

Алгоритмы энергоэффективного управления ветроэнергетическими установками

КРЮКОВ О.В., СЕРЕБРЯКОВ А.В.

Рассмотрены вопросы повышения эффективности работы ветроэнергетических установок (ВЭУ) для автономных систем электроснабжения. Получена оптимальная область работы ВЭУ с синхронным генератором (показана графически), которая позволяет эффективно управлять режимом ВЭУ при различной скорости ветрового потока и нагрузке СЭС. Получено численное уравнение линеаризованной регрессии для ВЭУ, расположенной на побережье Ладожского озера, которое применяется в качестве управляющего алгоритма работы ВЭУ. Представлено описание инвариантной системы управления для ВЭУ в автономном режиме работы. Оптимизация энергоэффективности работы ВЭУ обеспечивается замкнутой системой автоматического регулирования (САР) по напряжению. Предложена структурная схема инвариантной САР ВЭУ с приоритетным фактором стабилизации напряжения, причем предусмотрена возможность стабилизации выходного напряжения средствами автоматической разгрузки потребителей на основе контура регулирования выходного тока.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, эффективность работы, алгоритмы управления

Стремительное развитие новой аппаратной базы электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной техники стимулирует разработчиков на создание высокотехнологичных, энергоэффективных, надежных и быстро окупаемых ветроэнергетических установок (ВЭУ) [1]. Сегодня к возобновляемым автономным источникам энергии (АИЭ) на базе ВЭУ предъявляются все более высокие требования по обеспечению надежности и энергоэффективности работы [2]. Типовые решения систем электроснабжения (СЭС) с ВЭУ реализуют только частные задачи, не обеспечивая комплекса проблем создания конкурентоспособных интеллектуальных источников электроснабжения (ИИЭ) на основе принципов активно-адаптивных «разумных» электросетей SMART GRID [3, 4]. Принятые в последнее время нормативные акты РФ стимулируют поиск инновационных энергосберегающих технологий СЭС на базе ВЭУ для объектов и потребителей различных отраслей [1, 5].

Особенности оптимизации ВЭУ. Рассмотрим комплексную систему «Альтернативный источник энергии с ВЭУ – автономная система электроснабжения – система распределения и потребители электроэнергии». В общем случае на нее воздействуют с разной степенью интенсивности сразу несколько внешних возмущений стохастического и детерминированного характера:

технологические – ветровой поток, режим работы традиционных источников энергии, график потребления;

природные – температурные условия, природные возмущения.

Все это в совокупности предопределяет необходимость рассмотрения автономного генераторного комплекса (АГК) как объекта теории планирования эксперимента [4, 6] с необходимостью синтеза инвариантной системы ВЭУ, обеспечивающей надежную и энергоэффективную работу.

Исходя из стохастического характера амплитудно-частотных характеристик ветрового потока при законе распределения скоростей ветра Вейбулла–Гудрича (рис. 1), на объемы и качество выра-

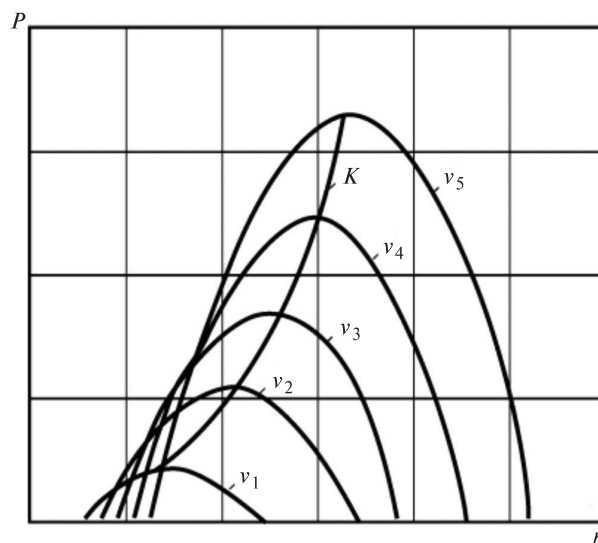


Рис. 1. Мощностные характеристики ветротурбин: P – мощность выходная, отн.ед.; n – частота вращения вала, 1000 об/мин; $v_1 - v_5$ – линейные скорости ветра; K – линия максимального съема мощности потока

ботки электроэнергии ВЭУ влияет обоснованный выбор параметров ($P_{уст}$, ω_0) синхронного генератора (СГ) и обеспечение работы ветротурбины в оптимальных точках соответствующих диапазонов скоростей ветра.

При этом ВЭУ с переменной частотой вращения ветроколеса с горизонтальной осью имеют потенциальную возможность преобразовывать энергию ветра в электрическую с высоким КПД за счет сохранения высокого коэффициента использования энергии ветра даже при низких скоростях.

Момент ветроколеса (ВК) определяется по формуле, записанной через аппроксимирующую функцию аэродинамической характеристики (АДХ):

$$M_B = 0,5\rho FRV^2 \sum_{k=0}^p D_k \left(\frac{\pi R}{30}\right)^k \left(\frac{n}{v}\right)^k, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха; R – радиус ВК; v – скорость ветра; D_k – коэффициент аппроксимации АДХ ВК; $z = \pi R n / (30V)$ – число модулей, характеризующее быстроходность ВК; n – частота вращения вала ВК.

Для графического построения оптимальной области работы ВЭУ с СГ воспользуемся уравнениями установившегося режима в соответствии с (1):

$$0,5\rho FRV^2 \sum_{k=0}^p D_k z^k - \sum_{m=0}^l G_m n^m = 0, \quad (2)$$

где G_m – коэффициент, определяющий заданную нагрузочную характеристику СГ.

Таким образом, область оптимальных режимов ВЭУ, определяемую уравнением (2), можно графически интерпретировать в виде заштрихованной зоны (рис. 2). В соответствии с ним, оптимальная работа ВЭУ достигается при таком управлении, когда в зависимости от текущего значения скорости ветра обеспечивается работа в одном из следующих режимов при постоянстве:

- частоты вращения, равной минимальной рабочей n_{min} (нагрузочная характеристика $M_1 - M_2$);
- числа модулей ВК, равного номинальному зном (нагрузочная характеристика $M_3 - M_4$, где $i=1,2,3,4$);

моментов, равных расчетному моменту СГ (нагрузочная характеристика $M_{3i} - M_{4i}$);

частоты вращения, равной синхронной скорости СГ n_0 (нагрузочная характеристика $M_{4i} - M_{45}$).

Рассмотренный принцип оптимального управления при его реализации в САР работой ВЭУ с учетом характера потребления обеспечит энергоэффективную работу всей автономной системы электроснабжения в соответствии с принципом выработки максимума электроэнергии при конкретной скорости ветра.

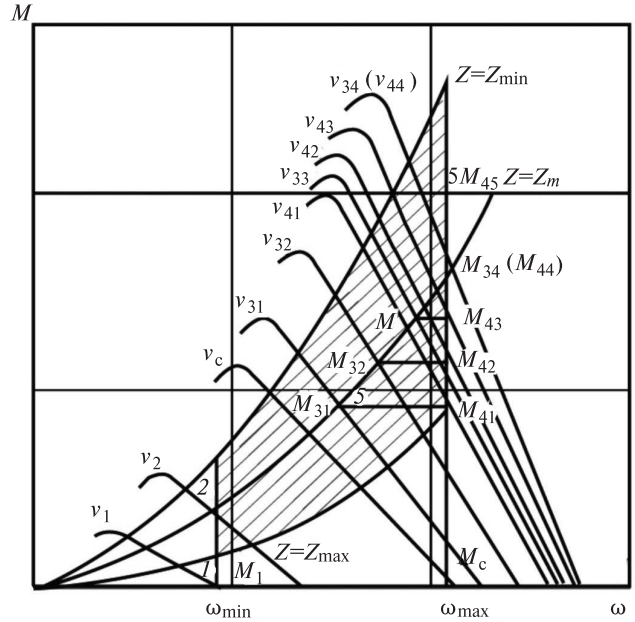


Рис. 2. Область оптимальных режимов работы ВЭУ с учетом нагрузочных характеристик синхронного генератора

Математическая модель СЭС автономных потребителей. Процесс формирования электрических нагрузок потребителя имеет вероятностный характер, поэтому при определении закономерностей формирования и числовых значений графика нагрузок потребителя можно использовать общепринятые методы теории вероятностей и математической статистики [4]. В этом случае график нагрузки будет характеризоваться функцией распределения, математическим ожиданием и корреляционной функцией, которая отражает зависимость между параметрами процесса.

Число электроприемников из общего их числа, работающих одновременно и составляющих групповую нагрузку, может быть определено по биномиальному закону. В этом случае вероятность работы m электроприемников из общего их числа n определяется из следующего выражения:

$$P_{(n,m)} = \sum \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m (1-p)^{n-m}. \quad (3)$$

На основе полученных данных строится имитационная модель потребления электрической энергии (рис. 3).

Данная модель состоит из двух частей: постоянная – реальные усредненные статистические данные потребителей, и переменная – вероятностная составляющая на основе нормального распределения. Приведенная модель может быть использована для расчета вероятности совпадения нагрузки и поступления энергии ветра для включения в общую модель системы автономного электроснабжения.

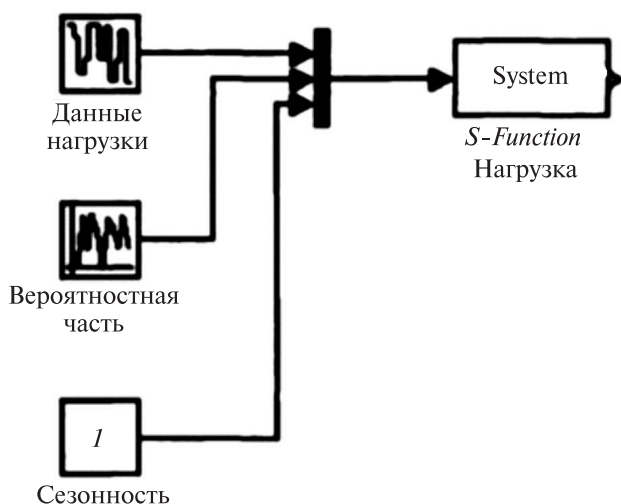


Рис. 3. Упрощенная модель нагрузки потребителей

Формализация работы ВЭУ с учетом стохастических возмущений. Для получения режимов максимальной энергоэффективности работы локальных СЭС в условиях случайного характера ветрового потока и потребления необходимо автоматически обеспечивать работу ВЭУ в оптимальных областях (рис. 2) средствами электромеханической части АИЭ.

Наибольшее влияние на процесс выработки электроэнергии ВЭУ оказывают значения стохастических параметров, имеющих метеорологическую и технологическую природу:

значение линейной скорости ветра V , м/с;

плотность воздуха в ветровом потоке ρ , кг/м³, зависящая от текущих значений атмосферного давления p_a , МПа, и температуры воздуха T_B , °К, в соответствии с уравнением Клапейрона;

энергопотребление $W_{\text{потр}}(G_m)$, кВт·ч, включая электрическую и тепловую мощности у потребителей.

Так как для получения стабильной высококачественной электроэнергии СЭС на базе ВЭУ охвачена отрицательной обратной связью по напряжению, задание управляющего воздействия на преобразователь (ПЧ) в условиях одновременного случайного изменения всех параметров должно изменяться по аналитическим регрессионным алгоритмам вида [4, 6]:

$$U_3 = f(V, p_a, T_B, G_m). \quad (4)$$

Для реализации алгоритма (4) используется база метеорологических данных аргументов для региона размещения ВЭУ, и они оцениваются статистическими методами. Все основные возмущения, действующие на ВЭУ, носят случайный характер и независимы друг от друга. Поэтому искомые многопараметрические зависимости получаются в виде регрессионных моделей методом наименьших квадратов.

Для этого в (4) определяются параметры a_j четырехфакторной модели вида

$$U_3 = a_1 V + a_2 p_a + a_3 T_B + a_4 G_m + \zeta, \quad (5)$$

где V — линейная скорость; p_a и T_B — атмосферное давление и температура окружающего воздуха соответственно; G_m — коэффициенты, определяющие заданную нагрузочную характеристику СГ (энергопотребление).

В результате расчетов получено численное уравнение линеаризованной регрессии для ВЭУ, расположенной на побережье Ладожского озера:

$$U_3 = 12,214V + 0,219p_a + 0,92T_B + 0,022G_m + 9,602, \quad (6)$$

являющееся искомым алгоритмом инвариантного задания и управления ВЭУ. Уравнение (6) целесообразно использовать в качестве управляющего алгоритма работы ВЭУ для задающего воздействия на систему СГ–ПЧ или мультипликатор.

Инвариантная система ВЭУ в автономном режиме генерации. Автономная СЭС с ВЭУ функционирует в условиях, при которых напряжение, частота и вырабатываемый ток не остаются постоянными, а значительно изменяются во времени. При этом коэффициент вариации для большинства процессов случайного воздействия на ВЭУ составляет 0,4÷0,9, а энергетический частотный спектр их обычно заключен в диапазоне низких частот.

При необходимости полного учета всех случайных воздействий наиболее целесообразным является организация инвариантной системы управления ВЭУ, адекватно учитывающей все частные влияния возмущений на объект. Для этого все влияющие возмущения после формализации вводятся в закон управления ВЭУ, обеспечивая адекватность задания.

Оптимизация энергоэффективной выработки электроэнергии ВЭУ обеспечивается в замкнутой по отклонению и возмущению комбинированной САР. Приоритетным фактором является стабилизация выходной координаты — напряжения. Одновременно для максимального съема ветрового потока необходимо корректно задавать управление ПЧ по результатам обработки внешних изменяющихся воздействий. Исходя из этого обоснован синтез комбинированной замкнутой САР ВЭУ с ПИ-регулятором напряжения и коррекцией по возмущению (рис. 4,а) [7, 8].

Основным недостатком данной схемы является необходимость установки ступенчато регулируемого мультипликатора, который автоматически подстраивает частоту вращения СГ под съем максимальной мощности (в соответствии с характеристиками рис. 1).

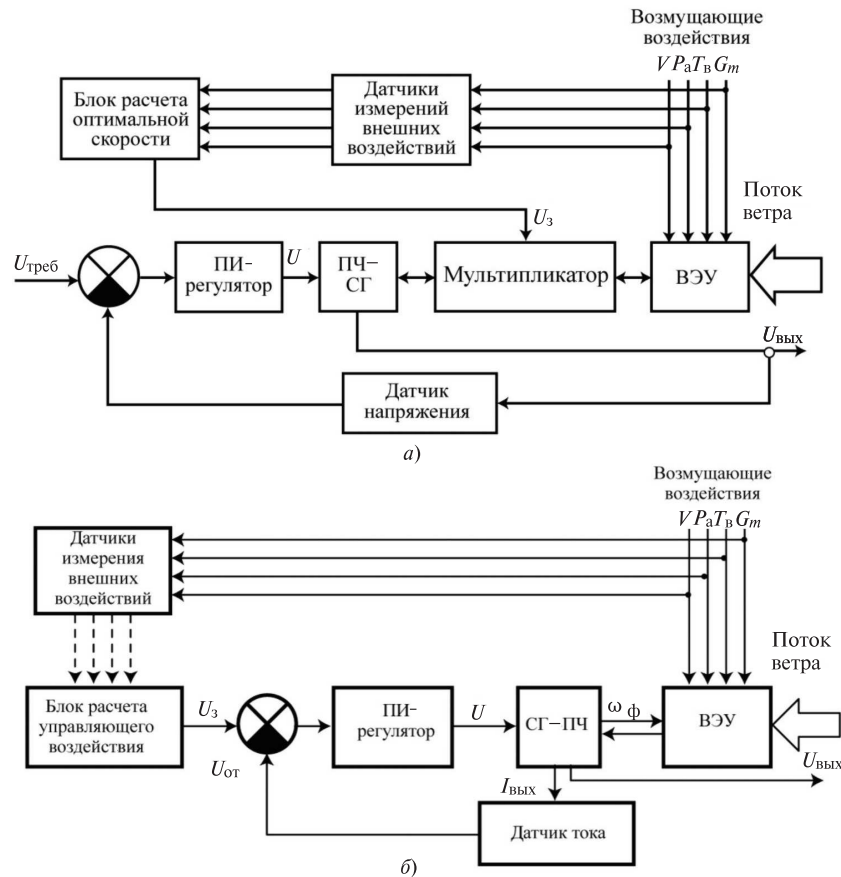


Рис. 4. Структура инвариантной САР ВЭУ: *a* – $U_з$ – задающее воздействие; $U_{об}$ – сигнал обратной связи по напряжению; $U_{вых}$ – выходное напряжение; *b* – $U_{от}$ – сигнал обратной связи по выходному току (мощности); $\omega_{ф}$ – скорость вала ВК; $U_{вых}$ – выходное напряжение

Поэтому в условиях возможности стабилизации выходного напряжения средствами автоматической разгрузки потребителей, балластной нагрузки или внутреннего контура стабилизации СГ можно применять структуру с контуром регулирования выходного тока (рис. 4, б).

Выводы. 1. Техническим результатом применения инвариантных автономных систем энергоисточников с ВЭУ является строгое соблюдение параметров выработки напряжения при оптимизации энергоэффективной работы ВЭУ.

2. Наибольшее влияние на процесс выработки электроэнергии ВЭУ оказывают значения четырех стохастических факторов: скорости ветра, атмосферного давления, температуры воздуха и энергопотребления. Полученные регрессионные алгоритмы управления ВЭУ в полной мере отслеживают все возмущения и адаптивно корректируют максимум выработки энергии.

3. Предложенные инвариантные структуры комбинированной САР ВЭУ позволяют обеспечить энергоэффективную и надежную работу локальных возобновляемых энергоисточников для питания потребителей.

4. Система СГ–ПЧ является перспективной для оптимизации ВЭУ, поскольку, изменяя задание, по

току можно оптимизировать мощность, передаваемую в СЭС, а выбором соответствующего закона управления ПЧ можно обеспечить работу ВЭУ с высоким коэффициентом использования энергии ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васенин А.Б., Крюков О.В., Титов В.В. Анализ технико-экономических параметров ветроэнергетических установок для объектов ОАО «Газпром». – Приводная техника, 2011, № 6, с. 2–11.
2. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа. – Сб. трудов VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП-2014). В 2 т. Ответственный за выпуск И.В. Гуляев. – Саранск, 2014, том. 2, с. 404–409.
3. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б. Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками. – Труды конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах»/ Под ред. С.Н. Васильева. – ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2012, с. 467–469.
4. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем. – Труды IX МНТК «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO '12). – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2012, с. 222–236.
5. Крюков О.В., Васенин А.Б., Серебряков А.В. Экспериментальный стенд электромеханической части ветроэнергетической установки. – Приводная техника, 2012, № 4, с. 2–11.

6. **Крюков О.В.** Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях. — *Электричество*, 2008, № 9, с. 44–50.

7. **Патент № 113085 (Россия).** Энергетический комплекс / А.Б. Васенин, О.В. Крюков, А.В. Серебряков. — БИ, 2012, № 3.

8. **Крюков О.В., Серебряков А.В., Васенин А.Б.** Диагностика электромеханической части ветроэнергетических установок. — *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2012, № 3 (19), с. 549–552.

[09.02.2017]

А в т о р ы : **Крюков Олег Викторович** окончил факультет автоматики и электромеханики Нижегородского политехнического института в 1978 г. В 2015 г. защитил докторскую диссертацию «Энерго-

эффективные электроприводы газоперекачивающих агрегатов газопроводов на базе интеллектуальных систем управления и мониторинга». Главный специалист АО «Гипрогазцентр».

Серебряков Артем Владимирович окончил факультет автоматики и электромеханики Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева в 2007 г. В 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию «Энергоэффективные ветроэнергетические установки с оперативной диагностикой для автономных систем электроснабжения». Доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (Н. Новгород).

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 6, pp. 31–35

DOI:10.24160/0013-5380-2017-6-31-35

Energy-Efficient Wind Mill Control Algorithms

KRYUKOV Oleg V. (*JSC «Giprogaztsentr», Nizhnii Novgorod, Russia*) — *Chief Specialist, Dr. Sci. (Eng.)*

SEREBRYAKOV Artem V. (*N.Novgorod State Technical University named R.Ye. Alekseyev, N.Novgorod, Russia*) — *Reader, Cand Sci. (Eng.)*

Matters concerned with achieving more efficient operation of windmills for stand-alone power supply systems are considered. The optimal operation region of a windmill equipped with a synchronous generator is obtained (with showing it in graphic form), within which the wind mill operating mode can be efficiently controlled at different wind velocities and different standalone power system loads. A numerical linearized regression equation is obtained for the windmill situated on the Lake Ladoga coast, which is used as the wind mill operation control algorithm. An invariant control system for the windmill running in an independent operating mode is described. The energy efficiency of windmill operation is optimized by using a closed-loop automatic control system (ACS) with voltage feedback. The structure of an invariant ACS for a windmill with assigning priority to the voltage stabilization function and with the possibility of stabilizing the output voltage by automatically shedding the consumer loads through the use of an output current control loop.

Key words: wind mill, performance efficiency, control algorithms

REFERENCES

1. **Vasenin A.B., Kryukov O.V., Titov V.V.** *Privodnaya tekhnika — in Russ. (Drive Technology)*, 2011, No. 6, pp. 2–11.

2. **Vasenin A.B., Kryukov O.V., Serebryakov A.V.** *Sb. trudov VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu* (Proceedings of the 8th International (19th All-Russia) Conference on Automatic Electric Drives AED-2014 (2 vol.) — Saransk (Russia), 2014, pp. 404–409.

3. **Serebryakov A.V., Kryukov O.V., Vasenin A.B.** *Trudy konf. «Upravleniye v tekhnicheskikh, ergaticheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh»/Pod red. S.M. Vasil'yeva — in Russ. (Proceedings of the Conference «Control in Technical, Ergatic, Organization, and Network Systems»)*. Moscow, Institute of Management Problems named V.A. Trapeznikov, 2012, pp. 467–469.

4. **Kryukov O.V.** *Trudy IX MNTK «Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya» (SICPRO'12) — in Russ. (Proceedings of the 9th*

International Scientific-Technical Conference «System Identification and Control Problems» (SICPRO'12). Moscow, Institute of Management Problems named V.A. Trapeznikov, 2012, pp. 222–236.

5. **Kruukov O.V., Vasenin A.B., Serebryakov A.V.** *Privodnaya tekhnika — in Russ. (Drive Technology)*, 2012, No. 4, pp. 2–11.

6. **Kryukov O.V.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2008, No. 9, pp. 44–50.

7. **Patent RF No. 113085.** *Energeticheskii kompleks* (Energy complex)/A.B. Vasenin, O.V. Kryukov, A.V. Serebryakov. Bulletin of inventions, 2012, No. 3.

8. **Kryukov O.V., Serebryakov A.V., Vasenin A.B.** *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi — in Ukrainian (Electromechanical and Energosaving)*, 2012, No. 3(19), pp. 549–552.

[09.02.2017]