

Моделирование и исследование в COMSOL Multiphysics динамических характеристик малых ветро-энергетических установок

Рецензия эксперта на статью получена
01.06.2022 [The expert review of the article
received on June 1, 2022].

Введение

В настоящее время значительное усложнение конструкций многих изделий машиностроения потребовало от разработчиков использования новых методов их проектирования. Это связано прежде всего с требованиями сокращения сроков создания изделий. В то же время уровень сложности изделий стал существенно влиять на эффективность труда проектировщика. Оказалось, что технические требования к изделиям уже не могут быть обеспечены без интенсивного использования компьютерных технологий в процессе их проектирования, конструирования и изготовления. Следствием этого стало появление нового инженерного инструмента — систем автоматизированного проектирования (САПР), широко опирающихся на всех этапах производства новой техники на программные комплексы компьютерного инженерного анализа (CAE), основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Примерами комплексов CAE являются пакеты программ высокого уровня, например, ANSYS, SolidWorks, COMSOL Multiphysics. Они позволяют численно, с достаточно высокой точностью приближения в зависимости от уровня детализации расчётной сетки,

решать самые разнообразные задачи из самых различных областей физики, например, механики твёрдого тела, аэродинамики, термодинамики, теплопередачи и многих других.

Виртуальная (цифровая) модель реального объекта выражает его ключевые характеристики и способна воспроизводить его функции при разных условиях.

Современное производство уже немислимо без использования компьютерных технологий в процессе их проектирования, конструирования и изготовления. Следствием этого стало появление систем автоматизированного проектирования (САПР)

По сути, это совокупность математических формул, описывающих сам объект и протекающие в нём процессы. При этом построенная таким образом цифровая модель отличается более высокой точностью кинематических и функциональных связей, чем в реальном объекте, построенном при использовании, например, производственной поузловой сборки.

УДК 620.93. Научная специальность: 05.14.08.

Моделирование и исследование в COMSOL Multiphysics динамических характеристик малых ветроэнергетических установок

В. А. Сучилин, д.т.н., профессор; **А. С. Кочетков**, старший преподаватель; **Н. Н. Губанов**, старший преподаватель, [Российский государственный университет туризма и сервиса \(РГУТиС\)](#), дп. Черкизово, Московская область

Малые ветроэнергетические установки (ВЭУ) — это сложные структурные и конструктивные объекты с недостаточно ещё отработанными параметрами и функциональными характеристиками, требующие непрерывного совершенствования и постоянного инженерного внимания. На основании изучения методов их проектирования и отказов при работе установлена необходимость дополнительных исследований задач динамики ветроколес (ВК). Проведено моделирование и исследование динамических характеристик малых ВЭУ в ПО COMSOL Multiphysics. Разработана цифровая модель ВК ВЭУ с горизонтальной осью вращения, приведены исследования динамических характеристик ВК и сделаны практические предложения.

Ключевые слова: ВЭУ малой мощности, структура ВЭУ с горизонтальной осью вращения, дисбаланс в конструкции ВК, моделирование динамики ВК в COMSOL Multiphysics, уравнивание центра масс ВК, цифровая модель ВК.

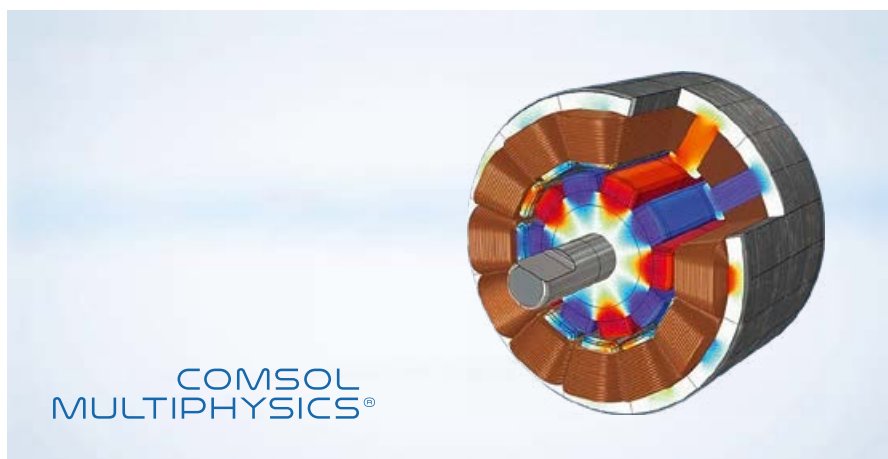
UDC 620.93. Scientific specialty number: 05.14.08.

Modeling and research in COMSOL Multiphysics of the dynamic characteristics of small wind power plants

V. A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **A. S. Kochetkov**, senior lecturer; **N. N. Gubanov**, senior lecturer, [Russian State University of Tourism and Service \(RGUTS\)](#), dp. Cherkizovo, Moscow region

Small wind power plants (WPP) are complex structural and constructive objects with insufficiently developed parameters and functional characteristics, requiring continuous improvement and constant engineering attention. Based on the study of their design and refusals during operation, the need for additional studies of the tasks of the dynamics of the windwheel (WW) was established. Modeling and studying the dynamic characteristics of small WPP in COMSOL Multiphysics has been carried out. A digital model of WW WPPs with a horizontal rotation axis has been developed, studies of the dynamic characteristics of WW are presented and practical proposals are made.

Key words: small wind power plants, structure of wind power plants with a horizontal rotation axis, an imbalance in design of windwheel, modeling the dynamics of windwheel in COMSOL Multiphysics, balancing the center of the windwheel's mass, digital model of windwheel.



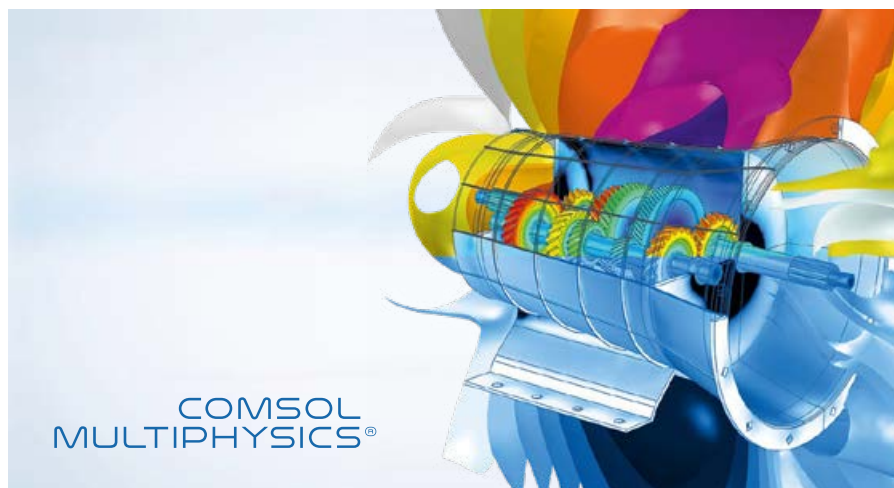
элементов ВЭУ; ветровые нагрузки на ВК и мачту; динамические нагрузки от гироскопического момента при вращении ВК на гондолу ВЭУ; центробежные силы, вызванные дисбалансом массы ВК по отношению к оси вращения; и другие. Центробежные силы дисбаланса могут достигать значительной величины и практически присутствуют во всех ВК, созданных в том числе в заводских условиях [3].

По данным проведённых ранее исследований [4], эксцентриситет центра масс

Дальнейшее совершенствование методов создания новой техники привело к появлению при проектировании обновляемых взаимосвязей между реальным и виртуальным объектами концепции «цифрового двойника» (digital twin) [1, 2].

Эта концепция предполагает, что виртуальный объект содержит подробное (обычно численное) описание физического устройства или процесса и получает всю информацию, собранную от реального объекта в виде показаний датчиков, отчётов пользователей и других данных. Таким образом, цифровой двойник должен быть динамическим и постоянно обновляемым представлением реального физического устройства или процесса, перенесённым в виртуальную среду. В свою очередь, различные прогнозы, оценки и управляющие параметры, которые могут использоваться для разработки и эксплуатации реального устройства, должны непрерывно передаваться обратно из виртуального пространства в реальное. Статическая модель не является цифровым двойником.

Метод применения цифрового двойника в промышленности был известен и раньше. Но лишь появление достаточных вычислительных мощностей для проведения комплекса расчётов в реальном времени позволило расширить применение метода, например, уже на этапе эскизного проектирования. Использование ПО для имитационного моделирования позволяет обновлять системную модель и создавать её вариации. Далее на этапе технического проектирования полученная на предыдущем этапе модель может дорабатываться и уточняться при помощи более точных системных моделей элементов на основе данных, непрерывно получаемых при дополнительных исследованиях цифровых моделей. При этом используются также показания датчиков от реального объекта и информация о его текущем техническом состоянии. На этапе изготовления разработанный цифровой двойник изделия помогает в определении допусков и контроле



точности характеристик для безотказной работы изделия, причём в течение всего срока службы.

Таким образом, цифровой двойник практически сопровождает реальный объект в течение всего его жизненного цикла. За это время непрерывно создаётся научно-техническая база для выпуска в перспективе подобных объектов с новыми, более эффективными технико-экономическими характеристиками.

ВЭУ в целом представляют собой достаточно сложные объекты с неустойчивыми ещё конструктивными параметрами и функциональными характеристиками, требующие непрерывного совершенствования

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) в целом представляют собой достаточно сложные объекты с неустойчивыми ещё конструктивными параметрами и функциональными характеристиками, требующие непрерывного совершенствования и постоянного инженерного внимания. Так, на ВЭУ башенного (мачтового) типа с горизонтальной осью вращения ветрового колеса (ВК) действуют разнообразные нагрузки: от собственного веса

ВК по отношению к его геометрическому центру на оси вращения может составлять до 0,25 % диаметра ВК. Это создаёт дисбаланс массы ВК и вызывает при его вращении динамические нагрузки, передаваемые через ступицу вала ВК на его подшипниковые опоры и, следовательно, на мачту и фундамент ВЭУ, оказывая наиболее существенное влияние на снижение надёжности функционирования ВЭУ.

В связи с этим, в данной работе рассматриваются вопросы моделирования и исследования динамических характеристик малых ВЭУ, с учётом наличия дисбаланса ВК. На основе представленной выше концепции с использованием ПО SolidWorks и COMSOL Multiphysics моделировалась геометрия ВК. Далее определялся центр масс виртуальной модели и исследовались её динамические характеристики, в том числе действие дисбаланса (если он присутствовал в данной модели). Далее виртуальная модель ветроколеса рассматривалась в качестве цифрового двойника и исследовались её динамические характеристики с учётом конструктивных параметров реальной модели, то есть наличия возможного дисбаланса ВК, в соответствии с существующими методиками [4, 5]. Затем отрабатывалась методика балансировки реального ВК до совпадения показателей динамических характеристик с цифровой моделью.

Исследуемая модель и результаты

Геометрия исследуемой модели включает три лопасти аэродинамического профиля *NACA 44-12*, часто используемого в малых ВЭУ. Трёхмерная модель лопасти длиной 3,5 м построена в ПО *SolidWorks* по десяти перпендикулярным сечениям в соответствии с формулами, задающими наиболее эффективные параметры лопасти с точки зрения аэродинамики [6]. Длины хорд сечений и углы закрутки уменьшаются от основания к вершине от 0,6322 до 0,1688 м и от 34,11° до 1,06°, соответственно. Угол атаки, оптимальный для данного профиля, равен 5,25°. Цилиндрические основания лопастей длиной 0,35 м закреплены в соответствующих отверстиях ротора гондолы. Ротор жёстко посажен на вал, помещённый в два подшипника, которые установлены в опорах в виде стоек на плите гондолы. Дальнейшее моделирование динамики ветроколеса проводилось в ПО *COMSOL Multiphysics* по методике, принятой в работах [7, 8]. Однако лопасти предполагаются цельнометаллическими, как и прочие элементы ВК. Поэтому использовался интерфейс *Multibody Dynamics*, причём для лопастей и ротора — с узлом *Rigid Domain*, а для вала, подшипников и их опор — с материальной моделью *Linear Elastic Material*. Моделировалось вращение ВК от начального состояния покоя до выхода на устойчивый режим работы с постоянной скоростью вращения 60 об/мин. вокруг оси *Oz* в продолжение двух оборотов (2 с).

Результатом первого этапа исследования геометрии ВК, построенной по аналитическим зависимостям (рис. 1), является определение центра масс ВК, напряжений и нагрузок на опорах вала ВК под действием сил, передаваемых валом при вращении ВК на подшипниковые опоры. Как было отмечено выше, моделирование МКЭ даёт приближенный результат, что обусловлено возможными незначительными погрешностями в геометрии модели и уровнем детализации расчётной сетки, но в то же время с точностью, достаточной для инженерных расчётов. На рис. 1а показана геометрия ВК, центр масс — точка на оси вращения ВК, напряжения и распределение сил на опорах подшипников. Установлено, что центр масс ВК лежит практически на геометрической оси вращения ВК и смещение его пренебрежимо мало. Максимальное напряжение на первой подшипниковой опоре за пол-оборота вала (время 0,5 с) под действием веса ВК равно 26,64 МПа, а на второй опоре значительно меньше — 7,24 МПа. Можно заметить, что напряжения на опорах при вращении ВК оста-

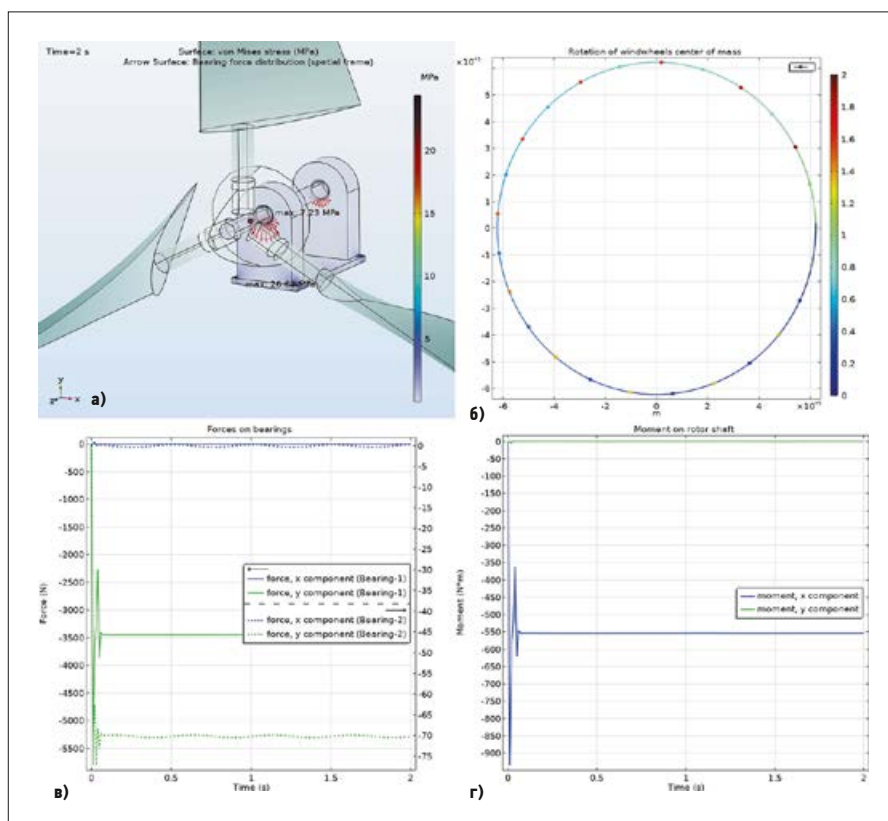


Рис. 1. Геометрия ВК без дисбаланса и функциональные характеристики цифровой модели (а — геометрия ВК (фрагмент в увеличенном масштабе), центр масс — точка на оси вращения ВК, напряжения и распределение сил на первой и второй опорах вала (2 с); б — траектория движения центра масс ВК (в увеличенном масштабе); в — составляющие нагрузки на опорах вала по осям *Ox* и *Oy*; г — составляющие момента сил на валу ротора по осям *Ox* и *Oy*)

ются постоянными в моменты времени, кратные полупериоду: 1,0; 1,5 и 2,0 с. Это показывает практическое отсутствие дисбаланса в геометрии ВК. Характер распределения сил на опорах вала — типичный для подшипников (эпюра сил косинусоидального вида).

На рис. 1б дана в увеличенном масштабе траектория движения центра масс при вращении ВК. Отклонение центра масс ВК от оси вращения всего лишь 0,06 мм, что не может существенно отражаться на динамических характеристиках ВЭУ.

Изменение нагрузки на валу ВК в области подшипниковых опор можно оценить более детально. На рис. 1в показаны составляющие по осям *Ox* и *Oy* сил, действующих на опорах. По оси *Oz* нагрузка не передаётся, её составляющая равна 0 и не показана. В начале вращения ВК наблюдается всплеск колебаний нагрузки на

первую опору вала с высокой амплитудой по оси *Oy*. Далее на первой опоре по оси *Ox* нагрузка практически отсутствует, есть лишь незначительные колебания относительно нулевой линии, а по оси *Oy* под действием силы веса ВК наступает стабилизация нагрузки со значением около –3440 Н (сплошные линии). На второй опоре по оси *Ox* нагрузка в среднем также близка к нулю с небольшими колебаниями (синяя пунктирная линия). По оси *Oy* изменение нагрузки также представлено гармоническими колебаниями с малой амплитудой и средним значением около –70 Н (зелёная пунктирная линия). Частота колебаний по обоим осям вдвое выше частоты вращения ВК 6,28 Гц, причём колебания второй опоры по оси *Ox* находятся в противофазе с колебаниями по той же оси первой опоры. Это объясняется тем, что опоры расположены на некотором расстоянии друг от друга, и вал получает, хотя и незначительные, периодические изгибные колебания той же формы, передавая нагрузку между опорами со смещением фазы. В то же время надо отметить, что незначительные гармонические колебания нагрузки по осям *Ox* и *Oy* являются следствием смещения центра масс от оси *Oz* на 0,06 мм.

Результатом первого этапа исследования геометрии ВК является определение центра масс ВК, напряжений и нагрузок на опорах вала ВК под действием сил, передаваемых валом при вращении ВК на опоры

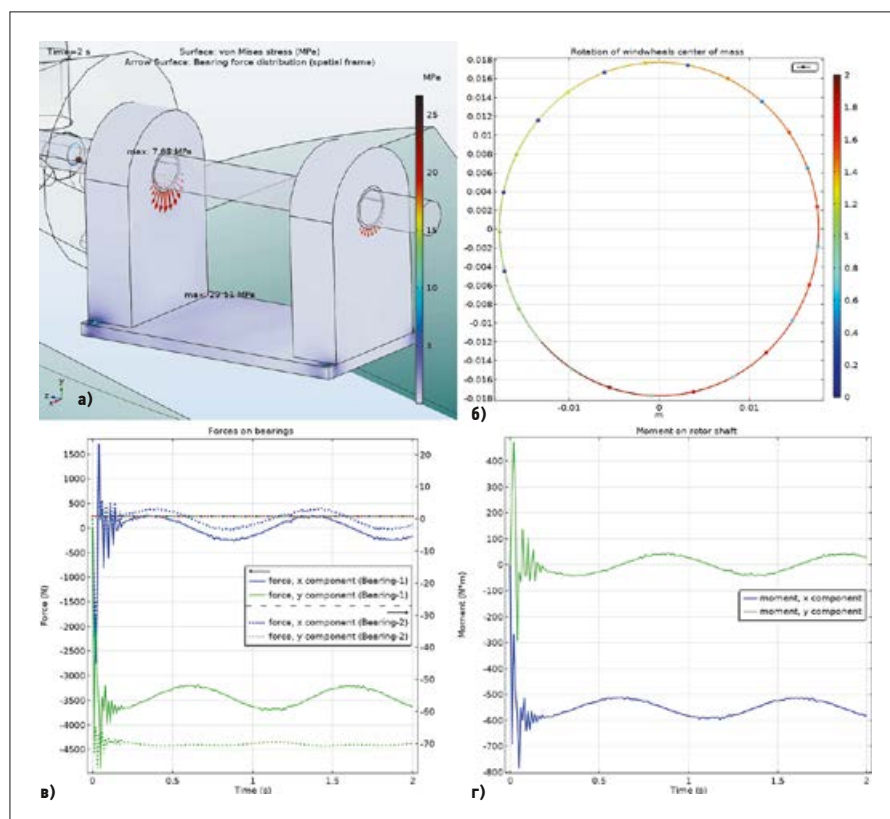


Рис. 2. Геометрия ВК с дисбалансом и функциональные характеристики цифровой модели [а — геометрия ВК (фрагмент в увеличенном масштабе), траектория вращения центра масс ВК вокруг оси Oz , напряжения и распределение сил на первой и второй опорах вала (2 с); б — траектория движения центра масс ВК (в увеличенном масштабе); в — составляющие нагрузки на опорах вала по осям Ox и Oy ; г — составляющие момента сил на валу ротора по осям Ox и Oy]

На рис. 1г даны составляющие момента сил на валу ротора. По оси Ox момент остаётся постоянным со значением около -550 Н·м. По оси Oy момент равен нулю. Таким образом показано, что при вращении ВК, построенного по аналитическим зависимостям, возможны незначительные отклонения (практически пренебрежимо малые) при исследовании динамических характеристик средствами ПО COMSOL Multiphysics. Они не могут оказать существенного влияния на результаты задачи первого этапа — исследование динамических характеристик ВК виртуальной модели. В связи с этим, данная геометрия может выступать цифровой моделью для изучения и других видов нагрузок и процессов на ВК при вращательном движении.

Вторым этапом исследования динамических характеристик малых ВЭУ стало исследование цифровой модели ВК с дисбалансом (рис. 2). Как было указано выше, при поузловой сборке ВК в производственных условиях эксцентриситет центра масс ВК по отношению к геометрическому центру может составлять до 0,25 % диаметра ВК. При этом заранее предсказать неуравновешенность тех или иных элементов ВК при сборке практи-

чески невозможно (это случайное событие), и суммарная величина дисбаланса проявляется только в процессе установки ВК на ступицу вала гондолы при пробной прокрутке. Поэтому неуравновешенность ВК в цифровой модели задавалась искусственно путём изменения положения центров масс каждой из лопастей. Для этого их координаты получали поправки в виде псевдослучайных чисел, заданных функцией Random с равномерным распределением. Далее определялся эксцентриситет центра масс ВК относительно его оси вращения, который составил 17,7 мм, что соответствует его возможной величине при диаметре ВК, равном 7 м. Затем вновь находились характеристики напряжений и нагрузок на опорах вала ВК.

На рис. 2а показаны геометрия ВК, траектория вращения центра масс ВК во-

кругу оси Oz , напряжения и распределение сил на первой и второй опорах вала при вращении ВК. Установлено, что при вращении ВК центр масс описывает окружность радиусом 17,7 мм. Максимальное напряжение на первой опоре за пол-оборота вала (0,5 с) равно 24,09 МПа, на второй значительно меньше — 6,8 МПа. Вал ВК передаёт нагрузки через подшипники на опоры и далее на плиту гондолы. Максимальные напряжения на опорах вала в моменты времени 1,0; 1,5 и 2 с на первой опоре: 29; 24,19 и 29,11 МПа; на второй опоре — 7,66; 6,81 и 7,65 МПа, соответственно. Итак, при наличии дисбаланса напряжения на опорах вала ВК непостоянны и изменяются периодически. Следовательно, периодическое изменение напряжений будет передаваться на плиту гондолы, мачту и фундамент ВЭУ.

Траектория движения центра масс в увеличенном масштабе показана на рис. 2б. Отклонение центра масс ВК от оси вращения равно 17,7 мм, что может заметно повлиять на динамические характеристики ВЭУ.

Периодичность нагружения вала в области подшипниковых опор наглядно можно наблюдать на рис. 2в. Здесь показаны составляющие по осям Ox и Oy сил, действующих на опоры. В момент пуска ВК происходит высокочастотный всплеск колебаний нагрузки на обе опоры вала с быстро затухающей амплитудой по обеим осям. На первой опоре по оси Ox за счёт действия дисбаланса ВК устанавливаются гармонические колебания нагрузки вокруг нулевого значения с частотой, равной частоте вращения ВК 6,28 Гц, и амплитудой 238 Н (сплошная синяя линия). Максимум нагрузки показан горизонтальной линией. Аналогично по оси Oy под действием силы веса ВК наступает стабилизация при значении примерно -3440 Н. Далее происходят гармонические колебания нагрузки с теми же частотой 6,28 Гц и амплитудой 238 Н, но со сдвигом по фазе примерно на 0,25 с за счёт смещения центра масс ВК относительно осей (сплошная зелёная линия). Общая нагрузка возрастает по абсолютной величине за каждый цикл вращения ВК до 3680 Н. По оси Oz (вдоль вала) колебания нагрузки не передаются. Составляющие сил, действующих на второй опоре, показаны пунктиром. По оси Ox устанавливаются гармонические колебания нагрузки относительно нулевой линии с частотой 6,28 Гц и амплитудой примерно 4 Н. По оси Oy нагрузка со средним значением около -70 Н также испытывает колебания с малой амплитудой и частотой вдвое выше частоты вращения ВК.

При наличии дисбаланса напряжения на опорах вала ветроколеса непостоянны и изменяются периодически. Следовательно, периодическое изменение напряжений будет передаваться на плиту гондолы, мачту и фундамент ВЭУ

Кроме того, колебания нагрузки на второй опоре по оси Ox совпадают по фазе с колебаниями по той же оси на первой опоре, а по оси Oy находятся практически в противофазе с колебаниями по той же оси на первой опоре. Это также объясняется изгибными колебаниями вала, который передаёт нагрузку между опорами. Со временем это может привести к усталостным явлениям в металле вала.

На рис. 2г даны составляющие момента сил на валу ротора. По оси Ox гармонические колебания момента с частотой 6,28 Гц устанавливаются относительно значения примерно -550 Н·м с амплитудой примерно 90 Н·м. По оси Oy — относительно нулевого значения с той же частотой 6,28 Гц и амплитудой примерно 40 Н·м. Причём колебания момента на валу по каждой из осей находятся в противофазе с колебаниями нагрузки на первой опоре.

Данная цифровая модель позволяет также проводить исследование деталей ВК на прочность и циклическую усталость в зависимости от времени эксплуатации объекта.

На третьем этапе проводилось исследование цифровой модели ветрового колеса при выполнении статической балансировки (рис. 3). Известно, что если центр тяжести ВК имеет эксцентриситет e относительно оси вращения, то при вращении ВК возникает центробежная сила инерции с амплитудой

$$F_{\text{и}} = m\omega^2 e,$$

где m — масса ВК; ω — угловая скорость вращения [4]. В данной цифровой модели при $e = 17,7$ мм, $m = 340,03$ кг, $\omega = 6,28$ с $^{-1}$, $F_{\text{и}} = 238,07$ Н. Это соответствует величине амплитуды гармонических колебаний нагрузки на рис. 2в. Как показано на рис. 2в и 2г, действие этой силы на подшипники, в которых вращается вал ВК, а следовательно, и на плиту гондолы, и на мачту ВЭУ, и её фундамент является периодическим. Координаты смещённого центра масс ВК (красная точка на рис. 3а) по осям Ox и Oy равны $-0,012$ и $-0,013$ м, соответственно. Для устранения статической неуравновешенности необходимо на противоположную относительно оси вращения ВК сторону добавить противовес (синяя точка) массой $m_{\text{п}}$, на некотором расстоянии $r_{\text{п}}$ от оси вращения Oz , чтобы алгебраическая сумма статических моментов масс была равна нулю, то есть $m_{\text{п}}r_{\text{п}} = me$. При этом, чем больше $r_{\text{п}}$, тем меньше значение массы $m_{\text{п}}$ балансирующего груза. Поэтому в данном случае, как и делается обычно на практике, дополнительные грузы устанавливались не

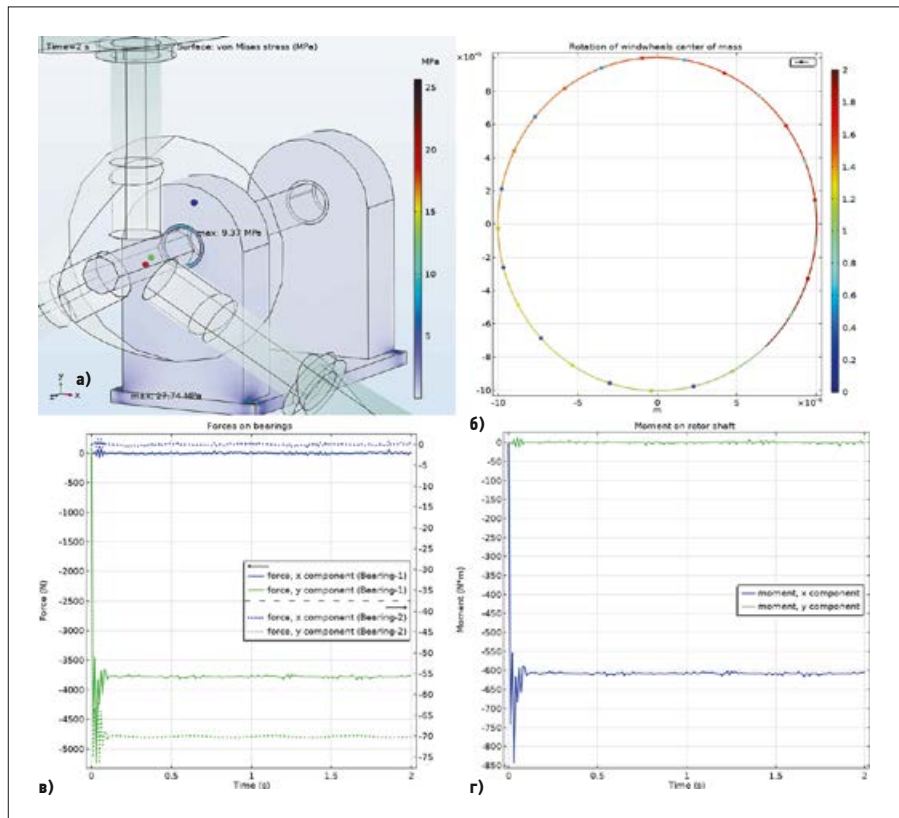


Рис. 3. Геометрия ВК после статической балансировки и функциональные характеристики цифровой модели (а — геометрия ВК (фрагмент в увеличенном масштабе), центр масс — точка на оси вращения ВК, напряжения на первой и второй опорах вала (2 с); б — траектория движения центра масс ВК (в увеличенном масштабе); в — составляющие нагрузки на опорах вала по осям Ox и Oy ; г — составляющие момента сил на валу ротора по осям Ox и Oy)

на поверхности ротора, а на цилиндрических основаниях двух лопастей — в виде колец, $r_{\text{п}} = 0,34$ м. Величины добавленных масс легко определить по правилу параллелограмма для суммы векторов.

Результатом третьего этапа исследования цифровой модели стало практически полное совпадение функциональных характеристики ВК с первым (рис. 1) этапом исследования. На рис. 3а показана геометрия ВК, центр масс — точка на оси вращения ВК (зелёная точка), напряжения и распределение сил на опорах под-



шипников. Установлено, что центр масс после балансировки лежит практически на оси Oz и смещение его не превышает точности расчёта. Это видно в увеличенном масштабе и на рис. 3б. Напряжения на опорах вала остаются постоянными в моменты времени, кратные полупериоду. В моменты времени 0,5; 1,0; 1,5 и 2 с на первой опоре ВК напряжение равно 27,74 МПа при значительно меньшем напряжении на второй опоре — 9,37 МПа. На рис. 3в показаны составляющие по осям Ox и Oy сил, действующих на опорах. Видно, что нагрузки по оси Ox на обеих опорах равны нулю (синие линии), стабилизация нагрузки по оси Oy на первой опоре достигается при значении около -3700 Н (действие силы веса ВК), а на второй опоре — около -70 Н (зелёные линии). Периодические колебания нагрузок практически не отмечены, лишь по оси Oy на второй опоре, как и на рис. 1в, присутствуют колебания с малой амплитудой и частотой вдвое выше частоты вращения ВК.

На рис. 3г даны составляющие момента сил на валу ротора. По оси Ox момент остаётся постоянным со значением примерно -610 Н·м. По оси Oy момент сил на валу ротора равен нулю.

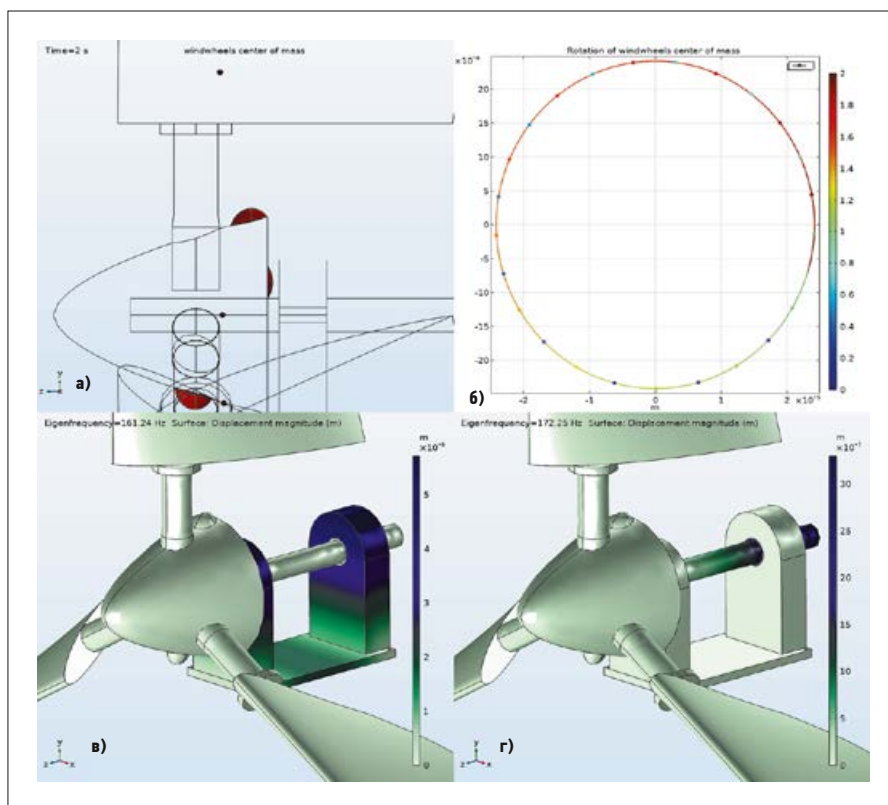


Рис. 4. Геометрия ВК после динамической балансировки и функциональные характеристики цифровой модели [а — геометрия ВК (фрагмент в увеличенном масштабе), центр масс ВК, его верхней и нижней половины — точки в различных плоскостях вращения и добавленные грузы; б — траектория движения центра масс ВК (в увеличенном масштабе); в — смещение элементов ВК при колебаниях на первой собственной частоте; г — то же для второй собственной частоты]

Статическая балансировка ВК малых ВЭУ часто считается заключительной операцией по исследованию нагрузок, действующих на элементы его конструкции. Это обусловлено невысокой скоростью вращения ВК, в данном случае лишь 60 об/мин. Поэтому можно ожидать, что одномоментное динамическое воздействие на элементы конструкции будет не столь значительным. Однако в течение длительной эксплуатации ВЭУ эти воздействия могут существенно отразиться на снижении характеристик функционирования и надёжности эксплуатации установок. Одним из признаков необходимости исследования динамической неуравновешенности ВК является обнаружение, например, неустойчивости нагрузки (напряжений) на опорах ВК в течение полного оборота его вала. Причиной может быть действие момента силы относительно оси его вращения. Для этого необходимо определить центры масс верхней и нижней половины ВК. Если они лежат в одной плоскости, перпендикулярной оси вращения, то ВК можно считать динамически уравновешенным. Если в разных плоскостях, на расстояниях r_1 и r_2 от оси вращения, то необходимо проводить динамическое уравновешивание [9]. В нашем случае верхняя и нижняя половины ВК с массами m_v и m_n имеют центры масс в разных плоскостях вращения, причём $m_v \neq m_n$ и $r_1 \neq r_2$.

При вращении динамически неуравновешенного ВК с угловой скоростью ω возникают центробежные силы инерции F_{i1} и F_{i2} . Они образуют пару сил с моментами $M_1 = F_{i1}L_1$ и $M_2 = F_{i2}L_2$, где L_i — расстояния от центров масс половин ВК до плоскости вращения общего центра тя-

Одним из признаков необходимости исследования динамической неуравновешенности ВК является обнаружение, например, неустойчивости нагрузки (напряжений) на опорах ВК в течение полного оборота его вала

жести ($i = \{1, 2\}$). Под их действием ВК стремится повернуться вокруг оси Ox , вследствие чего на подшипники вала будут действовать дополнительные силы, вызывающие вибрацию. Для динамического уравновешивания моментов M_1 и M_2 используют противовесы, располагая их чаще всего на боковых поверхностях ротора ВК или на цилиндрических основаниях лопастей, или же распределяют противовесы по тем и другим местам так, чтобы они образовывали пару сил с моментами противоположного направления. При этом как алгебраическая сумма статических моментов масс, так и геометрическая сумма моментов центробежных сил инерции должны быть равны нулю.

Противовес моменту M_1 был создан двумя грузами, закреплёнными на верхней поверхности ротора и на его торце вблизи вала, общей массой $m = 11,25$ кг с эффективным плечом $l_1 = 0,051$ м, а противовес моменту M_2 — грузом той же массы m на нижней поверхности ротора с плечом $l_2 = 0,0507$ м.

Функциональные характеристики цифровой модели после динамического уравновешивания ВК оказались близки к полученным на первом этапе исследования, поэтому на рис. 4 приводятся некоторые новые результаты. На рис. 4а показаны центр масс ВК, его верхней и нижней половины до динамической балансировки и добавленные для этой балансировки грузы. Центр масс всего ВК остался также практически на оси вращения со смещением около 0,02 мм — величиной, определяемой точностью расчёта (рис. 4б).

На рис. 4в и 4г показано смещение (деформация) элементов ВК при колебаниях на первой (161,24 Гц) и второй (172,25 Гц) собственных частотах. Видно, что в первом случае напряжённо-деформированное состояние могут испытывать элементы стоек и плиты гондолы ВЭУ. Во втором



случае это происходит только на валу ВК с возрастанием величины деформации в зоне второй опоры. Но в численном выражении указанные явления незначительны, как можно судить по графику деформации. Кроме того, отмеченные стальные элементы ВК имеют значительный запас прочности, что видно по результатам второго этапа исследований (рис. 2а). В то же время при проектировании ВЭУ важным является обеспечение устойчивости системы «ВЭУ — фундамент». Задача устойчивости мачт малых ВЭУ исследовалась в [10]. Для обеспечения устойчивости системы «ВЭУ-фундамент» требуется, чтобы частота её собственных колебаний не попадала в резонанс с частотой вращения ВК. Для этого достаточно, чтобы для наименьшей собственной частоты ω_1 и наибольшей частоты вращения ВК $\omega_{\max}$ выполнялось условие $\omega_{\max}/\omega_1 \leq 0,577$. Система, для которой выполняется это условие, считается жёсткой [5]. Наибольшая рабочая частота вращения ВК определяется геометрией лопасти и конструкцией ВК [8]. В нашем случае $\omega_1 = 161,24$ Гц, $\omega_{\max} = 34,3$ Гц, так что условие заведомо выполняется.

Таким образом, цифровая модель, построенная в ПО COMSOL Multiphysics, позволяет оперативно и с высокой точностью проводить значительный ряд исследований механических и физических процессов, протекающих в узлах и механизмах ВЭУ, заменяя затратные натурные испытания на действующих объектах.

Заключение

1. Малые ВЭУ — это сложные структурные и конструктивные объекты с недостаточно ещё отработанными параметрами и функциональными характеристиками, требующие непрерывного совершенствования и постоянного инженерного внимания. Для дальнейшего развития их необходима цифровая модель конструкции, сопровождающая реальный объект в течение всего жизненного цикла. В этот период возможны плановые регламентные работы и процедурные доработки на реальном объекте на основании результатов проведённых ранее исследований на цифровой модели. Кроме того, за это время будет создаваться научно-техническая база для выпуска подобных объектов с новыми, более эффективными технико-экономическими параметрами.

2. На малые ВЭУ мачтового типа с горизонтальной осью вращения ВК действуют разнообразные нагрузки: это нагрузки от собственного веса элементов ВЭУ, ветровые нагрузки на ВК и мачту, динамические нагрузки от дисбаланса массы ВК по отно-



шению к оси вращения, приводящие к циклическим изменениям нагрузки на подшипниковых опорах ВК, передаваемые далее на мачту и фундамент ВЭУ и оказывающие наиболее существенное влияние на снижение надёжности установок.

3. Разработка цифровой модели ВК малых ВЭУ в ПО COMSOL Multiphysics, использующем средства комплексного компьютерного инженерного анализа (CAE), позволило провести исследование влияния дисбаланса ВК, часто встречающегося в реальных их конструкциях, и получить

Для развития малых ВЭУ необходима цифровая модель конструкции, сопровождающая реальный объект в течение всего жизненного цикла. В этот период возможны плановые регламентные работы и процедурные доработки на реальном объекте на основании результатов проведённых ранее исследований на цифровой модели

достоверные значения действующих сил и напряжений на опорах вала ветроколеса, что обусловило необходимость поиска теоретических и практических основ уравнивания массы ВК. Данная цифровая модель позволяет проводить исследования на прочность, усталость, надёжность элементов ВК, а также эффективность аэродинамики лопастей и функциональных характеристик малых ВЭУ.

4. Разработан статический метод уравнивания (балансировки) ВК в ПО COMSOL Multiphysics. Предложен алгоритм определения места положения цен-

тра масс ВК с дисбалансом, определена центробежная сила инерции $F_{\text{и}}$, вызванная его действием, которая уравнивается расчётной массой противовеса $m_{\text{п}}$, размещённого на противоположной стороне от оси вращения ВК. В этом случае дополнительные грузы устанавливались не на поверхности ротора, а на цилиндрических основаниях двух лопастей. Алгебраическая сумма статических моментов масс стала равна нулю, что обеспечило статическое уравнивание масс ВК.

5. Разработан динамический метод уравнивания (балансировки) ВК в ПО COMSOL Multiphysics. Предложен алгоритм определения места положения центра масс верхней и нижней половинок ВК. Установлено, что они расположены в разных плоскостях вращения, вследствие чего возникают моменты сил инерции M_1 и M_2 . Под их действием ВК стремится повернуться вокруг оси Ox , что приводит к возникновению на подшипниках вала дополнительной нагрузки. Для динамического уравнивания ВК рассчитывалась система противовесов, один из которых массой m распределён между верхней поверхностью ротора и его торцом вблизи вала, а второй той же массы на нижней поверхности ротора. Таким образом создавалась пара сил с моментами, направленными противоположно M_1 и M_2 , что обеспечило динамическую уравнированность ветроколеса. ●

1. Цифровой двойник [Электр. текст]. АО «Кадфем Си-Ай-Эс». Режим доступа: cadfem-cis.ru. Дата обращения: 15.05.2022.
2. Fontes Ed. Digital twins: not just hype. Web-source: comsol.com. Access data: May 15, 2022.
3. ГОСТ Р 54418.1–2012 (МЭК 61400-1:2005) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Ч. 1. Технические требования. — М.: Стандартинформ, 2016. 87 с.
4. Елистратов В.В., Константинов И.А., Панфилов А.А. Нагрузки на элементы ветроэнергетической установки, на её фундамент и основание: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 38 с.
5. Елистратов В.В., Константинов И.А., Панфилов А.А. Динамические расчёты системы «ветроэнергетическая установка — фундамент — основание»: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 49 с.
6. Mostafa N.H., Talaat M., Ibrahim M.M. Performance analysis and design a small horizontal axis wind turbine. The Association of Egyptian-American Scholars 41st annual conference “Comprehensive development of the Sinai Peninsula”. 2014. Web-source: researchgate.net. Access data: May 15, 2022.
7. Stress and modal analysis of a wind turbine composite blade. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access data: May 15, 2022.
8. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование и исследование в COMSOL Multiphysics функциональных характеристик малых ВЭУ // Журнал СОК. 2021. №4. С. 72–77.
9. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: учебн. для вузов. — М.: Наука, 1988. 640 с.
10. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование и оптимизация в COMSOL Multiphysics мачт малых ветроэнергетических установок // Журнал СОК. 2022. №2. С. 64–69.

References — see page 79.

Modeling and research in COMSOL Multiphysics of the dynamic characteristics of small wind power plants. Pp. 70–76.

Vladimir A. Suchilin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Alexander S. Kochetkov**, senior lecturer; **Nikolay N. Gubanov**, senior lecturer, [Russian State University of Tourism and Service \(RGUTS](#), dp. Cherkizovo, Moscow region)

1. *Cifrovoy dvojniki* [Digital twin]. “Kadferm Si-Aj-JeS”, JSC. Web-source: cadferm-cis.ru. Access data: May 15, 2022. [In Russian]
2. Ed Fontes. Digital twins: not just hype. Web-source: comsol.com. Access data: May 15, 2022.
3. GOST R 54418.1–2012 (MJeK 61400-1:2005) [State industry standard of Russia No. 54418.1–2012 (IEC 61400-1:2005)]. *Vozobnovljayemaja jenergetika. Vetrojenergetika. Ustanovki vetrojenergeticheskie. Ch. 1. Tehnicheskie trebovanija* [Renewable energy. Wind power. Wind power plants. Part 1. Technical requirements]. Moscow. *Standartinform* [Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology and Conformity Assessment (“Standartinform” Publishers)]. 2016. 87 p. [In Russian]
4. V.V. Elistratov, I.A. Konstantinov, A.A. Panfilov. *Nagruzki na jelementy vetrojenergeticheskoy ustanovki, na ee fundament i osnovanie: ucheb. posobie* [Loads on the elements of the wind power plant, on its foundation and base: A tutorial]. St. Petersburg. *Izd-vo SPbPU* [Publishing House of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. 1999. 38 p. [In Russian]
5. V.V. Elistratov, I.A. Konstantinov, A.A. Panfilov. *Dinamicheskie raschety sistemy “vetrojenergeticheskaja ustanovka — fundament — osnovanie”: ucheb. posobie* [Dynamic calculations of the system “wind power plant — foundation — base”: A tutorial]. St. Petersburg. *Izd-vo SPbPU* [Publishing House of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. 1999. 49 p. [In Russian]
6. N.H. Mostafa, M. Talaat, M.M. Ibrahim. Performance analysis and design a small horizontal axis wind turbine. The Association of Egyptian-American scholars 41st annual conference “Comprehensive development of the Sinai Peninsula”. 2014. Web-source: researchgate.net. Access data: May 15, 2022.
7. Stress and modal analysis of a wind turbine composite blade. COMSOL Multiphysics User’s Guide. Web-source: comsol.com. Access data: May 15, 2022.
8. [V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. Modelirovanie i issledovanie v COMSOL Multiphysics funkcional’nyh harakteristik malyh VJeU \[Modeling and research in COMSOL Multiphysics of the functional characteristics of small wind power plants\] Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie \(SOK\) \[Journal of Plumbing, Heating, Ventilation\]. 2021. No. 4. Pp. 72–77. \[In Russian\]](#)
9. I.I. Artobolevskij. *Teorija mehanizmov i mashin: uchebn. dlja vuzov* [Theory of mechanisms and machines: A textbook for technical universities]. Moscow. *Nauka* [“The science” Publishers]. 1988. 640 p. [In Russian]
10. [V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. Modelirovanie i optimizacija v COMSOL Multiphysics macht malyh vetrojenergeticheskikh ustanovok \[Modeling and optimization in COMSOL Multiphysics of the masts of small wind power plants\]. Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie \(SOK\) \[Journal of Plumbing, Heating, Ventilation\]. 2022. No. 2. Pp. 64–69. \[In Russian\]](#)