

Разработка программно-аппаратного стенда для расчета основных параметров ветроэнергетической установки вихревого типа

В.А. Костюков, А.М. Маевский, Д.Д. Павленко, П.В. Трегубов

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

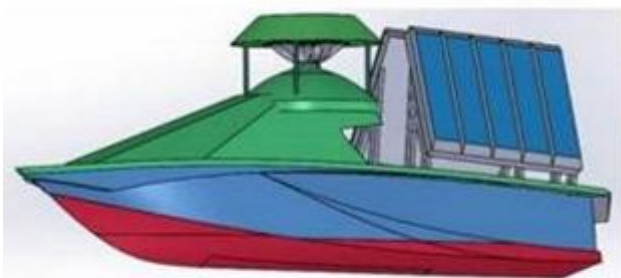
Аннотация: В настоящей статье рассматривается программно-аппаратный комплекс для исследования аэродинамики и электромеханических характеристик ветроэнергетических установок (ВЭУ) с вертикальной осью вращения. Рассмотрены созданный лабораторный стенд для экспериментальных исследований разрабатываемых ветроэнергетических установок и макетные образцы ВЭУ мощностей 0,2 кВт и 1,2 кВт. Разработанное программное обеспечение позволяет проводить численное моделирование движения ВЭУ в условиях нестационарного невозмущенного ветрового потока с учетом массо-инерционных характеристик установки. Сопоставляются экспериментальные и численные результаты, полученные с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса. Эти результаты свидетельствуют о возможности использования такого комплекса в качестве эффективного инструмента разработки ВЭУ с вертикальной осью вращения.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, экспериментальное исследование, программно-аппаратный комплекс, численное моделирование, численные методы динамики сплошных сред.

Введение

В настоящее время существует большая группа наземных и морских объектов, стационарного базирования и подвижных, в том числе робототехнических комплексов, нуждающаяся во вспомогательных автономных источниках энергии. Одним из перспективных направлений развития таких источников является разработка ветроэнергетических установок, эффективно покрывающих ощутимую часть энергетических затрат указанных объектов при соответствующих ограничениях по надежности и стоимости.

Указанные ВЭУ могут быть применены как на базе стационарных платформ, так и на базе мобильных – см. рис. 1 а, б.



а) использование разрабатываемой ВЭУ в комплексных силовых установках для автономного снабжения катера



б) использование разрабатываемой ВЭУ для автономного снабжения доков и станций базирования для подводных аппаратов

Рис. 1. – Возможные мобильные платформы для разрабатываемой ВЭУ

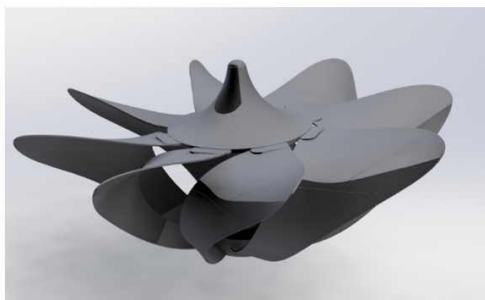
Такие ветроэнергетические установки могут использоваться в качестве систем энергообеспечения: сооружений, находящихся на морском шельфе [1, 2]; автономных подводных аппаратов (АПА) [3]. Применение этих источников совместно с технологией удаленного обслуживания АПА [4] без необходимости в наземной опоре или сложных кабельных системах, позволяет существенно снизить трудоемкость и стоимость работ по обслуживанию объектов на морском шельфе или АПА.

Одними из важных критериев, позволяющих отобрать тип наиболее подходящих для использования ВЭУ, являются: а) коэффициент использования энергии ветра в рабочем диапазоне его скоростей; б) возможность инсталляции на несущую платформу без нарушения выходных характеристик всего устройства; б) стоимость инсталляции на несущую платформу.

Первый критерий имеет значение как для стационарных, так и для мобильных платформ; второй и третий имеют преобладающее значение для мобильных объектов, поскольку к последним предъявляются более серьезные ограничения по габаритам, массе, парусности дополнительной конструкции ВЭУ по отношению к стационарным платформам. В этой связи ВЭУ вертикально-осевого типа имеют значительное преимущество по

отношению к горизонтально-осевым ВЭУ. Известны установки вертикально-осевого типа с роторами типа Савониуса, типа Дарье [5]; в работах [6,7] анализируется одна из возможных перспективных вертикально-осевых ВЭУ роторного типа (см. рис. 1 а) с возможными её применениями для электроснабжения различных типов платформ (см. рис. 1 б, в).

Работа такой установки основана на принципе полезной аэродинамической интерференции между статической и роторной её частями [6], а также использовании лопастей ротора специальной формы (см. рис. 2 а), эффективно воспринимающих как горизонтальные, так и вертикальные восходящие потоки. Вихрь, возникающий в результате вращения ротора, концентрируется внутри диффузора и над его верхней частью. Образованные области пониженного давления вызывают эффект дополнительной тяги, что увеличивает момент вращения ротора. Возникающая при этом над ним вихревая структура дополнительно подпитывает энергией ротор, находясь с ним в динамическом равновесии (см. рис. 2 б).



а) внешний вид ротора ВЭУ вихревого типа



б) принцип действия ВЭУ вихревого типа

Рис. 2. – К рассмотрению перспективной ВЭУ вихревого типа

В работах [6,7] представлены результаты аэродинамической оптимизации формы статора ВЭУ вихревого типа по критерию максимума аэродинамической мощности на её валу, позволившие более чем на 20%

повысить указанную мощность при прочих равных условиях по сравнению с исходной формой статора.

В работе [8] рассмотрена аэродинамическая система управления угловой скоростью вращения ротора ВЭУ указанного вихревого типа на базе использования изменяемых элементов геометрии конструкции установки. В качестве последних выступают регулируемые расстояние от нижней направляющей структуры до нижнего края ротора и степень выдвижения тормозной заслонки, установленной на верхней части внешней поверхности статора ВЭУ и играющей роль аэродинамического тормоза.

В настоящей статье рассматривается лабораторный стенд и макетные установки, позволяющие экспериментально исследовать ВЭУ роторного типа различных модификаций, а также верифицировать получающиеся результаты их виртуальных продувок. Приводится структурная схема подключения основных элементов устройства управления ВЭУ.

Развитие точной механики, в том числе технологий изготовления приводов исполнительных механизмов, совместно с повышением эффективности и глубины аэродинамического анализа, происходящих в процессе функционирования ВЭУ процессов, способны со временем сделать метод аэродинамического регулирования угловой скорости основным для некоторых типов ВЭУ.

Исследования статей [7,8] во многом опирались на методы вычислительной динамики сплошных сред (*сfd* - моделирование). Однако там процесс моделирования аэродинамики ВЭУ не рассматривался совместно с расчетом механики движения её ротора ВЭУ в единой расчетной программной среде.

В настоящей статье также рассматривается программный комплекс, позволяющий проводить численное моделирование движения ВЭУ с единой точки зрения на базе системы уравнений к конечным разностям,

связывающих между собой механические, в том числе аэродинамические, воздействия, с соответствующими перемещениями элементов механической системы с учетом её массо-инерционных характеристик и свойств среды.

Экспериментальное исследование ВЭУ вихревого типа

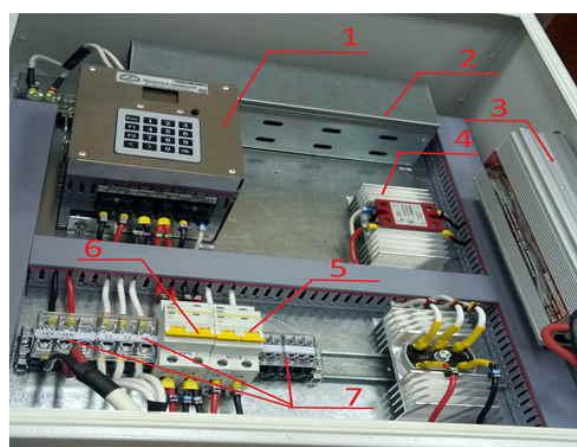
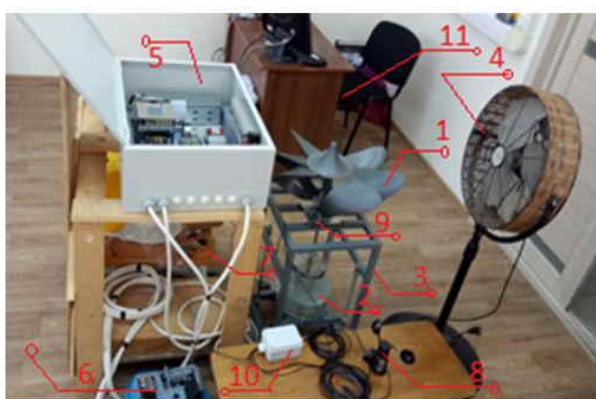
В рамках исследования рассмотренной выше вихревой ВЭУ был создан лабораторный стенд для исследования электромеханических характеристик ветроэнергетических установок с мощностями до 1 кВт.

Этот стенд для аэродинамических и электромеханических испытаний ВЭУ, внешний вид которого приведен на рис. 3 а, включает в себя: ротор ВЭУ 1 с генератором 2, закрепленные на единой несущей конструкции 3; вентилятор для нагнетания воздуха 4 с целью имитации обдува ветровым потоком; блок управления 5 режимами работы и выходными характеристиками ВЭУ, аккумуляторную батарею 6 номиналом $60\text{ А}\cdot\text{час}$; электрическую нагрузку 7 в виде лампочек накаливания общей мощностью 80 Вт; анемометр 8 для измерения скорости ветрового потока; установленный магнит датчика Холла 9; плату 10 управления и записи показаний датчиков 7 и 8; рабочее место оператора 11, на мониторе которого в режиме реального времени отображаются текущие скорость ветрового потока, угловая скорость вращения ротора ВЭУ, напряжение и ток на нагрузке.

Внешний вид устройства блока управления приведен на рис.3 б. Здесь: 1 -контроллер заряда АКБ; 2 -балластное сопротивление, куда сбрасывается излишняя мощность при превышении предельно возможной угловой скорости ротора; 3 - инвертор; 4 - твердотельное реле, используемое в системе электромагнитного торможения; 5 – автоматический выключатель для ручного отключения системы, как для ручного торможения, так и для временного отключения при ремонте; 6 - автоматический выключатель для

переключения между автоматическим управлением контроллером и ручным режимом управления; 7 – соединительные колодки.

На рисунке 4 приведена структурная схема подключения основных элементов устройства управления ВЭУ. Устройство по указанной схеме работает следующим образом. Переменный сигнал от генератора идет на выпрямитель, с которого снимается практически постоянное напряжение, подаваемое на контроллер заряда АКБ – МРРТ-контроллер «Фотон -100-50».



а) внешний вид лабораторного стенда для аэродинамических и электромеханических испытаний ВЭУ

б) электроника системы управления ветроустановкой

Рис. 3 – Лабораторный стенд для верификации аэродинамических и электромеханических моделей ВЭУ и его комплектация

Последний поддерживает напряжение на АКБ в режиме реального времени в заданных диапазонах, соответствующих свойствам АКБ. При этом в случае превышения мощности на выходе выпрямителя порогового значения, соответствующего верхней границе по мощности для нормальной работы АКБ, происходит выброс излишек мощности на балластное сопротивление через твердотельное реле, запускаемое контроллером и играющее роль промежуточного усилителя его сигнала. Снимаемая с АКБ мощность идет на нагрузку.

Для экспериментальной натурной верификации проведенных оптимизационных аэродинамических расчетов и последующего тестирования разрабатываемой системы управления были разработаны два макетных образца: первый обладает номинальной мощностью $P_{ном} = 0,2 \text{ кВт}$ при номинальной скорости ветра $V_{ном} = 7 \text{ м/с}$, второй – мощностью $P_{2ном} = 1,2 \text{ кВт}$ при той же номинальной скорости ветра. Обоснование аэродинамической эффективности ротора, использованного в этих установках, приведено в работах [6, 7].

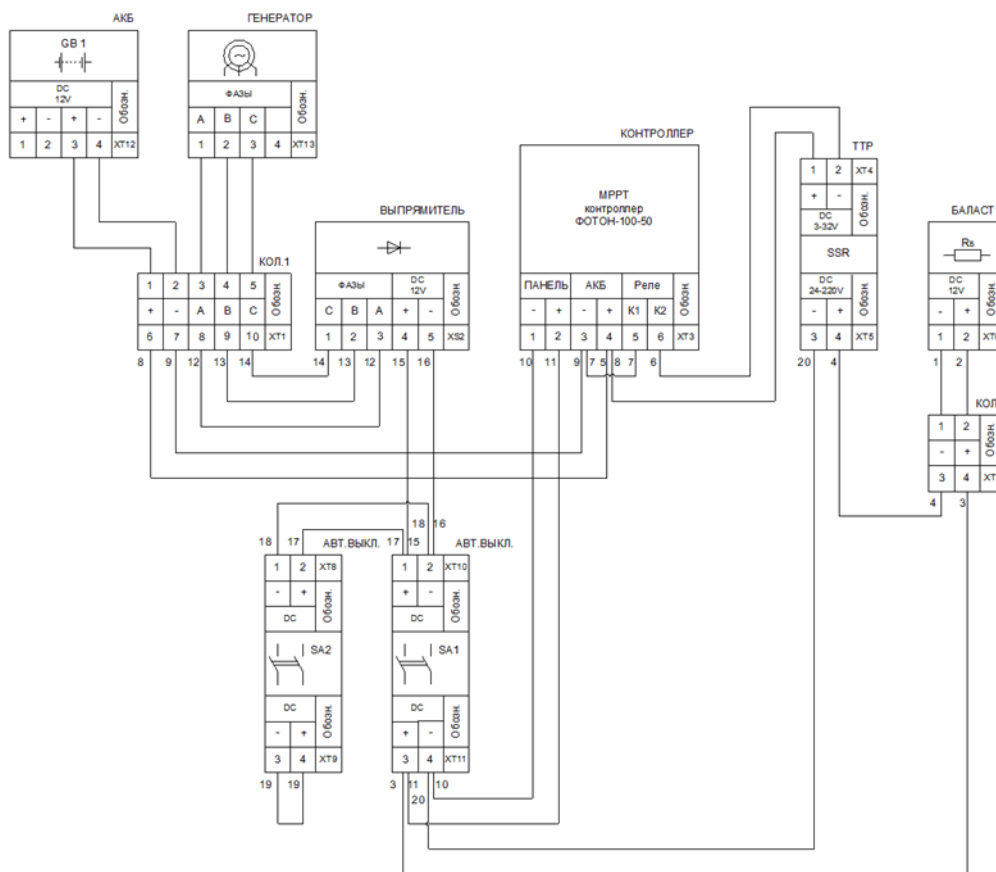


Рис. 4 – Структурная схема подключения основных элементов устройства управления ВЭУ

На рисунке 5 а приведен внешний вид мобильной платформы с установленным на нём макетным образцом ВЭУ мощностью $P_{1ном} = 0,2 \text{ кВт}$, а на рисунке 5 б - внешний вид установки мощностью $P_{2ном} = 1,2 \text{ кВт}$.

Проведены предварительные испытания макета с целью уточнения требований, предъявляемых к электрическим и электромеханическим элементам установки, прежде всего, генератора.

На рисунке 6 красной линией изображен график аппроксимационной экспериментальной зависимости установившейся угловой скорости ВЭУ $\omega(V)$ от скорости ветра V при условиях: диаметр и высота ротора $D = 600\text{мм}$ и $H = 310\text{мм}$, приведенный к оси ротора момент инерции $J = 0,03\text{кг} \cdot \text{м}^2$, материал лопастей ротора ABS-пластик, подключенная электрическая нагрузка номинальной мощностью $P_n = 80\text{Вт}$; синими точками представлены соответствующие результаты *cfd*-анализа, рассматриваемого далее в разделе 3; последние отклоняются от экспериментальных значений не более чем на 10,5%.



а) испытание ВЭУ малой мощности $P_1 = 0,2\text{кВт}$ (при номинальной скорости ветра 7 м/с) на автомобильной платформе

б) испытание ВЭУ большей мощности $P_2 = 1,2\text{кВт}$ (при номинальной скорости ветра 7 м/с)

Рис. 5 – Полевые испытания ветроустановок малой ($P_{1\text{ном}} = 0,2\text{кВт}$) –

а), и большой ($P_{2\text{ном}} = 1,2\text{кВт}$) – б), мощностей

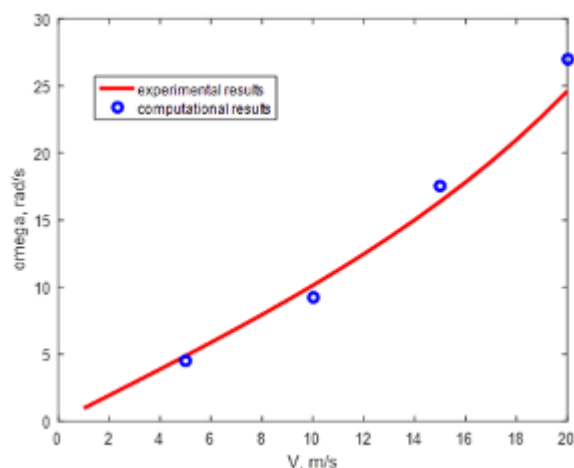


Рис. 6 – Сопоставление статических зависимостей установившейся угловой скорости ротора от постоянной скорости ветра, полученных экспериментально (красная кривая) и численно (синие точки)

Одной из причин отклонений численных результатов от соответствующих экспериментальных является неучет в комплексе моделирования момента противоположной ЭДС, возникающего за счет наличия электрической нагрузки ВЭУ.

Разработка программного модуля для исследования аэродинамических свойств ВЭУ в нестационарном потоке ветра

Постановка задачи. Большинство исследований по аэродинамике ВЭУ базируется на методах *cfд*, подразумевающих решение множества псевдостационарных задач с фиксированной скоростью ветра. Как правило, они базируются на концепции скользящих сеток. Этот метод применяется, в частности, в работе [9] – для моделирования динамики горизонтально-осевой гидротурбины; в [10] - для сопоставления численных исследований горизонтально-осевой трехлопастной турбины с соответствующими испытаниями её в аэродинамической трубе; в [11, 12] - для исследования аэродинамических характеристик ВЭУ с ротором типа Савониуса.

Применение же методов, позволяющих моделировать динамику ВЭУ с учетом влияния массо-инерционных характеристик турбины и моментов

сопротивления на его валу, представлено гораздо меньше [13, 14]. Здесь, как правило, используются совмещенный подход Эйлера-Лагранжа, позволяющий моделировать в том числе изменяющиеся сеточные структуры (динамические сетки) расчетной области, а также отслеживать и учитывать движения отдельных частиц среды в наиболее критичных для точности моделирования областях этой области.

Именно на основе последних методов может быть рассмотрен достаточно строго единый процесс запуска турбины ВЭУ, выхода её в установившийся режим и последующее торможение, вызванные изменением скорости ветра с учетом приведенных динамических параметров турбины и параметров сопротивления её вращению со стороны среды.

Рассмотрим разработанный авторами на базе программной среды *Ansys Fluent* программный модуль, позволяющий оценивать взаимодействие между ветром и жесткими лопастями в процессе изменения скорости вращения турбины, посредством сформированных дополнительных, определенных пользователем, файлов (*UDF*-файлов), учитывающих массо-инерционные характеристики турбины ВЭУ и параметры среды, и смоделировать характер изменения турбины ВЭУ от момента её старта до тех пор, пока турбина не достигнет своей конечной угловой скорости вращения.

Будем исходить из следующего закона вращения ротора ВЭУ [6, 8]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M(V, \omega) + M_c(\omega), \quad (1)$$

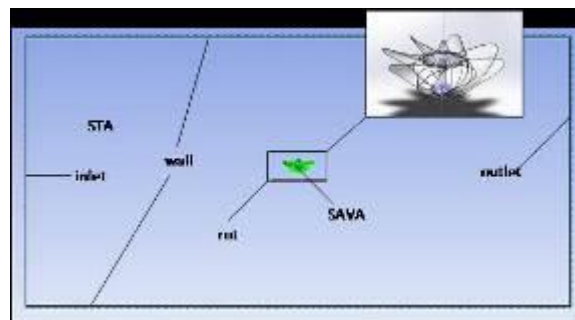
где V – скорость ветра, изменения которой представляют в данной задаче внешнее возмущение; J – приведенный момент инерции ротора; $M(V, \omega) + M_c(\omega)$ – полезный аэродинамический момент на роторе и момент сопротивления.

Закон (1) указывает, что чистый внешний крутящий момент на твердом теле вызовет угловое ускорение. Вращение твердого тела будет ускоряться

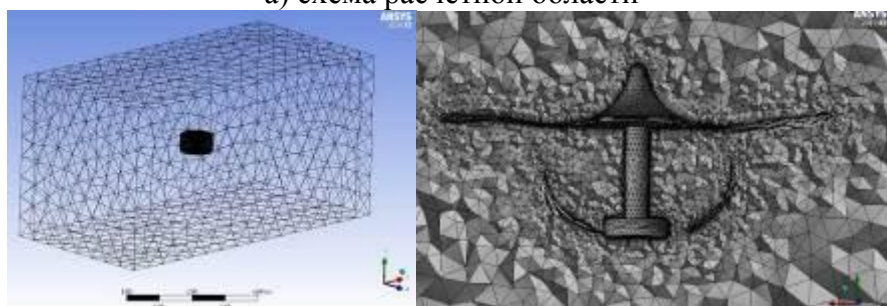
до тех пор, пока полный крутящий момент не станет равным нулю или не будет периодически колебаться относительно нуля.

Необходимо разработать программный комплекс моделирования аэродинамических характеристик ВЭУ вихревого типа в нестационарных режимах изменения скорости ветра. Его необходимо протестировать для следующих конкретных данных: момент инерции ротора, приведенного на рис.2 а, $J = 0,03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, миделево сечение ротора $S = 0,0223 \text{ м}^2$, зависимость момента сопротивления на валу ротора его вращению есть функция: $M_c(\omega) = b\omega$, где $b = 0,573 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$; выбор функции основан на результатах [6, 8].

Используемый метод и его применение. Прежде всего была построена расчетная область, в которой далее будут находиться поля ключевых аэродинамических величин, прежде всего, давления и скорости. Схема расчетной области показана на рисунке 7 а. Следует отметить, что начало координат установлено в центре тяжести ротора ВЭУ.



а) схема расчетной области



б) сеточная модель ВЭУ и расчетной области

Рис. 7 – К построению сеточного разбиения расчетной области

На данной схеме изображены основные элементы, необходимые для расчета аэродинамических характеристик ВЭУ: зоны входа и выхода потока, область вращения (rot) и включённые в нее лопадки ВЭУ, стационарная область (STA) и внешние границы расчетной области (wall).

Расчетная область, пристеночные слои ротора и вращающейся структуры представлены на рисунке 7 б; параметры полученной сетки следующие: количество элементов сетки - 1338491; число пристеночных слоев – 10; средний показатель ортогональности ячеек - 0,71. Для расчета турбулентных явлений была использована модель *k-epsilon-realizable*.

Для того чтобы изучить характеристики вращения ВЭУ под непостоянным воздействием набегающего потока ($V \neq const$) необходимо создать две специальные пользовательские функции, первая из которых описывает временное изменение скорости невозмущенного потока при входе в расчетную область, а вторая – зависимость момента сопротивления на валу ротора от угловой скорости.

Работа моделирующего комплекса, позволяющего дополнительно к аэродинамическому воздействию учитывать также инерционные свойства ротора и момент сопротивления на его валу, представлена следующими ключевыми стадиями:

1. Проводится основное *CFD* исследование аэродинамических характеристик модели на основе уравнения движения вязкой жидкости (RANS) с учетом входных характеристик по скорости набегающего потока (V), времени моделирования t , временном шаге (Δt), инерционных характеристик ВЭУ (массы и момента инерции), функции зависимости момента сопротивления $M_c(\omega)$ от угловой скорости.

2. На каждом i -м шаге рассчитывается полный момент силы M_i , действующий на ротор ВЭУ и складывающийся из момента взаимодействия тела с набегающим потоком воздуха, в общем случае, переменной во времени скорости, и моментом сопротивления на валу ротора, задаваемым извне; при этом учитывается угловая скорость вращения тела ω_i , достигнутая на i -м шаге:

$$M_i = M_c(\omega_i) + M_a[V(t_i), \omega(V(t_i))]. \quad (2)$$

3. Рассчитывается значение угловой скорости на следующем шаге $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ по разностной формуле, вытекающей из (1):

$$\omega_{i+1} = \omega_i + (M_i / J)\Delta t. \quad (3)$$

4. На основе новой скорости вращения $V(t_{i+1})$ твердого тела моделируется новое поле течения по дискретным разностным уравнениям, соответствующим дифференциальным уравнениям движения сплошной среды (уравнения Навье-Стокса) с учетом заданных краевых условий.
5. Повторяются вышеупомянутые процедуры 1–4 до тех пор, пока не будет исчерпан временной интервал исследования процесса.

Заметим, что на каждом временном шаге t_i решатель производит дополнительную итерационную процедуру поиска мгновенного решения с дискретным псевдо временем, позволяющую добиться приемлемой сходимости расчета для данного t_i .

Общая структурная схема работы моделирующего комплекса, описывающего процесс взаимодействия ротора ВЭУ с нестационарным набегающим потоком газа при наличии момента сопротивления на валу ротора, приведена на рис. 8.

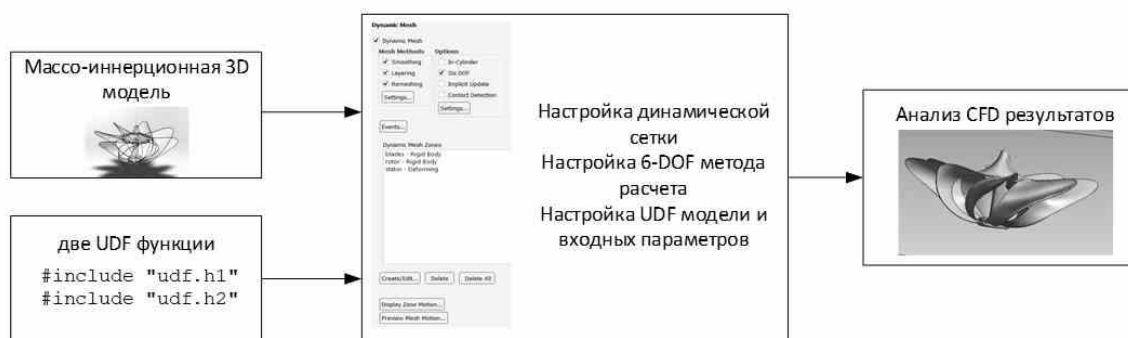
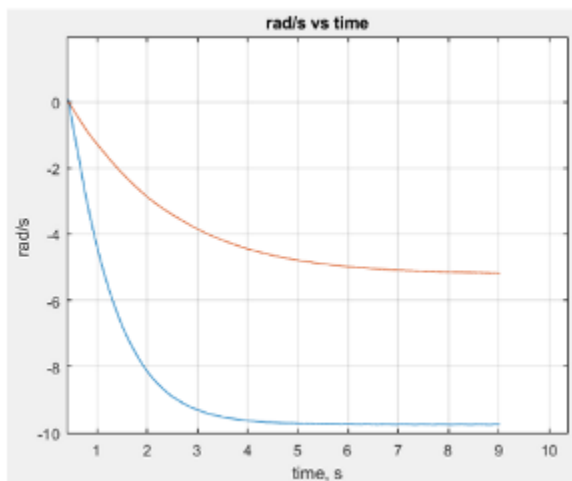


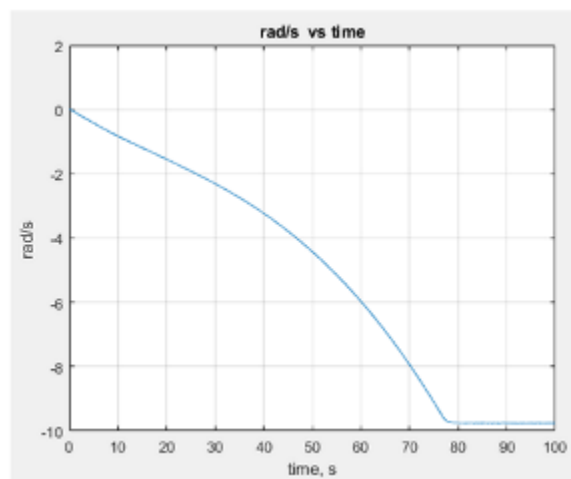
Рис. 8 – Структурная схема разработанного программного комплекса

Входными данными для расчета вращения ВЭУ являются функции изменения скорости набегающего потока, зависимости момента сопротивления на валу от угловой скорости, а также массо-инерционные характеристики ВЭУ. Далее в блоке настроек модели *CFD* и *6-DOF* (блок расчета динамики тела с шестью степенями свободы) формируются основные настройки для системы вращения и деформации динамических сеток. Для организации свободного вращения твердого тела была выбрана ось, совпадающая с осью вращения ротора, после чего были настроены основные объекты вращения (ротор, область вращения ротора, общая расчетная область).

Результаты моделирования. Рассмотрим результаты решения поставленной задачи методом, описанным выше, при постоянной скорости ветра $V = 10 \text{ м/с}$ и условии начального покоя ротора. На рисунке 9 а показаны соответствующие временные диаграммы для угловой скорости ω в этом случае.



а)



б)

Рис. 9 – Временные диаграммы угловой скорости вращения ротора при начальном покое ротора и: а) постоянной скорости ветра; б) нестационарного набегающего потока, меняющегося согласно (4)

Как показывают графики, приведенные на рис. 9 а, при скорости ветра $V = 5 м/с$ угловая скорость ω достигает насыщения примерно к моменту времени $t = 7,5 с$ (со значением насыщения, примерно равным $\omega = 5,1 rad / s$); при скорости ветра $V = 10 м/с$ ω достигает насыщения примерно к моменту времени $t = 4,0 с$ (со значением насыщения, примерно равным $\omega = 9,8 rad / s$). что при приближении к области насыщения графики немного осциллируют. Отрицательное значение связано с выбранным направлением оси вращения.

Заметим, что временные диаграммы угловой скорости вращения ротора, приведенные на рис. 9 а, хорошо согласуются в части установившихся значений угловой скорости с соответствующими экспериментальными результатами с максимальным относительным отклонением до 5%.

Теперь рассмотрим результаты расчета при следующей зависимости скорости набегающего потока от времени:

$$V(t) = \max[e^{0,03t}, V_{\max}], \quad (4)$$

где было наложено ограничение сверху на значение входной скорости потока, равное величине $V_{\max} = 10 \text{ м/с}$. На рисунке 8 б показана соответствующая временная диаграмма для угловой скорости ω в этом случае.

Из рассмотрения рис. 9 б видно, что время выхода ВЭУ в установившееся значение угловой скорости $\omega = 9,71 \text{ рад/с}$ достигает величины $t = 75 \text{ с}$.

Результаты моделирования, в том числе представленные на рисунках б и 9, позволяют заключить, что разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет проводить корректный расчет воздействия на ветроустановку как стационарного невозмущенного потока воздуха, так и нестационарного. Последнее может быть эффективно использовано для исследования процесса работы ВЭУ от момента запуска до останова, когда скорость ветра снижается до определенной критической величины.

Заключение

Созданный лабораторный стенд и макетные установки позволяют проводить экспериментальные исследования ВЭУ роторного типа различных модификаций, а также верифицировать получающиеся результаты моделирования их аэродинамики.

Разработанный программный комплекс может быть эффективно использован для исследования взаимодействия набегающего потока воздуха и твердого тела ВЭУ в режиме нестационарного невозмущенного потока и наличия момента сопротивления на валу ротора, зависящего от угловой скорости его вращения. Этот комплекс позволяет производить расчеты с учетом нелинейных возмущений потока, описанных пользовательскими функциями, что значительно увеличивает возможности для теоретических

исследований функционирования ВЭУ. Впоследствии данный комплекс может быть расширен с учетом использования технологии 2-FSI для исследования прочностных характеристик ВЭУ под воздействием потока газа с учетом его свободного вращения. Разработанный программный комплекс верифицирован лабораторными и полевыми испытаниями собранных макетных образцов.

Лабораторный стенд совместно с указанным программным обеспечением позволяют эффективно разрабатывать ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения, о чем свидетельствуют соответствующие экспериментальные и численные результаты.

Благодарности

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», а также гранта УМНИК № 14459ГУ/2019.

Литература

1. Barnes Zoe, Newman Mike, Gibberd George, ADMA – Power transfer in sea study // URL: s3vanguardinitiative.eu/sites/default/files/images/ADMA/adma_energy_power_transfer_at_sea.pdf
2. Floating offshore wind turbines: Subsea Tech at FOWT 2019, from the site of Subsea Tech // URL: subsea-tech.com/floating-offshore-wind-turbines-subsea-tech-at-fowt-2019/
3. Granger Rich, Neal Michael, Pomerleau Richard, Grob Harald, Resident AUV system with subsea dock in development // URL: [offshore-](#)

mag.com/home/article/16804687/resident-auv-system-with-subsea-dock-in-development

4. Hampton Laura, Thomas the marine engine set to explore UK ocean fronts // URL: [newscientist.com/article/2089165-thomas-the-marine-engine-set-to-explore-uk-ocean-fronts/](https://www.newscientist.com/article/2089165-thomas-the-marine-engine-set-to-explore-uk-ocean-fronts/)

5. Gorelov D. N. Energy characteristics of the Darier rotor (review). Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010, pp. 325—333

6. Костюков В.А., Шевченко В.А. Особенности комплексной силовой энергетической установки для подвижных робототехнических платформ // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5299.

7. Костюков В.А., Маевский А.М., Павленко Д.Д. Моделирование ряда модификаций перспективной ветроэнергетической установки вихревого типа, использующих направляющие воздушный поток структуры различных топологий // Инженерный вестник Дона, 2019, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6258.

8. Kostyukov V. A., Medvedev M. Yu., Pavlenko D. D., Mayevsky A. M., Poluyanovich N. K. Investigation of a Rotor Speed Controlling of a Promising Wind-Driven Power Plant Using Several Variable Elements of its Geometry // Mechatronics, automation, control, 2020, Vol. 21, № 10, pp. 599-607.

9. Laín S., Contreras L.T., López O. A review on computational fluid dynamics modeling and simulation of horizontal axis hydrokinetic turbines // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, pp. 375-412.

10. Kalvig S., Manger E., Hjertager B. Comparing different CFD wind turbine modelling approaches with wind tunnel measurements // Phys.: Conf., 2014, Ser. 555 012056.

11. Глазков В.С., Игнаткин Ю.М. Верификация программного пакета ANSYS Fluent при исследовании аэродинамических характеристик ветроколеса Савониуса // Труды МАИ, 2018, № 100, стр. 10-26.
12. Habtamu Beri, Yingxue Yao. Numerical Simulation of Unsteady Flow to Show Self-starting of Vertical Axis Wind Turbine Using Fluent // Journal of Applied Sciences, 2011, Vol. 11, no. 6, pp. 962-970.
13. Wang X., Luo X., Zhuang B., Yu W., Xu H. 6-DOF Numerical Simulation of the Vertical-Axis Water Turbine // ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, 2011, DOI: 10.1115/AJK2011-22035.
14. Ali M. “Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades at Low Wind Speed” // International Journal of Modern Engineering Research, 2013, Vol.3, №.5. PP. 2978-2986.

References

1. Barnes Zoe, Newman Mike, Gibberd George, ADMA – Power transfer in sea study. URL: s3vanguardinitiative.eu/sites/default/files/images/ADMA/adma_energy_power_transfer_at_sea.pdf
2. Floating offshore wind turbines: Subsea Tech at FOWT 2019, from the site of Subsea Tech. URL: subsea-tech.com/floating-offshore-wind-turbines-subsea-tech-at-fowt-2019/
3. Granger Rich, Neal Michael, Pomerleau Richard, Grob Harald, Resident AUV system with subsea dock in development. URL: offshore-mag.com/home/article/16804687/resident-auv-system-with-subsea-dock-in-development
4. Thomas the marine engine set to explore UK ocean fronts. Laura Hampton. URL: newscientist.com/article/2089165-thomas-the-marine-engine-set-to-explore-uk-ocean-fronts/



5. Gorelov D. N. Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya RAN, 2010, pp. 325—333.
6. Kostyukov V.A., Shevchenko V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5299.
7. Kostyukov V.A., Maevsky A.M., Pavlenko D.D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6258.
8. Kostyukov V. A., Medvedev M. Yu., Pavlenko D. D., Mayevsky A. M., Poluyanovich N. K. Mechatronics, automation, control, 2020, Vol. 21, №10, pp. 599-607.
9. Laín S., Contreras L.T., López O. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, pp. 375-412.
10. Kalvig S., Manger E., Hjertager B. Phys. Conf., 2014, Ser. 555 012056.
11. Glazkov V.S., Ignatkin Yu.M. Trudy MAI [MAI Proceedings], 2018, № 100, стр. 10-26.
12. Habtamu Beri, Yingxue Yao. Journal of Applied Sciences, 2011, Vol. 11, no. 6, pp. 962-970.
13. Wang X., Luo X., Zhuang B., Yu W., Xu H. ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, 2011, DOI: 10.1115/AJK2011-22035.
14. Ali M. International Journal of Modern Engineering Research, 2013, Vol.3, №5. PP. 2978-2986.