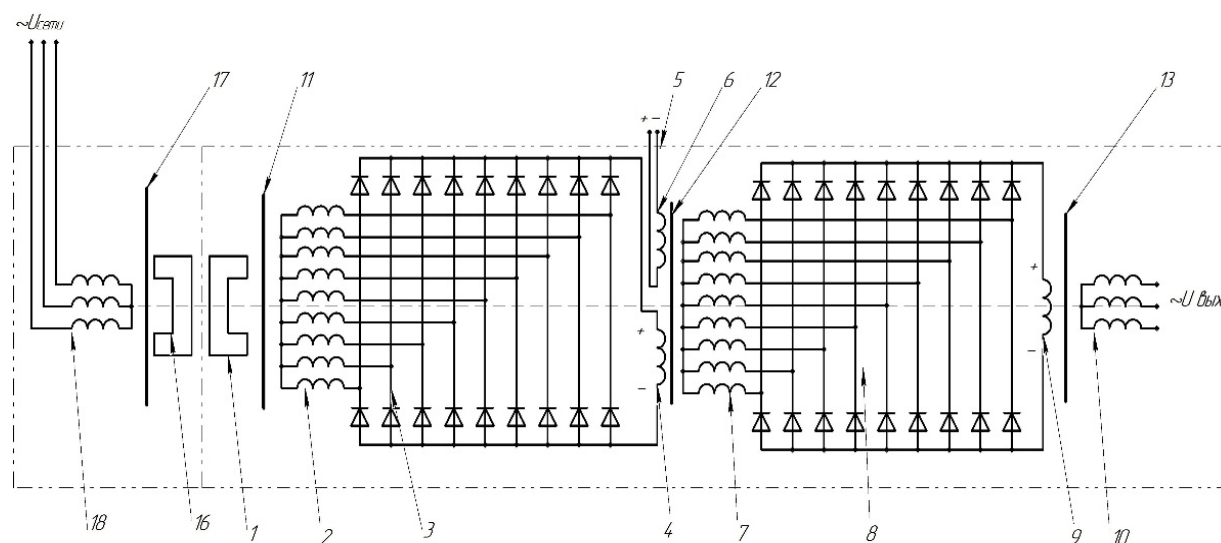


Рис. 4. Электрическая схема СДГУ
Fig. 4. SDGS electric circuit

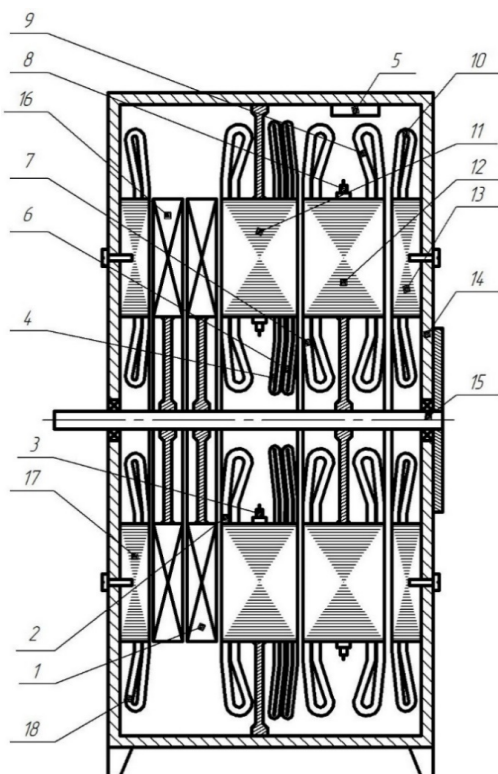


Рис. 5. Конструкция СДГУ
Fig. 5. SDGS design

возбудителя постоянный ток создаёт магнитный поток, сонаправленный с магнитным потоком, создаваемым током, протекающим в основной однофазной обмотке 4 возбуждения возбудителя. Созданный токами, протекающими в основной 4 и дополнительной 6 однофазных обмотках возбуждения возбудителя, суммарный магнитный поток взаимодействует с многофазной обмоткой 7 якоря подвозбудителя, уложенной в пазы вращающегося магнитопровода, и наводит в ней многофазную систему ЭДС, которая выпрямляется вторым многофазным двухполупериодным выпрямителем 8 и подается на однофазную обмотку 9 возбуждения основного генератора, уложенную в пазы вращающегося магнитопровода. Магнитный поток однофазной обмотки 9 возбуждения основного генератора взаимодействует с трёхфазной обмоткой 10 якоря основного генератора, уложенной в пазы неподвижного магнитопровода, и наводит в ней трёхфазную систему ЭДС, которая подаётся потребителям.

На рис. 6 представлена функциональная схема ДГУ.

Функционально ДГУ состоит (см. рис. 6) из отдельных составляющих – блоков I–V, в которых происходит преобразование энергии, а именно:

- блок I – ветротурбина, преобразующая кинетическую энергию ветра в механическую энер-

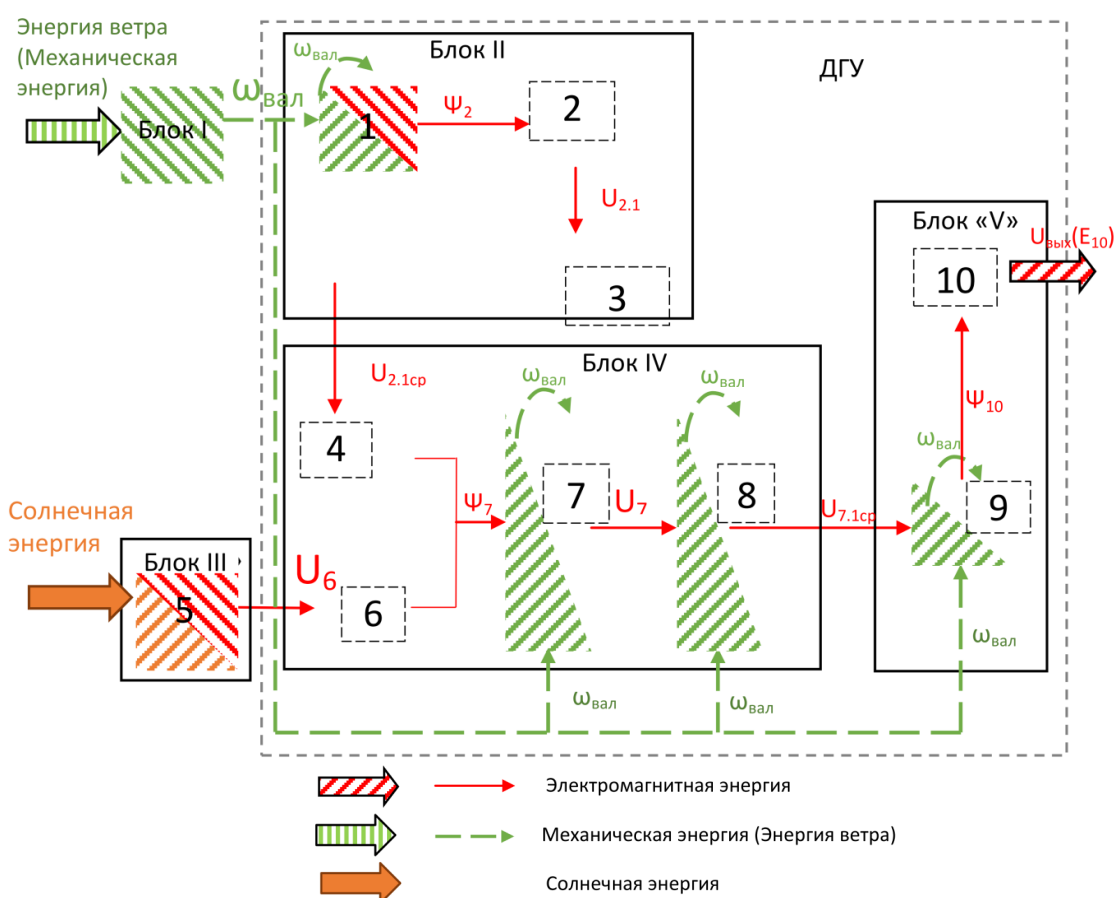


Рис. 6. Функциональная схема двухходовой генераторной установки
Fig. 6. Functional diagram of a two-input generator set

гию вращения и состоящая из ветроколеса и вала, который соединён с валом ДГУ;

- блок II – подвозбудитель, состоящий из постоянного многополюсного магнита 1 индуктора подвозбудителя, многофазной обмотки 2 якоря подвозбудителя, первого выпрямителя 3. В блоке II происходит преобразование механической энергии вращения, поступающей от блока I, и энергии, поступающей от многополюсного магнита 1 индуктора подвозбудителя, в электрическую энергию постоянного тока;

- блок III – внешний источник постоянного напряжения (например, фотоэлектрического преобразователя энергии – ФЭП, где происходит преобразование световой энергии Солнца в электрическую энергию постоянного тока);

- блок IV – возбудитель, состоящий из основной однофазной обмотки 4 возбуждения возбудителя, дополнительной однофазной обмотки 6 возбуждения возбудителя, многофазной обмотки 7 якоря возбудителя, второго многофазного двухполупериодного выпрямителя 8. В блоке IV происходит преобразование электрической энергии постоянного тока, поступающей от блока III, и электромагнитной энергии, поступающей от блока II, в электрическую энергию переменного тока;

- блок V – основной генератор, состоящий из однофазной обмотки 9 возбуждения основного генератора, трёхфазной обмотки 10 якоря основного генератора. В блоке V происходит преобра-

зование электромагнитной энергии, поступающей от блока IV в электрическую энергию переменного тока.

Математическая модель ДГУ составлена в осях d, q [10]. Пространственные модели блоков II, IV, V ДГУ в осях d и q представлены на рис. 7а, 7б, 7с.

При составлении системы дифференциальных уравнений обмоток 2, 7, 10 ДГУ представлены уравнениями по двум осям $d-q$ с последующим преобразованием в 9-фазную систему.

Математическая модель ДГУ построена при следующих допущениях:

- каждая из частей ДГУ (подвозбудитель, возбудитель, основной генератор) геометрически симметрична, то есть обмотки расположены равномерно по зубцовой зоне магнитопровода;

- каждая из частей ДГУ (подвозбудитель, возбудитель, основной генератор) электрически симметрична, то есть активные сопротивления и индуктивности каждой из обмоток по осям d и q одинаковы;

- каждая из частей ДГУ (подвозбудитель, возбудитель, основной генератор) имеет синусные обмотки;

- коэффициент взаимной индуктивности между обмотками, расположенными по одной оси (d, q) пространственных моделей (рис. 7а, 7б, 7с), одинаковы;

- в листах стали магнитопровода ДГУ нет разрывов и стыков;

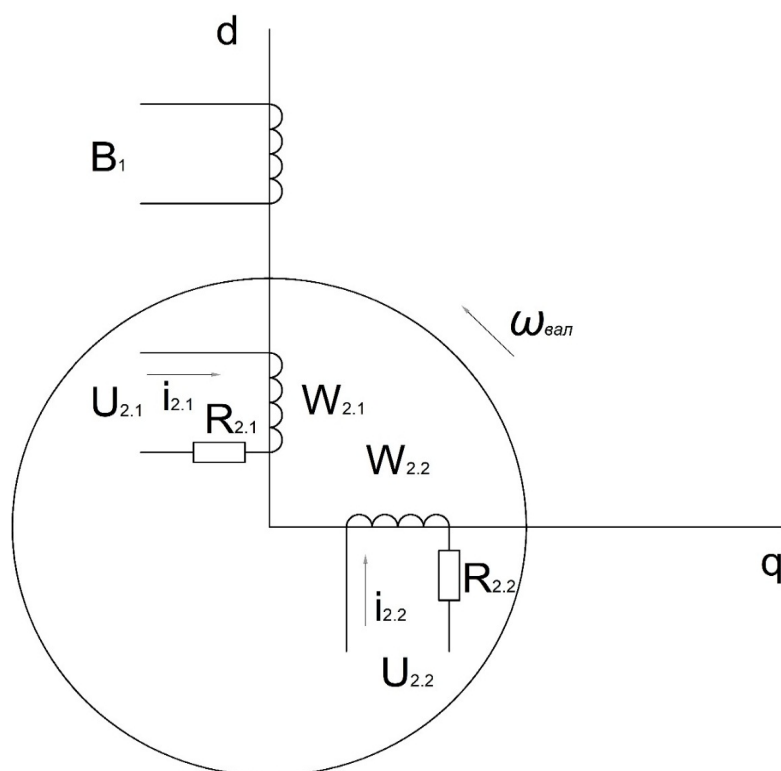


Рис. 7а. Пространственная модель блока II ДГУ по осям d, q
Fig. 7a. Spatial model of block II DGS along the axes d, q

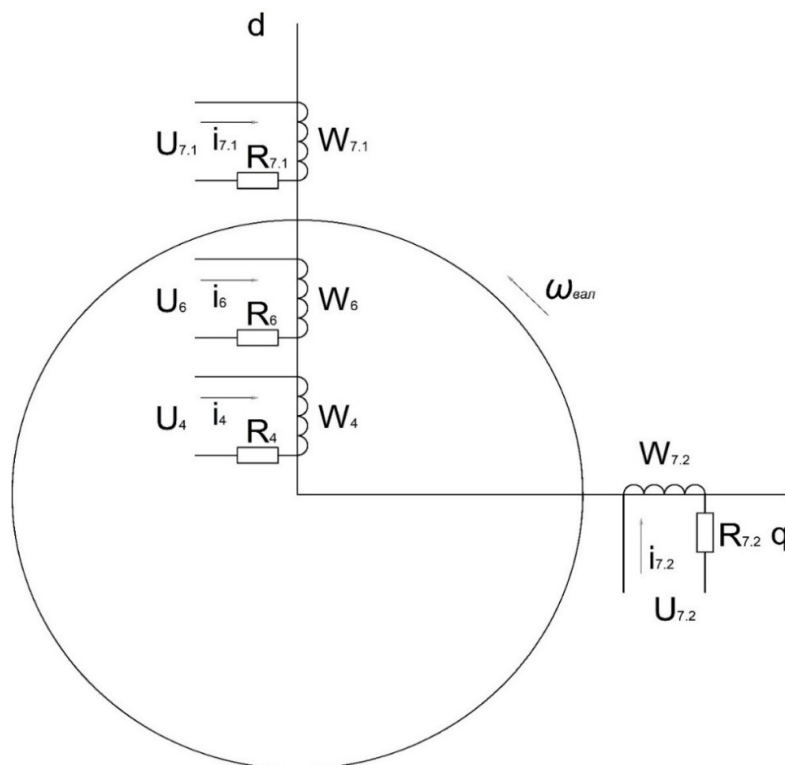


Рис. 7б. Пространственная модель блока IV ДГУ по осям d, q
Fig. 7b. Spatial model of block IV of the DGS along the axes d, q

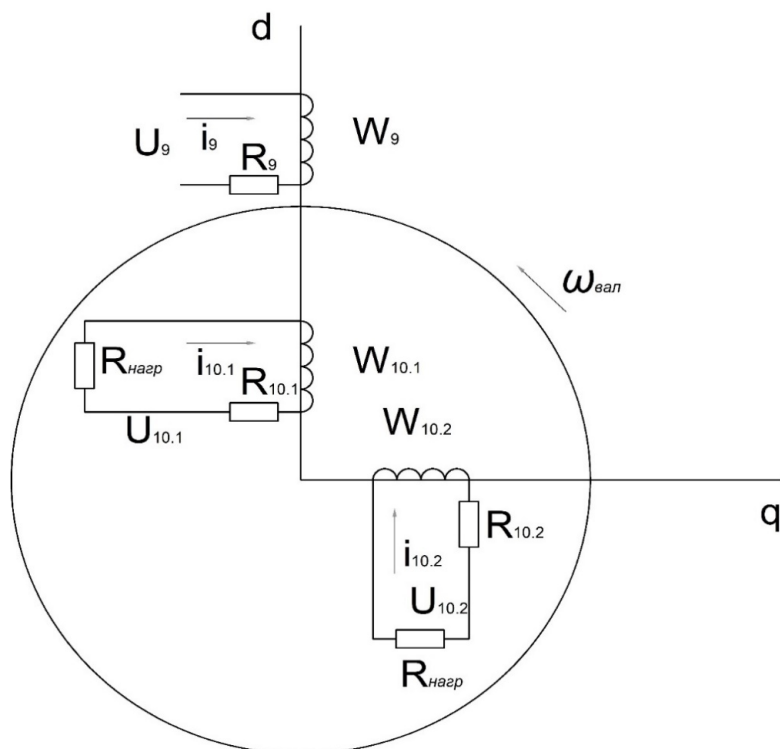


Рис. 7с. Пространственная модель блока V ДГУ по осям d, q
Fig. 7c. Spatial model of block V of the diesel generator set along the axes d, q

– сопротивления многофазных выпрямителей постоянны и не зависят от режима работы машины.

При составлении математической модели преобразование энергии в блоках II, IV, V, ДГУ

объединено в единое целое с учетом потокоцеплений. Преобразование механической энергии, поступающей на вал ДГУ, учтено в едином уравнении моментов математической модели.

Математическая модель ДГУ приведена к двухфазной модели по осям d, q и построена в виде системы дифференциальных уравнений.

Уравнения (1)–(8) в совокупности представляют собой математическое описание физических процессов двухвходовой генераторной установки.

Скорость ветра в функции времени $V_D(t)$ описывается линейным уравнением

$$V_D(t) = A_0 + A_1 \cdot \sin(n_1 \cdot \omega_{\text{вет}} \cdot t) + \dots + A_n \cdot \sin(n_n \cdot \omega_{\text{вет}} \cdot t), \quad (1)$$

где A_0 – постоянная составляющая, не допускающая отрицательного значения функции $V_D(t)$; A_1, A_2, A_n – амплитудные значения 1-й, 2-й и последующих гармоник; $\omega_{\text{вет}}$ – угловая скорость ветроколеса; $n_1 \dots n_n$ – номер с 1-й по n -ю гармонику.

Изменение индуцируемой ЭДС e_2 в обмотке 2 якоря подвозбудителя, разложенной по осям d ($e_{2.1}(t)$) и q ($e_{2.2}(t)$), которая зависит от магнитной индукции многополюсного магнита и скорости ветра V_D [13, 14], величины магнитной индукции и изменения среднего значения выпрямленного напряжения на однофазной обмотке 4 возбуждения возбудителя ($U_{2.1cp}(t)$), зависящего от тока ($i_{2.1}(t), i_{2.2}(t)$), протекающего по обмотке 2 и вызванного ЭДС e_2 , и потокоцепления Ψ_2 ($\Psi_{2.1}(t), \Psi_{2.2}(t)$) многофазной обмотки 2 якоря подвозбудителя, которые определяются индуктивностью L_2 обмотки, взаимной индуктивностью M , токами, протекающими по обмоткам, расположенным на соответствующих осях, описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} e_{2.1}(t) = B_1 \cdot I_{\text{кат}2} \cdot V_D(t) \cdot \sin(\omega_{\text{вал}}(t) \cdot t); \\ e_{2.2}(t) = B_1 \cdot I_{\text{кат}2} \cdot V_D(t) \cdot \sin(\omega_{\text{вал}}(t) \cdot t + 90^\circ); \\ U_{2.1}(t) = (R_{2.1} + R_{3.1}) \cdot i_{2.1}(t) + \frac{d\Psi_{2.1}(t)}{dt}; \\ U_{2.1cp}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T |U_{2.1}(t)| dt, \end{cases} \quad (2)$$

где $I_{\text{кат}2}$ – длина проводника обмотки [8] якоря подвозбудителя; $R_{3.1}$ – сопротивление первого многофазного выпрямителя [9] и основной однофазной обмотки возбуждения возбудителя 4 [15]; $U_{2.1}(t)$ – значение напряжения на однофазной обмотке 4 возбуждения возбудителя (напряжение на входе выпрямителя).

Изменения напряжения U_4 на основной однофазной обмотке 4 возбуждения возбудителя, зависящего от $U_{2.1cp}$ и вызывающего ток i_4 в обмотке, и напряжения U_6 на дополнительной однофазной обмотке 6 возбуждения возбудителя в функции времени, зависящего от освещённости ФЭП и вызывающего ток i_6 в обмотке, можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} U_4(t) = \frac{K_B \cdot U_{2.1cp}(t)}{1 + K_{\Pi}}; \\ i_4(t) = \frac{U_4(t)}{R_4} - \frac{U_4(t)}{R_4} \cdot e^{-t \cdot \frac{R_4}{L_4}}; \\ U_6(t) = C_0 + C_1 \cdot \sin(n_1 \cdot \omega_c \cdot t) + \dots + C_{71} \cdot \sin(n_7 \cdot \omega_c \cdot t); \\ i_6(t) = \frac{U_6(t)}{R_6}, \end{cases} \quad (3)$$

где K_B, K_{Π} – коэффициенты выпрямления и пульсации соответственно (приняты $K_B = 2,57, K_{\Pi} = 0,75$ [16–18]); C_0 – постоянная составляющая, не допускающая отрицательного значения функции $U_6(t)$; C_1, C_2, C_n – амплитудные значения 1-й, 2-й и последующих гармоник; ω_c – угловая частота изменения напряжения, поступающего от ФЭП.

Изменение индуцируемой ЭДС e_7 в обмотке 7 многофазной обмотки якоря возбудителя, разложенной по осям d ($e_{7.1}(t)$) и q ($e_{7.2}(t)$), которая зависит от параметров обмотки (активного сопротивления R_7 и индуктивности L_7), скорости ветра V_D [13, 14], потокоцепления Ψ_7 ($\Psi_{7.1}(t), \Psi_{7.2}(t)$) многофазной обмотки якоря возбудителя и средневывпрямленного значения напряжения [16, 17] на однофазной обмотке 9 возбуждения основного генератора ($U_{7.1cp}(t)$), зависящего от тока i_7 ($i_{7.1}(t), i_{7.2}(t)$), протекающего по обмотке 7 и вызванного ЭДС e_7 , можно определить из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} e_{7.1}(t) &= k_{\mu} \cdot \frac{W_7}{l_{\text{серд}7}} \cdot l_{\text{кат}7} \cdot (i_4(t) + i_6(t)) \cdot V_{\text{Д}}(t) \cdot \sin(\omega_{\text{вал}}(t) \cdot t); \\ e_{7.2}(t) &= k_{\mu} \cdot \frac{W_7}{l_{\text{серд}7}} \cdot l_{\text{кат}7} \cdot (i_4(t) + i_6(t)) \cdot V_{\text{Д}}(t) \cdot \sin(\omega_{\text{вал}}(t) \cdot t + 90^\circ); \\ U_{7.1}(t) &= (R_{7.1} + R_{8.1}) \cdot i_{7.1}(t) + \frac{d\Psi_{7.1}(t)}{dt}; \\ U_{7.1\text{cp}}(t) &= \frac{1}{T} \int_0^T |U_{7.1}(t)| dt, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где k_{μ} – коэффициент магнитной проницаемости; $l_{\text{кат}7}$ – длина проводника многофазной обмотки 7 якоря возбуждателя; $l_{\text{серд}7}$ – длина средней линии сердечника якоря возбуждателя; $R_{8.1}$ – сопротивление второго многофазного двухполупериодного выпрямителя 8 и однофазной обмотки возбуждения основного генератора 9; $U_{7.1\text{cp}}(t)$ – средневывпрямленное значение напряжения на однофазной обмотке 9 возбуждения основного генератора (напряжение на входе выпрямителя).

Изменения напряжения U_9 на однофазной обмотке 9 возбуждения основного генератора, зависящего от $U_{7.1\text{cp}}$ и вызывающего ток i_9 в обмотке, описывают уравнения:

$$\left\{ \begin{aligned} U_9(t) &= \frac{K_{\text{В}} \cdot U_{7.1\text{cp}}(t)}{1 + K_{\text{П}}}; \\ i_9(t) &= \frac{U_9(t)}{R_9} - \frac{U_9(t)}{R_9} \cdot e^{-t \cdot \frac{R_9}{L_9}}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Изменение индуцируемой ЭДС e_{10} в обмотке 10 якоря основного генератора, разложенной по осям $d(e_{10.1}(t))$ и $q(e_{10.2}(t))$, которая зависит от параметров обмотки (активного сопротивления R_{10} и индуктивности L_{10}), скорости ветра $V_{\text{Д}}$ и потокосцепления $\Psi_{10}(\Psi_{10.1}(t), \Psi_{10.2}(t))$ обмотки якоря основного генератора, отражает система уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} e_{10.1}(t) &= k_{\mu} \cdot \frac{W_{10}}{l_{\text{серд}10}} \cdot l_{\text{кат}10} \cdot i_9(t) \cdot V_{\text{Д}}(t) \cdot \sin(\omega_{\text{вал}}(t) \cdot t); \\ e_{10.2}(t) &= k_{\mu} \cdot \frac{W_{10}}{l_{\text{серд}10}} \cdot l_{\text{кат}10} \cdot i_9(t) \cdot V_{\text{Д}}(t) \cdot \sin(\omega_{\text{вал}}(t) \cdot t + 90^\circ); \\ u_{10.1}(t) &= (R_{10.1} + R_{\text{нагр}}) \cdot i_{10.1}(t) + \frac{d\Psi_{10.1}(t)}{dt}; \\ u_{10.2}(t) &= (R_{10.2} + R_{\text{нагр}}) \cdot i_{10.2}(t) + \frac{d\Psi_{10.2}(t)}{dt}, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где $l_{\text{серд}10}$ – длина средней линии сердечника катушки якоря основного генератора; $l_{\text{кат}10}$ – длина проводника катушки якоря основного генератора; $R_{\text{нагр}}$ – сопротивление нагрузки.

Потокосцепления, описанные в системах уравнений (2), (4), (6) и формирующиеся токами обмотки якоря подвозбудителя, токами обмотки якоря возбуждателя и токами обмотки якоря основного генератора, определяются с помощью системы уравнений потокосцеплений:

$$\left\{ \begin{aligned} \Psi_{2.1} &= L_2 \cdot i_{2.1} + B_1 \cdot S_1 \cdot \cos(\omega t); \\ \Psi_{2.2} &= L_2 \cdot i_{2.2}; \\ \Psi_{7.1} &= L_7 \cdot i_{7.1} + M_{47} \cdot i_4 + M_{67} \cdot i_6; \\ \Psi_{7.2} &= L_7 \cdot i_{7.2}; \\ \Psi_{10.1} &= L_{10} \cdot i_{10.1} + M_{910} \cdot i_9; \\ \Psi_{10.2} &= L_{10} \cdot i_{10.2}, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где L_2, L_7, L_{10} – индуктивности обмотки якоря подвозбудителя, обмоток якоря возбуждателя и обмоток якоря основного генератора; M_{47}, M_{67}, M_{910} , – взаимные индуктивности между обмотками, 4–7, 6–7, 9–10, соответственно; S_1 – площадь сечения постоянного многополюсного магнита индуктора подвозбудителя I ; B_1 – магнитная индукция постоянного многополюсного магнита индуктора подвозбудителя I .

Изменения моментов (электромагнитного, сопротивления, синхронизирующих), параметров сети, токов, протекающих по обмоткам ДГУ, описывается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{\text{вет}}(t) = d^2 \cdot \frac{(v(t))^3 \cdot K_{\text{ДГУ}}}{n_{\text{ДГУ}}}; \\ M_{\text{в ном}} = d^2 \cdot \frac{(v)^3 \cdot K_{\text{ДГУ}}}{n_{\text{ДГУ}}}; \\ M_{\text{син}}(t) = M_{\text{возм}}(t) = M_{\text{вет}}(t) = M_{\text{вет}}(t) - M_{\text{вет.ном}}; \\ M_{\text{син.мах}}(t); T \in (0; 5T); \\ M_{\text{син1}}(t) = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{E_{\text{ЭТК}} \cdot U_c}{X_{\text{ЭТК}}} \cdot \cos(\theta(t)); \\ M_{\text{син1расч}}(t) = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{E_{\text{ЭТК}} \cdot U_c}{X_{\text{ЭТК}}} \cdot \cos(60^\circ); \\ M_{\text{син1расч}}(t) \geq M_{\text{син.мах}}(t) - M_{\text{син1расч}}(t); \\ M_{\text{ЭМ}}(t) = \frac{m}{2} \cdot M \cdot [i_{2.2} \cdot (B_1 \cdot \cos(\omega t) \cdot K_{\text{МГ}}) + i_4 \cdot i_{7.1} + i_6 \cdot i_{7.1} + i_{10.2} \cdot i_9]; \\ M_{\text{сопр}}(t) = M_{\text{сопр.}\Sigma}(t); \\ M_{\text{Д}}(t) = \frac{1}{p} \cdot j_{\text{сист}} \cdot \frac{d\omega_{\text{вал}}(t)}{dt}; \\ M_{\text{вет}}(t) = M_{\text{ЭМ}}(t) + M_{\text{сопр}}(t) + M_{\text{Д}}(t) + M_{\text{син}}(t), \end{array} \right. \quad (8)$$

где $M_{\text{вет}}(t)$ – крутящий момент ветра в функции времени, приведённый к валу ДГУ; ξ – коэффициент использования энергии ветра (принят за 0,5 [14] при числе модулей ветроколеса $Z = 7$); $d_{\text{вк}}$ – диаметр ветроколеса ($d_{\text{вк}} = 4,5$ м); $M_{\text{в ном}}$ – номинальный крутящий момента ветра (принятый при данных типоразмерах машины и $V_{\text{в ном}} = 5,23$ м/с); $M_{\text{сопр}}(t) = M_{\text{сопр.}\Sigma}(t)$ – момент сопротивления ДГУ; $M_{\text{син}}(t) = M_{\text{возм}}(t)$ – момент «возмущения» от ветра (в функции времени); $\theta(t)$ – угол нагрузки (при расчете принят равным 60°); U_c – напряжение внешней сети; $X_{\text{ЭТК}}$ – индуктивное сопротивление ДГУ; $M_{\text{ЭМ}}(t)$ – электромагнитный момент, учитывающий процессы электромагнитного взаимодействия, протекающие в подвозбудителе, возбудителе и основном генераторе; $n_{\text{ДГУ}}$ – частота вращения вала ДГУ ($n_{\text{ДГУ}} = 750$ об/мин); $K_{\text{ДГУ}} = 2,28$ – коэффициент, учитывающий потери в подшипниках, передачах, мультипликаторе, плотность воздуха, коэффициент использования ветра, переводные коэффициенты в систему СИ; $K_{\text{МГ}}$ – коэффициент, учитывающий конструктивные и магнитные характеристики магнита; $M_{\text{сопр}}(t)$ – момент сопротивления установки, учитывающий момент сопротивления ДГУ и сил трения в движущих частях установки; $M_{\text{Д}}(t)$ – динамический момент ДГУ; $j_{\text{сист}}$ – момент инерции ДГУ; $M_{\text{син1}}$ – синхронизирующий момент, развиваемый ДГУ; $M_{\text{син2}}$ – момент, который необходимо создать внешним синхронизатором для работы ДГУ на единую сеть.

На рис. 8 приведён скриншот изменения электромагнитного момента ДГУ.

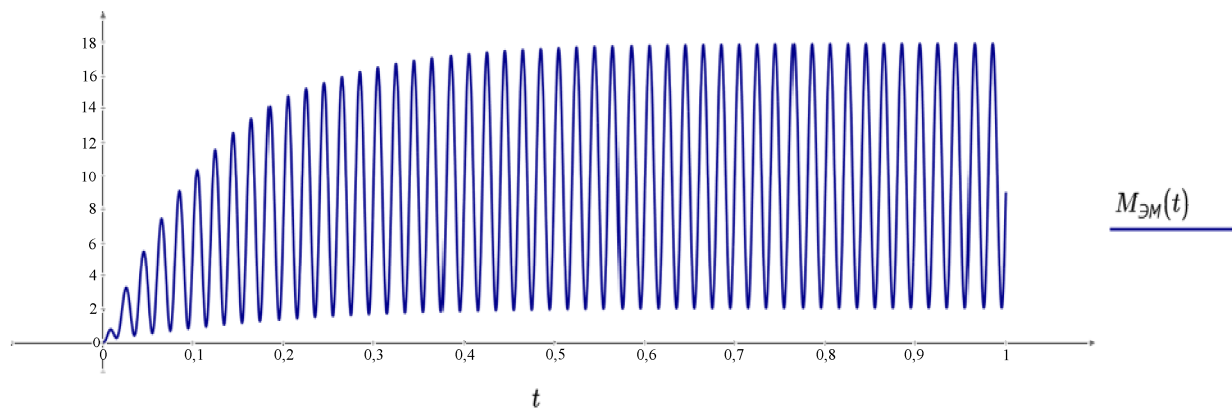


Рис. 8. График изменения электромагнитного момента ДГУ
Fig. 8. Trend of the change in the electromagnetic moment of the diesel generator set

На рис. 9, 10 приведены зависимости вращающего и синхронизирующих моментов ДГУ от различных внешних факторов, а именно: скорости ветра и напряжения на выходе ФЭП.

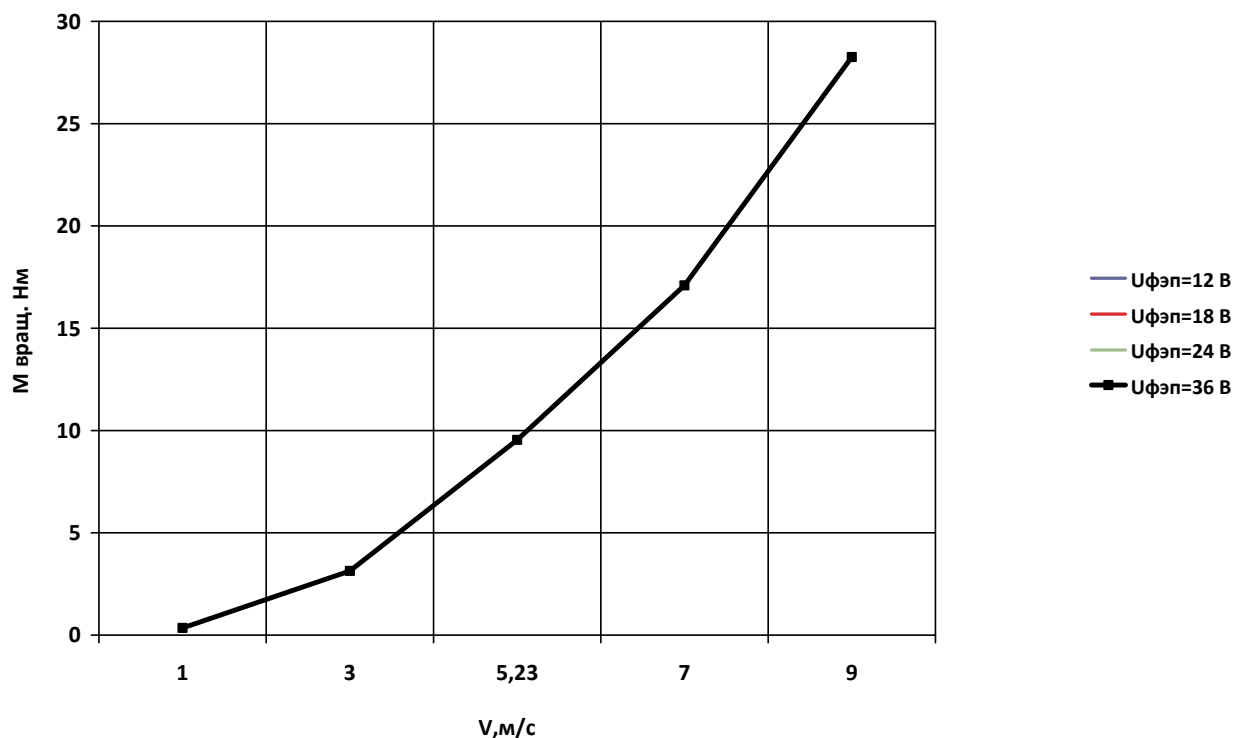


Рис. 9. Зависимость вращающего момента ДГУ от скорости ветра при изменении напряжения на выходе ФЭП
Fig. 9. Dependence of the torque of the diesel generator set on the wind speed with a change in the voltage at the output of the solar cell

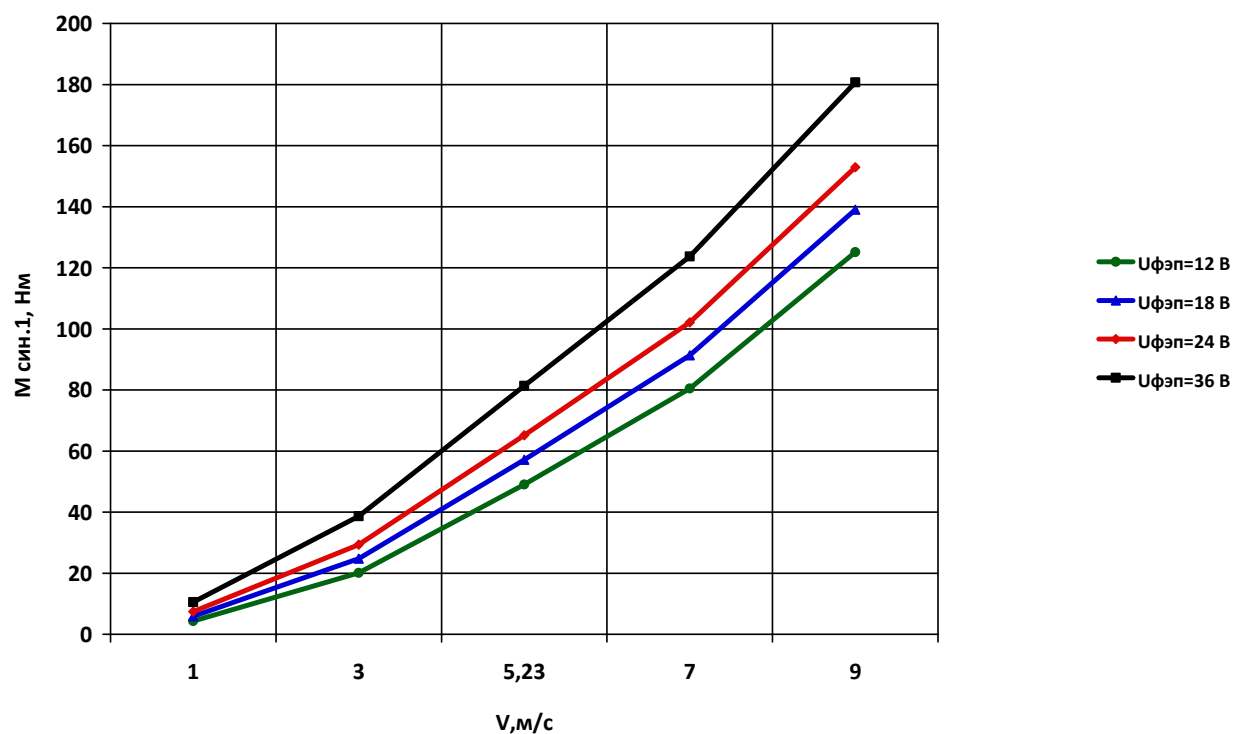


Рис. 10. Зависимость синхронизирующего момента ДГУ от скорости ветра при изменении напряжения на выходе ФЭП
Fig. 10. Dependence of the synchronizing moment of the diesel generator set on the wind speed with a change in the voltage at the output of the solar cell

По результатам оценки приведённых характеристик можно сделать следующие выводы.

Вращающий момент ДГУ возрастает с возрастанием скорости ветра и зависит от скорости ветра по нелинейному закону. Данное обстоятельство объясняется тем, что момент на валу ДГУ пропорционален мощности на валу ветроколеса и обратно пропорционален скорости ветра ($M \equiv P/V$). В свою очередь, мощность на валу ветроколеса пропорциональна скорости ветра в кубе ($P \equiv V^3$) [19]. В результате вращающий момент ДГУ: $M \equiv V^2$.

Синхронизирующий момент, создаваемый ДГУ, также увеличивается с увеличением скорости ветра. Синхронизирующий момент, создаваемый ДГУ, зависит от ЭДС, индуцируемой в обмотке 10 якоря основного генератора, напряжения на выходных зажимах обмотки 10 якоря основного генератора, индуктивности обмотки 10 якоря основного генератора.

Синхронизирующий момент, создаваемый исследуемой ДГУ, зависит от напряжения на выходе ФЭП, так как $M_{\text{син}1} \equiv U, E, \cos(\theta)/X$, где U – напряжение сети, E – ЭДС обмотки якоря основного генератора, X – средневзвешенное индуктивное сопротивление обмоток ДГУ, θ – угол между осями поля якоря и поля ротора машины (θ принят в диапазоне от 0 до 60°).

Если ДГУ предполагается использовать для работы не только на автономные потребители, но и параллельно с сетью, то необходимо предусмотреть синхронизатор. Тогда структурная схема системы электроснабжения на базе СДГУ (ДГУ с синхронизатором напряжения) будет иметь вид, как показано на рис. 2.

Использование дополнительного синхронизатора позволяет создать в СДГУ синхронизирующий момент ($M_{\text{син}2}$).

Из рис. 11 видно, что синхронизирующий момент ($M_{\text{син}2}$), создаваемый синхронизатором напряжения, изменяет свой знак в зависимости от того, скорость ветра выше или ниже номинальной. Так, при скорости ветра ниже номинальной (5,23 м/с) момент, который необходимо создать внешним синхронизатором для работы СДГУ на единую сеть ($M_{\text{син}2}$), имеет положительное значение. При скорости ветра выше номинальной (5,23 м/с) дополнительный момент ($M_{\text{син}2}$) принимает отрицательные значения.

Момент, который необходимо создать внешним синхронизатором для работы СДГУ на единую сеть ($M_{\text{син}2}$), зависит от скорости ветра и в меньшей степени от напряжения на выходе ФЭП. Данное обстоятельство объясняется тем, что момент $M_{\text{син}2}$ определяется как разность между электромагнитным моментом СДГУ, вращающим моментом, синхронизирующим моментом ДГУ ($M_{\text{син}1}$) и моментом сопротивления СДГУ (учитываются моменты сопротивления СДГУ и всей механической системы). А вращающий момент (как это было отмечено выше) зависит от скорости ветра во второй степени. В связи с тем, что напряжение на выходе ФЭП оказывает влияние на создание и величину МДС только одного каскада (и, как следствие, оказывает влияние только на величину ЭДС одного каскада), а скорость ветра – на ЭДС трёх каскадов, то и, соответственно, влияние скорости ветра, по сравнению с напряжением на выходе ФЭП, на моменты $M_{\text{син}1}$ и $M_{\text{син}2}$ более существенное. Следует также отметить, что по рис. 11 значе-

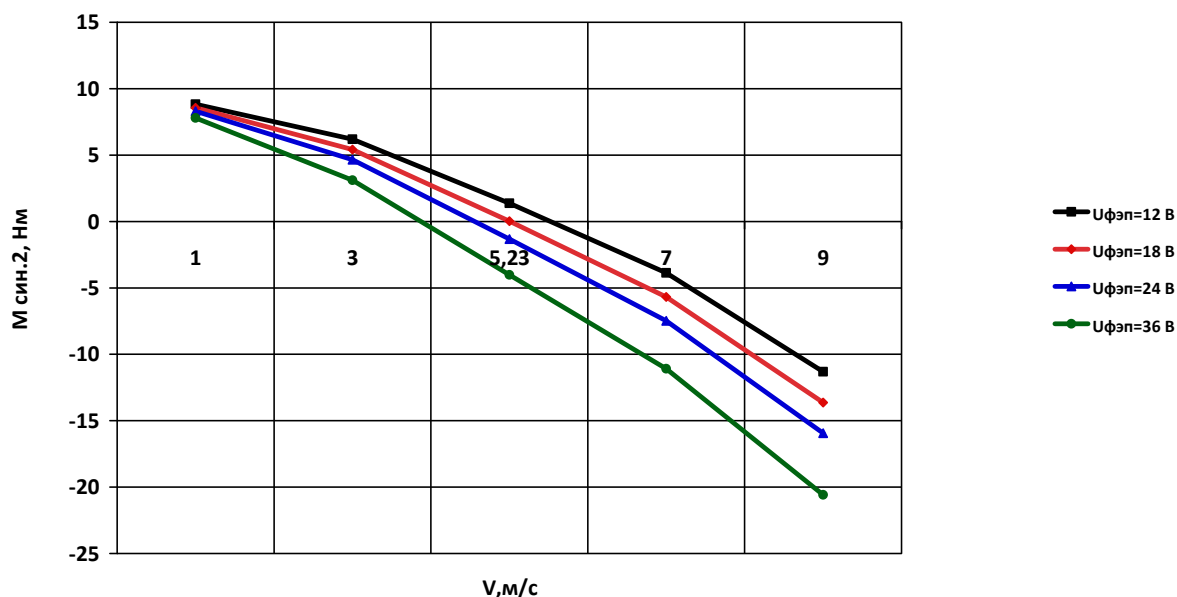


Рис. 11. Зависимость дополнительного момента $M_{\text{син}2}$ от скорости ветра при изменении напряжения на выходе ФЭП

Fig. 11. Dependence of the additional moment $M_{\text{син}2}$ on wind speed when the voltage at the output of the solar cell changes

ние $M_{\text{син}2}$ (при $U_{\text{ФЭП}} = 24 \text{ В}$) не обращается в «0» (отклонение составляет 1,1 Нм), что объясняется допущениями, сделанными при составлении математической модели, и погрешностью расчёта.

На рис. 12, 13 представлены зависимости выходных параметров СДГУ от входных (скорости ветра и напряжения на выходе ФЭП). Так, частота выходного напряжения СДГУ зависит от скорости ветра и не зависит от напряжения на

выходе ФЭП, что объясняется известным соотношением ($f \equiv \omega, p$, где p – число пар полюсов, ω – угловая скорость вала СДГУ). Выходное напряжение зависит от скорости ветра, причём чем выше скорость ветра – тем существенней «рост» величины выходного напряжения. Данное обстоятельство объясняется тем, что выходное напряжение создаётся «наращиванием» «первоначальной» ЭДС (ЭДС обмотки якоря подвозбудителя).

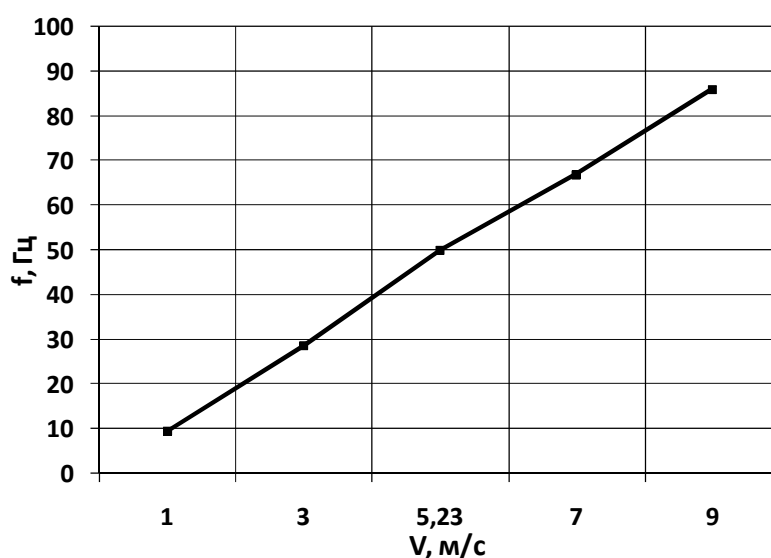


Рис. 12. Зависимость частоты выходного напряжения ДГУ от скорости ветра при изменении напряжения на выходе ФЭП

Fig. 12. Dependence of the frequency of the output voltage of the diesel generator set on wind speed when the voltage at the output of the solar cell changes

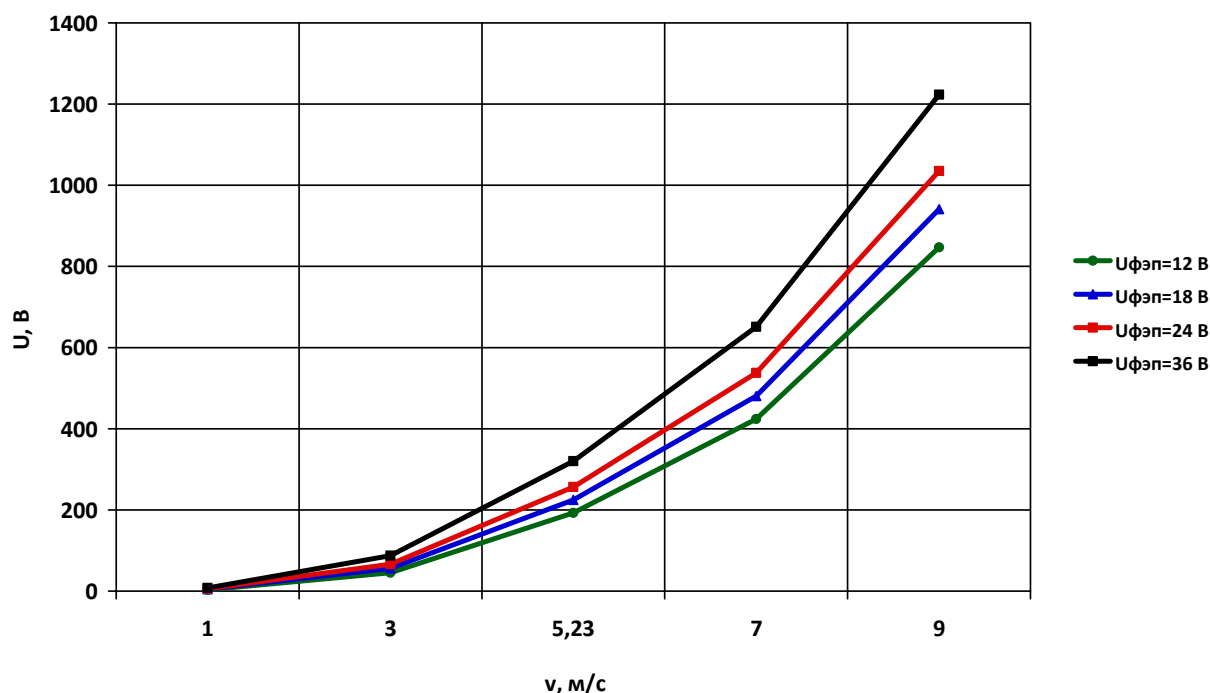


Рис. 13. Зависимость выходного напряжения ДГУ от скорости ветра при изменении напряжения на выходе ФЭП

Fig. 13. Dependence of the output voltage of the diesel generator set on the wind speed with a change in the voltage at the output of the solar cell

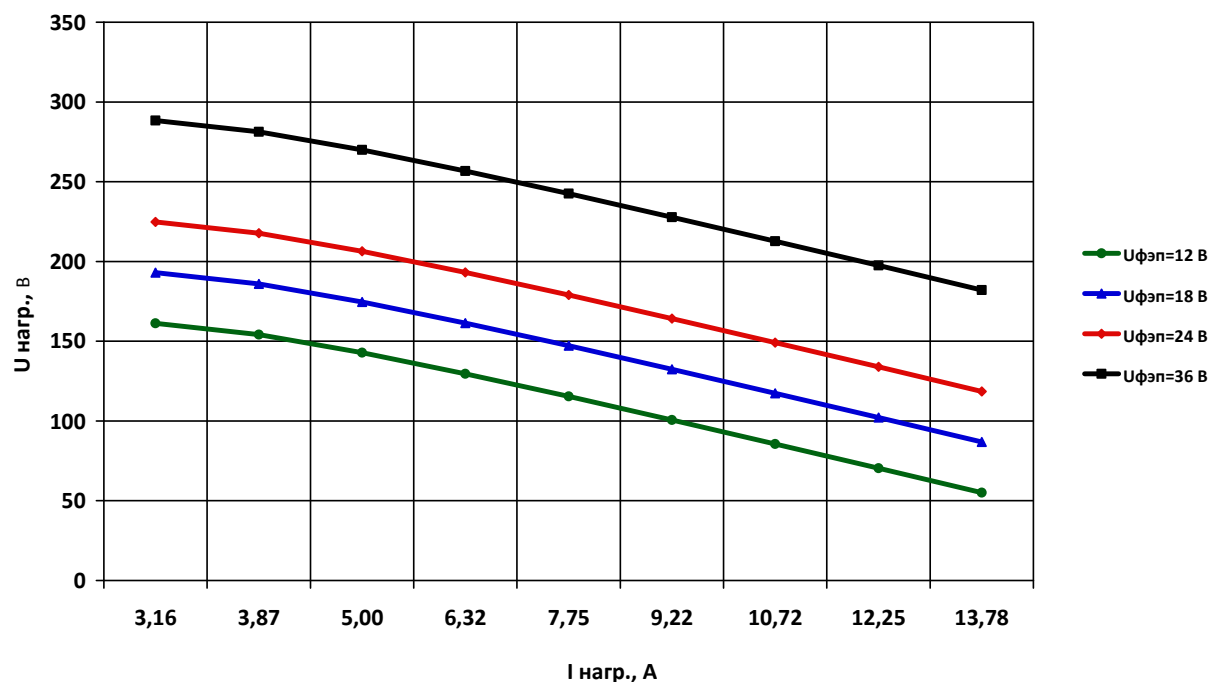


Рис. 14. Зависимость напряжения на нагрузке ДГУ от тока нагрузки при изменении напряжения на выходе ФЭП
Fig. 14. Dependence of the voltage on the load of the DGS on the load current when the voltage at the output of the solar cell changes

Из рис. 12 видно, что на величину выходного напряжения СДГУ (пропорционально ЭДС обмотки 10 якоря основного генератора E_{10}) наибольшее влияние из входных параметров (скорости ветра и напряжение на выходе ФЭП) оказывает скорость ветра, так как ЭДС, индуцируемое в трехфазной обмотке 10 якоря основного генератора, зависит от входных параметров в следующей пропорции:

$$U_{\text{вых}} \equiv E_{10} \equiv K_{\text{в}} \cdot K_{\text{вог}} \cdot K_{10} \cdot V^2 \cdot (K_{\text{яв}} \cdot V + K_{\text{двв}} U_{\text{ФЭП}}), \quad (9)$$

где V – скорость ветра; $U_{\text{ФЭП}}$ – напряжение на выходе ФЭП; $K_{\text{в}}$, $K_{\text{вог}}$, K_{10} , $K_{\text{яв}}$, $K_{\text{двв}}$ – коэффициенты, учитывающие параметры обмоток ДГУ (многофазной обмотки 7 якоря возбудителя; однофазной обмотки 9 возбуждения основного генератора; трехфазной обмотки 10 якоря основного генератора; обмотки 2 якоря; дополнительной однофазной обмотки 6 возбуждения возбудителя).

На рис. 14 представлена внешняя характеристика ДГУ при различных значениях напряжения на выходе ФЭП и скорости ветра. Из представленных графиков видна нелинейность характеристик, что объясняется реакцией якоря.

Реакция якоря в ДГУ заключается:

- во влиянии магнитного поля, создаваемого многофазной обмоткой 2 якоря подвозбудителя,

на магнитное поле, создаваемое постоянным многополюсным магнитом 1 индуктора подвозбудителя;

- влиянии магнитного поля, создаваемого многофазной обмоткой 7 якоря возбудителя, на магнитное поле, создаваемое однофазной обмоткой 4 возбуждения возбудителя и дополнительной однофазной обмоткой 6 возбуждения возбудителя;

- влиянии магнитного поля, создаваемого трехфазной обмоткой 10 якоря основного генератора, на магнитное поле, создаваемое однофазной обмоткой 9 возбуждения основного генератора.

Заключение

Созданная математическая модель двухвходовой генераторной установки и результаты численного эксперимента подтвердили возможность при преобразовании двух видов энергии (механической и электрической) получать на выходе установки электрическую энергию переменного тока. Дополнение двухвходовой генераторной установки синхронизатором напряжения позволяет стабилизировать выходные параметры установки, синхронизируя их с соответствующими параметрам внешней трёхфазной сети.

Список литературы

1. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1: Ветроэлектрогенераторы: учеб. Харьков: Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт»; Севастополь: Севастопольский национальный технический университет, 2003. 400 с.
2. Сокольский А.К. Ветроэнергетика за рубежом и в России – современное состояние и перспективы // Возобновляемые источники энергии: сборник. М.: МГУ, 2005. С. 135–154.
3. Multi-objective design under uncertainties of hybrid renewable energy system using NSGA-II and chance constrained programming / A. Kamjoo, A. Maheri, A.M. Dizqah, G.A. Putrus // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2016. Vol. 74 (1). P. 187–194. DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.07.007
4. Performance analysis & energy benefits of a desiccant based solar assisted trigeneration system in a building / S. Hands, S. Sethuvenkatraman, M. Peristy et al. // Renewable Energy. 2016. Vol. 85 (3). P. 865–879. DOI: 10.1016/j.renene.2015.07.013
5. Воронин С.М. Формирование автономных систем электроснабжения сельскохозяйственных объектов на основе возобновляемых источников энергии: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02. зерноград: Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия, 2009. 323 с.
6. Григораш О.В., Усков А.Е., Семёнов Я.А. Инверторы солнечных электростанций с улучшенными техническими характеристиками // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. 2014. № 99. С. 372–382. URL: <http://ej.kubagro.ru/2014/05/pdf/06.pdf>.
7. Юдаев И.В. Опыт использования ВИЭ на сельских территориях и в рекреационных зонах в регионах ЮФО // Вестник аграрной науки Дона. 2015. № 1 (29). С. 82–92.
8. Пат. 2 647 708 РФ. Синхронизированная аксиальная двухходовая генераторная установка / Я.М. Кашин, А.Я. Кашин, Л.Е. Копелевич и др. Опубл. 19.03.2018, Бюл. № 8.
9. Копылов И.П., Щедрин О.П. Расчёт на ЦВМ характеристик асинхронных машин. М.: Энергия, 1973. 121 с.
10. Копылов И.П., Мамедов Ф.А., Беспалов В.Я. Математическое моделирование асинхронных машин. М.: Энергия, 1969. 95 с.
11. Копылов И.П. Применение вычислительной техники в инженерно-экономических расчётах: Электрические машины: учебник. М.: Высшая школа, 1980. 263 с.
12. Ветро-солнечный генератор для систем автономного электроснабжения / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич и др. // Электричество. 2018. № 1. С. 19–27. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-1-19-27
13. Promising converters of wind and solar energy into electric energy for electrotechnical complexes / V.A. Kim, A.V. Samorodov, Y.M. Kashin., M.S. Khristoforov // International Conference “Actual Issues of Mechanical Engineering” (AIME 2018). 2018. С. 255–261. DOI: 10.2991/aime-18.2018.49
14. Яковлев А.И., Затучная М.А. Аэродинамический расчет ветротурбин пропеллерного типа: учеб. пособие по курсовому проектированию. Харьков: Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2001. 78 с.
15. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. М.: ОГИЗ-Сельхозгиз, 1948. 544 с.
16. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: Энергия, 1979. 199 с.
17. Сингаевский Н.А. Теоретические и схемотехнические основы силовых полупроводниковых выпрямителей на базе многофазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем: дис. ... д-ра техн. наук. Краснодар, 2010. 314 с.
18. Атрощенко В.А., Сингаевский Н.А. Силовые полупроводниковые выпрямители на основе многофазных трансформаторов с вращающимся магнитным полем // Международный журнал экспериментального образования. 2012. № 11. С. 26–27.
19. Bunyakin A.V. System of thermal energy accumulation in a soil layer in a combination with wind energy // Green Design, Materials and Manufacturing Processes. CRC Press; 2013. P. 405–410. DOI: 10.1201/B15002-78

References

1. Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. *Neischerpaemaya energiya. Kn. 1: Vetroelektrogeneratory: uchebnik* [Inexhaustible Energy. Book. 1: Wind Power Generators. Textbook]. Kharkov: National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Sevastopol: Sevastopol National Technical University; 2003. 400 p. (In Russ.)
2. Cokol'skiy A.K. [Wind power engineering abroad and in Russia – current state and prospects]. In: *Sat. “Renewable energy sources”*. Moscow: Moscow State University; 2005. P. 135–154. (In Russ.)
3. 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 & Energy Systems*. 2016;74(1):187–194. DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.07.007

4. 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(3):865–879. DOI: 10.1016/j.renene.2015.07.013
5. Voronin S.M. *Formirovanie avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya sel'skokhozyaystvennykh ob"ektov na osnove vozobnovlyаемых источников энергии: dis. d-ra tekhn. nauk: 05.20.02* [Formation of autonomous power supply systems for agricultural facilities based on renewable energy sources. Doct. sci. diss.]. Zernograd; 2009. 323 p. (In Russ.)
6. Grigorash O.V., Uskov A.E., Semjonov Ja.A. Solar power inverter with improved performance. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University (Scientific Journal of KubSAU)* [Electronic resource]. 2014;99:372–382. (In Russ.) Available at: <http://ej.kubagro.ru/2014/05/pdf/06.pdf>.
7. Yudaev I.V. [Experience in the use of renewable energy sources in rural areas and in recreational areas in the regions of the Southern Federal District]. *Don agrarian science bulletin*. 2015;1(29):82–92. (In Russ.)
8. Kashin Y.M., Kashin A.Y., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Khristoforov M.S. *Synchronised axial two-inlet generator installation*. Patent RF, no. 2647708, 2018. (In Russ.)
9. Kopylov I.P., Shchedrin O.P. *Raschet na TsVM kharakteristik asinkhronnykh mashin* [Calculation on the digital computer of the characteristics of asynchronous machines]. Moscow: Energiya; 1973. 121 p. (In Russ.)
10. Kopylov I.P., Mamedov F.A., Bepalov V.Ya. *Matematicheskoe modelirovanie asinkhronnykh mashin* [Mathematical modeling of asynchronous machines]. Moscow: Energiya; 1969. 95 p. (In Russ.)
11. Kopylov I.P. *Primenenie vychislitel'noy tekhniki v inzhenerno-ekonomicheskikh raschetakh: Elektricheskie mashiny: uchebnyk* [Application of computer technology in engineering and economic calculations: Electric machines. Textbook]. Moscow: Vysshaya shkola. 1980. 263 p. (In Russ.)
12. Gaitov B.K., Kashin Y.M., Kopelevich L.E. et al. A combined wind-and-solar generator for autonomous electric power supply systems. *Elektrichestvo*. 2018;1:19–27. (In Russ.) DOI: 10.24160/0013-5380-2018-1-19-27
13. Kim V.A., Samorodov A.V., Kashin Y.M., Khristoforov M.S. Promising converters of wind and solar energy into electric energy for electrotechnical complexes. In: *International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" (AIME 2018)*; 2018. P. 255–261. DOI: 10.2991/aime-18.2018.49
14. Yakovlev A.I., Zatchnaya M.A. *Aerodinamicheskii raschet vetroturbin propeller-nogo tipa: ucheb. posobie po kursovomu proektirovaniyu* [Aerodynamic calculation of propeller-type wind turbines: Proc. allowance for course design]. Kharkov: National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute"; 2001. 78 p. (In Russ.)
15. Fateyev E.M. *Vetrodvigateli i vetroustanovki* [Wind turbines and wind turbines]. Moscow: OGIZ-Sel'khozgiz, 1948. 544 p. (In Russ.)
16. Onishchenko G.B., Lokteva I.L. *Asinkhronnye ventil'nye kaskady i dvigateli dvoynogo pitaniya* [Asynchronous valve stages and dual power motors]. Moscow: Energiya; 1979. 199 p. (In Russ.)
17. Singaevskiy N.A. *Teoreticheskie i skhemotekhnicheskie osnovy silovykh poluprovodnikovyykh vypryamiteley na baze mnogofaznykh transformatorov s vrashchayushchimsya magnitnym polem: dis. d-ra tekhn. nauk* [Theoretical and circuitry foundations of power semiconductor rectifiers based on multiphase transformers with a rotating magnetic field. Doct. sci. diss.]. Krasnodar; 2010. 314 p. (In Russ.)
18. Atroshchenko V.A., Singaevsky N.A. [Power semiconductor rectifiers based on multiphase transformers with a rotating magnetic field]. *International Journal of Experimental Education*. 2012;11:26–27. (In Russ.)
19. Bunyakin A.V. System of thermal energy accumulation in a soil layer in a combination with wind energy. In: *Green Design, Materials and Manufacturing Processes*. CRC Press; 2013. P. 405–410. DOI: 10.1201/B15002-78

Информация об авторах

Кашин Яков Михайлович, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой электротехники и электрических машин, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия; jlms@mail.ru.

Копелевич Лев Ефимович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электротехники и электрических машин, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия; kklev@mail.ru.

Самородов Александр Валерьевич, канд. техн. наук, доц. кафедры электротехники и электрических машин, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия; alex.samorodoff@gmail.com.

Ким Владислав Анатольевич, аспирант направления «Электро- и теплотехника» (направленность: Электротехнические комплексы и системы), Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия; vladk-kub@mail.ru.

Горбунов Игорь Алексеевич, аспирант направления «Электро- и теплотехника» (направленность: Электротехнические комплексы и системы), Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия; igor.gorbunoff@yandex.ru.

Information about the authors

Yakov M. Kashin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia; jlms@mail.ru.

Lev E. Kopelevich, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia; kkllev@mail.ru.

Alexander V. Samorodov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia; alex.samorodoff@gmail.com.

Vladislav A. Kim, Postgraduate Student of the direction “Electrical and heat engineering” (focus: Electro-technical complexes and systems), Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia; vladk-kub@mail.ru.

Igor A. Gorbunov, Postgraduate Student of the direction “Electrical and heat engineering” (focus: Electro-technical complexes and systems), Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia; vladk-kub@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 24.09.2022; одобрена после рецензирования 10.01.2023; принята к публикации 10.01.2023.

The article was submitted 24.09.2022; approved after review 10.01.2023; accepted for publication 10.01.2023.