

Повышение энергоэффективности ветроустановки для зарядки аккумуляторов

© 2023. В. Г. Петько, И. А. Рахимжанова, Ю. А. Ушаков , М. Б. Фомин, А. С. Байков, В. А. Пушко

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»,
г. Оренбург, Российская Федерация

В статье изложена методика определения оптимальных значений угловой скорости и числа витков обмотки генератора на постоянных магнитах с приводом от ветротурбины, работающей в конкретных, по скоростному режиму ветра, условиях эксплуатации. Критерием оптимизации является максимум потенциала энергии, которая может быть направлена на зарядку аккумулятора. В качестве ограничивающих факторов приняты допустимые мощность генератора и ветротурбины, ток и напряжение зарядки аккумулятора. Ограничение предусмотрено путём подключения к выходу генератора балластного резистора. Развиваемая ветротурбиной мощность определяется с учётом коэффициента использования энергии ветра, зависящего от угловой скорости её вала и скорости ветра. Произведено сравнение двух вариантов ограничения мощности: путём ограничения угловой скорости аэродинамическими средствами и путём остановки ветротурбины. Отдача энергии на зарядку в том и другом случаях определяется с учётом распределения скоростей ветра, подчиняющемуся закону распределения вероятностей Вейбулла. В работе в качестве примера произведён расчёт возможной годовой выработки энергии для зарядки аккумулятора ёмкостью 200 А·ч напряжением 24 В от синхронного генератора с числом полюсов 48 с приводом от ветротурбины радиусом 2 м, работающей в местности со средней скоростью ветра 5 м/с. Результаты расчёта показали, что для принятых в примере параметров и условий эксплуатации ветроустановки максимальную годовую выработку энергии ($3,3 \cdot 10^3$ кВт·ч) наблюдали при оптимальных 11-ти витках обмотки на каждом из полюсов генератора. Отклонение числа витков от оптимального в ту и другую сторону в 2 раза приводит, при тех же габаритах ветроустановки, к снижению годовой выработки энергии в 3...5 раз, что является наглядным доказательством необходимости проведения подобного расчёта для каждой конкретной ветроустановки.

Ключевые слова: мощность, синхронный генератор, электродвижущая сила, коэффициент мощности, энергия зарядки

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации трехлетнего плана научно-исследовательских работ на 2022-2024 годы за счет средств ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет» (протокол №3 Ученого совета ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет» от 22.10.2021 г.).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Петько В. Г., Рахимжанова И. А., Ушаков Ю. А., Фомин М. Б., Байков А. С., Пушко В. А. Повышение энергоэффективности ветроустановки для зарядки аккумуляторов. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(2):317-326. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.2.317-326>

Поступила: 23.11.2022

Принята к публикации: 28.03.2023

Опубликована онлайн: 25.04.2023

Improving the energy efficiency of wind turbines for charging batteries

© 2023. Viktor G. Petko, Ilmira A. Rakhimzhanova, Yuriy A. Ushakov , Maxim B. Fomin, Aleksey S. Baikov, Vladislav A. Pushko

Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russian Federation

The article describes the method for determining the optimal angular velocity and the number of turns of the generator winding on permanent magnets powered by a wind turbine operating in specific operating conditions according to the wind speed regime. The optimization criterion is the maximum potential of energy that can be used to charge the battery. The permissible power of the generator and wind turbine, current and battery charging voltage are accepted as limiting factors. The restriction is provided by connecting a ballast resistor to the generator output. The power developed by the turbine is determined taking into account the wind energy utilization factor, which depends on the angular velocity of its shaft and wind speed. Two variants of power limitation are compared: by limiting the angular velocity by aerodynamic means and by stopping the wind turbine. The return of energy to charging in both cases is determined taking into account the distribution of wind speeds, obeying the Weibull probability distribution law. As an example, the calculation of the possible annual power generation for charging a battery with a capacity of 200 A·h with a voltage of 24 volts from a synchron generator with a number of poles of 48 driven by a wind turbine with a radius of 2 meters, operating in an area with an average wind speed of 5 m/s. The calculation shows that for the parameters and operating conditions of the electrical installation used in the example, the maximum annual energy output (3.3×10^3 kWh) is observed at optimal 11 turns of the winding at each of the poles of the generator. The deviation of the number of turns from the optimal one in both directions by 2 times leads, with the same dimensions of the wind turbine, to a decrease in annual energy output by 3...5 times, which is a clear proof of the need to carry out such a calculation for each specific wind turbine.

Key words: power, synchronous generator, electromotive force, power factor, charging energy

Acknowledgements: the work was carried out as part of the implementation of the three-year research plan of the Orenburg State Agrarian University for 2022-2024. The work was carried out at the expense of the funds of the Orenburg State Pedagogical University (Protocol No. 3 of the Academic Council of the Orenburg State Pedagogical University dated 10.22.2021).

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

Conflict of interest: the authors declared no conflict of interest.

For citations: Petko V. G., Rakhimzhanova I. A., Ushakov Yu. A., Fomin M. B., Baikov A. S., Pushko V. A. Improving the energy efficiency of wind turbines for charging batteries. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(2):317-326. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.2.317-326>

Received: 23.11.2022

Accepted for publication: 28.03.2023

Published online: 25.04.2023

Бесперебойное электропитание потребителей от альтернативного источника энергии переменной непредсказуемой интенсивности, к одному из типичных примеров которого относится ветер, в принципе невозможно осуществить без использования или резервного традиционного источника энергии, или электрического аккумулятора [1, 2, 3]. При относительно небольшой (до нескольких кВт) мощности электропотребления второй вариант наиболее предпочтителен. Из всего многообразия конструктивных и принципиальных схем ветроэнергетических установок с аккумулярованием электрической энергии следует выделить отличающиеся простотой технической реализации ветроустановки с применением синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов [4, 5, 6]. Несовпадение графиков выработки ветроустановкой электрической энергии и графиков её потребления является причиной работы аккумуляторов в режиме циклического заряда и разряда, а в некоторые моменты и перехода в буферный режим зарядки [7, 8, 9]. Так как синхронный генератор на постоянных магнитах лишен возможности регулирования развиваемой им электродвижущей силы (ЭДС) путём изменения магнитного потока его ЭДС, а, следовательно, и напряжение на выходе пропорционально угловой скорости приводного вала генератора и равной ей угловой скорости вала ветротурбины (при прямом их соединении). При параллельном подключении аккумулятора и синхронного генератора их ЭДС мало отличаются по величине [10]. А поскольку ЭДС заряженного и разряженного аккумулятора также отличаются всего лишь на несколько процентов, то угловая скорость генератора и ветротурбины

будет во время работы оставаться практически постоянной при всех скоростях ветра^{1, 2}. Это исключает возможность работы ветротурбины в режиме с максимальным использованием энергии ветра, предполагающем работу при оптимальной по указанному критерию угловой скорости, пропорционально изменяющейся скорости ветра [11].

Цель работы – определение рабочей угловой скорости ветротурбины и генератора, напрямую зависящей от числа витков обмотки генератора, при которой потенциально генератор при существующем в месте установки ветроагрегата распределении скоростей ветра мог отдавать на зарядку аккумулятора и питание потребителей максимальное количество энергии.

Новизна исследований – разработка методики определения оптимального числа витков обмотки генератора по критерию максимума энергии, которая потенциально может быть направлена на зарядку аккумулятора, при заданных параметрах аккумулятора, магнитной системы синхронного генератора на постоянных магнитах и ветротурбины, работающей в конкретных по скоростному режиму ветра условиях эксплуатации.

Материал и методы. Принципиальная схема ветроэнергетической установки для зарядки аккумуляторов изображена на рисунке 1³.

Напряжение U_a , полученное путём выпрямления напряжения U_g синхронного генератора с помощью диодного моста VD1...VD6, поступает через диод обратного тока VD7 на вход аккумулятора GB1. Величина этого напряжения (действующее значение) является функцией угловой скорости ω вала генератора и числа витков W катушек генератора (здесь и далее по тексту под числом витков W катушки

¹IEC 60034-2-3 ed1.0, Rotating electrical machines. Part 2-3: Specific Test Methods for Determining Losses and Efficiency of Converter-Fed AC Induction Motor, Geneva, Switzerland, November 2013. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/123>

²IEC 60034-30-2, Edition 1.0: Rotating Electrical Machines – Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code), Geneva, Switzerland, February 2016. URL: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60034-30-2%7Bed1.0%7Den.pdf

³Разнообразные схемы зарядных устройств. Мои инструменты. 2020 г. [Электронный ресурс].

URL: <http://moy-instrument.ru/chertezhi-i-shemy/printsiipialnye-shemy-zaryadnyh-ustrojstv-dlya-avtomobilnyh-akkumulyatorov.html> (дата обращения: 03.10.2022).

генератора будем иметь в виду число витков W обмотки, выполненной в виде катушки на каждом из зубцов статора генератора):

$$U_d(\omega, W) = U_d(1,1) \omega W, \quad (1)$$

где $U_d(1,1) = U_{d0} = 2,34E_0/\text{Sin}(\pi/p)^4$ – размерный коэффициент пропорциональности, численно

равный напряжению на выходе выпрямителя при $\omega = 1$ рад/с и $W = 1$, В·с/(вит·рад); E_0 – ЭДС в каждом витке обмотки при $\omega = 1$ рад/с, зависящая только от геометрических и физических параметров магнитной системы генератора, В·с/(вит·рад); p – число полюсов (зубцов) статора.

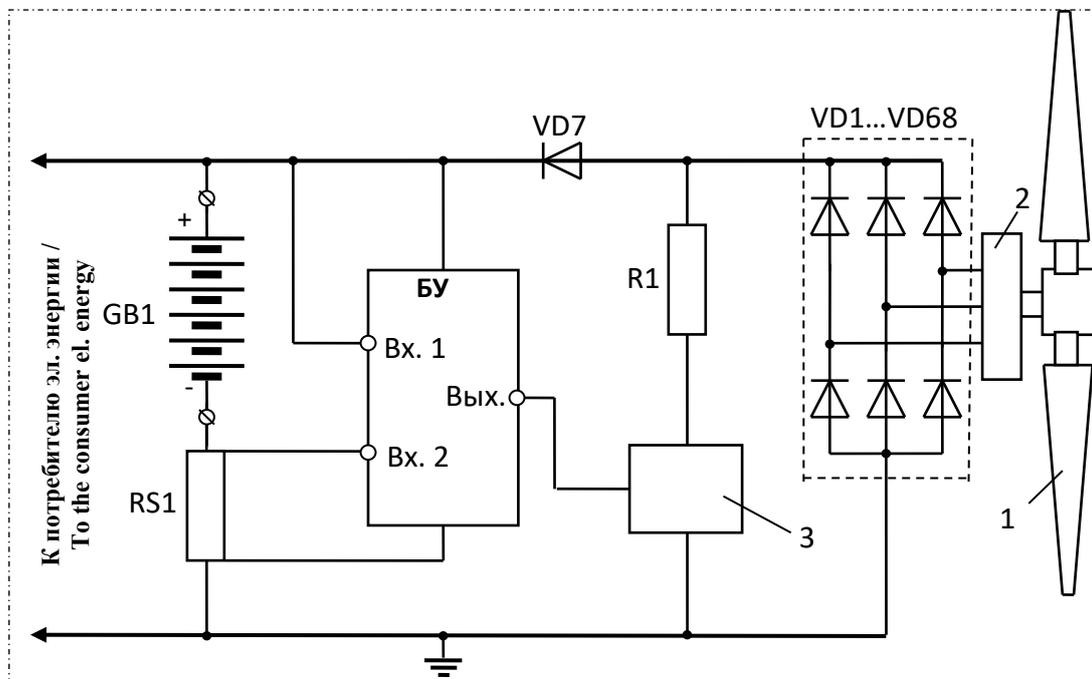


Рис. 1. Принципиальная схема ветроагрегата: 1 – ветротурбина; 2 – трёхфазный синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов; VD1...VD6 – трёхфазный диодный мост Ларионова; R1 – нагрузочный резистор; VD7 – диод ограничения обратного тока; БУ – блок управления; 3 – ключ; RS1 – шунт измерительный; GB1 – аккумулятор /

Fig. 1. Schematic diagram of the wind turbine: 1 – wind turbine; 2 – three-phase synchronous generator with excitation from permanent magnets; VD1...VD6 – Larionov three-phase diode bridge; R1 – load resistor; VD7 – reverse current limiting diode; BU – control unit; 3 – key; RS1 – measuring shunt; GB1 – battery

В результате напряжение на выходе выпрямителя определяется:

$$U_d(\omega, W) = U_{d0} \omega W = \frac{2,34E_0}{\text{sin}(\pi/p)} \omega W. \quad (2)$$

На вход 2 блока управления поступает сигнал величины тока зарядки аккумулятора, а на вход 1 – сигнал величины напряжения на клеммах, характеризующей степень его зарядки. Блок управления формирует поступающий на вход ключа 3 сигнал подключения к выходу генератора нагрузочного резистора R1, чем предотвращает превышение тока зарядки аккумулятора выше допустимой величины I_{zd} , а также исключает превышение напряжения U_a на клеммах аккумулятора, выше напряжения при полной его зарядке, равного для 12-ти вольтового аккумулятора 13,7 В [12]. Как в том, так и в другом случаях (ввиду незначительности

внутреннего сопротивления аккумулятора), напряжение на его клеммах и равное ему напряжение на выходе выпрямителя U_d с достаточной степенью точности можно считать постоянным. Следовательно, можно считать постоянной в период зарядки (в рабочий период) и соответствующую этому напряжению рабочую угловую скорость ω_r генератора, а следовательно, и ветротурбины. В то же время она должна быть такой, чтобы в условиях реального распределения скоростей ветра в месте установки ветроагрегата при одних и тех же (заранее заданных) параметрах ветротурбины, аккумулятора и магнитной системы генератора обеспечивался бы максимальный потенциал энергии для передачи непосредственно на зарядку аккумулятора. Для синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов,

⁴Трёхфазная мостовая схема (Ларионова) выпрямителя. Мудосх. 2015 г.
URL: <https://mydocx.ru/1-10121.html> (дата обращения: 22.10.2022).

в котором связь между числом витков и угловой скоростью при постоянном напряжении – однозначна, выполнение этих двух условий будет обеспечено при оптимальном, по указанному критерию, числе витков (W_{opt}) катушек генератора.

При известной номинальной ёмкости Q_{an} в ампер-часах установленного аккумулятора допустимая мощность зарядки в ваттах запишется:

$$P_{zd}(\omega, W) = U_d(\omega, W)I_{zd} = U_d(\omega, W)K_d Q_{an}, \quad (3)$$

где $K_d = I_{zd}/Q_{an}$ – кратность допустимого тока зарядки по отношению к ёмкости аккумулятора, равная по рекомендации различных источников [12, 13, 14] от 0,1 до 0,3, ч⁻¹.

При работе генератора на аккумулятор неизменное напряжение на клеммах аккумулятора равно напряжению на выходе выпрямителя, которое обеспечивается генератором при соответствующей этому напряжению неизменной рабочей скорости вала:

$$U_a = U_d(\omega_p, W) = U_{d0}\omega_p W = \frac{2,34E_0}{\sin(\pi/p)}\omega_p W. \quad (4)$$

Рабочую угловую скорость генератора в функции числа витков на каждом из зубцов магнитной системы статора определяем:

$$\omega_p(W) = \frac{U_a}{U_{d0}W} = \frac{U_a \sin(\pi/p)}{2,34E_0W}, \quad (5)$$

тогда минимальная скорость ветра, при которой напряжение $U_d(\omega, W)$ на выходе выпрямителя достигнет величины U_a и начнётся зарядка аккумулятора, составит:

$$V_0(W) = \frac{R\omega_p(W)}{Z_c} = \frac{RU_a \sin(\pi/p)}{2,34Z_cW}, \quad (6)$$

где R – радиус ветротурбины, м; Z_c – синхронная быстроходность ветротурбины, отн. ед.

Мощность ветротурбины, развиваемая ею при зарядке аккумулятора, в функции скорости ветра V и числа витков W определяется:

$$P_t(V, W) = \zeta(V, \omega_p(W))P_w(V) = \zeta(V, W)P_w(V), \quad (7)$$

где $\zeta(V, W)$ – коэффициент использования мощности ветрового потока [14] в функции скорости ветра и числа витков, равный нулю при $V < V_0(W)$; $P_w(V) = 0,5\rho SV^3$ – мощность воздушного потока через ометаемую поверхность ветротурбины, Вт; ρ – плотность воздуха, равная 1,29 кг/м³; $S = \pi \cdot R^2$ – площадь поверхности, ометаемой ветротурбиной, м².

При этом, если мощность ветротурбины увеличивается до допустимой мощности P_{zd} зарядки аккумулятора, блок управления путём периодического подключения и отключения

нагрузочного резистора R_l ограничивает её на уровне P_{zd} . При достижении превышения допустимой по условиям нагрева мощности генератора P_{gd} блок управления останавливает ветротурбину или ограничивает её мощность на уровне P_{gd} аэродинамической системой ограничения.

Непосредственно на зарядку аккумулятора с выхода генератора будет поступать несколько меньшая мощность:

$$P(V, W) = P_t(V, W)\eta, \quad (8)$$

где η – КПД генератора.

Таким образом, зная мощность, можно определить и потенциал энергии за год эксплуатации, который ветроустановка может отдать на зарядку аккумулятора при различном числе витков W катушки:

$$w(W) = \int_{V_0(W)}^V P(V, W)f(V)dV, \quad (9)$$

где $f(V)$ – функция распределения скоростей ветра в месте эксплуатации ветроустановки.

Число витков катушки, при котором наблюдается максимум данной энергии и будет его оптимальным значением.

Результаты и их обсуждение. Осуществим расчёт по изложенной методике ветроустановки, предназначенной для зарядки аккумулятора ёмкостью 200 А·ч напряжением 24 В. Расчёт осуществим в математической системе Mathcad⁵.

Электродвижущая сила E_z заряженного аккумулятора равна 2·13,7 = 27,4 В. Приняв кратность K_d допустимого тока зарядки равной 0,1, определим допустимую мощность зарядки аккумулятора:

$$P_{zd} = K_d Q_a E_z = 0,1 \cdot 200 \cdot 27,4 = 548 \text{ Вт}. \quad (10)$$

Генератор синхронный трёхфазный с возбуждением от постоянных магнитов с числом полюсов (зубцов) статора $p = 48$ и допустимой (номинальной) мощностью $P_{gd} = 700$ Вт. В результате проведённого расчёта установлена величина ЭДС магнитной цепи генератора в расчёте на один виток катушки и один радиан в секунду угловой скорости ω генератора – $E_0 = 0,0074$ В. С учётом выражения (2) для данного генератора получим зависимость:

$$U_d(\omega, W) = \frac{2,34 \cdot E_0}{\sin\left(\frac{\pi}{p}\right)} \omega W = \frac{2,34 \cdot 0,0074}{\sin(\pi/48)} \omega W = 0,265 \omega W. \quad (11)$$

Графически эта зависимость для наглядности проиллюстрирована на рисунке 2.

⁵Черняк А. А., Черняк Ж. А. Математические расчеты в среде Mathcad: учебное пособие для вузов. Под общ. ред. А. А. Черняк. 3-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2022. 163 с. URL: <https://urait.ru/bcode/492750>

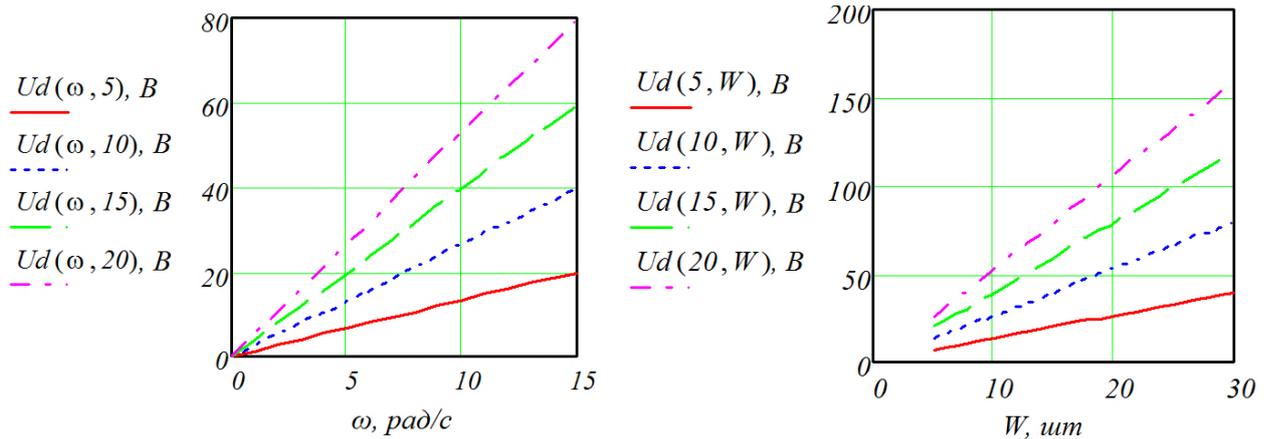


Рис. 2. Зависимости напряжения на выходе выпрямителя от угловой скорости и числа витков / Fig. 2. The dependence of the voltage at the output of the rectifier on the angular velocity and on the number of turns

В соответствии с уравнением (5) рабочая угловая скорость данного генератора, работающего на заданный аккумулятор в функции числа витков, составит:

$$\begin{aligned} \omega_p(W) &= \frac{U_a \sin(\pi/p)}{2,34E_0W} = \\ &= \frac{27,4 \sin(\pi/48)}{2,34 \cdot 0,0074W} = \frac{103,5}{W}. \end{aligned} \quad (12)$$

Как следует из полученного выражения, она однозначно связана с числом витков W и обратно пропорциональна их числу.

Принято, что привод генератора осуществляется от ветротурбины с горизонтальной осью

вращения, имеющей радиус 2 м и синхронную быстроходность 9 ($R = 2, Z_c = 9$). Тогда, с учётом выражения (6) минимальная скорость ветра в функции числа витков, с которой начинается зарядка аккумулятора при заданных его параметрах, а также магнитной системы генератора и ветротурбины, вычисляется:

$$\begin{aligned} V_0(W) &= \frac{RU_a \sin(\pi/p)}{2,34Z_cW} = \\ &= \frac{2 \cdot 27,4 \sin(\pi/48)}{2,34 \cdot 9W} = \frac{23}{W}. \end{aligned} \quad (13)$$

В виде графиков зависимости $V_0(W)$ и $\omega_p(W)$ представлены на рисунке 3.

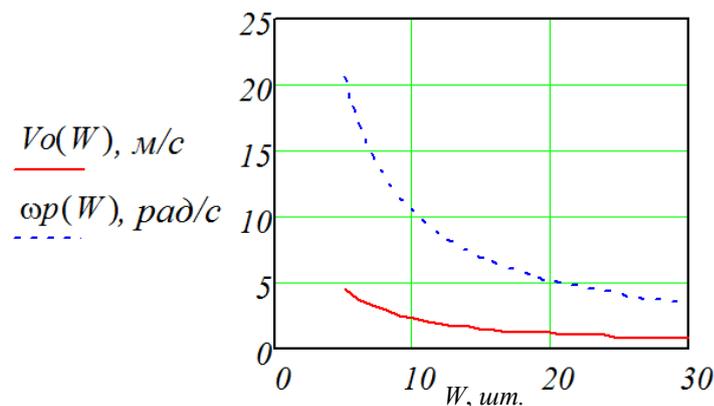


Рис. 3. Зависимости рабочей начальной скорости ветра и рабочей угловой скорости вала генератора от числа витков его катушки /

Fig. 3. Dependences of the working initial wind speed and the working angular velocity of the generator shaft on the number of turns of the generator coil

Примечательно, что соотношение между рабочей угловой скоростью и минимальной скоростью ветра при любых параметрах составных узлов ветрозарядной установки не зависит от числа витков катушки генератора. В частности, для рассматриваемой установки оно будет равно:

$$\omega_p(W) / V_0(W) = \frac{\omega_p(W)}{V_0(W)} = \frac{103,5/W}{23/W} = 4,5. \quad (14)$$

Для ветротурбины, принятой для привода генератора, зависимость коэффициента использования мощности ветрового потока ζ от скорости ветра V и угловой скорости ω ветротурбины, заданной графически, аппроксимирована семью членами ряда Фурье⁶ [11]. Максимальная погрешность аппроксимации при этом составила 0,7 %. Ввиду того, что

⁶Быстрицкий Г. Ф., Гасангаджиев Г. Г., Кожиченков В. С. Общая энергетика. Основное оборудование: учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2022. 416 с. URL: <https://urait.ru/bcode/490895>

мощность зарядки аккумулятора равна нулю при скорости ветра меньше начальной $V_0(W) = \omega_p(W)R/Z_c$ (рис. 3), при которой начинается заряд аккумулятора, принимается $\zeta(V, W) = 0$ при $V < V_0(W)$ и $\zeta(V, \omega) = \zeta(V, W)$ при $V > V_0$.

На рисунке 4 для сопоставления приведены зависимости мощности ометаемого турбиной воздушного потока ($P_w(V) = 0,5\rho SV^3$) и

мощности ветротурбины $P(V, W) = \zeta(V, W) P_w(V)$ при числах витков катушки 2 и 3, которую потенциально она может развивать при зарядке аккумулятора. Для оценки степени влияния на мощность ветротурбины представлены кривые зависимости коэффициента использования мощности ветрового потока от скорости ветра в масштабе $3 \cdot 10^5:1$ при этих же числах витков катушки генератора $\xi_t(V, W) = 3 \cdot 10^5 \xi(V, W)$.

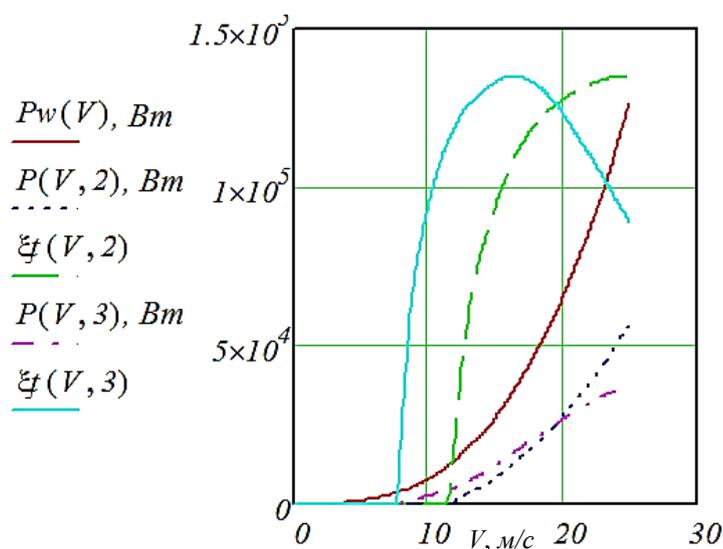


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования мощности ветрового потока и мощности ветротурбины, которую она может развивать на зарядку аккумулятора, от скорости ветра / Fig. 4. The dependence of the wind flow power utilization factor and the power of the wind turbine, which it can develop to charge the battery, on the wind speed

Однако реально мощность ветротурбины ограничивается допустимой мощностью зарядки аккумулятора P_{zd} или допустимой по условиям нагрева мощностью генератора P_{gd} [4, 15]. При этом возможны четыре случая.

А. Допустимая мощность генератора меньше допустимой мощности зарядки аккумулятора ($P_{gd} < P_{zd}$).

1. Ветротурбина оснащена аэродинамической системой ограничения мощности.

При мощности ветротурбины $P(V, W) < P_{gd}$ на зарядку аккумулятора может развиваться мощность $P_1(V, W) = P(V, W)$, а при $P(V, W) > P_{gd}$ – $P_1(V, W) = P_{gd}$. В системе Mathcad: $P_1(V, W) := \text{if}(P(V, W) < P_{gd}, P(V, W), P_{gd})$.

2. Вместо ограничения мощности ветротурбины производится её остановка, например, путём короткого замыкания на выходе генератора.

При мощности ветротурбины $P(V, W) < P_{gd}$ на зарядку аккумулятора будет развиваться мощность $P_2(V, W) = P(V, W)$ при $P(V, W) < P_{gd}$ и $P_2(V, W) = 0$ при $P(V, W) > P_{gd}$. В системе Mathcad: $P_2(V, W) := \text{if}(P(V, W) < P_{gd}, P(V, W), 0)$.

Б. Допустимая мощность генератора больше допустимой мощности зарядки аккумулятора ($P_{gd} > P_{zd}$).

3. Ветротурбина оснащена аэродинамической системой ограничения мощности.

При мощности ветротурбины $P(V, W) < P_{zd}$ на зарядку аккумулятора может развиваться мощность $P_3(V, W) = P(V, W)$, а при $P(V, W) > P_{zd}$ $P_3(V, W) = P_{zd}$. В системе Mathcad: $P_3(V, W) := \text{if}(P(V, W) < P_{zd}, P(V, W), P_{zd})$.

4. Остановка ветротурбины при увеличении её мощности сверх P_{zd} .

При мощности ветротурбины $P(V, W) < P_{zd}$ на зарядку аккумулятора будет развиваться мощность $P_4(V, W) = P(V, W)$ при $P(V, W) < P_{gd}$ и $P_4(V, W) = 0$ при $P(V, W) > P_{gd}$. В системе Mathcad: $P_4(V, W) := \text{if}(P(V, W) < P_{gd}, P(V, W), 0)$.

На рисунке 5 приведены графики изменения мощности ветротурбины для всех возможных случаев ограничения мощности и соотношений допустимых мощностей зарядки аккумулятора и генератора.

Анализ графиков показывает, что ограничение мощности ветротурбины во всех случаях осуществляется на уровне меньшей допустимой мощности. При этом ограничение мощности путём остановки ветротурбины, по сравнению с ограничением аэродинамическими средствами, исключает возможность использования энергии высокоскоростных потоков воздуха.

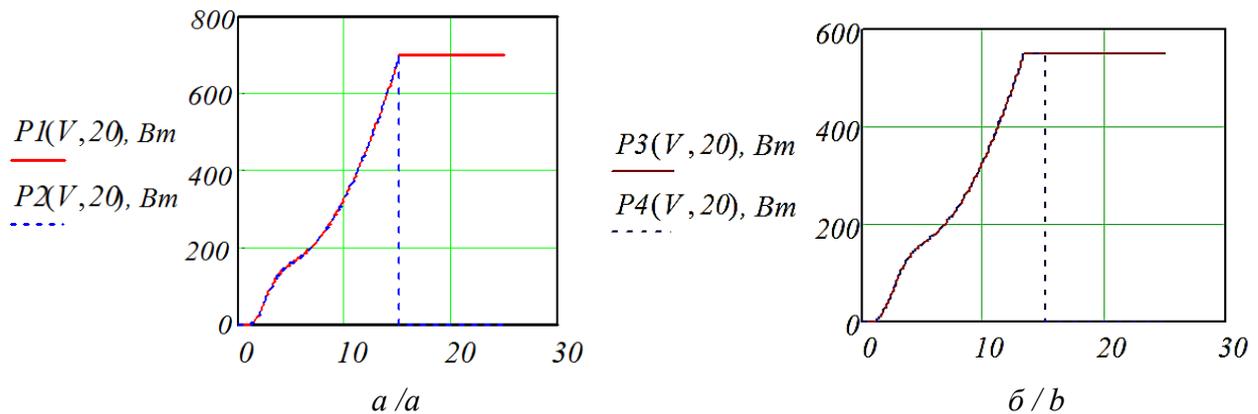


Рис. 5. Зависимости мощности зарядки аккумулятора от скорости ветра для: а) $P_{gd} < P_{zd}$; б) $P_{gd} > P_{zd}$ / Fig. 5. The dependence of the battery charging power on the wind speed for: а) $P_{gd} < P_{zd}$; б) $P_{gd} > P_{zd}$

С другой стороны, количество энергии, которое ветроустановка может отдать на зарядку аккумулятора, зависит не только от развиваемой ею мощности, но и от закона распределения скоростей ветра в месте эксплуатации ветроустановки. В большинстве мест этот закон описывается функцией распределения вероятностей Вейбулла [16]:

$$f(V) = (8760\alpha V^{\alpha-1} e^{-(V/\beta)^\alpha}) / \beta^\alpha, \quad (15)$$

где α – параметр формы; β – параметр масштаба.

В [17] была установлена связь этих параметров со средней скоростью ветра, аппроксимируемая выражениями:

$$\alpha = 1,45 Vc^{0,33} \text{ и } \beta = 1,0875 Vc + 0,625. \quad (16)$$

Для принятой в расчётах средней скорости ветра 5 м/с: $\alpha = 2,47$; $\beta = 6,063$.

Тогда количество энергии в киловатт-часах в функции числа витков W катушек гене-

ратора, которое ветроустановка потенциально может отдать на зарядку аккумулятора за год эксплуатации для рассмотренных выше соотношения допустимых параметров зарядки и вариантов ограничения мощности ветротурбины, может быть найдено по выражению (9).

Графически эти зависимости представлены на рисунке 6.

Вид полученных зависимостей указывает на наличие явно выраженного максимума отдаваемой энергии, наблюдающегося как при $P_{gd} < P_{zd}$ так и при $P_{gd} > P_{zd}$. в районе десяти витков, если турбина имеет ограничение мощности, и в районе 14...16 витков, если при мощности турбины, превышающей допустимую мощность генератора, производится её остановка. Причём максимум энергии и при $P_{gd} > P_{zd}$, и при $P_{gd} < P_{zd}$ значительно меньше при остановке турбины, чем при ограничении её мощности.

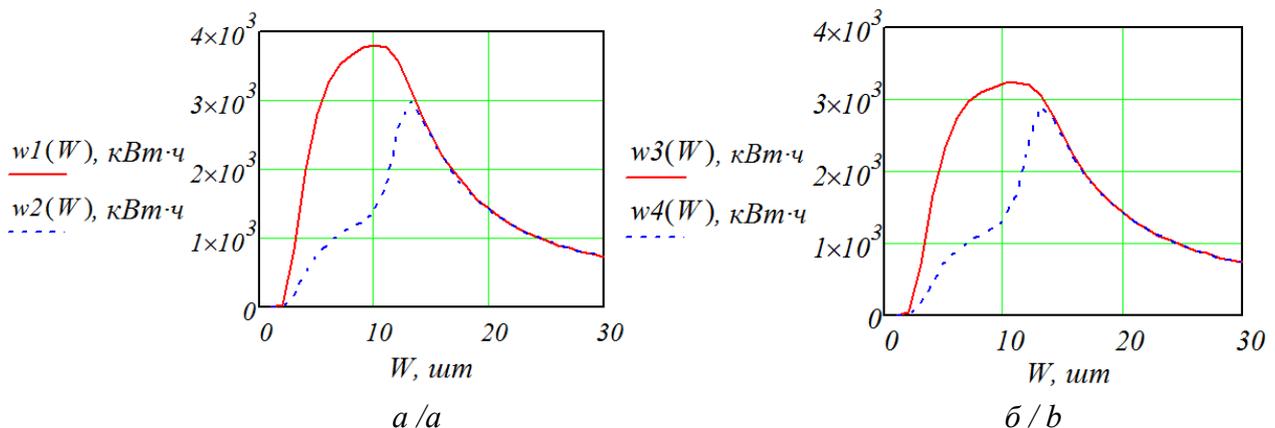


Рис. 6. Зависимости количества энергии в кВт·ч, которое может отдать ветротурбина за год эксплуатации, от числа витков каждой из катушек генератора при: а) $P_{gd} < P_{zd}$; б) $P_{gd} > P_{zd}$ /

Fig. 6. The dependence of the amount of energy in kWh that a wind turbine can give during a year of operation on the number of turns of each of the generator coils at: а) $P_{gd} < P_{zd}$; б) $P_{gd} > P_{zd}$

Заключение. Разработанная методика расчета возможной выработки энергии для зарядки аккумуляторов показала, что существует явно выраженный её максимум при определенном (оптимальном) для данной конкретной установки числе витков обмотки генератора. Отклонение числа витков от оптимального значения может приводить к снижению потенциала энергии в несколько раз. А так как оптимальное число витков обмотки генератора зависит от совокупности параметров всех составных узлов ветроустановки и распределения

скоростей ветра в предполагаемом месте её эксплуатации на завершающем этапе её изготовления следует осуществлять его определение для каждого конкретного случая по разработанной выше методике. При этом следует учитывать, что потенциально при любом числе витков выработка энергии больше, если допустимая мощность зарядки аккумулятора превышает допустимую мощность генератора и если ограничение мощности осуществляется не путём остановки ветротурбины, а аэродинамическими средствами.

Список литературы

1. Куницкая О. А., Помигуев А. В., Афоничев Д. Н., Григорьев В. И., Дмитриева И. Н., Григорьев Г. В. Альтернативные источники энергии для автономного энергоснабжения удаленных объектов сельского хозяйства и лесного комплекса. Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022;15(1):71-81. DOI: https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_71 EDN: PNWJGU
2. Titkov V. V., Bekbayev A. B., Munsyrbai T. M., Shakenov K. B. Construction of autonomous buildings with wind power plants. Magazine of Civil Engineering. 2018;4(80):171-180. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.80.15>
3. Васильев И. А., Кольниченко Г. И., Тарлаков Я. В., Сиротов А. В. Возобновляемые источники энергии в автономных источниках электроснабжения. Лесной вестник. 2020;24(4):91-97. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-2020-4-91-97> EDN: CLWKNY
4. Петько В. Г., Рахимжанова И. А., Фомин М. Б., Колесников А. Б., Садчиков А. С., Колесникова И. В. Обзор и оценка конструктивных схем ветродизельэлектрических установок. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022;(1(93)):135-141. DOI: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-93-1-135-140> EDN DRJZRW
5. Makarichev Y. A., Anufriev A. S., Zubkov Y. V., Didenko N. I. Energy efficiency of the wind power generator. Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, Saint Petersburg-Moscow, 28-30 January 2019. Saint Petersburg - Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. pp. 1011-1015. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657095>
6. Статкевич А. В., Тимофеев С. С., Шишлаков В. Ф. Современные ветроэнергетические установки: обзор и тенденции развития. Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: мат-лы XXV Международн. науч. конф., Санкт-Петербург, 30 мая – 03 июня 2022 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. С. 257-261. Режим доступа: <https://elibrary.ru/fnkagm> EDN FNKAGM
7. Tsgoev R., Isaev T. Energy Efficiency of Wind Electrical Plant Models Localized in the Russian Federation on the Repeatability Function of Wind Speed. Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, Sochi, 16-20 May 2022. Sochi, 2022. pp. 176-180. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM54945.2022.9787268>
8. Бороденков Е. В., Слисаренко С. Ю., Литвин В. И. Применение ветроэнергетической установки с аккумулярованием энергии для автономного энергоснабжения объектов сельского хозяйства. Современные проблемы энергоэффективности агроинженерных исследований в условиях цифровой трансформации: мат-лы Международ. научн.-практ. конф., Балашиха, 19 мая 2022 года. Балашиха: Российский государственный аграрный заочный университет, 2022. С. 99-103. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49046859&pff=1> EDN KAYAYI
9. Петько В. Г., Рахимжанова И. А., Фомин М. Б., Колесников А. Б., Садчиков А. С., Колесникова И. В. Регулирование мощности и частоты вращения ветротурбин путём изменения угла установки лопастей. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022;(3(95)):210-215. DOI: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-95-3-210-215> EDN: KPZJJD
10. Perzhabinsky S. M., Karamov D. N., Achitayev A. A. A Model of Reliability Optimization of a Stand-Alone Electric Power System with Constraints on Dynamic Stability of the Wind Turbine. Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2021;14(1):55-71. DOI <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0288>
11. Averyanov V. K., Tolmachev V. N., Shapovalov A. A., Sidorenko G. I. Application of algorithms with a predictive model in solving the problem of regulating the rotational speed of the wind turbine of autonomous wind energy converters. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019, St. Petersburg, 20-21 June 2019. St. Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019;666:012032. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/666/1/012032>
12. Мартынов А. А., Самсыгин В. К. Устройства для заряда и разряда аккумуляторных батарей источников бесперебойного питания. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020;1(391):151-158. DOI: <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2020-1-391-151-158> EDN: NBGTMU

13. Доброго К. В., Бладыко Ю. В. Моделирование сборки аккумуляторных батарей в электронной лаборатории. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021;64(5):381-392. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-381-392> EDN: OUIJKO
14. Селиванов К. В. Устройство для проверки Li-ion аккумуляторов и прогнозирования периода их работы в различных условиях. Датчики и системы. 2022;(2(261)):47-53. DOI: <https://doi.org/10.25728/datsys.2022.2.7> EDN: QTNPKN
15. Petko V., Rakhimzhanova I., Ushakov Yu., Fomin M., Khristianovskaya M. Methodology for determining optimal parameters of the valve float level regulator. AIP Conference Proceedings: international conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment 2021. Sevastopol, 06-10 September 2021. Sevastopol: American Institute of Physics Inc. 2022;2503:030027. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0100717>
16. Корсун О. Н., Ом М. Х., Латт Ч. З. Определение проекций скорости ветра на основе измерений воздушной скорости, углов атаки и скольжения. Мехатроника, автоматизация, управление. 2021;22(10):553-560. DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.22.553-560> EDN: FWAFLX
17. Петько В. Г., Рахимжанова И. А. Оценка энергетического потенциала воздушного потока. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018;(4(72)):227-231. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35553615> EDN UYPYTC

References

1. Kunitskaya O. A., Pomiguyev A. V., Afonichev D. N., Grigoriev V. I., Dmitrieva I. N., Grigoriev G. V. Alternative energy sources for autonomous power supply of remote facilities in agriculture and forestry. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Voronezh state agrarian university. 2022;15(1):71-81. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_71
2. Titkov V. V., Bekbayev A. B., Munsyzbai T. M., Shakenov K. B. Construction of autonomous buildings with wind power plants. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;4(80):171-180. DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.80.15>
3. Vasil'ev I. A., Kol'nichenko G. I., Tarlakov Ya. V., Siroto A. V. Renewable energy sources in independent systems of power supply. *Lesnoy vestnik*. 2020;24(4):91-97. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-4-91-97>
4. Petko V. G., Rakhimzhanova I. A., Fomin M. B., Kolesnikov A. B., Sadchikov A. S., Kolesnikova I. V. Review and evaluation of design schemes wind-diesel-electric installations. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2022;(1(93)):135-141. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-93-1-135-140>
5. Makarichev Y. A., Anufriev A. S., Zubkov Y. V., Didenko N. I. Energy efficiency of the wind power generator. Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, Saint Petersburg-Moscow, 28-30 January 2019. Saint Petersburg - Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. pp. 1011-1015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ElConRus.2019.8657095>
6. Statkevich A. V., Timofeev S. S., Shishlakov V. F. Modern wind power plants: overview and development trends. Wave electronics and Infocommunication systems: Proceedings of the XXV International Scientific Conference, St. Petersburg, May 30 – June 03, 2022. Saint-Petersburg: *Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya*, 2022. pp. 257-261. URL: <https://elibrary.ru/fnkagm>
7. Tsgoev R., Isaev T. Energy Efficiency of Wind Electical Plant Models Localized in the Russian Federation on the Repeatability Function of Wind Speed. Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, Sochi, 16-20 May 2022. Sochi, 2022. pp. 176-180. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM54945.2022.9787268>
8. Borodnikov E. V., Slisarenko S. Yu., Litvin V. I. Application of a wind power plant with energy storage for autonomous power supply of agricultural facilities. Modern problems of energy efficiency of agroengineering research in the context of digital transformation: Proceedings of the International scientific and practical conference, Balashikha, May 19, 2022. Balashikha: *Rossiyskiy gosudarstvennyy agrarnyy zaochnyy universitet*, 2022. pp. 99-103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49046859&pff=1>
9. Petko V. G., Rakhimzhanova I. A., Fomin M. B., Kolesnikov A. B., Sadchikov A. S., Kolesnikova I. V. Regulation of power and speed of wind turbines by changing the angle of the blades. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2022;(3(95)):210-215. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-95-3-210-215>
10. Perzhabinsky S. M., Karamov D. N., Achitaev A. A. A Model of Reliability Optimization of a Stand-Alone Electric Power System with Constraints on Dynamic Stability of the Wind Turbine. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2021;14(1):55-71. DOI <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0288>
11. Aveyanov V. K., Tolmachev V. N., Shapovalov A. A., Sidorenko G. I. Application of algorithms with a predictive model in solving the problem of regulating the rotational speed of the wind turbine of autonomous wind energy converters. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019, St. Petersburg, 20-21 June 2019. St. Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019;666:012032. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/666/1/012032>
12. Martynov A. A., Samsygin V. K. Chargers/dischargers for ups batteries. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* = Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020;1(391):151-158. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2020-1-391-151-158>

13. Dobrego K. V., Bladyko Yu. V. Modeling Battery Connections in the Electronic Lab. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i obrazovatel'nykh ob'edineniy SNG = ENERGETIKA*. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. 2021;64(5):381-392. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-381-392>

14. Selivanov K. V. Devices for testing li-ion batteries and predicting the period of their operation in various conditions. *Datchiki i sistemy*. 2022;(2(261)):47-53. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25728/datsys.2022.2.7>

15. Petko V., Rakhimzhanova I., Ushakov Yu., Fomin M., Khristianovskaya M. Methodology for determining optimal parameters of the valve float level regulator. AIP Conference Proceedings: international conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment 2021. Sevastopol, 06-10 September 2021. Sevastopol: American Institute of Physics Inc. 2022;2503:030027. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0100717>

16. Korsun O. N., Om M. H., Latt K. Z. Determination of Wind Velocity Projections Taking into Account Measurements of Airspeed, Angles of Attack and Sideslip. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2021;22(10):553-560. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17587/mau.22.553-560>

17. Petko V. G., Rakhimzhanova I. A. Evaluation of energy potential of air flow. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2018;(4(72)):227-231. (In Russ.).

URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35553615>

Сведения об авторах

Петько Виктор Гаврилович, доктор техн. наук, профессор, кафедра «Электротехнологии и электрооборудование», ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет», д. 18, ул. Челюскинцев, г. Оренбург, Российская Федерация, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8214-8732>

Рахимжанова Ильмира Агзамовна, доктор с.-х. наук, профессор, зав. кафедрой «Электротехнологии и электрооборудование», ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет», д. 18, ул. Челюскинцев, г. Оренбург, Российская Федерация, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7771-7291>

✉ **Ушаков Юрий Андреевич**, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Физика и математика», ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет», д. 18, ул. Челюскинцев, г. Оренбург, Российская Федерация, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-5442>, e-mail: lu6j1a159@mail.ru

Фомин Максим Борисович, кандидат техн. наук, доцент, кафедра «Электротехнологии и электрооборудование», ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет», д. 18, ул. Челюскинцев, г. Оренбург, Российская Федерация, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1190-7842>

Байков Алексей Сергеевич, кандидат с.-х. наук, доцент, кафедра «Электротехнологии и электрооборудование», ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет», д. 18, ул. Челюскинцев, г. Оренбург, Российская Федерация, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9531-4712>

Пушко Владислав Анатольевич, кандидат техн. наук, доцент, кафедра «Электротехнологии и электрооборудование», ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет», д. 18, ул. Челюскинцев, г. Оренбург, Российская Федерация, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2019-3658>

Information about the authors

Viktor G. Petko, DSc in Engineering, professor, the Department of Electrical Technologies and Equipment, Orenburg State Agrarian University, 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, Russian Federation, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8214-8732>

Ilmira A. Rakhimzhanova, DSc in Agricultural Science, professor, Head of the Department of Electrical Technologies and Equipment Orenburg State Agrarian University, 18, 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, Russian Federation, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7771-7291>

✉ **Yuriy A. Ushakov**, DSc in Engineering, professor, Orenburg State Agrarian University, 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, Russian Federation, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-5442>, e-mail: lu6j1a159@mail.ru

Maxim B. Fomin, PhD in Engineering, associate professor, the Department of Electrical Technologies and Equipment, Orenburg State Agrarian University, 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, Russian Federation, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1190-7842>

Aleksey S. Baikov, PhD in Agricultural Science, associate professor, the Department of Electrical Technologies and Equipment, Orenburg State Agrarian University, 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, Russian Federation, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9531-4712>

Vladislav A. Pushko, PhD in Engineering, associate professor, the Department of Electrical Technologies and Equipment, Orenburg State Agrarian University, 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, Russian Federation, 460014, e-mail: rector@orensau.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2019-3658>

✉ – Для контактов / Corresponding author