

# АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

## Оптимизация управления автономными ветроэнергетическими установками в условиях стохастических возмущений

Серебряков А. В., инж.

Новгородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Крюков О. В., канд. техн. наук

ОАО “Гипрогазцентр”, Нижний Новгород

Рассмотрены особенности функционирования ветроэнергетических установок в условиях автономных систем электроснабжения. Показано, что максимальная энергоэффективность ВЭУ достигается при непрерывном отслеживании основных метеорологических и технологических параметров. Представлена методика получения алгоритмов регрессионного управления, обеспечивающих оптимум энергетических характеристик автономных систем электроснабжения.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, стохастические возмущения, синхронный генератор, оптимальное управление, регрессионные уравнения.

Работа автономных ветроэнергетических установок (ВЭУ) характеризуется специфическими особенностями, среди которых наиболее существенными являются [1]:

широкие диапазоны изменения скорости вращения вала и нагрузки вплоть до критических значений из-за стохастического характера ветровой энергии и метеорологических условий;

преобладание динамических режимов работы генератора вследствие непостоянного и порывистого воздействия ветрового потока, приводящего к вибрации и колебаниям скорости;

сложность оптимизации электрооборудования из-за неадекватности прогнозов реальных условий эксплуатации;

совместимость работы генератора с ветроколесом и редуктором, а также с преобразователями и накопителями электроэнергии;

наличие широкого спектра возможных потребителей электроэнергии с различными требованиями к качеству напряжения и частоте, значительное колебание нагрузки.

Вместе с тем реализация идей “интеллектуальных” систем электроснабжения (СЭС) в соответствии с принципами SMART GRID для комбинированных сетей питания автономных объектов позволяет [2]:

уменьшить выбросы  $\text{CO}_2$  при производстве электроэнергии автономными источниками (АИЭ);

повысить стабильность параметров вырабатываемой электроэнергии и надежность СЭС в целом;

снизить затраты и себестоимость электроэнергии и увеличить энергоэффективность АИЭ;

улучшить наблюдаемость и устойчивость локальных энергосетей;

повысить уровень эксплуатационной безопасности потребителей 1-й и 2-й категорий.

Для этого целесообразно использовать комбинированные АИЭ [3] на основе сочетания ВЭУ и традиционного углеводородного источника электроэнергии (ТИЭ) (рис. 1) с дифференцированным питанием трех категорий потребителей разной мощности:

нагрузка 1-й категории — “жизненно важные” потребители объектов;

нагрузка 2-й категории — штатное электроснабжение потребителей;

нагрузка 3-й категории — полное электроснабжение.

Возможность работы в каждом категориальном режиме потребления контролируется АСУ СЭС, которая по измеренным значениям входной мощности ветрового потока (момента и частоты вращения вала) и выходной мощности нагрузки (напряжения, тока и коэффициента мощности) контролирует стабильность параметров. При использовании двух независимых источников электроэнергии в СЭС появляется возможность перераспределения используемой мощности от этих источников с целью минимизации затрат на выработку электроэнергии для автономных потребителей.

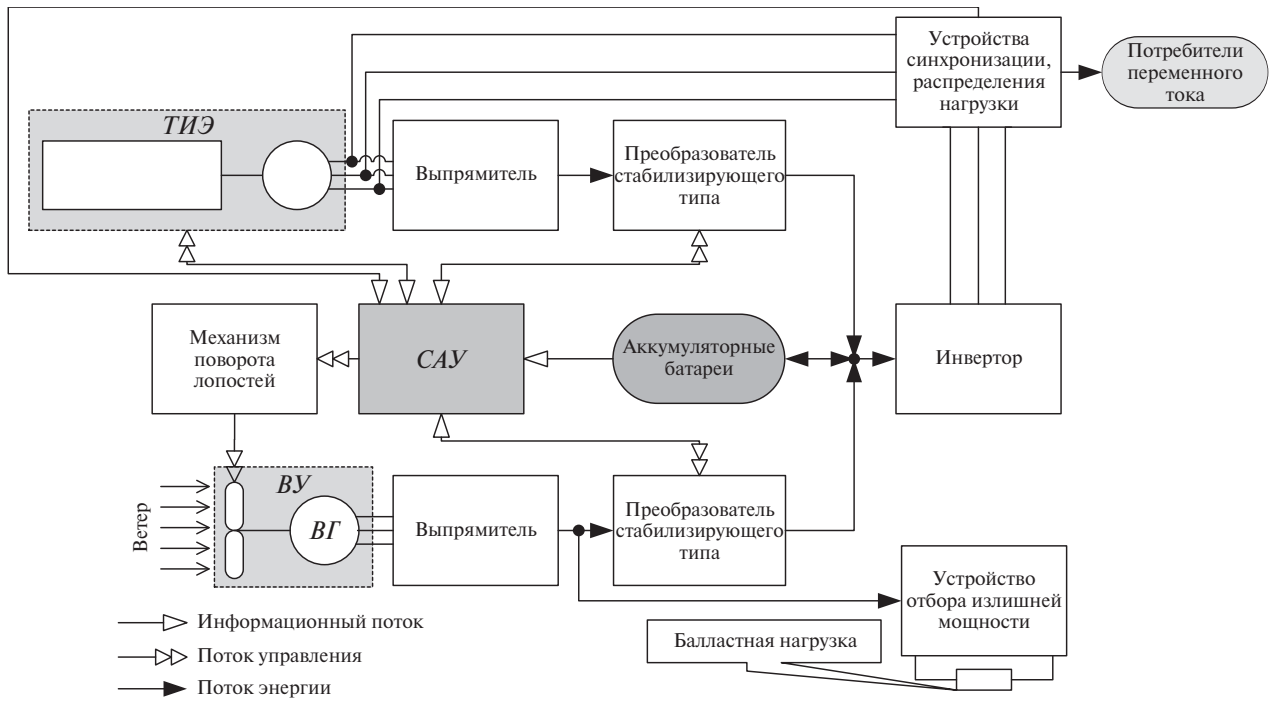


Рис. 1. Трехлучевая структура комбинированной СЭС ВЭУ с выделенным каналом ТИЭ

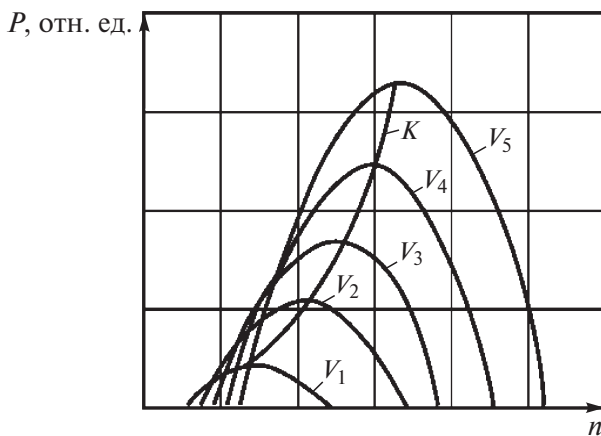


Рис. 2. Мощностные характеристики ветротурбин:

$P$  — выходная мощность, отн. ед.;  $n$  — частота вращения вала (1000 об/мин);  $V_1 - V_5$  — линейные скорости ветра;  $K$  — линия максимального съема мощности потока

Применение преобразовательной техники в ВЭУ обеспечивает универсальность, упрощение механической части, высокие КПД и качество вырабатываемой электроэнергии. Кроме того, разработанные законы оптимального управления ВЭУ в динамических режимах позволяют алгоритмическим путем решать задачи их энергоэффективной эксплуатации.

Замкнутые системы автоматического регулирования (САР) ВЭУ дают возможность осуществить стабилизацию амплитуды и частоты вырабатываемого напряжения с требуемой

точностью, а также регулирование реактивной мощности без установки вспомогательного электротехнического оборудования [3]. Разработанные алгоритмы САР в данной схеме комбинированных “интеллектуальных” электросетей позволяют увеличить количество вырабатываемой электроэнергии на 9 – 16 % по сравнению с традиционными системами за счет более точного отслеживания соответствия частоты вращения вала генератора линейной скорости ветра по оптимизационным кривым (рис. 2).

Для получения оптимальных алгоритмов управления ВЭУ в соответствии с принципами SMART GRID предложено использовать мультипроцессорную систему с “интеллектуальными” датчиками на основе 5-уровневой нечеткой логики (рис. 3). Цифровые алгоритмы замкнутой САР в “интеллектуальной” СЭС синтезированы на основе теории планирования эксперимента [4].

Как известно, ВЭУ проектируют и выпускают универсальными в соответствии с типорядами по ГОСТ Р 51990–2002 для интеграции их в автономные СЭС различной мощности и эксплуатации в разных климатических зонах. Поэтому для получения режимов максимальной энергоэффективности работы их локальных СЭС в условиях случайного характера ветрового потока и потребления для получения высококачественной электроэнергии необходимо автоматиче-

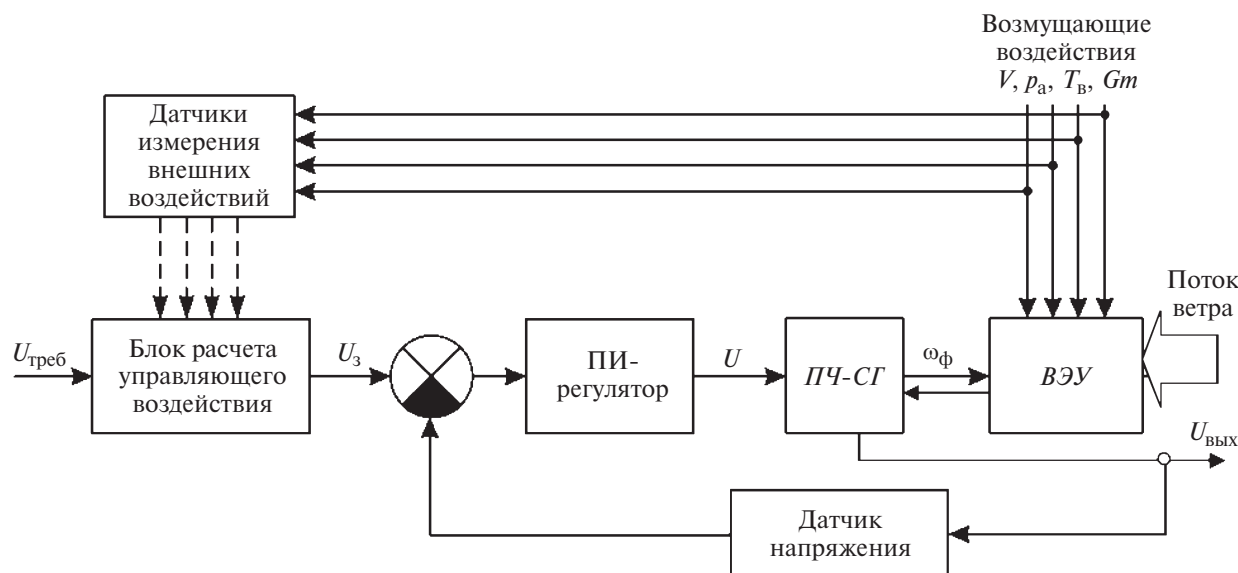


Рис. 3. Структура комбинированной САР локальной ВЭУ:

$U_{\text{треб}}$  — задающий сигнал напряжения;  $U_3$  — задающее управляющее воздействие;  $U$  — управляющее воздействие  $U/f^2$ ;  $\omega_{\text{ф}}$  — частота вращения вала ветроколеса;  $U_{\text{вых}}$  — выходное напряжение ВЭУ; ПЧ — преобразователь частоты; СГ — синхронный генератор

ски обеспечивать работу ВЭУ в оптимальных областях средствами электромеханической части АИЭ.

Наибольшее влияние на процесс выработки электроэнергии ВЭУ оказывают параметры стохастического характера, имеющие метеорологическую (климатическую) и технологическую природу:

линейная скорость ветра  $V$ , м/с;

плотность воздуха в ветровом потоке  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, зависящая от текущих значений атмосферного давления  $p_a$ , МПа, и температуры воздуха  $T_b$ , К, в соответствии с уравнением Клапейрона;

энергопотребление  $W_{\text{потр}}$ , кВт·ч, в том числе электрическая и тепловая мощности потребителей (параметр  $G_m$ ).

Поскольку для получения стабильной высококачественной электроэнергии на выходе АИЭ СЭС на базе ПЧ-СГ ВЭУ охвачена отрицательной обратной связью по напряжению (см. рис. 3), задание управляющего воздействия на ПЧ (в условиях одновременного случайного изменения всех параметров) должно изменяться по аналитическим регрессионным алгоритмам вида

$$U_3 = f(V, p_a, T_b, G_m). \quad (1)$$

Для получения конкретных зависимостей вида (1) необходимо использовать базу метеорологических данных аргументов для региона предполагаемого размещения ВЭУ и обработать их статистическими методами

планирования эксперимента. Совокупность этих методов основана на приложениях центральной теоремы теории вероятностей. Действительно, все основные возмущения, воздействующие на ВЭУ, носят преимущественно случайный характер и не зависят друг от друга. Поэтому искомые многопараметрические зависимости нужно получить в виде нелинейных и линеаризованных регрессионных моделей с использованием одного из подходящих матричных способов наименьших квадратов [4].

Метод регрессионного анализа, являющийся фундаментом многих разделов теории планирования эксперимента и статистической обработки данных, применяется в реальной практике проектирования АСУ электроэнергетическими объектами в двух основных случаях:

когда после проведения натурных экспериментов с ВЭУ имеются базы численных значений, характеризующие изменение регистрируемых признаков (полученные таким образом массивы информации обрабатываются на персональном компьютере);

когда непосредственно в ходе эксплуатации системы управления ВЭУ сигналы, снимаемые с датчиков с определенной дискретностью, обрабатываются на управляющем компьютере (режим on-line).

Для экспериментальных данных или обработанной информации с сайта “Погода России” по выражениям [3, 4] можно получить

модель линейной регрессии в матричном виде:

$$Y = Xa + \zeta, \quad (2)$$

где  $Y$  — матрица выходных параметров системы (вырабатываемой электроэнергии или напряжения на шинах СГ);  $X$  — матрица входных воздействий (температуры и давления воздуха, скорости ветра, объема потребляемой энергии);  $a$  — параметры механизма преобразований в системе;  $\zeta$  — матрица помех (неучтенных факторов).

Математическая модель алгоритма управления ПЧ-СГ ВЭУ для работы в оптимальной области реализуется на основе исходной информации о параметрах работы или экспериментальных данных прототипа. Для этого необходимо найти в зависимости (1) параметры  $a_i$  линейной четырехфакторной модели (2):

$$U_3 = a_1 V + a_2 p_a + a_3 T_B + a_4 G_m + \zeta. \quad (3)$$

Параметры  $a_i$  находят путем статистической обработки экспериментальных данных с использованием средств MATLAB и MathCAD и путем обработки исходных массивов данных по методу наименьших квадратов. Экспериментальные значения замеров представлены в статистических сводках [1].

По таблицам данных можно представить модель линейной регрессии в матричном или линейном виде. В результате расчетов из выражения (3) получено численное уравнение линейной регрессии четвертого порядка

$$U_3 = 12,214V + 0,219p_a + 0,92T_B - 0,022G_m + 9,602, \quad (4)$$

которое является искомым алгоритмом инвариантного задания и управления синхронным генератором ВЭУ. Как видно, наибольшие коэффициенты в этом уравнении (наибольшее влияние) имеют факторы  $V$  (12,214) и  $T_B$  (0,92). Это ожидаемо и соответствует результатам многолетних наблюдений в разных регионах России. В упрощенных системах можно ограничиться измерением и вычислением только этих параметров ветра.

Линейные регрессионные уравнения для двухфакторной модели ВЭУ, учитывающей влияние только скорости ветра и температуры окружающего воздуха  $T_B$  по сухому термометру имеют вид:

$$\omega_{л2} = 3,899V + 0,384T_B + 30,988. \quad (5)$$

Судя по полученным зависимостям (4) и (5), регрессионные алгоритмы управления

ВЭУ в полной мере отслеживают текущие входные возмущения и корректируют максимум выработки электроэнергии комбинированной СЭС. Поэтому выражения линейных регрессий (4) и (5), как и в целом выражение (3), целесообразно использовать в качестве управляющих алгоритмов работы ПЧ-СГ ВЭУ для задающего воздействия.

Таким образом, соблюдение оптимальных параметров энергетического комплекса по закону съема максимума мощности ветрового потока в функции скорости ветра обеспечивается путем автоматического регулирования синхронного генератора ВЭУ, а также распределения мощности между ветрогенератором и ТИЭ. Этим достигаются возмещение генерируемой мощности от энергозатратного ТИЭ в соответствии с принципами SMART GRID и высокий уровень энергосбережения в “интеллектуальных” автономных СЭС для различных объектов, удаленных от центральных электросетей.

## Выводы

1. Рациональное сочетание традиционных и альтернативных источников электроэнергии для автономных СЭС может быть реализовано в комбинированных АИЭ с интегрированными АСУ “интеллектуальных” сетей на основе технологий SMART GRID активно-адаптивной сети. Рассмотренная комбинированная схема “интеллектуальных” сетей электроснабжения позволяет сократить выбросы  $CO_2$  при производстве электроэнергии автономными источниками, повысить качество вырабатываемой электроэнергии и надежность СЭС, снизить себестоимость электроэнергии и увеличить эксплуатационную безопасность потребителей 1-й и 2-й категорий.

2. Предложенная и теоретически обоснованная методика расчета алгоритмов регрессионного управления ВЭУ при стохастических воздействиях позволила получить модели системы управления ПЧ-СГ, инвариантные к внешним возмущениям. Анализ рассчитанных линеаризованных и нелинейных двух- и четырехфакторных регрессионных алгоритмов управления показал их адекватность.

3. Оптимизация съема мощностей в реальном времени на локальном и системном уровнях автономных СЭС с ВЭУ в рамках комбинированных энергоисточников позволяет достичь высоких показателей надежности, обеспечивает дистанционный мониторинг и

энергоэффективность “интеллектуальных” электросетей для питания удаленных потребителей.

#### Список литературы

1. Пужайло А. Ф., Савченков С. В., Спиридович Е. А. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: Монография / Под ред. О. В. Крюкова. — Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010 – 2012.
2. Васенин А. Б., Крюков О. В., Серебряков А. В. АСУ систем электроснабжения на принципах SMART GRID для объектов магистральных газопроводов. — Автоматизация в промышленности, 2012, № 4.
3. Пат. 113085, МПК H02J 3/00, H02J 3/46. Энергетический комплекс / А. Б. Васенин, О. В. Крюков, А. В. Серебряков. — Изобретения. Полезные модели, 2012.
4. Крюков О. В. Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях. — Электричество, 2008, № 9.

serebryakov@ardman.ru

