

## Особенности электромеханического управления комплексной силовой энергетической установкой с ветропреобразовательным устройством вихревого типа

*В.А. Костюков, В.А. Шевченко*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В настоящей статье рассматриваются особенности управления силовой установкой на базе возобновляемых источников энергии для дополнительного и аварийного электропитания надводных робототехнических комплексов. Такого рода комплексная силовая энергетическая установка (КСЭУ) может быть построена на базе преобразователей ветровой и солнечной энергий и вырабатывать не менее 10-15% всей потребной для судна электрической энергии. Для наиболее важного элемента КСЭУ - ветроэнергетической установки (ВЭУ), рассматривается электромеханическое управление моментом на валу её ротора. Для этого, во-первых, решается задача управления угловой скоростью вращения ротора с помощью изменяемых элементов геометрии (ИЭГ) ВЭУ перспективного типа. В качестве ИЭГ рассматривается перестраиваемое расстояние от нижней части ротора до верхней части нижней направляющей структуры этой ВЭУ. Проводится моделирование полученных уравнений регулятора для частного случая стабилизации скорости вращения ротора. Во-вторых, обосновывается структурная схема электрического управления выходными характеристиками ВЭУ и приводится методика выбора некоторых ключевых элементов этой схемы. Рассматриваются особенности реализации электрической схемы подключения ВЭУ, солнечных панелей (СП) и дизельной генераторной установки в единую КСЭУ. Показывается, что построенная интегрированная система управления ВЭУ способна эффективно решать вопрос парирования внешних ветровых возмущений.

**Ключевые слова:** комплексная силовая энергетическая установка, роботизированная надводная платформа, электромеханическое управление ветроэнергетической установкой, изменяемые элементы геометрии, структурная электрическая схема подключения, гибридный контроллер.

### Введение

В настоящее время существует большая группа морских объектов, стационарного базирования и подвижных, в том числе робототехнических комплексов, нуждающаяся во вспомогательных автономных источниках энергии.

Разработкой и внедрением альтернативных источников энергии на морских надводных платформах с целью снижения общего потребления ими топлива занимаются многие международные компании [1, 2].

Одним из подходов, позволяющим экономически ощутимо (более чем на 10%) снизить потребление обычного топлива, является использование комплексной силовой энергетической установки (КСЭУ), состоящей из ветроэнергетической установки (ВЭУ) и установки на солнечных батареях.

Ключевыми проблемами при этом являются: 1) выбор типа ВЭУ, подходящей для установки на стационарную/мобильную платформу как элемент указанной КСЭУ; 2) разработка электромеханической системы управления КСЭУ, позволяющей оптимизировать её функционирование по критерию максимальной вырабатываемой мощности при жестких ограничениях, накладываемых требованиями безопасности и надежности функционирования всех систем носителя.

В настоящей статье рассматривается вторая из указанных двух проблем на основе перспективной вертикально-осевой ВЭУ вихревого типа, рассмотренной в статьях [3, 4, 6, 7] и патенте [5]; эффективность применения такой ВЭУ в составе КСЭУ для катера малого водоизмещения показана в [3].

### **Постановка задачи по разработке электромеханической системы управления ВЭУ**

Пусть для надводного катера малого водоизмещения (длиной  $L=10$  м) необходимо разработать систему управления комплексной силовой энергетической установкой на базе возобновляемых источников энергии, вырабатывающую не менее 10% от номинальной мощности  $P_{дв}=10$  кВт двигателей катера.

Возможный внешний вид такого катера с установленной на нем КСЭУ приведен на рисунке 1, а. Систему солнечных панелей берем стандартную, в качестве ВЭУ берем вертикально-осевую установку вихревого типа (см. рис. 1 б, патент [5]), целесообразность применения которой для морского транспорта малого водоизмещения рассмотрена в работе [3]. Эта ВЭУ содержит восьмилопастный ротор специальной формы, верхнюю часть

статора - раструб, нижнюю часть статора - направляющую структуру (см. рис. 1 б). Принцип действия такой ВЭУ основан на использовании энергии вихревой структуры, возникающей внутри раструба, перепада давлений между верхней и нижней его частями и специальной форме ротора (см. рис.1, в).

В работах [6, 7] показаны аэродинамические преимущества такой установки, как в отношении вырабатываемой мощности, так и в отношении минимизации уровня шума, по сравнению с аналогами [8-16]. Конструкция этой установки была получена в результате аэродинамической оптимизации, которая производилась с помощью программных комплексов *Ansys Fluent* и *Fine Hexa*. Эти программные пакеты были ранее эффективно использованы авторами для расчета гидродинамических характеристик надводных кораблей и подводных аппаратов [17, 18].

Далее сосредоточимся на разработке системы управления (СУ) рассматриваемого типа ВЭУ как основного элемента указанной КСЭУ.

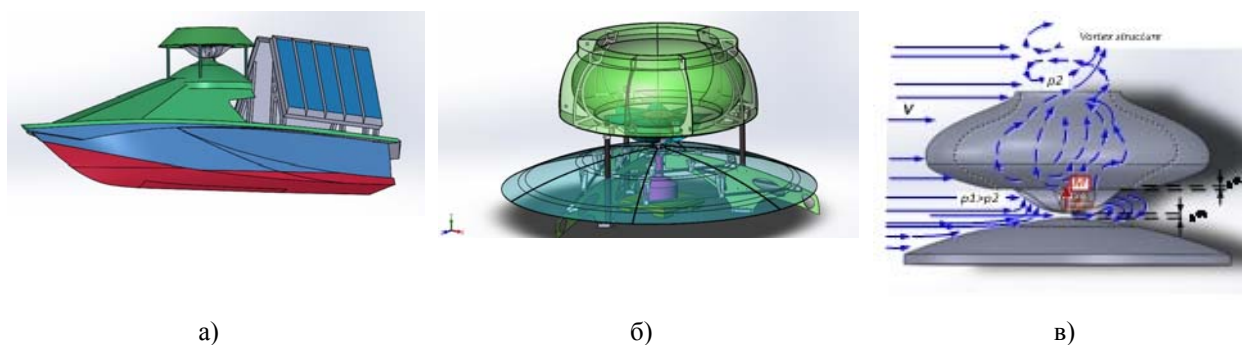


Рис.1 – К синтезу конструкции КСЭУ и ВЭУ: а) упрощенная 3d-модель маломерного катера с установленной на нём КСЭУ; б) 3d-модель используемой ВЭУ вихревого типа; в) к пояснению принципа действия ВЭУ вихревого типа

Рассмотрим основные технические характеристики разрабатываемой КСЭУ с предложенной выше ВЭУ вихревого типа для катера длиной  $L = 10 \text{ м}$ .

Для скорости потока воздуха относительно ВЭУ  $V = 3 \text{ м/с}$  средняя мощность КСЭУ равна  $P_{КСЭУ} = 2 \text{ кВт}$  [3], что составляет 14% от заданной мощности двигательной установки  $P_{ДВ} = 10 \text{ кВт}$ . Причем на ВЭУ приходится рассчитанная мощность  $P_{ВЭУ} = 0,1 \text{ кВт}$ , а на СП -  $P_{СП} = 1,3 \text{ кВт}$ , полученная из расчета, что с  $1 \text{ м}^2$  СП снимается в среднем мощность 190 Вт, что соответствует КПД СП  $\eta_{СП} \approx 19\%$ . При  $V = 10 \text{ м/с}$  значения мощностей ВЭУ, КСЭУ соответственно равны:  $P_{ВЭУ} = 3,7 \text{ кВт}$ ,  $P_{КСЭУ} = 5 \text{ кВт}$ , что с учетом  $P_{СП}$  составляет уже 56% от потребной мощности движителей.

Габариты ВЭУ составляют  $2,4 \times 1,6 \times 2,4 \text{ м}$ , СП -  $2,2 \times 2,5 \times 2,9 \text{ м}$ . Вертикальный размер ВЭУ может быть снижен за счет использования уже существующих конструктивных элементов катера в качестве нижней части статора (рис. 1 а).

### Управление изменяемыми элементами геометрии ВЭУ

Рассмотрим использование изменяемых элементов геометрии (ИЭГ) для управления угловой скоростью вращения ротора ВЭУ. В работах [3,4] рассмотрен процесс стабилизации этой скорости с помощью ИЭГ – расстояния  $h$  от нижней части ротора до верхней части нижней направляющей структуры (см. параметр  $h^{(1)}$  на рис. 1 в). Однако там не была достаточно строго поставлена и решена задача по исследованию переходных процессов, происходящих при сходимости угловой скорости к целевому значению, поскольку не была учтена инерционность регулирования в соответствии с некоторым уравнением его ошибки.

Пусть  $\omega^*$  - целевая функция угловой скорости  $\omega$ . Будем рассматривать управления с помощью указанного выше ИЭГ  $h$  согласно уравнению ошибки  $\Delta\omega = \omega_p - \omega^*$  регулирования второго порядка:

$$\frac{d^2\Delta\omega}{dt^2} + A\frac{d\Delta\omega}{dt} + B\Delta\omega = 0, \quad (1)$$

где  $A, B, C$  - некоторые постоянные коэффициенты, определяющие характер переходного процесса по угловой частоте, в частности, время затухания этого процесса и степень его перерегулирования.

Уравнение вращательного движения ротора есть:

$$J\frac{d\omega}{dt} = M(V, \omega, h) + M_c(\omega), \quad (2)$$

где  $M(V, \omega, h), M_c(\omega)$  - полезный аэродинамический момент на роторе и момент сопротивления, соответственно. На основании (1) и (2) может быть получено выражение:

$$\frac{1}{J}\left(M'_V\dot{V} + (M'_\omega + M'_{c,\omega})\dot{\omega} + M'_h\dot{h}\right) + \frac{A}{J}(M + M_c) + B\omega = f(t), \quad (3)$$

где  $f(t) = \ddot{\omega}^* + A\dot{\omega}^* + B\omega^*$ .

Будем исходить из конкретных эмпирических зависимостей для  $M(V, \omega, h), M_c(\omega)$ , соответствующих нашему случаю [3, 4]:

$$M(V, \omega, h) = V\left[a_1 + a_2(V - V_0)\omega\right]f_u(h), \quad (4)$$

$$M_c(\omega) = -b\omega, \quad (5),$$

где функция  $f_u(h)$  дана выражением:

$$f_u(h) = \begin{cases} \frac{a_3}{h} + a_4, & \text{при } h \in [h_1; h_2]; \\ h_1, & \text{при } h < h_1; \\ h_2, & \text{при } h > h_2. \end{cases} \quad (6)$$

В (4)-(6)  $a_1, a_2, a_3, a_4, b, h_1, h_2$  - некоторые константы.

Комбинируя (3) с (4)-(6), приходим к дифференциальному уравнению первого порядка в форме Коши относительно неизвестной функции управления ИЭГ  $h$ :

$$\dot{h} = \frac{1}{M'_h} \left\{ BJ(\omega^* - \omega) - \left[ a_1 + a_2\omega(2V - V_0) \right] f_u(h) \dot{V} + \frac{1}{J} \left[ a_2V(V - V_0) f_u(h) + AJ - b \right] (M + M_c) \right\}, \quad (7)$$

где скорость ветра  $V$  и её производная  $\dot{V}$  считаются измеряемыми функциями.

Для определенности положим, что скорость ветра изменяется по апериодическому закону:

$$V(t) = V^*(t) = V_0 + A_V \exp(\alpha_V t) \sin(\Omega_V t), \quad (8)$$

где  $A_V$  - амплитуда ветровых колебаний,  $\alpha_V$ ,  $\Omega_V$  - параметры, характеризующие степень их затухания.

Уравнения (1) и (7) образуют систему уравнений в форме Коши для решения искомой задачи управления на заданном интервале времени.

### Моделирование управления ИЭГ

На основании системы уравнений (2) и (7) было проведено моделирование механического, аэродинамического управления параметром  $h$  - расстоянием от нижней части ротора до верхней части нижней направляющей структуры (это есть величина  $h^{(1)}$  на рис. 1 в) для трех значений амплитуды ветровых колебаний:  $A_V = 1; 2; 2,5; 3,36 \text{ м/с}$ .

Исходные данные для моделирования были следующие: граничные значения диапазона управляющего параметра:  $h_1 = 0,01 \text{ м}$ ,  $h_2 = 0,65 \text{ м}$ ; целевое значение скорости ротора  $\omega^* = 2\pi \text{ рад/с}$ , допустимое время вхождения кривой частоты в коридор допуска -  $T_{\max} = 6 \text{ с}$ ; постоянные параметры, входящие в выражения моментов (аэродинамического и сопротивления):  $a_1 = 0,0716$ ,  $a_2 = 1,704 \cdot 10^{-4}$ ,  $a_3 = 0,202$ ,  $a_4 = 0,692$ ,  $b = 0,0019$ ; начальные условия для

решения задачи Коши:  $\omega_0 = 3\pi \text{ рад/с}$ ,  $h_0 = 0,04 \text{ м}$ ; параметры ветрового возмущения (8):  $\alpha_v = -0,1 \text{ с}^{-1}$ ,  $\Omega_v = 2\pi \text{ рад/с}$ .

На рисунке 2, а представлен процесс сходимости управляемой угловой частоты к установившемуся значению  $\omega^* = 2\pi \text{ рад/с}$ , на рис. 2, б – процесс потребного, целевого изменения параметра  $h$  без учета конструктивных ограничений  $h \in [h_1; h_2]$ , т.е. зависимость управляющего множителя  $f_u(h)$  в (4) была положена  $f_u(h) = a_3/h + a_4$  без ограничений, фигурирующих в (6).

На рис. 2, в представлены временные зависимости управляемой угловой скорости ( $\omega_{\text{им}}(t)$ ) при реальном управлении  $h$  (рис. 2 г) с учетом указанных ограничений, соответствующих множителю  $f_u(h)$  в (6).

Из этих графиков видно, что при реальном изменении  $h$  время вхождения в целевой 5%-й коридор по допустимому отклонению угловой скорости от своего номинального значения  $\omega^* = 2\pi \text{ рад/с}$  имеет место для максимальной рассмотренной амплитуды колебаний ветра  $A_v = 2,5 \text{ м/с}$ , составляет  $T(A_v = 2,5) \approx 5 \text{ с} < T_{\text{max}}$  и является допустимым. Таким образом, ограничение  $h \in [h_1; h_2]$  увеличивает время переходного процесса для случая  $A_v = 2,5 \text{ м/с}$  в среднем в  $5/1,6 = 3,125$  раз, по сравнению с идеальным управлением, согласно рис. 2 а, в. Для меньших значений амплитуды  $A_v$  указанное отличие будет меньше. Однако при значении  $A_v = 3,36 \text{ м/с}$  аналогичное время  $T(A_v = 3,36) \approx 10 \text{ с} > T_{\text{max}}$  является уже недопустимым.

Для получения зависимостей, приведенных на рис. 2 в, г, было проведено моделирование только по одному уравнению вращательного движения (2). Здесь в качестве управляющей функции времени была взята зависимость  $h(t)$ , полученная в результате расчета системы уравнений (2), (7) (см. рис. 2 б) с наложенным на неё ограничением  $h \in [h_1; h_2]$ :

$$h(t) = \begin{cases} \tilde{h}(t), & \text{при } h \in [h_1; h_2]; \\ h_1, & \text{при } \tilde{h}(t) < h_1; \\ h_2, & \text{при } \tilde{h}(t) > h_2. \end{cases} \quad (9)$$

Ясно, что введение дополнительных изменяемых элементов геометрии потенциально способно повысить динамический диапазон регулирования момента вращения.

Следовательно, механическое регулирование частоты вращения ротора ВЭУ за счет управления изменяемыми элементами геометрии в комплексе с обычными методами электрической стабилизации этой частоты способно повысить эффективность и надежность работы ВЭУ, а также качество вырабатываемой электроэнергии.

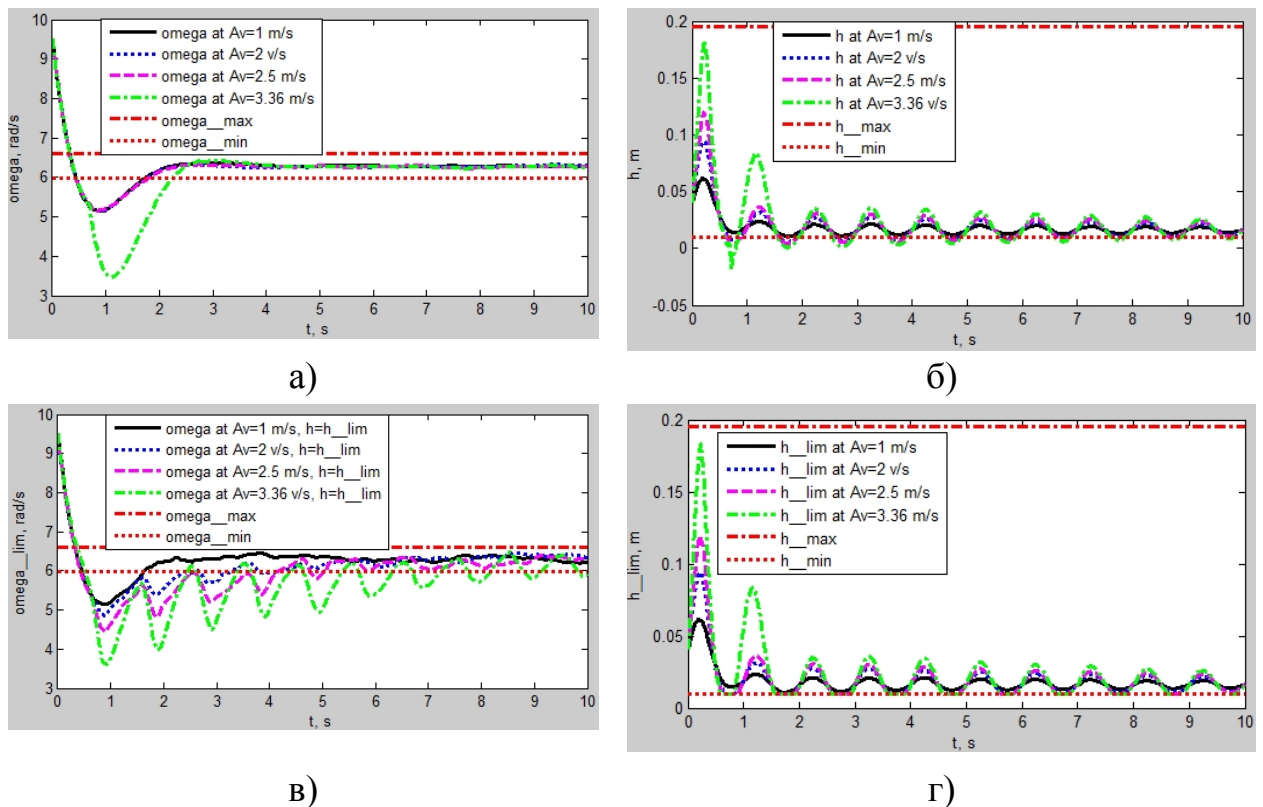


Рисунок 2 – Результаты моделирования: а), в) – временные зависимости угловой скорости для идеальной управляющей зависимости ИЭГ (б) и реальной зависимости с учетом ограничений (г)



## Электромеханическая схема управления КСЭУ

Электрическая часть КСЭУ включает в себя: генератор электроэнергии на базе синхронной машины, систему стабилизации выходного напряжения, силовые преобразователи, систему управления преобразованием энергии, аккумуляторные батареи, солнечные панели и резервный источник – дизельный генератор.

Рассмотрим обобщенную структурную электромеханическую схему КСЭУ, включающей ВЭУ, блок солнечных панелей (СП) и, в общем случае, также резервный дизельный генератор (ДГ).

Для модуля ВЭУ и подключения СП и ДГУ к нагрузке может использоваться классическая схема (рис. 3), содержащая синхронный генератор с постоянными магнитами, фильтр низких частот, выпрямитель, инвертор, контроллер заряда (зарядного устройства) и аккумуляторные батареи (АКБ). Модулю СП соответствует свой контроллер заряда, питающий АКБ; ДГ может подключаться к нагрузке с помощью программно-управляемого ключа 2.

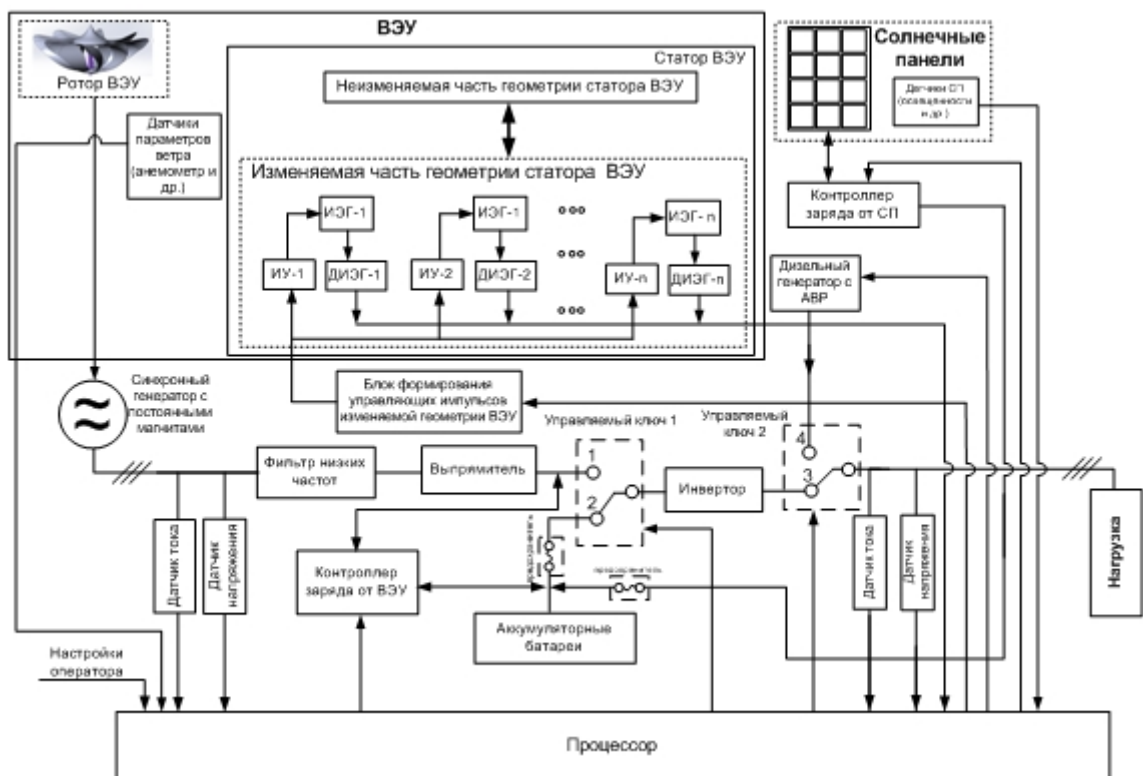


Рис. 3 – Обобщенная классическая электромеханическая схема КСЭУ

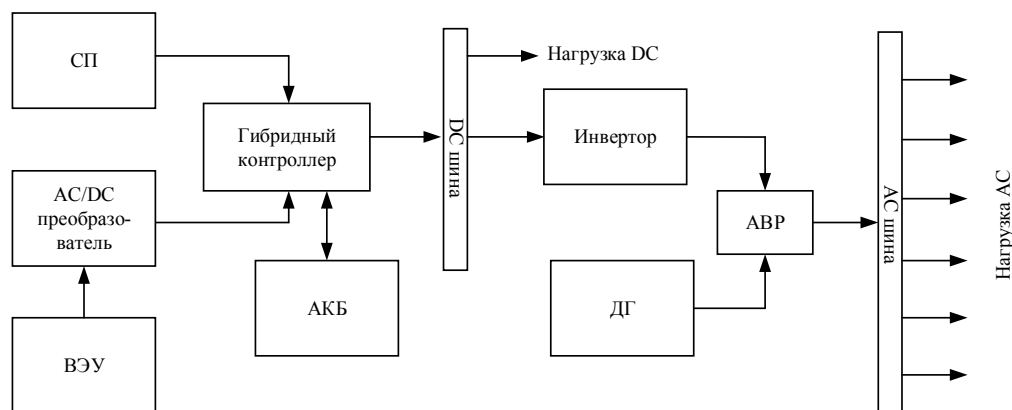


Рис. 4 – Схема КСЭУ обобщенная структурная с использованием ГК (без учета ИЭГ ВЭУ)

Когда скорость ветра больше значения  $V_{\min}$ , определяющейся скоростью запуска ветродвигателя, и меньше  $V_{\max}$ , управляемый ключ 1 должен находиться в положении 1, если АКБ уже заряжена полностью. При этом сложное по форме выходное напряжение с синхронного генератора выпрямляется, а далее - инвертируется с получением трехфазного синусоидального напряжения и далее – поступает на нагрузку. Если при тех же условиях АКБ заряжена не полностью, то ключ 1 процессором переводится в положение 2, и нагрузка начинает питаться от АКБ через инвертор.

Если скорость  $V \geq V_{\min}$ , то контроллер начинает ограничивать ток с выпрямителя и растет напряжение на генераторе, электромеханический момент сопротивления вращению ротора уменьшается и последний может раскрутиться еще сильнее. Для предотвращения такой ситуации предусматриваются два варианта: а) аварийный останов ветроколеса; б) сбрасывание энергии генератора на балластное сопротивление. Если ключ 1 находился в положении 2, то процессор дает команды устройствам торможения ротора на отработку его останова. Когда превышение  $V > V_{\max}$  детектируется в положении 1 ключа 1, то вначале производится перевод

ключа 1 в положение 2, а затем осуществляются описанные действия по отключению АКБ от генератора и торможение ротора.

Вводимой нами особенностью является аэродинамическое торможение ротора, которое есть пример использования изменяемых элементов геометрии (ИЭГ) ВЭУ для регулирования её выходных характеристик [3, 4]. Это торможение предлагается осуществить за счет управляемого втягивания ротора вверх, т.е. за счет регулирования ометаемой ветром поверхности ротора. При этом используются два управляемых параметра ИЭГ ВЭУ: расстояния от нижней части ротора до верхнего края нижнего статора  $h^{(1)}$ , и до края верхнего статора  $h^{(2)}$ , соответственно (рис. 1, в). ИЭГ отклоняются исполнительными устройствами (ИУ) от своих нормальных положений для реализации заданного взаимодействия ветрового потока с ВЭУ. Для осуществления обратной связи по управлению ИЭГ используются датчики их отклонения (ДИЭГ). Управляющие сигналы для ИУ вырабатываются в блоке формирования управляющих импульсов для ИЭГ, регулируемого процессором.

АКБ должна осуществлять питание нагрузки и, соответственно, быть рассчитанной на один из двух возможных режимов: 1) снабжение потребителя при потере мощности от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) так долго, как позволит емкость батареи; при этом указанная емкость должна быть как можно большей при заданном лимите стоимости батареи; 2) снабжение потребителя до включения дизельного генератора.

Рассмотрим именно второй режим, поскольку он определит нижнюю границу емкости АКБ в общем случае. Зададим мощность КСЭУ  $P_{КСЭУ} = 5 \text{ кВт}$ , соответствующую ветру  $V=10 \text{ м/с}$ . Время ввода в рабочее состояние ДГ в зависимости от мощности составляет, как правило, от 2 до 15 секунд. Выберем 5-ти минутный интервал с максимальной мощностью нагрузки 5 кВт. Для примера рассмотрим АКБ производителя ВОСТОК PRO

---

серии СХ. Согласно паспортным данным выбираем АКБ 12В емкостью 200 А\*ч, обеспечивающей 5352 Вт в течении 5 минут с падением напряжения на 20%. Более глубокая разрядка АКБ является нецелесообразной и способна снизить срок его службы.

Использование дополнительно солнечных панелей (СП) требует подключения соответствующего контроллера заряда СП. Заметим, что использование одного контроллера заряда для ВЭУ и СП невозможно, так как транзисторы, как правило, используемые в контроллере заряда от СП, сгорят при напряжении на генераторе, близком к напряжению холостого хода при большой скорости вращения ротора. Данное ограничение может быть преодолено применением гибридного контроллера (ГК) ВЭУ/СП [20-22]. Внедрение ГК позволяет отказаться от одного из контроллеров заряда и электронно-механического управляемого ключа 1 в классической схеме.

ГК контролирует дополнительные внешние зарядные/разрядные токи, автоматически их ограничивая. Тем самым решается проблема превышения допустимого тока заряда в классической схеме, т.к. мгновенные токи от контроллера ВЭУ и СП не могут быть в ней учтены одновременно. Кроме того, использование ГК имеет еще ряд преимуществ: а) применение технологии МРРТ (отслеживание точки максимальной мощности); б) детектирование превышения скорости вращения ротора ВЭУ (сигнализация о необходимости применения аэродинамического тормоза); в) контроль тока и напряжение сразу с двух источников (ВЭУ и СП); г) применение защиты СП от обратного хода, обратной полярности; и АКБ от холостого хода, обратной полярности, перегрузки, молнии, перезаряда; д) динамическая коррекция параметров заряда/разряда АКБ.

Таким образом, классическую схему подключения ВЭУ, СП и ДГ, приведенную на рис. 3, можно преобразовать к виду, показанному на рисунке 4.

## Выводы

В работе рассмотрена электромеханическая система управления перспективной ветроэнергетической установкой вихревого типа, включающая электрическую систему стабилизации выходных параметров (получающихся на нагрузке) электрической её части и механическую систему стабилизации частоты вращения ротора, основанную на использовании изменяемых элементов геометрии ВЭУ. Последнюю можно использовать, как показано, в качестве главного элемента соответствующей комплексной силовой энергетической установки для морских судов малого водоизмещения с соблюдением всех требований безопасности и надежности функционирования.

Синтезированный регулятор угловой скорости вращения ротора рассматриваемой ВЭУ способен держать эту скорость в 5%-коридоре при ветровых возмущениях с амплитудой аperiodической составляющей не более 2,5 м/с при гарантированном времени вхождения частоты в указанный коридор не более 6 секунд. Это достигается за счет значительного динамического диапазона регулирования используемого для управления изменяемого элемента геометрии рассматриваемой ВЭУ – расстояния от нижней части ротора до верхней части нижней направляющей структуры.

Реализация указанного аэродинамического регулирования угловой скорости позволит сделать менее жесткими требования к части электрооборудования, прежде всего, к выпрямителю, контроллеру заряда АКБ, а также к фильтру низких частот. На базе концепции использования ИЭГ предложен механический вариант автоматического торможения ротора путем втягивания последнего во внутреннюю область раструба.

Разработана схема электрического управления КСЭУ, которая предусматривает возможность использования, кроме ВЭУ, также солнечных

---

панелей и дизельного генератора. Указана методика выбора аккумуляторной батареи, предназначенной для питания потребителя в течение времени ввода в резерв дизельного генератора.

Таким образом, в работе показано, что одной из перспектив развития альтернативной энергетики водного транспорта малого водоизмещения является использование комплексных силовых энергетических установок, включающих солнечные панели, дизельный генератор и предложенную ветроэнергетическую установку вертикально-осевого типа с изменяемыми элементами геометрии. Причем для дальнейшего развития таких ВЭУ, в том числе используемых в составе КСЭУ, в плане повышения эффективности управления требуется усилить использование изменяемых элементов их геометрии. Последние способны значительно повысить адаптивность системы управления выходными характеристиками ВЭУ, существенно расширить динамический диапазон регулирования момента на роторе ветроэнергетической установки, а также робастность указанных характеристик к внешним ветровым и внутренним конструкционным параметрическим возмущениям.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-08-00473 а, от 25/12/2018 на тему: «Разработка и исследование методов оптимизации и управления процессами преобразования энергии в силовых установках комплексного типа, в том числе преобразующими поток сплошной среды».*

### Литература

1. Innovative Technologies & Solutions for Sustainable Shipping // Eco Marine Power. URL: [ecomarinepower.com/en/about-us](http://ecomarinepower.com/en/about-us) (date of access: 26.10.2018).
2. Ocius Technology Limited (Australia). URL: [ocius.com.au](http://ocius.com.au) (date of access: 26.10.2018).

3. V. A. Kostjukov, A. M. Maevskiy, N. K. Poluyanovich and M. N. Dubyago, "Adaptive mechatronic management system of wind-driven power-plant with variable geometry," 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, 2017, pp. 460-464.

4. М.Ю. Медведев, В.А. Костюков, А.М. Маевский, Д.Д. Павленко, Разработка комплексной силовой энергетической установки для надводных робототехнических платформ // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. №01. с. 194-208.

5. Патент на полезную модель «Устройство преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию с использованием нижней направляющей структуры» / Костюков В.А., Медведев М.Ю., Маевский А.М., Полуянович Н.К., Савченко В.В., от 11.08.2016 г., № 175397.

6. Костюков В.А., Медведев М.Ю., Маевский А.Н., Полуянович Н.К., Савченко В.В. Исследование перспективной ветроэнергетической установки с типом компоновки «ротор в раструбе» // Вестник донского государственного технического университета, 2017, 1(88), с. 85-91.

7. Костюков В.А., Медведев М.Ю., Маевский А.Н., Полуянович Н.К., Савченко В.В. Оптимизация форм геометрии раструба ветроэнергетической установки типа «ротор в раструбе» // Вестник донского государственного технического университета, 2017, 4(91), с. 61-68.

8. P. Ying, Y.K. Chen, Y.G. Xu, Y. Tian. Computational and experimental investigations of an omni-flow wind turbine. Applied Energy, Volume 146, pp. 74–83.

9. Rafał Wróżyński, Mariusz Sojka, Krzysztof Pyszny, Krzysztof Pyszny. The application of GIS and 3D graphic software to visual impact assessment of wind turbines. Renewable Energy, Volume 96, Part A, pp. 625–635.

10. Qing'an Li, Junsuke Murata, Masayuki Endo, Takao Maeda, Yasunari Kamada. Experimental and numerical investigation of the effect of turbulent inflow on a Horizontal Axis Wind Turbine (part II: Wake characteristics)./ *Energy*, Volume 113, pp. 1304–1315.

11. Y.G. Heoa, b, N.J. Choic, K.H. Choib, H.S. Jia, K.C. Kima. CFD study on aerodynamic power output of a 110 kW building augmented wind turbine./ *Energy and Buildings*, Volume 129, pp. 162–173.

12. L. Wang, X. Liub, A. Koliosa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 64, pp. 195–210.

13. Михненко Л.В. Ветроэнергетическая установка планетарного типа. // *Научный Вестник МГТУ ГА, серия Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. Безопасность полетов*, №49, 2002. с. 110 – 113;

14. Михненко Л.В. Ветроэнергетическая установка планетарного типа. *Научный вестник МГТУ*, №125, 2008, с. 22-24.

15. Wenyi Liu. Design and kinetic analysis of wind turbine blade-hub-tower coupled system *Renewable Energy*, Volume 94, pp. 547–557.

16. Горелов Д.Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор); Издательство Сибирского отделения РАН (2010), с. 325-333.

17. Костюков В.А., Маевский А.Н., Гуренко Б.В. Математическая модель надводного мини-корабля // *Инженерный вестник Дона*, 2015, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3297](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3297).

18. Костюков В.А., Кульченко А.Е., Гуренко Б.В. Методика расчета гидродинамических коэффициентов АНПА // *Инженерный вестник Дона*, 2015, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3226](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3226).

19. Nema P., Nema R. K., Rangnekar S. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review



//Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, Vol. 13, №. 8, pp. 2096-2103.

20. Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, Hongxing Yang, Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems, Applied Energy, Volume 87, Issue 2, 2010, pp. 380-389.

21. Chong W. T. et al. Techno-economic analysis of a wind–solar hybrid renewable energy system with rainwater collection feature for urban high-rise application //Applied Energy, 2011, Vol. 88, №. 11, pp. 4067-4077.

### References

1. Innovative Technologies & Solutions for Sustainable Shipping. Eco Marine Power URL: [ecomarinepower.com/en/about-us](http://ecomarinepower.com/en/about-us) (date of access: 16.10.2018).

2. What is a USV? Ocius URL: [ocius.com.au/usv/](http://ocius.com.au/usv/) (date of access: 24.10.2018).

3. V. A. Kostjukov, A. M. Maevskiy, N. K. Poluyanovich and M. N. Dubyago, "Adaptive mechatronic management system of wind-driven power-plant with variable geometry," 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, 2017, pp. 460-464.

4. M.Yu. Medvedev, V.A. Kostyukov, A.M. Maevskiy, D.D. Pavlenko, Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2018. №01. pp. 194-208.

5. Patent na poleznuyu model' «Ustroystvo preobrazovaniya kineticheskoy energii vetra v mekhanicheskuyu energiyu s ispol'zovaniem nizhney napravlyayushchey struktury» [Device for converting kinetic wind energy into mechanical energy using the lower guide structure]. Kostjukov V.A., Medvedev M.Ju., Maevskij A.M., Polujanovich N.K., Savchenko V.V., 11.08.2016 г., № 175397.

6. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Maevskiy A.N., Poluyanovich N.K., Savchenko V.V., Vestnik donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, 1(88), pp. 85-91.

7. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Maevskiy A.N., Poluyanovich N.K., Savchenko V.V., Vestnik donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, 4(91), pp. 61-68.

8. P. Ying, Y.K. Chen, Y.G. Xu, Y. Tian. Applied Energy, Volume 146, pp. 74–83.

9. Rafał Wróżyński, Mariusz Sojka, Krzysztof Pyszny, Krzysztof Pyszny. Renewable Energy, Volume 96, Part A, pp. 625–635.

10. Qing'an Li, Junsuke Murata, Masayuki Endo, Takao Maeda, Yasunari Kamada. Energy, Volume 113, pp. 1304–1315.

11. Y.G. Heoa, b, N.J. Choic, K.H. Choib, H.S. Jia, K.C. Kima. Energy and Buildings, Volume 129, pp. 162–173.

12. L. Wanga, X. Liub, A. Koliosa. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 64, pp. 195–210.

13. Mikhnenkov L.V. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, Eksploatatsiya vozdušnogo transporta i remont aviatsionnoy tekhniki. Bezopasnost' poletov, №49, 2002. pp. 110 – 113;

14. Mikhnenkov L.V. Nauchnyy vestnik MGTU, №125, 2008, pp. 22-24.

15. Wenyi Liu. Renewable Energy, Volume 94, pp. 547–557.

16. Gorelov D.N. Energeticheskie kharakteristiki rotora Dar'e (obzor) [Energy characteristics of the Darier rotor (review)]. Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya RAN (2010), pp. 325-333.

17. Kostyukov V.A., Maevskiy A.N., Gurenko B.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3297](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3297).

18. Kostyukov V.A., Kul'chenko A.E., Gurenko B.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3226](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3226).

---



19. Nema P., Nema R. K., Rangnekar S. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, Vol. 13, №. 8, pp. 2096-2103.
20. Wei Zhou, Chengzhi Lou, Zhongshi Li, Lin Lu, Hongxing Yang, Applied Energy, Volume 87, Issue 2, 2010, pp. 380-389.
21. Chong W. T. et al. Applied Energy, 2011, Vol. 88, №. 11, pp. 4067-4077.