

УДК 620.92, 621.316.1

DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-102-112

Интеллектуальная система управления, используемая при работе ветроэлектрических установок

Л. М. Абдали, аспирант, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Ф. М. Аль-Руфай, аспирант, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

В. В. Кувшинов, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Работа ветроэлектрических установок недостаточно стабильна и надежна, что связано с непостоянством ветрового потока и изменчивостью направления ветра. Однако мировая ветроэнергетика развивается довольно большими темпами, и в перспективе доля генерирующих мощностей, связанных с преобразованием ветрового потока, составит значительную часть всей электроэнергетики. Для устранения подобных факторов при проектировании работы ветротурбин необходимо более полно использовать системы автоматического регулирования не только параметров, связанных с работой механических частей, но и электрических характеристик ветроустановок на основе силовой электроники.

Выработка электрической энергии путем преобразования ветрового потока стала основой возобновляемой энергетики в энергосистемах всего мира. Современные системы ветроэлектрических установок (ВЭУ), преобразующие ветровые потоки с различной скоростью и расположенные на крупных ветроэлектрических станциях, нашли лучшее признание и захватили большую часть доли рынка. Подобные установки преобразовывают ветровую энергию с использованием силовых электронных систем. Технологии систем силовой электроники значительно повышают управляемость ветротурбин. Использование электронных систем в ветроэнергетике позволяет эффективно решать проблемы, связанные с требованиями к подключению к электросети.

В предложенной работе представлено интеллектуальное устройство управления гибридной системой преобразования энергии ветра (СПЭВ) с помощью ветровой турбины с переменной скоростью вращения ротора на основе синхронного генератора с постоянным магнитом (СПМ-ВЭУ). Предлагаемая конструкция управления затрагивает многие части системы, которые обеспечивают отслеживание максимальной мощности, управление системой и поддержание постоянного напряжения на необходимом уровне. Предлагаемый регулятор разработан с использованием дробного пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора, где параметры контроллера успешно настраиваются новым алгоритмом метаэвристической оптимизации Бат (ВА). Чтобы выделить и сравнить характеристики этого контроллера, он используется при изменении скорости ветра и сравнивается с обычным ПИ-регулятором. Результаты моделирования показывают эффективность предложенного контроллера. Кроме того, по предложенной схеме установка ветротурбины с постоянным магнитом эффективно управляется в различных режимах работы.

Ключевые слова: ветротурбина, энергия ветра, управление, синхронный генератор с постоянными магнитами, интеллектуальная система управления.

Введение

Эффект глобального потепления вместе с уменьшением запасов ископаемого топлива способствовал увеличению внимания к возобновляемой энергетике. Из всех видов возобновляемой энергии энергия ветра признана основным источником в электроэнергетике. Ресурсы энергии ветра огромны во всем мире [1]. Система преобразования энергии ветра (СПЭВ) является одним из наиболее универсальных нетрадиционных источников энергии из-за постоянно растущего спроса на электроэнергию. Поскольку ветер является естествен-

ным источником, а его полезность основана на климатических изменениях, важно эффективно использовать эту энергию для удовлетворения спроса [2–4]. Благодаря развитию технологий в синхронных и асинхронных генераторах можно эффективно использовать эти генераторы в СПЭВ. Энергия ветра может быть использована для автономной нагрузки или подключена к сети. В настоящее время многие автономные системы используют возобновляемую энергию [5]. Ввиду этого интереса к использованию ветроэнергетических технологий для автономного применения проводится большое количество

исследований по выбору подходящего генератора для автономной СПЭВ [6].

На рисунке 1 показана система ветровых турбин, состоящая из ступицы, системы зубча-

той передачи, тормоза, генератора, лопасти, гондолы и высокоскоростного вала [7].

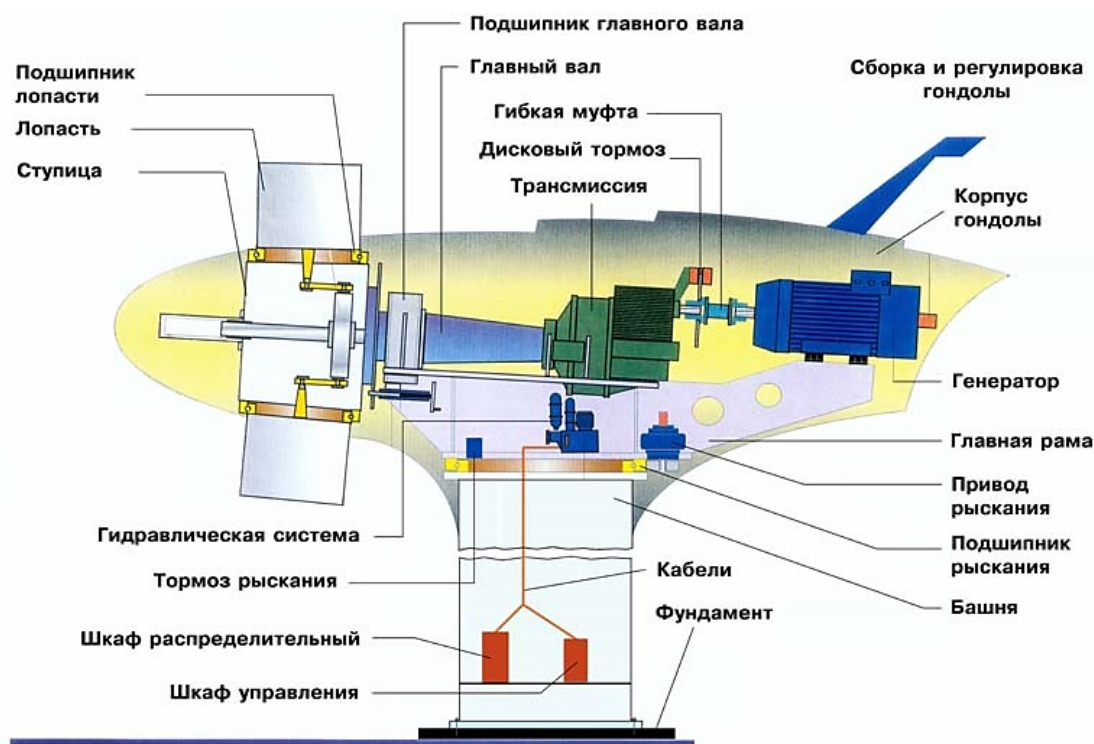


Рис. 1. Схема ветроэлектрической установки

Fig. 1. Wind turbine system

Для оптимизации использования энергии ветра в автономной системе может быть подключен контроллер дробной настройки сети, для такой системы необходимо разработать правильную стратегию управления и схему мониторинга энергии. Поскольку энергия ветра является прерывистой, для эффективного использования энергии ветра может применяться гибридная система, такая как система ветряных батарей [8]. Система преобразования энергии ветра с использованием ветряной турбины с регулируемой скоростью вращения и с синхронным генератором на постоянных магнитах является одной из наиболее перспективных систем благодаря своим преимуществам: высокой мощности, отсутствию коробки передач, высокой точности, за исключением первоначальных затрат на установку. Однако ее управление является сложной задачей из-за присущих ей нелинейностей [9–11].

Таким образом, было предложено множество стратегий управления для преодоления различных трудностей в управлении и разработке ветротурбины с постоянным магнитом, например, ПИ-регулирование [12], нечеткая логика и не-

четко-скользящий режим. В системе используется контроллер – «нечеткий пропорциональный интегральный наблюдатель», у которого есть особенность, такая как свойство демпфирования, которое имеет плоскую фазу вокруг частоты кроссовера усиления, что улучшает устойчивость к изменениям параметров и внешним возмущениям [13].

Существует определенная сложность поиска параметров регулятора, поэтому цель управления может быть сформулирована как задача оптимизации; последнюю можно решить с помощью методов метаэвристической оптимизации. Некоторые из этих подходов включают генетический алгоритм – метод «серого волка» [14, 15]; в нашем исследовании мы используем метод оптимизации алгоритма Бат.

Янг разработал новый способ – метаэвристический алгоритм Бат. Он был вдохновлен эхолокационным поведением микробатов с различной частотой пульса излучения и громкостью [16].

Цель исследования – получение интеллектуального управления глобальной системой преобразования энергии ветра с помощью ветряной турбины с переменной скоростью вращения.

Эта интеллектуальная система оптимизации используется для получения наилучших параметров контроллера FOPID. Дробная настройка пропорционально-интегрального контроллера с помощью метода оптимизации алгоритма Бат была применена для ВЭУ-СГПМ, где исследуемыми частями являются части управления точками отбора максимальной мощности МРРТ, управление СГПМ и управление напряжением промежуточного контура. Предлагаемый контроллер может управлять состоянием системы для отслеживания ее оптимальной траектории.

Модель преобразования ветровой энергии и ветрогенераторная система синхронного генератора на постоянных магнитах

Цепь преобразования состоит из турбины с регулируемым шагом, соединенной с синхронным генератором на постоянных магнитах. Чтобы улавливать максимальную энергию ветра, необходимо установить силовые электронные устройства между генератором ветряной турбины и сетью, где частота постоянна (рис. 2). Мощность, получаемая от ветровой турбины, определяется по формуле

$$P_t = 0,5\rho\pi R(v_{eq})^3 C_p(\lambda, \theta_{pitch});$$

$W_{rotor} = (\lambda) \cdot (v_{eq}/R)$ – скорость вращения ротора [17].

Аэродинамический крутящий момент определяется как

$$T_r = \frac{P_t}{W_{rotor}} = \frac{\frac{1}{2}(\rho\pi R^2(v_{eq})^3 C_p(\lambda, \theta_{pitch}))}{(\lambda)\left(\frac{v_{eq}}{R}\right)}$$

Плотность воздуха ρ зависит от температуры и давления воздуха. Безразмерный коэффициент мощности $C_p(\lambda, \theta_{pitch})$ представляет эффективность ротора турбины [18]. Этот коэффициент зависит от отношения скорости ветрового потока и линейной скорости вращения конца лопасти (коэффициента быстроходности) и выражается как $\lambda = W_{rotor} \frac{R}{v_{eq}}$, угол установки лопасти – θ_{pitch} , W_{rotor} обозначает скорость ротора. Для турбины с постоянной скоростью коэффициент мощности уменьшается, когда скорость ветра v_{eq} увеличивается (λ мала). Этот факт используется в пассивной ветровой турбине [19].

Коэффициент эффективности C_p изменяется при разных отрицательных значениях угла ориентации ($0, -1, -2, -3^\circ$), но наилучшая эффективность достигается при $\theta_{pitch} = 0^\circ$ (предполагается, что это оптимальный угол установки лопасти при данной скорости ветра).

Из рисунка 3 видно, что оптимальное соотношение скорости конца лопасти составляет $\lambda_{opt} = 8,1$, и максимальный коэффициент использования мощности $C_{pmax} = 0,48$.

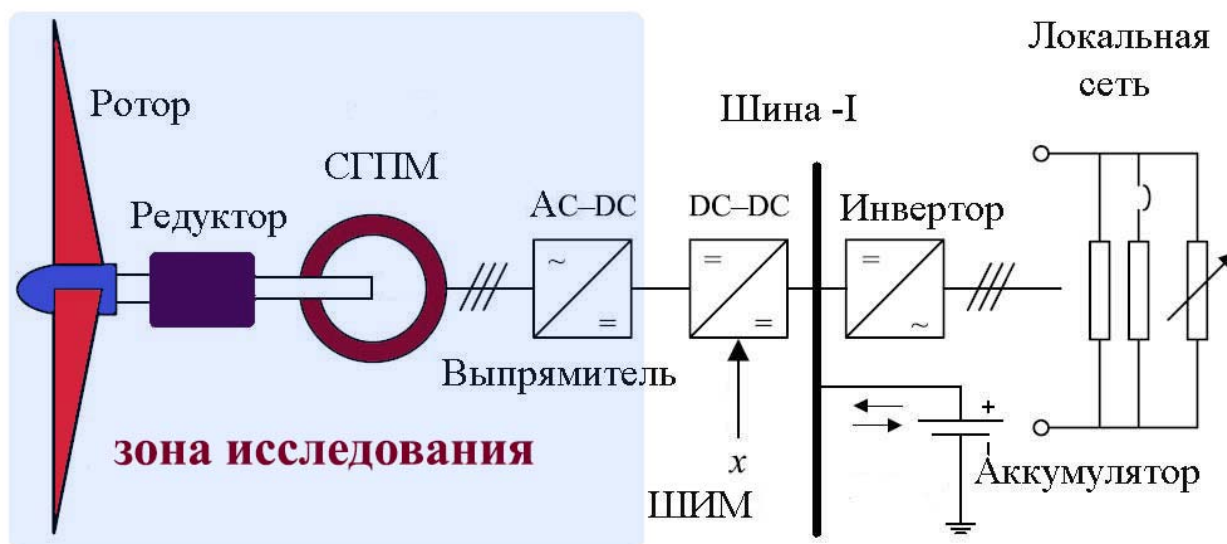


Рис. 2. Схема ветровой турбины с СГПМ

Fig. 2. Wind turbine system with PMSG

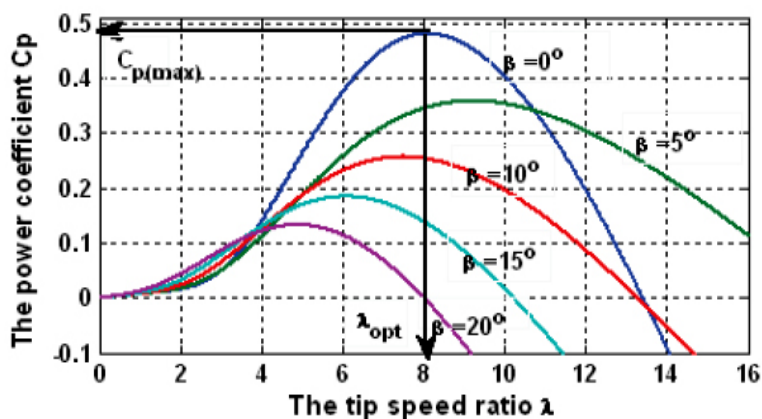


Рис. 3. Зависимость коэффициента использования мощности от соотношения скоростей ветра и линейной скорости конца лопасти (коэффициента быстроходности λ)

Fig. 3. The dependence of the power utilization factor on the ratio of wind speeds and the linear speed of the blade tip (speed factor λ)

Моделирование синхронного генератора на постоянных магнитах

Уравнения динамики напряжения в системе отсчета выражаются как [20]

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega i_q, \\ V_q = R_s I_q + L_d \frac{di_q}{dt} - w(L_d i_d + \psi); \end{cases}$$

тогда механическая система представлена следующим уравнением:

$$j = \frac{d_{\omega r}}{dt} = \Gamma_m - \Gamma_e - f\omega_r;$$

здесь V_d, V_q – напряжения по осям d, q ; i_d, i_q – токи на осях d, q ; L_d, L_q – индуктивность по осям d, q ; $w = P\omega_r$ – частота вращения электрогенератора; R_s – сопротивление статора; ψ – потокосцепление постоянных магнитов; P – количество полюсов; воздушный зазор синхронной машины – $L_d = L_q = L$.

Электромагнитный момент в точках d, q определяется как [21]

$$\Gamma_e = \frac{3}{2} P ((L_d - L_q) i_d i_q + \psi i_q).$$

В этом управлении опорный ток оси d устанавливается на ноль, чтобы уменьшить потери меди в обмотках статора. Опорный ток d оси пропорционален моменту, который генерируется из контроллера МРРТ и изменяется при изменении скорости ветра. Используется метод управления током в полосе гистерезиса, то есть

трехфазные линейные токи сравниваются с трехфазными эталонными токами, подаваемыми на контроллер гистерезиса для генерации импульсов широтно-импульсной модуляции.

На рисунке 4 представлена глобальная система управления ветротурбиной: показана энергия, обеспечиваемая ветром переменной скорости с помощью синхронного генератора на постоянных магнитах. Пока идет настройка контроллеров, коэффициенты усиления оптимизируются с помощью БАТ-алгоритма [22].

Стратегия контроля

Контроллеры дробного порядка

В последние десятилетия приложения дробного исчисления привлекают все большее внимание ученых в нескольких областях. Во-первых, дробное исчисление – это область математики, которая обобщает порядок интегрирования и вывода от целого числа к действительному значению.

$$\begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & \alpha > 0, \\ 1 & \alpha = 0, \\ \int d(\tau) - \alpha & \alpha < 0. \end{cases}$$

Одним из наиболее часто используемых определений является определение Капуто [23]:

$$D_a^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n - \alpha)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t - \tau)^{\alpha}}.$$

Это гамма-функция на основе теории Римана – Лиувилля.

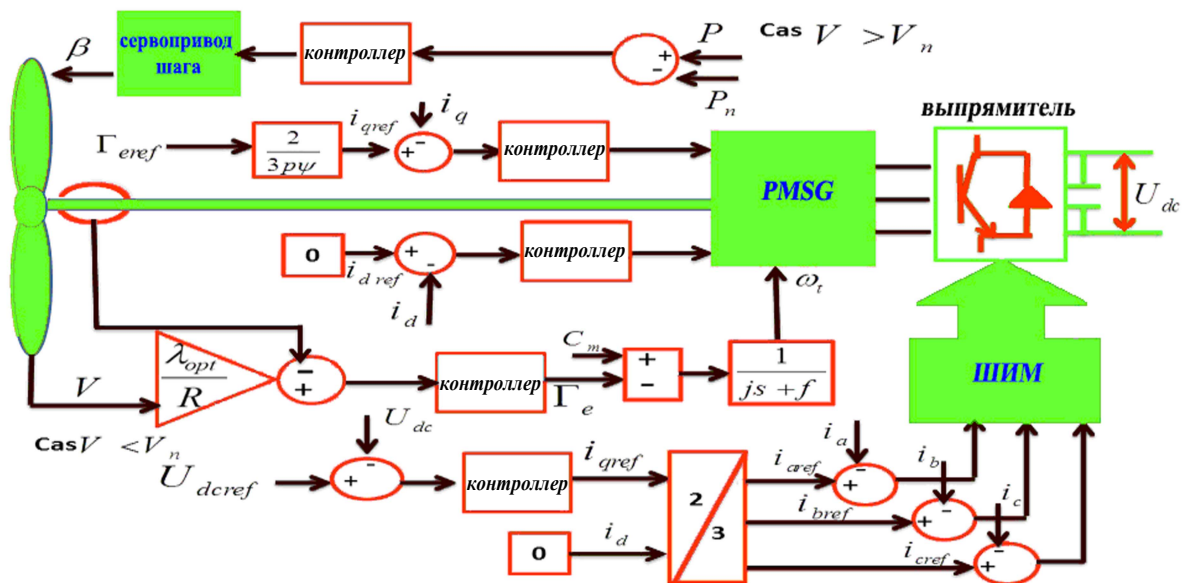


Рис. 4. Схема управления ветротурбиной

Fig. 4. The scheme strategie control

Бат-алгоритм

Метаэвристический алгоритм, называемый алгоритмом летучей мыши (ВА), был недавно реализован Янгом [24]. В природе эхолокация может иметь всего несколько тысячных долей секунды (примерно до 8...10 мс) с изменяющейся частотой в области 25...150 кГц, что соответствует длинам волн 2...14 мм в воздухе. Увеличение частоты, называемое настройкой частоты, вместе с ускорением излучения импульсов сокращает длину волны эхолокации и, следовательно, увеличивает точность обнаружения.

Эхолокационные характеристики можно идеализировать следующими правилами.

1. Летучие мыши используют эхолокацию, чтобы чувствовать расстояние, они также знают различие между добычей и фоновыми барьерами.

2. Летучие мыши беспорядочно летают со скоростью v_j в позиции x_j с неизменной частотой f_{\min} , различной громкостью A_0 и длиной волны k для поиска добычи. Они могут в обычном порядке настраивать частоту излучения импульсов $r \in [0,1]$ и регулировать длину волны (или частоту) излучаемых им импульсов в зависимости от близости их цели.

3. Хотя громкость (амплитуда) может изменяться по-разному, мы предполагаем, что громкость изменяется от большого (положительного) A_0 до минимально постоянного значения A_{\min} . Для каждой летучей мыши (j) необходимо

определить ее скорость v_j и положение x_j в пространстве поиска, новые скорости решения v_j^t и x_j^t на временном шаге t можно записать следующим образом [25]:

$$f_j = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\alpha;$$

$$v_j^t = v_j^{t-1} + (v_j^{t-1} - x) f_j;$$

$$x_j = x_j^{t-1} + v_j^t,$$

где α в диапазоне $[0,1]$ – случайный вектор, взятый из равномерного распределения, является текущим лучшим глобальным местоположением после сравнения всех решений на текущей операции x . Поскольку произведение $k f_j$ является приращением скорости, можно использовать либо f_j , либо k_j , фиксируя другой коэффициент, чтобы настроить изменение скорости. Для реализации каждой величины случайным образом назначается частота, которая равномерно берется из f_{\min} , f_{\max} . Локальный поиск – это в основном случайный обход текущих наилучших решений [26]. Как только решение выбрано, новое решение для каждой величины генерируется локально с использованием случайного значения:

$$X_j^{new} = X_j^{old} + \sigma A^t,$$

где $\sigma \in [0,1]$ – случайное число, представляющее направление и интенсивность случайной

величины; A' – средняя амплитуда всех величин.

Основываясь на этих приближениях и идеализации, основные шаги алгоритма летучей мыши можно резюмировать в виде следующего псевдокода [26, 27]:

Бат-алгоритм	
Identify Objective function $f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_{10})^T$,	
Initialize the bat population :	
$x_j (j = 1, 2, \dots, 10)$ and $v_i (nprop = 20)$	
Define pulse frequency :	
f_j at x_j , which ($f_{min} = 0, f_{max} = 1$)	
Initialize pulse rates and the loudness :	
$(r = 0.5, A = 0.5)$	
Define the boundaries of the parameter:	
$(L_b; U_b)$; see Table 1	
1: while ($t < t_{max}$); t_{max} : Max number of iterations	
Tuning frequency generate novel solutions	
updating velocities and locations/solutions [Eqs (8) to (10)],	
2: if ($rand > r$)	
Choose a solution between the best solutions.	
Generate a local solution around the selected best solution,	
[Eq(11)]	
3: end if	
Generate a new solution by flying randomly,	
4: if ($rand < A \& f(x_i) < f(x^*)$)	
Admit the new solutions,	
Augment r_j and decrease A_j ,	
5: end if	
Class the bats and searching the current best x^* ,	
6: end while	
Display result of final iteration (minimum function value)	
and best (optimized parameter value)	

Рис. 5. Блок-схема алгоритма Бат

Fig. 5. Bat algorithm block diagram

Таким образом, можно резюмировать процедуру оптимизации контроллера ветряной турбины с помощью алгоритма Бат, выполнив следующие шаги.

Шаг 1. Генерация начальной совокупности решений, характеризующих настройки контроллера.

Шаг 2. Для всех решений:

- оценка целевой функции;
- классификация полученных решений по их пригодности;
- построение новой зависимости путем обновления частот, скоростей и решений.

Шаг 2 повторяется до тех пор, пока не будет выполнено максимальное количество операций. После процесса эволюции последняя операция алгоритма состоит из хорошо скорректированного решения, которое обеспечивает наилучший результат.

Алгоритм Бат предлагается для прогнозирования скорости ветра, чтобы уменьшить медленную реакцию анемометров и датчиков и устранить разрыв последовательности скорости ветра, учитывая, что изменение скорости ветра требует очень короткого времени отклика. Предлагается управление с обратной связью по состоянию для достижения отслеживания потока ротора и скорости ротора. Этот метод может развязать ток и напряжение индукционного генератора для отслеживания.

Результаты и их обсуждение

Чтобы проанализировать производительность предлагаемого ПИ-регулятора дробного порядка, имитационные испытания были проведены на СГПМ-ВЭУ с параметрами, приведенными в таблице 1. Числовые значения FOPi и настройка контроллеров ПИ с помощью алгоритма Бат приведены в таблице 2. Предлагаемая стратегия управления протестирована для всех регионов со следующей функцией скорости ветра. На рисунке 6 показано изменение скорости ветра, на рисунках 7 и 8 – скорость вращения ротора и зависимость изменения механической мощности на валу энергоустановки соответственно.

Таблица 1. Параметры системы преобразования энергии ветра

Table 1. The parameters of the wind conversion system

Параметр	Значение
Диаметр ротора R	2 м
Плотность воздуха ρ	1,225 кг /м ³
Индуктивность статора L	0,174 МГн
Коэффициент трения f	0,005 Н · м
Момент инерции j	0,089 кг·м ²
Сопrotивление статора R_s	0,00829 Ω
Магнитный поток ψ	0,072 вб
Количество полюсов p	6

Таблица 2. Оптимальные параметры контроллеров, указанные в (ВА)

Table 2. Optimal parameters controller that given by the (ВА)

	MPPT	Векторное управление		Напряжение промежуточного контура	
		i_d	i_q		
ПИ или PI	P	76,24	0,41	0,39	86,4
	I	87,85	59,63	98,4	7,87
FOPi	P	98,69	0,93	0,88	66,5
	I	97,21	93,87	44,6	29
	α	0,87	0,88	0,5	0,31

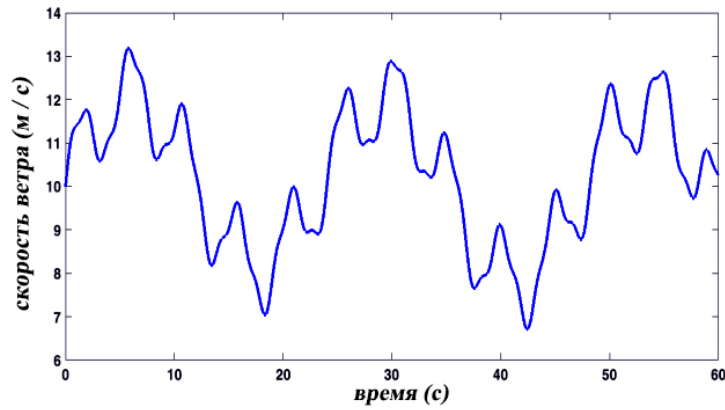


Рис. 6. Изменение скорости ветра

Fig. 6. The variation of the wind speed

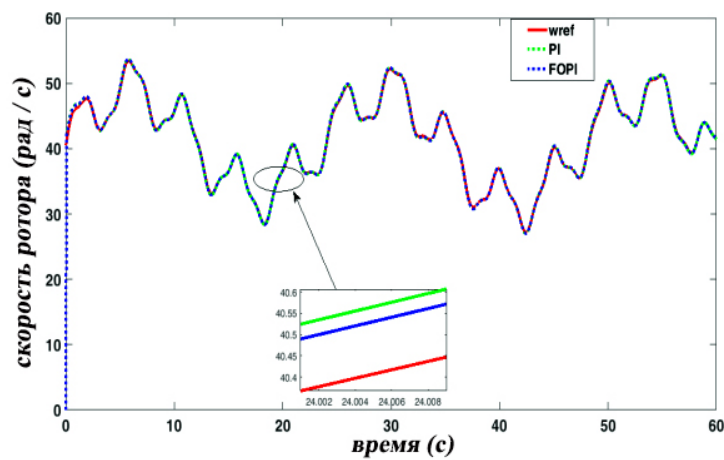


Рис. 7. Скорость вращения ротора

Fig. 7. The speed of the rotor

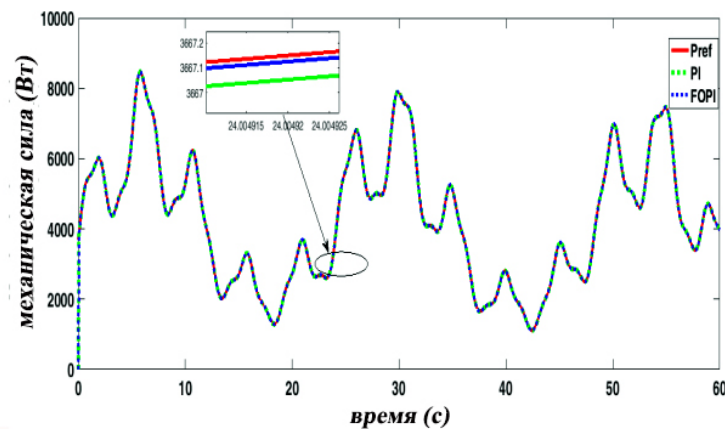


Рис. 8. Зависимость изменения механической мощности на валу ВЭУ

Fig. 8. Dependence of the change in the mechanical power on the shaft of the WT

Предлагаемый контроллер имеет меньшее время отклика, чем отслеживание, меньше ошибок отслеживания скорости, и он имеет лучшие характеристики, чем контроллер ПИ. На рисунках 9 и 10 применен оптимизированный FOPI для управления токами i_d и i_q СГПМ;

токи соответствуют их оптимальным эталонам для двух контроллеров, но время отклика у предлагаемого контроллера меньше, чем у обычного.

Отслеживание напряжения на шине представлено на рисунке 11.

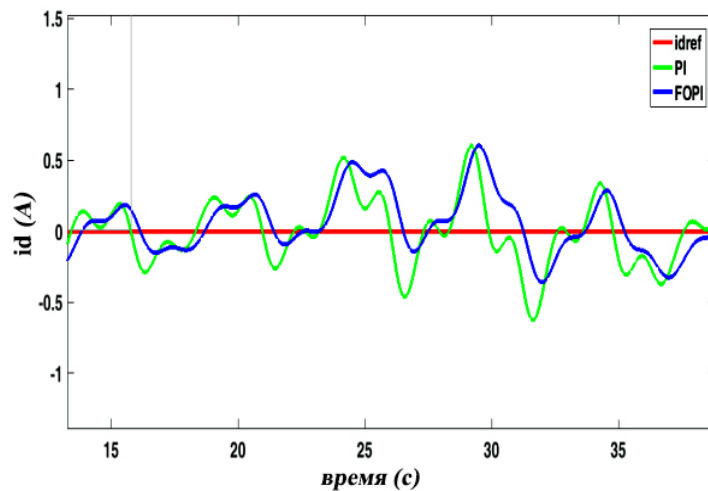


Рис. 9. Текущая ось d

Fig. 9. The current of the d -axis

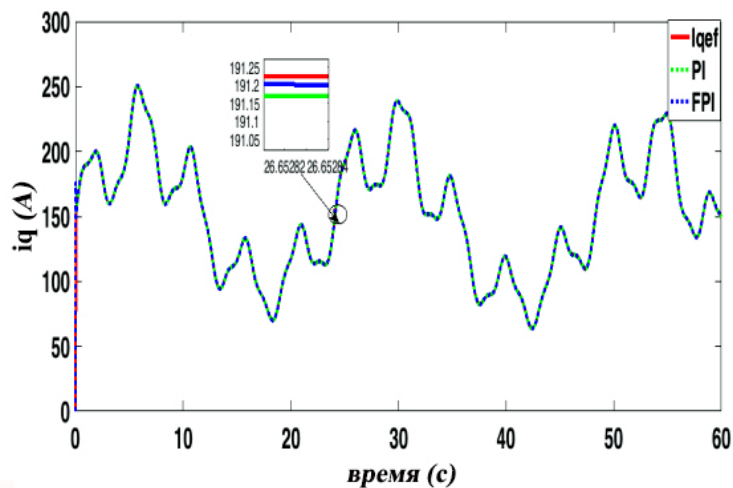


Рис. 10. Текущая ось q

Fig. 10. The current of q -axis

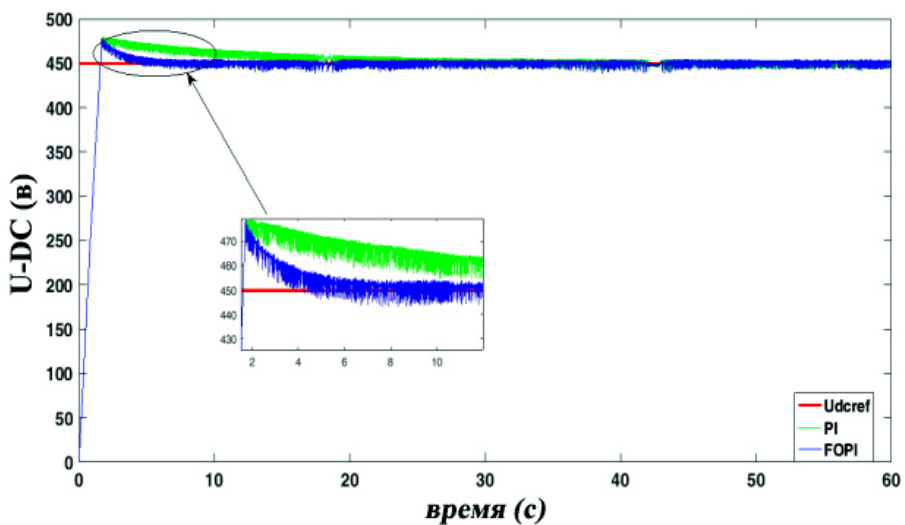


Рис. 11. Отслеживание напряжения на шине

Fig. 11. The tracking of bus voltage

Очевидно, что предлагаемый контроллер FOPi имеет самый быстрый и стабильный отклик при переменной скорости, когда напряжение промежуточного контура поддерживается на постоянном уровне (450 В).

Выводы

Представлен новый метаэвристический алгоритм для нахождения оптимальных параметров ПИ-регулятора дробного порядка, применяемого к синхронному генератору с постоянным магнитом, используемому в системе преобразования энергии ветра, получивший название «алгоритм летучей мыши». Различные части предлагаемого СПЭВ были смоделированы отдельно и проверены в условиях переменной скорости ветра. Результаты моделирования и сравнение с базовым ПИ-регулятором показывают, что установкой СГПМ-ВЭУ можно управлять с большой эффективностью и стабильностью при использовании предложенного оптимизированного контроллера FOPi. В дальнейшем планируется протестировать этот алгоритм управления на полной структуре СПЭВ.

Библиографические ссылки

1. *Morlaye Sekou Camara, Mamadou Bailo Camara, Brayima Dakyo and Hamid Gualous*. Permanent Magnet Synchronous Generator for Offshore Wind Energy System Connected to Grid and Battery - Modeling and Control Strategies. *International J. of Renewable Energy*, 01-03-2015, Le Havre, France.
2. *Hodzic M., Tai L.C.* Grey predictor reference model for assisting particle swarm optimization for wind turbine control. *Renew. Energy*, 2016, 86, 251-256.
3. *Dahmane M., Bosche J. and El-Hajjaji A.* Control of Wind Conversion System Used in Autonomous System. *Energy Procedia*, 2014, vol. 62, pp. 482-491.
4. *Mohammed Aslam Husain and Abu Tariq*. Modeling and Study of a Standalone PMSG Wind Generator System Using MATLAB/SIMULINK. *Universal J. of Electrical Engineering*, 2014, pp. 82-94. Aligarh Muslim University (AMU), India.
5. *Apata O., Oyedokun D.* Novel reactive power compensation technique for fixed speed wind turbine generators: *Proc. of the IEEE PES/IAS Power Africa*, 2018, pp. 628-633.
6. *Menezes E.J.N., Araújo A.M., Silva da Nadège Sophie Bouchonneau*. A review on wind turbine control and its associated methods. *J. Clean. Prod.*, 2018, vol. 174, pp. 945-953.
7. *Tiwari R., Babu N.R.* Recent developments of control strategies for wind energy conversion system. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, vol. 66, pp.268-285.
8. *Wagner H., Mathur J.* Operation and control of wind energy converters: *Proc. of the Introduction to Wind Energy Systems Anonymous*, Springer, 2018, pp. 63-74.
9. *Morim R.B.* Analysis of wind turbine power generation with individual pitch control: *Proc. of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*, 2019, pp. 1-6.
10. *Sudhir Sharma, Shivani Mehta, Gurpreet Kaur*. Optimizing Hybrid Wind/Diesel Generator System Using BAT Algorithm: *Proc. of International Interdisciplinary Conference On Engineering Science & Management Held*, December 2016.
11. *Kumar D., Chatterjee K.* A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, vol. 55, pp. 957-970.
12. *Kuvshinov V.V., Kolomiychenko V.P., Kakhushkina E.G.* Storage System for Solar Plants. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 153-158. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19030046>.
13. *Kuznetsov N.P., Abd Ali M.L., Kuvshinov V.V., Issa A.H., Mohammed J.H. & Al-bairmani G.A.* Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading. *J. of Applied Engineering Science*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 313-320. DOI: 10.5937/jaes18-24460.
14. *Arnaltes S., Rodriguez-Amenedo J.L., & Montilla-DJesus M.E.* Control of variable speed wind turbines with doubly fed asynchronous generators for stand-alone applications. *Energies*, 2018, vol. 11, pp. 26-32.
15. *Abdali L.M., Al-Rufae F.M., Kuvshinov V.V.* Study of Hybrid Wind-Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284-290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.
16. *Arnaltes S., Rodriguez-Amenedo J.L., & Montilla-DJesus M.E.* Control of variable speed wind turbines with doubly fed asynchronous generators for stand-alone applications. *Energies*, 2018, vol. 11, pp. 26-32.
17. *Kahla S., Soufi Y., Sedraoui M., Bechouat M.* Maximum power point tracking of wind energy conversion system using multi-objective grey wolf optimization of fuzzy-sliding mode controller. *International J. of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2017, vol. 7, pp. 926-936.
18. *Bao J.* Feed forward control for wind turbine load reduction with pseudo-lidar measurement. *Int. J. Autom. Comput.*, 2018, vol. 15, pp. 142-155.
19. Моделирование и контроль энергии ветра / Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, Х. А. Исса, Х. Д. Мохаммед, Б. А. Якимович // X Всероссийская научно-практическая конференция «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (Томск, 22–24 апреля 2020 г.). Томск : Изд-во ТПУ, 2020. С. 14–19.
20. Моделирование параметров управления интегрированной системой солнечной генерации и накопления энергии / Л. М. Абдали, В. В. Кувшинов, Э. А. Бекиров, Ф. М. Аль-Руфай // Строительство и техногенная безопасность. 2020. № 18 (70). С. 133–142. DOI: 10.37279/2413-1873-2020-18-133-142.
21. *Lan J., Patton R.J., and Zhu X.* Fault-tolerant wind turbine pitch control using adaptive sliding mode estimation. *Renew. Energy*, 2018, vol. 116, pp. 219-231.
22. Оптимизация аккумулирования энергии в гибридных системах ветроэнергетики и фотовольтаики / Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Яки-

мович, В. В. Кувшинов // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 2. С. 100–108. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-100-108.

23. Оценка потенциала ветроэнергетических ресурсов на юге Ирака / Ф. М. Аль-Руфай, Л. М. Абдали, В. В. Кувшинов, Б. А. Якимович // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 3. С. 105–113. DOI: DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-105-113.

24. Yang X.S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm: Nature inspired cooperative strategies for optimization (NCSO-2010). Springer, 2010, pp. 65-74. Berlin, Heidelberg.

25. Astolfi D., Scappaticci L., Terzi L. Fault diagnosis of wind turbine gearboxes through temperature and vibration data. *International J. of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 965-976.

26. Yang X.S., Gandomi A.H. Bat Algorithm: A Novel Approach for Global Engineering Optimization. *Engineering Computations*, 2012, vol. 29, iss. 5, pp. 464-483.

27. Guo D.D., Song J.G., Wang X.Z. Research on indoor coverage optimization strategy of electric wireless private network based on improved bat algorithm. *Distrib. Util.*, 2019, no. 36, pp. 23-28.

References

1. Morlaye Sekou Camara, Mamadou Bailo Camara, Brayima Dakyo and Hamid Gualous. Permanent Magnet Synchronous Generator for Offshore Wind Energy System Connected to Grid and Battery - Modeling and Control Strategies. *International J. of Renewable Energy*, 01-03-2015, Le Havre, France.

2. Hodzic M.; Tai L.C. Grey predictor reference model for assisting particle swarm optimization for wind turbine control. *Renew. Energy*, 2016, 86, 251-256.

3. Dahmane M., Bosche J. and El-Hajjaji A. Control of Wind Conversion System Used in Autonomous System. *Energy Procedia*, 2014, vol. 62, pp. 482-491.

4. Mohammed Aslam Husain and Abu Tariq. Modeling and Study of a Standalone PMSG Wind Generator System Using MATLAB/SIMULINK. *Universal J. of Electrical Engineering*, 2014, pp. 82-94. Aligarh Muslim University (AMU), India.

5. Apata O., Oyedokun D. Novel reactive power compensation technique for fixed speed wind turbine generators: *Proc. of the IEEE PES/IAS Power Africa*, 2018, pp. 628-633.

6. Menezes E.J.N., Araújo A.M., Silva da Nadège Sophie Bouchonneau. A review on wind turbine control and its associated methods. *J. Clean. Prod.*, 2018, vol. 174, pp. 945-953.

7. Tiwari R., Babu N.R. Recent developments of control strategies for wind energy conversion system. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, vol. 66, pp.268-285.

8. Wagner H., Mathur J. Operation and control of wind energy converters: *Proc. of the Introduction to Wind Energy Systems Anonymous*, Springer, 2018, pp. 63-74.

9. Morim R.B. Analysis of wind turbine power generation with individual pitch control: *Proc. of the IEEE*

PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America), 2019, pp. 1-6.

10. Sudhir Sharma, Shivani Mehta, Gurpreet Kaur. Optimizing Hybrid Wind/Diesel Generator System Using BAT Algorithm: *Proc. of International Interdisciplinary Conference Oon Engineering Science & Management Held*, December 2016.

11. Kumar D., Chatterjee K. A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, vol. 55, pp. 957-970.

12. Kuvshinov V.V., Kolomiychenko V.P., Kakhushkina E.G. Storage System for Solar Plants. *Appl. Sol. Energy*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 153-158. <https://doi.org/10.3103/S0003701X19030046>.

13. Kuznetsov N.P., Abd Ali M.L., Kuvshinov V.V., Issa A.H., Mohammed J.H., Al-bairmani G.A. Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading. *J. of Applied Engineering Science*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 313-320. DOI: 10.5937/jaes18-24460.

14. Arnaltes S., Rodriguez-Amenedo J.L., Montilla-DJesus M.E. Control of variable speed wind turbines with doubly fed asynchronous generators for stand-alone applications. *Energies*, 2018, vol. 11, pp. 26-32.

15. Abdali L.M., Al-Rufae F.M., Kuvshinov V.V. Study of Hybrid Wind-Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284-290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.

16. Arnaltes S., Rodriguez-Amenedo J.L., Montilla-DJesus M.E. Control of variable speed wind turbines with doubly fed asynchronous generators for stand-alone applications. *Energies*, 2018, vol. 11, pp. 26-32.

17. Kahla S., Soufi Y., Sedraoui M., Bechouat M. Maximum power point tracking of wind energy conversion system using multi-objective grey wolf optimization of fuzzy-sliding mode controller. *International J. of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2017, vol. 7, pp. 926-936.

18. Bao J. Feed forward control for wind turbine load reduction with pseudo-lidar measurement. *International J. Autom. Comput.*, 2018, vol. 15, pp. 142-155.

19. Abdali L.M., Al-Rufai F.M., Issa Kh.A., Mohammed Kh.D., Yakimovich B.A. [Modeling and control of wind energy]. *X Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Nauchnaya initsiativa inostrannykh studentov i aspirantov rossiyskikh vuzov" (Tomsk, 22–24 aprelya 2020 g.) [X All-Russian Scientific and Practical Conference "Scientific Initiative of Foreign Students and Postgraduates of Russian Universities" (Tomsk, April 22-24, 2020).]* Tomsk, TPU, 2020, pp. 14-19 (in Russ.).

20. Abdali L.M., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A., Al-Rufae F.M. [Development of the simulation and control system for an integrated solar energy generation and storage]. *Construction and industrial safety*, 2020, no. 18, pp. 133-142 (in Russ.). DOI: [10.37279/2413-1873-2020-18-133-142](https://doi.org/10.37279/2413-1873-2020-18-133-142).

21. Lan J., Patton R.J., and Zhu X. Fault-tolerant wind turbine pitch control using adaptive sliding mode estimation. *Renew. Energy*, 2018, vol. 116, pp. 219-231.

22. Abdali L.M., Al-Rufai F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Optimization of Energy Storage in Hybrid-Wind and Photovoltaic Energy Systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 100-108 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-100-108.

23. Al-Rufai F.M., Abdali L.M., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A. [Assessment of the Potential of Wind Energy Resources in Southern Iraq]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 105-113 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-105-113.

24. Yang X.S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm: Nature inspired cooperative strategies for opti-

mization (NICSO-2010). *Springer*, 2010, pp. 65-74. Berlin, Heidelberg.

25. Astolfi D., Scappaticci L., Terzi L. Fault diagnosis of wind turbine gearboxes through temperature and vibration data. *International J. of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 965-976.

26. Yang X.S., Gandomi A.H. Bat Algorithm: A Novel Approach for Global Engineering Optimization. *Engineering Computations*, 2012, vol. 29, iss. 5, pp. 464-483.

27. Guo D.D., Song J.G., Wang X.Z. Research on indoor coverage optimization strategy of electric wireless private network based on improved bat algorithm. *Distrib. Util.*, 2019, no. 36, pp. 23-28.

Smart Control System for the Wind Energy Networks

L.M. Abdali, Post-graduate, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

F.M. Al-Rufae, Post-graduate, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

B.A. Yakimovich, DSc in Engineering, Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

V.V. Kuvshinov, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

The operation of wind power plants is not stable and reliable enough; this is due to the inconstancy of the wind flow and the variability of wind directions. However, the global wind energy is developing at a rather high pace and in the future, the share of generating capacities associated with the transformation of the wind flow will make up a significant part of the entire electricity industry. To eliminate such factors when designing the operation of wind turbines, it is necessary to more fully use the automatic control systems not only for the parameters associated with the operation of mechanical parts, but also for the electrical characteristics of wind turbines based on power electronics.

The generation of electrical energy by converting wind flow has become the backbone of renewable energy in power systems around the world. Modern wind turbine (WT) systems that convert wind currents at different speeds and are located in large wind power plants have found better recognition and captured most of the market share. Such installations convert wind energy using power electronic systems. Power electronics technology significantly improves the controllability of wind turbines. The use of electronic systems in wind power allows you to effectively solve the problems associated with the requirements for connecting to the grid.

This research presents the smart control of a global wind energy conversion system (WECS) with a variable speed wind turbine mounted on a permanent magnet synchronous generator (PMSG - WT). Many of the parts of the PMSG - WT that provide full power monitoring, PMSG control, and DC voltage keeping are discussed in the proposed control design. A fractional PI controller is used to construct the suggested controller, where the controller parameters are configured successfully using the metaheuristic optimization algorithm of the new Bat (BA). It is used when the wind speed varies and is compared to a standard PI controller in order to illustrate and compare the output of this controller. The simulation results clearly illustrate the efficacy of the controller proposed. In addition, the PMSG-WT installation is effectively tracked in different operating modes according to the proposed scheme.

Keywords: wind turbine, wind power, control, permanent magnet synchronous generator (PMSG), intelligent control system.

Получено 29.01.2021

Образец цитирования

Интеллектуальная система управления, используемая при работе ветроэлектрических установок / Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. С. 102–112. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-102-112.

For Citation

Abdali L.M., Al-Rufae F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Smart Control System for the Wind Energy Networks]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 102-112 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-102-112.