

УДК 504.064.36

doi 10.54708/22259309_2025_13252

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЗЕРВНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Н. С. Колинченко¹

¹ kolinichenko01@inbox.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В работе представлен проект СФП (солнечная фотоэлектрическая панель) и проведена разработка математической модели резервного электроснабжения. Автором были составлены математические модели солнечно-фотоэлектрической системы и ветроэнергетической установки. Предлагаемая система состоит из солнечной фотоэлектрической панели и представлена в виде модели *Simulink*, подключенной к повышающему преобразователю. При моделировании величина первичной солнечной энергии, которая доступна для преобразования ФЭС (фотоэлектрической электростанции), определялась интенсивностью суммарного солнечного излучения в месте ее установки и зависела от географических координат месторасположения ФЭС, температуры воздуха, уровня облачности, коэффициента отражения земной поверхности. Полученная математическая модель позволяет использовать модель СБ (солнечная батарея) для разработки эффективных алгоритмов контроллеров ФЭС.

Ключевые слова: математическое моделирование; автономные ветроэнергетические системы; проектирование электротехнических комплексов; численный метод.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие систем автономного электроснабжения обусловлено целым рядом обстоятельств: необходимость решения социально-экономических проблем в труднодоступных районах, повышенные требования потребителя к независимости от централизованного энергоснабжения и его надежности, возможность или необходимость использовать местные первичные источники производства энергии. Указанная тенденция развития автономных энергетических систем характерна для всей мировой экономики, включая промышленно развитые страны, независимо от климата.

Например, солнечные фотоэлектрические батареи и ветровые системы преобразования энергии привлекают внимание благодаря своей экологичности, низкой стоимости и доступности для применения [1].

Автономные системы используются для изолированной работы, то есть не подключены к сети. Автономные солнечные фотоэлектрические системы и ветровые системы широко используются для выработки электроэнергии в сельской местности. Однако у солнечных и ветровых систем есть свои недостатки, поскольку они сильно зависят от погодных условий, а солнечную энергию можно использовать только в дневное время. Интеграция этих возобновляемых источников энергии с компетентной системой имеет огромный потенциал для предоставления надежного источника энергии для потребителей, чем система, основанная только на солнечной или ветровой энергии.

ОСНОВНАЯ КОНЦЕПЦИЯ

Предлагаемая система, представленная на рис. 1 и 2, состоит из солнечной фотоэлектрической панели, ветровой турбины, генератора PMSG и повышающего преобразователя постоянного тока, переключающего батарею на звене постоянного тока, и VSI для питания средней потребительской нагрузки.

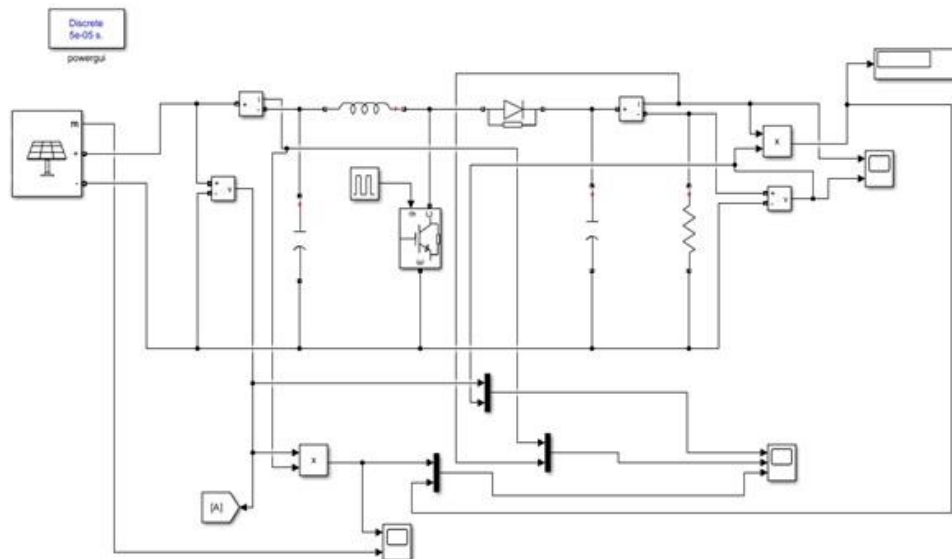


Рис. 1. Модель Simulink солнечной фотоэлектрической панели, подключенной к повышающему преобразователю

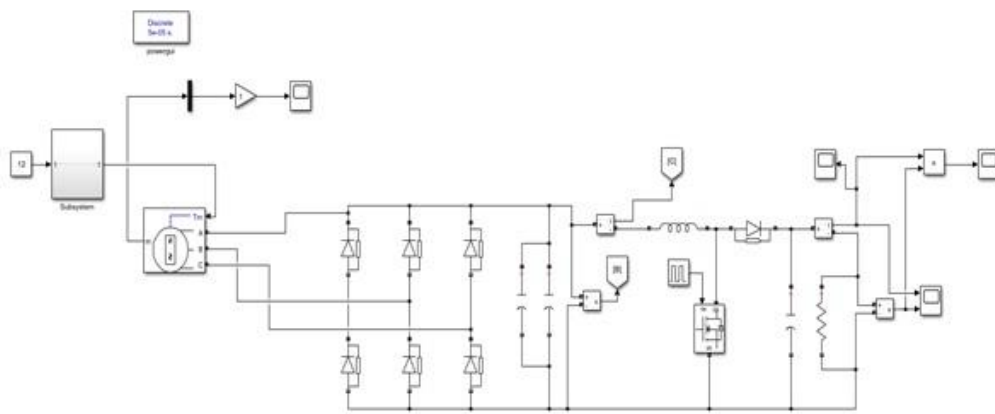


Рис. 2. Модель Simulink ветряной турбины, подключенной к повышающему преобразователю

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНО-ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Величина первичной солнечной энергии, которая доступна для преобразования ФЭС, определяется интенсивностью суммарного солнечного излучения в месте ее установки и зависит от географических координат месторасположения ФЭС, температуры воздуха, уровня облачности, коэффициента отражения земной поверхности.

Панель мощностью 30 кВт рассматривается как состоящая из 24 080 солнечных элементов, расположенных в комбинациях 344x70 мм. Солнечная батарея состоит из ряда панелей, соединенных в последовательно-параллельную конфигурацию, а панель состоит из ряда ячеек. Мощностные характеристики солнечной ячейки формулируются с использованием ее

эквивалентной схемы, использованной при моделировании имитационной модели, откуда выходной ток находился как,

$$I = I_{pv} - I_d - I_{Rs};$$

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p},$$

где I – выходной ток солнечной панели;

I_{pv} – ток, генерируемый светом, А;

V – напряжение на выходе панели, В;

R_s – внутреннее сопротивление, равное 0,55 Ом;

T – температура окружающей среды, °С;

q – величина заряда.

Для моделируемой системы были приняты следующие параметры при $t = 250$ °С и 1000 Вт/м²:

$$U = 17 \text{ В};$$

$$U_{oc} = 20 \text{ кВ};$$

$$P_{ном} = 50 \text{ Вт};$$

$$I = 2,9 \text{ А};$$

$$R_s = 0,55 \text{ Ом}.$$

Световой ток, генерируемый светом, равен I_{pv} . Токи насыщения через диоды равны I_0 . Напряжение на выходе панели равно U , В. Последовательное сопротивление ячейки равно R_s , что представляет собой внутреннее сопротивление ячейки и считается равным 0,55 Ом. Постоянная Больцмана равна K ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К). Температура окружающей среды (в Кельвинах) равна T , а постоянная заряда равна q ($1,607 \times 10^{-19}$ °С). Солнечная фотоэлектрическая батарея мощностью 30 кВт реализована с учетом 24 080 ячеек (размеры 344×70 мм) [2, 3].

Для построения модели солнечной батареи использовалась методика, предложенная [4], согласно которой максимальная выходная мощность солнечной батареи определяется по выражению:

$$P_{PV} = \frac{C_{FF} N_{FM} \eta_{cmv} G \ln(G \cdot 10^6)}{T_{FM}},$$

где N_{FM} – число ФМ в СБ;

C_{FF} – постоянный коэффициент СБ;

G – текущий уровень солнечной радиации, Вт/м²;

T_{FM} – текущая температура ФМ.

В отличие от оригинальной методики [4], в настоящей работе для определения величины коэффициента C_{FF} использовалось более точное выражение:

$$G_{FF} = \frac{FFT_{ref}}{G_{ref}} \cdot \frac{[I_{sc} + k_I(T_{FM} - T_{ref})] \cdot [V_{OC} + k_V(T_{FM} - T_{ref})]}{\ln G_{ref} \cdot 10^6},$$

где FF – коэффициент заполнения вольтамперной характеристики ВАХ;

T_{ref} , G_{ref} – значения температуры и освещенности ФМ при стандартных условиях;

k_I , k_V – температурные коэффициенты тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ.

Коэффициент заполнения ВАХ определялся по данным их технической спецификации:

$$FF = \frac{I_{MPP} V_{MPP}}{I_{SC} V_{OC}},$$

где I_{MPP} , V_{MPP} – паспортные значения тока и напряжения ФМ в точке максимальной мощности при стандартных условиях;

I_{SC} , V_{OC} – паспортные значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ при стандартных условиях.

Внутренние параметры модели СБ определяются данными технической спецификации ФМ и их количеством, входными переменными модели являются текущие значения величины солнечной радиации G и температуры поверхности ФМ T_{FM} , единственная выходная переменная определяет максимальную активную мощность PPV , которую можно снять с СБ в текущих условиях эксплуатации.

Для предложенной модели СБ использовались модель фотоэлектрического преобразователя, представленная в работе [5], и данные технической спецификации ряда ФМ моно- и поликристаллического типов.

Полученная математическая модель позволяет использовать модель СБ для разработки эффективных алгоритмов контроллеров ФЭС, совершенствования схемотехники преобразовательных устройств, прогнозирования выработки электроэнергии, анализа рабочих режимов фотоэлектрических систем.

Результаты моделирования солнечной фотоэлектрической панели, подключенной к повышающему преобразователю:

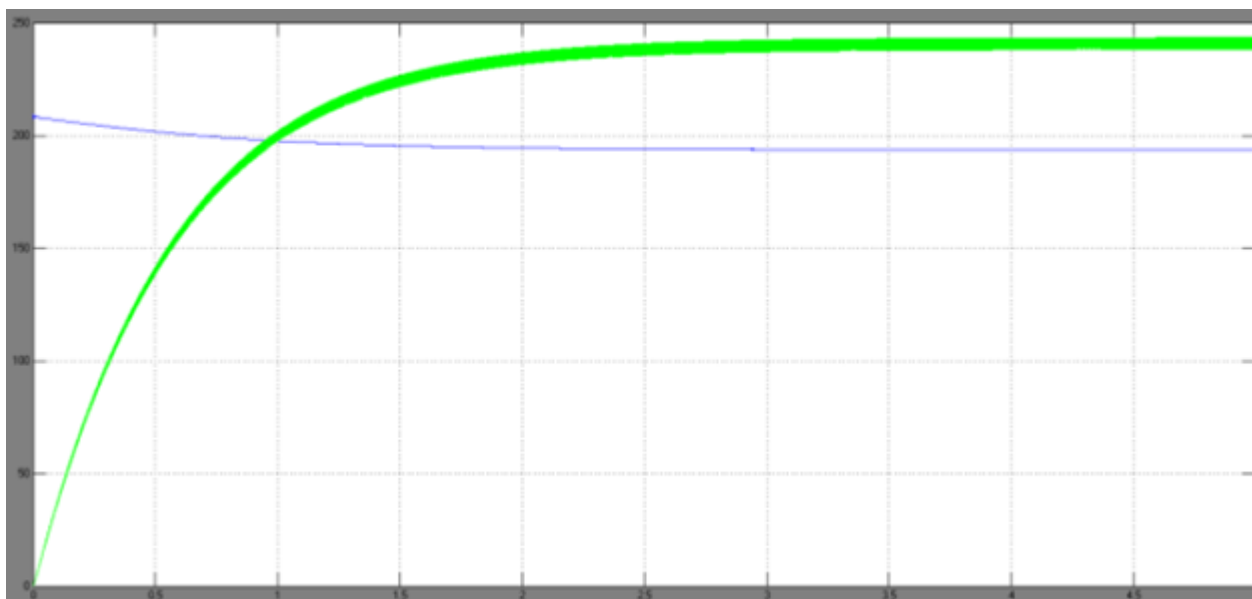


Рис. 3. Выходное напряжение фотоэлектрической панели

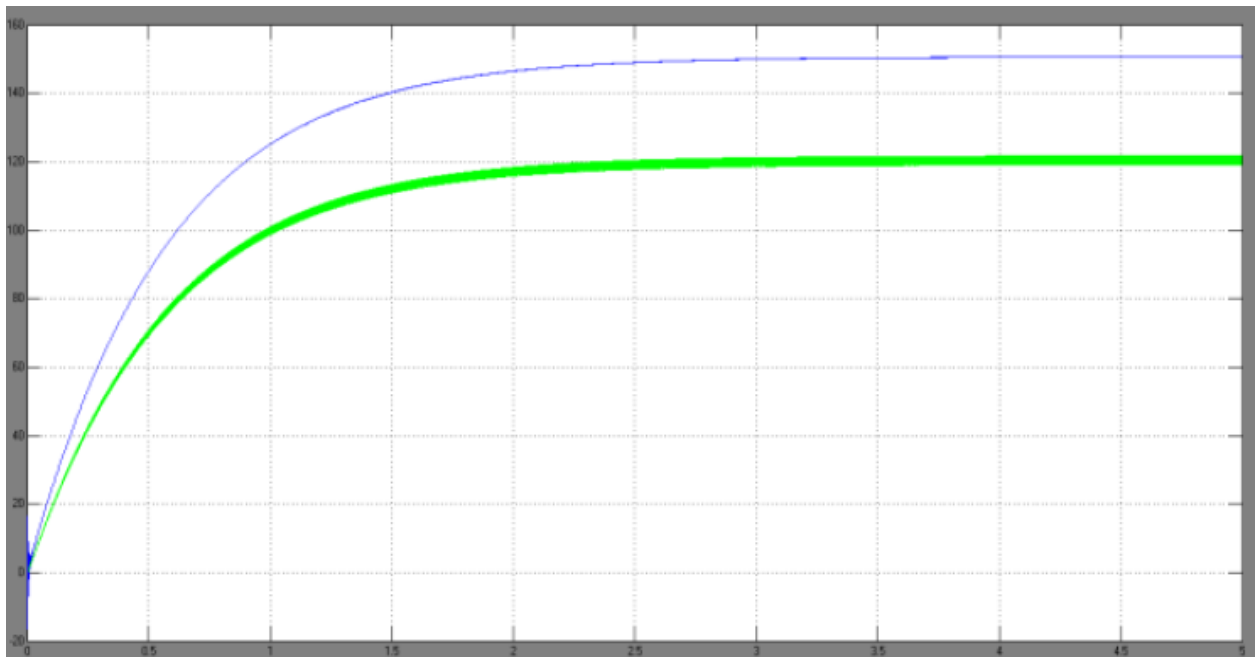


Рис. 4. Выходной ток фотоэлектрической панели

На графиках синяя линия показывает выходное напряжение и выходной ток у солнечной панели. Зеленая отвечает за повышающий преобразователь, к которому подключена солнечная панель.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Ветровая турбина выбрана с номинальной мощностью 7 кВт и смоделирована с использованием уравнения ее мощностных характеристик с учетом, которое показывает номинальную мощность, вырабатываемую ветровой турбиной. Номинальная скорость ветра для этой турбины составляет 10 м/с, а диаметр ротора – 6 м.

Выходная мощность ветровой турбины зависит от скорости ветра и выражается как:

$$P = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A V_w^3;$$

где плотность воздуха ρ составляет 1,22. Площадь ротора (A) рассчитывается как (πr^2) и в итоге равна 32 м².

Значение коэффициента мощности C является функцией угла наклона лопасти (β) и коэффициента скорости конца лопасти (λ), получается как:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,5 \left(\frac{116}{\lambda i} - 0,4\lambda - 5 \right) e^{\frac{-21}{\lambda i}} + 0,06\lambda;$$

$$\lambda i = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}.$$

Ветровая турбина с переменной скоростью моделируется с использованием приведенных выше уравнений.

Надежность ветряной турбины может быть улучшена с помощью синхронного генератора с постоянными магнитами (СГПМ), и он наиболее широко используется, поскольку представляет собой вращающуюся электрическую машину, в которой возбуждение поля обеспечивается постоянными магнитами [6].

Преимущества использования этого генератора включают бесщеточную конструкцию, малый вес, небольшой размер и высокую эффективность. Ротор СГПМ изготовлен из

постоянного магнита, который используется для подачи намагничивающего тока через статор для постоянного потока в воздушном зазоре. Ток статора используется для создания крутящего момента. СГПМ управляется для извлечения максимальной мощности ветряной турбины, доступной в потоке ветра, при различной скорости ветра [7].

Для получения синусоидальной электродвижущей силы установленный поток статора в постоянных магнитах также выбирается как синусоидальный. Из-за наличия большого воздушного зазора в СГПМ предполагается, что машина имеет линейную магнитную цепь, а сердечник статора или ротора не насыщается. Уравнения для электрической и механической системы могут быть получены из упрощенной модели оси dq СГПМ в синхронной системе отсчета поля ротора [6–8].

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{v_d}{L_d} - \frac{Ri_d}{L_d} + \frac{L_q}{L_d} p\omega_r i_q;$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{v_q}{L_q} - \frac{Ri_q}{L_q} + \frac{L_d}{L_q} p\omega_r i_d;$$

$$T_e = 1,5p[\phi i_q + (L_d - L_q)i_q i_d];$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = (T_e - T_f - F\omega_r - T_m)\frac{1}{J};$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r,$$

где L_d и L_q – индуктивности осей d и q ;

i_d и i_q – токи осей d и q соответственно;

R – сопротивление обмоток статора;

v_d и v_q – напряжения осей d и q соответственно;

ω – угловая скорость ротора;

p – число пар полюсов и электромагнитный момент;

J – объединенная инерция ротора и нагрузки;

F – объединенное вязкое трение ротора и нагрузки;

θ – угловое положение ротора;

T_m – механический момент вала;

T_f – момент трения вала.

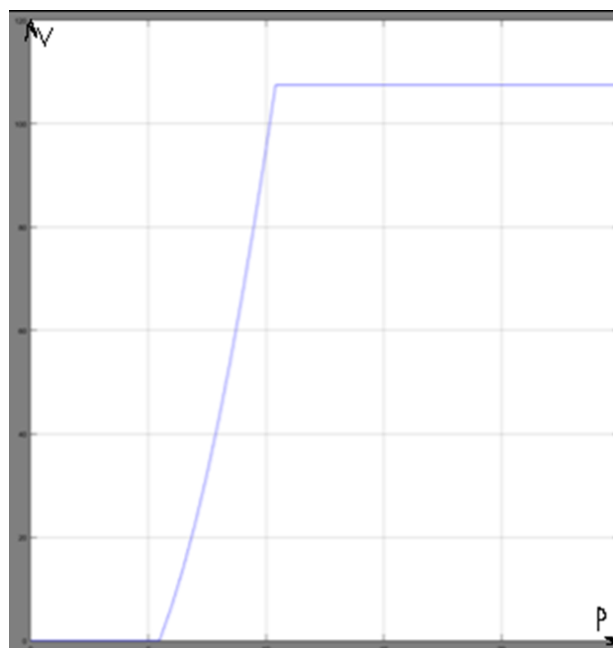


Рис. 5. График зависимости скорости ветра от мощности

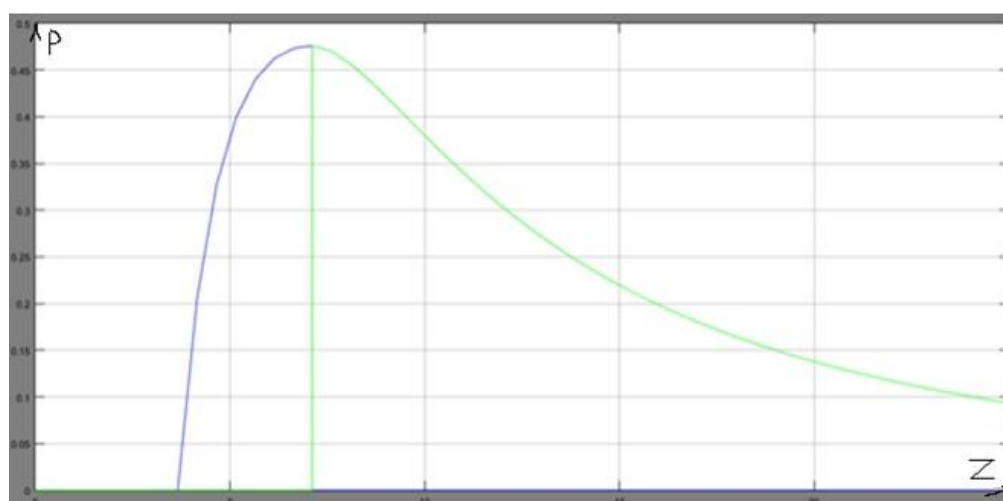


Рис. 6. График зависимости коэффициента использования энергии ветра от быстроходности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, нами были составлены математические модели солнечно-фотоэлектрической системы и ветроэнергетической установки. С использованием результатов моделирования были определены необходимые параметры для проектирования солнечно-фотоэлектрической системы. Данная математическая модель позволяет использовать модель для разработки эффективных алгоритмов контроллеров ФЭС, а также оптимизации схемотехники преобразовательных устройств, прогнозирования выработки электроэнергии, анализа рабочих режимов фотоэлектрических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-97; введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
2. Alex Dev S. Berlin Jeyaprabha, – Modeling and Simulation of PhotovoltaicModule in MATLAB|| International Conference on Applied Mathematics and Theoretical Computer Science – 2013. ISBN 978-93-82338-35-2.
3. Akikur R. K., Saidur R., Ping H. W., Ullah K. R. Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systemssuitable for off-grid rural electrification: A review|| Renewable and Sustainable Energy Reviews 27. 2013. P. 738–752.

4. Jones A. D., Underwood C. P. A thermal model for photovoltaic systems // Solar Energy. 2001. V. 70 (4). P. 349–359.
5. Обухов С. Г., Плотников И. А., Крючкова М. Моделирование электрических характеристик солнечной панели // Серия конференций ИОП: Материаловедение и машиностроение. 2016. Т. 132: Современные технологии неразрушающего контроля. 012017. 6 с.
6. Khajuria S., Kaur J. Implementation of Pitch Control Of wind Turbine Using Simulink (Matlab) // International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology. June 2012. Vol. 1. Issue 4.
7. Tan K., Islam S. Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System Without Mechanical Sensors // IEEE transactions on energy conversion. June 2004. Vol. 19. No. 2.
8. Rolan A., Luna A., Vazquez G. Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator // IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009). Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea. July 5–8. 2009.

ОБ АВТОРАХ

Колинченко Никита Сергеевич, студ. каф. ИЭТИ

METADATA

Title: Development of a mathematical model of backup power supply.

Author: N.S. Kolinichenko ¹

Affiliation:

¹ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹kolinichenko01@inbox.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (32), pp. 52-59, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract In addition, the SFP (solar photovoltaic panel) project was presented and the mathematical model and the primary electrical supply were developed, the mathematical models and the solar photovoltaic system and the wind power plant were developed. The proposed system consists of a single photovoltaic panel and is presented in the form of a model and a Simulink connected to a power converter. During modeling, the value of the primary solar energy required for the conversion of a FES (photovoltaic power plant) was determined by the intensity of the total solar radiation at the site of its installation and depended on the geographical coordinates of the locations of the FES, the temperature of the spirit, the level of toxicity, the coefficient of the earth's surface. The resulting mathematical model allows us to use the SB model (solar battery) to work out the effect of the algorithms of the FES controllers.

Keywords: mathematical modeling, autonomous electro-energy systems, design of electro-technical complexes, numerical method

About authors:

Nikita Sergeevich Kolinichenko, student, Dept. of Institute of Electrical Engineering (UUST).