



# Моделирование и исследование в COMSOL Multiphysics функциональных характеристик малых ВЭУ

## Введение

Энергия ветра продолжает оставаться одним из самых перспективных возобновляемых источников энергии во многих странах мира, в том числе и в России. Так, в соответствии с распоряжением Правительства РФ от 28 июля 2015 года № 1472-р продлевается срок действия программы поддержки ветрогенерации [1]. Это позволяет обеспечивать необходимый уровень конкуренции на рынке ветроэнергии и поддержку разработок соответствующего нового производственного оборудования. Энергия ветра практически неисчерпаема, а преобразование её в электрическую является экологически безопасной технологией. Развитию ветроэнергетики способствует также и то обстоятельство, что наступает эра электромобилей, и совсем не риторический вопрос: где брать электроэнергию для них? Естественно, говоря о экологически безопасных машинах, работающих на электрической тяге, надо иметь в виду, что получать её прежним способом (сжиганием углеводородных ископаемых) будет уже не только нерационально, но и недопустимо. Именно эти факторы оказывают и будут оказывать в ближайшее

время существенное влияние на ускоренное развитие ветроэнергетики.

Надо также отметить, что на этапе становления ветроэнергетики в мире основное внимание уделялось созданию и повышению эффективности ветроэлектрических установок (ВЭУ) средней и большой мощности. Согласно данным Глобального совета по ветроэнергетике (Global Wind Energy Council, GWEC), рост установленной мощности ветровых электростанций в мире в 2020 году уже достиг рекордного уровня в 71,3 ГВт, а в период с 2020 по 2024 годы прогнозируется прирост на 348 ГВт. Отметку же в 1 МВт установленной мощности сектор должен перешагнуть в 2025 году [2].

В настоящее время в связи с тенденцией к децентрализации производства электроэнергии перспективным направлением развития генерации ветроэнергии становится совершенствование ВЭУ малой мощности (от 5 до 99 кВт) [3]. Причина тому — рост числа новых потребителей электроэнергии, к которым относятся объекты малоэтажного строительства, фермерские хозяйства, рыболовные артели и охотничьи угодья, системы удалённого мониторинга, дорожные освети-

Рецензия эксперта на статью получена 19.03.2021 [The expert review on the article received on Mart 19, 2021].

УДК 678.8. Научная специальность: 05.23.03.

## Моделирование и исследование в COMSOL Multiphysics функциональных характеристик малых ветроэлектрических 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)

На протяжении последних десятилетий ветроэнергетика в мире бурно развивается. Это, в частности, обусловлено тем, что преобразование энергии ветра в электрическую является экологически безопасной технологией. В настоящее время этому способствует также и то обстоятельство, что наступает эра электромобилей и необходимо будет вводить для них дополнительные зарядные подстанции. Децентрализация производства электроэнергии требует совершенствования ветроэлектрических установок малой мощности. Оптимизация функциональных характеристик ветроэлектрических установок успешно решается на моделях в ПО COMSOL Multiphysics, что позволяет значительно сократить затраты на их разработку.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, коэффициент использования энергии ветра, ветроэлектрические установки малой мощности, композитные материалы, функциональные характеристики, моделирование в COMSOL Multiphysics.

UDC 678.8. Scientific specialty number: 05.23.03.

## Modeling and research in COMSOL Multiphysics of the functional 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 (RGUTIS)

Over the past decades, wind energy in the world is growing rapidly. This, in particular, is because the conversion of wind energy into electrical is environmentally friendly technology. Currently, this is also facilitated by the fact that the era of electric vehicles comes and it will be necessary to introduce additional charging substations for them. Decentralization of electricity production requires the improvement of small wind power plants. Optimization of the functional characteristics of wind power plants is successfully solved on models in COMSOL Multiphysics, which makes it possible to significantly reduce the costs of their development.

**Key words:** wind power, wind energy utilization rate, small wind power plants, composite materials, functional characteristics, modeling in COMSOL Multiphysics.

тельные системы, телекоммуникационное оборудование и другие автономные потребители. А теперь намечается ещё и возведение зарядных подстанций для электротранспортных средств.

В связи с этим актуальной является задача повышения эффективности использования ветрового потенциала для малых ВЭУ. Для этого потребуются, например, проведение дополнительных исследований в сфере многофакторной оптимизации механической части ветроэлектрических установок, в частности, лопастей ветроколёс (ВК), воспринимающих давление ветра и характеризующихся при работе коэффициентом использования энергии ветра.

Особенности функционирования подобных ВЭУ широко отражены в отечественных и зарубежных источниках, например [3–8]. В последней статье содержится исчерпывающий обзор исследовательских работ по проектированию и разработке лопастей малых ВЭУ, включая добавление аэродинамических элементов (диффузоров и винглетов). Подробно представлены характеристики и параметрический анализ аэродинамических профилей лопастей. Изучено влияние атмосферных условий на производительность ВЭУ, их воздействие на окружающую среду. Однако существует много препятствий для коммерциализации малых ветроэлектрических установок в больших масштабах из-за более низкого КПД, связанного с высокими вибрационными потерями, недостатком технических знаний у производителей, критериями стоимости и недостаточной осведомлённостью конечных пользователей. Отмечается, что необходимы исследования по повышению эффективности малых ВЭУ с использованием материалов с высоким соотношением прочности и массы.

Несмотря на то, что лопасти ВК с горизонтальной осью вращения при работе используют не силу напора ветра, а его подъёмную силу, сила лобового сопротивления как реакция лопастей ветроколеса на действие напора ветра определяет выбор прочностных характеристик конструкции ВЭУ и эффективность её функционирования. При этом ветроколёса, применяемые в ВЭУ малой мощности, отличаются, как правило, быстроходностью, следовательно, и центробежные силы также могут оказывать значительное влияние как на прочность конструкции, так и на аэродинамические характеристики лопастей.

Целью данной работы является оценка возможности решения указанной задачи методами компьютерного моделирова-



:: Турбины малых ВЭУ (до 10 кВт) Hummer H8.0-10 (слева) и Berghey Excel 10 Off-Grid

ния, адекватно отражающими функционирование малых ВЭУ в реальных условиях эксплуатации. Для исследования выбрана ВЭУ с тремя лопастями ВК и горизонтальной осью вращения, как наиболее оптимальный вариант структуры из используемых в современной практике, показывающий достаточно высокую скорость вращения лопастей, хорошую сбалансированность ВК и плавность хода.

### **В связи с тенденцией к децентрализации производства электроэнергии перспективным направлением развития ветровой генерации становится совершенствование ветроэлектрических установок малой мощности (от 5 до 99 кВт) [3]**

Лопасти ВК — это основные элементы механической части ВЭУ. При вращении они должны выдерживать различные виды воздействий: гравитационные и центробежные силы, давление ветра и аэродинамические нагрузки, с ними связанные. Значительные продольные размеры лопастей, вынужденные ограничения их по весу, требования надёжности и прочности определяют выбор соответствующих материалов при их производстве. Чаще всего по показателям лёгкости и прочности разработчики отдают предпочтение композитным материалам.

Средствами COMSOL Multiphysics моделирование функциональных характеристик малых ветроэлектрических установок проводится с использованием интерфейсов Solid Mechanics и Shell по методике [9], где анализ напряжений в лопасти выполнен лишь под действием гравитационных и центробежных сил.

### **Исследуемая модель и результаты**

В качестве исследуемой модели принята лопасть для ВЭУ мощностью 5 кВт. Длина лопасти равна 2,7 м. Лопасть имеет переменное сечение, состоящее из трёх различных профилей. Площадь поперечного сечения уменьшается от основания к вершине, отношение площадей достигает 5,0. Также лопасть имеет начальную закрутку с плавным увеличением углов поворота сечений от вершины к основанию. Максимальный угол закрутки составляет 3,5°. Лопасть состоит из оболочки и лонжеронов. Наружная часть конструкции лопасти представляет собой оболочку, подкреплённую внутри по всей длине двумя лонжеронами. Лонжероны являются внутренними элементами лопасти, служащими для увеличения её жёсткости на изгиб и кручение. На различных участках лопасти ВК используются разные типы аэродинамических поверхностей, хорошо зарекомендовавших себя на практике [10].

Оболочка лопасти выполнена многослойной. Первый внешний слой представляет собой ламинат из трёх слоёв углепластика, каждый толщиной 0,28 мм, с последовательной ориентацией  $[0^\circ/0^\circ/0^\circ]$  к главной оси лопасти Ох. Следующий слой оболочки — ламинат, состоящий из пяти слоёв стеклопластика, каждый толщиной 0,28 мм, с последовательностью укладки  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ]$ . Материалы считаются ортотропными, их механические характеристики взяты из библиотеки материалов COMSOL. Внутренний слой оболочки — из вспененного ПВХ толщиной 1 см. Лонжероны — из ПВХ толщиной 1,5 см. Выбор материалов оболочки и ориентация слоёв приняты исходя из их механических свойств, в частности, из того, что углепластик и стеклопластик характеризуются высоким сопротивлением к силам растяжения.

На первом этапе проводилось моделирование и расчёт полей скорости и давления в окружающем воздушном домене для безотрывного и стационарного режима обтекания лопасти. Такая задача решается в интерфейсе Rotating Machinery для разных моделей ламинарных и турбулентных потоков. В нашем случае выбрана модель Turbulent Flow,  $k-\omega$ .

Важным параметром конструкции ВК является коэффициент быстроходности конца лопасти  $\lambda$ . При постоянной скорости ветра  $v$  частота вращения  $\omega$  и радиус ротора  $R$  ветроколеса связаны формулой  $\lambda = \omega R/v$ . При различных скоростях ветра регулирование частоты вращения ВК позволяет приблизить режим работы к теоретическому и даёт максимальный коэффициент использования энергии ветра. Практически же значение коэффициента  $\lambda$  определяется конструкцией ВК. Для данной модели лопасти  $\lambda = 10$  [7].

Для проведённого моделирования принята скорость ветра  $v = 9$  м/с. Таким образом, частота вращения ветроколеса составляет  $\omega = 33,3$  с<sup>-1</sup>.

Ветровую нагрузку можно представить в виде суммы силы ветрового напора в направлении скорости ветра и подъёмной силы, перпендикулярной силе напора. Подъёмная сила обеспечивает вращение ВК. Геометрия лопасти с указанием нагрузок, действующих в одном из её положений, представлена на рис. 1а. При указанной ветровой нагрузке в отрицательном направлении оси  $Oy$  лопасть вращается с частотой  $\omega$  в плоскости  $xOz$ . При вращении ВК будут изменяться направления гравитационной и центробежной нагрузок относительно лопасти, поэтому в данном случае проводится статическое исследование функциональных характеристик ВЭУ для одного положения лопасти. Граничные условия задачи состоят в фиксации основания лопасти на ступице ветроколеса.

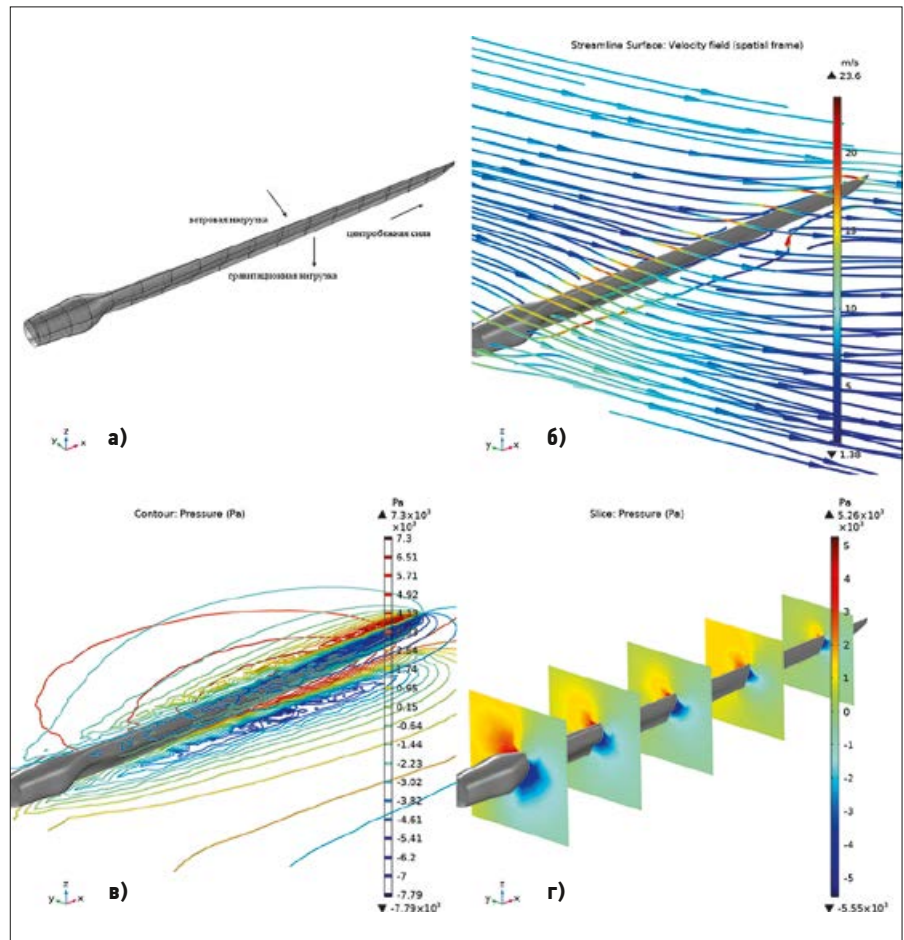


Рис. 1. Геометрия лопасти и результаты стационарного аэродинамического расчёта (а — геометрия лопасти с указанием нагрузок; б — линии поля скорости воздушной среды вблизи поверхности лопасти; в — линии изобар в плоскостях, перпендикулярных оси  $Oz$ ; г — распределение давления в плоскостях, перпендикулярных оси  $Ox$ )

На рис. 1б показаны линии поля скорости воздушной среды вблизи поверхности лопасти. Видно, что воздушный поток, обтекая лопасть, изменяет скорость, и направление движения неравномерно: наряду с замедлением потока в целом скорость отдельных струй увеличивается. На рис. 1в распределение давления воздуха вблизи поверхности лопасти представлено линиями изобар в плоскостях, пер-

пендикулярных оси  $Oz$ . Хорошо видно, что со стороны набегающего потока возникает область повышенного давления воздуха, а с обратной стороны и над лопастью — зона пониженного давления. На рис. 1г показано распределение давления в плоскостях, перпендикулярных оси  $Ox$ . Здесь также видны области пониженного давления со стороны, противоположной потоку воздуха, и над лопастью. Величина разности давлений составляет более 14 кПа. Разница давлений создаёт подъёмную силу, действующую на лопасть, и определяет направление вращения ВК.

На втором этапе осуществляется проецирование поля давления, полученного при расчёте обтекания лопасти воздушным потоком с помощью мультифизической связки Fluid-Structure Interaction, на многослойную оболочку лопасти в качестве внешней нагрузки для дальнейшего исследования функциональных характеристик ВЭУ. К заданной таким образом ветровой нагрузке добавляется действие гравитационной и центробежной сил и анализируется напряжённое состояние в элементах лопасти.



Малая ВЭУ AirForce10 (10 кВт) может монтироваться на башнях высотой до 20 м

Результаты исследования функциональных характеристики лопасти ВЭУ малой мощности при совместном действии гравитационной, центробежной и ветровой нагрузок показаны на рис. 2. При этом незначительная деформация лопасти в направлении, противоположном направлению её вращения, для наглядности показана в увеличенном масштабе. На рис. 2а приведено распределение напряжения (растяжения-сжатия) по Мизесу в лопасти в целом. Видно, что напряжение в элементах лопасти распределено неравномерно. Максимальное напряжение отмечается в области перехода секции основания лопасти к аэродинамическим секциям и равно 157 МПа. Наибольшее напряжение сжатия — на стороне лопасти, совпадающей с направлением деформации; наибольшее напряжение растяжения — на противоположной стороне.

**Результаты исследования показывают напряжения в элементах лопасти, в целом далёкие от предельных значений, однако для волокнистых композитных материалов в напряжённых зонах возможны случаи расслоения слоёв, приводящие к разрушению конструкции**

В структуре лопасти слой углепластика помещён на внешней поверхности оболочки, которая воспринимает не только функциональные нагрузки, но и действие окружающей среды. Поэтому важно детально оценить надёжность функционирования этого слоя. На рис. 2в приведено распределение напряжений по Мизесу во внешнем слое ламината из углепластика. Видно, что максимальное напряжение на

поверхности оболочки отмечается в области перехода секции основания лопасти к аэродинамическим секциям и равно 163 МПа. Наибольшее напряжение сжатия достигается в направлении деформации лопасти, противоположном направлению её вращения. Наибольшее напряжение растяжения — в направлении, совпадающем с направлением вращения. Напряжения во внешнем слое ламината из углепластика далеки от критических значений.

Из анализа проведённого исследования напряжений в лопасти видно, что максимальное напряжение в слое углепластика 163 МПа несколько выше, чем в лопасти в целом, и составляет 157 МПа (рис. 2а). Это обусловлено тем, что поверхностный слой лопасти непосредственно воспринимает ветровую и аэродинамические нагрузки, которые при переходе в глубину

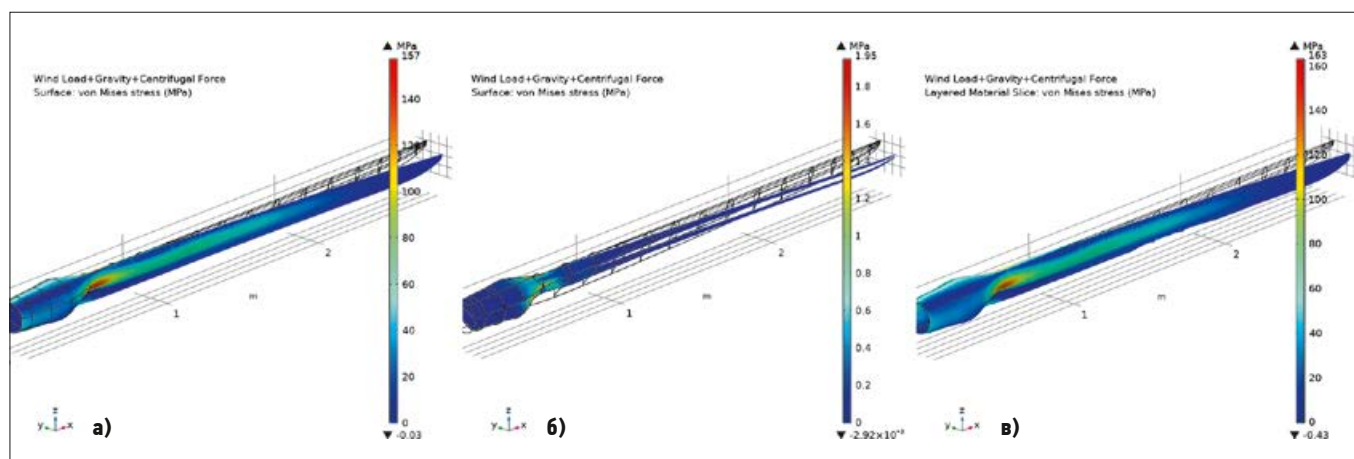


Рис. 2. Результаты исследования функциональных характеристики лопасти под действием гравитационной, центробежной и ветровой нагрузки: распределение напряжения по Мизесу (а — в элементах лопасти в целом; б — в лонжеронах лопасти; в — во внешнем слое ламината из углепластика)

Как показало исследование, напряжения в элементах лопасти в целом далеки от критических значений для выбранных материалов, что важно знать, как правило, до выполнения проектных разработок, тем более на стадии производства.

На рис. 2б приведено распределение напряжения по Мизесу в лонжеронах лопасти. Видно, что максимальное напряжение в лонжеронах возникает также в области перехода секции основания лопасти к аэродинамическим секциям и равно 1,95 МПа. Это напряжение сжатия в направлении деформации лонжеронов, которое противоположно направлению вращения лопасти. Остальные участки лонжеронов имеют незначительное напряжение. Следовательно, лонжероны имеют завышенный запас прочности. Можно провести оптимизацию соотношения прочности и массы лонжеронов при дополнительном моделировании, например, путём снижения их толщины.



Малая ВЭУ Zenia Energy (7,5 кВт)

лопасти частично демпфируются. Математическое моделирование характеристик функционирования лопастей ВЭУ позволяет заранее оценивать некоторые особенности их реальной работоспособности.

Несмотря на то, что результаты исследования показывают напряжения в элементах лопасти, в целом далёкие от предельных значений, однако для волокнистых композитных материалов в напряжённых зонах возможны случаи расслоения слоёв, приводящие к их разрушению. А это уже отказ работоспособности лопасти ВЭУ в целом [11, 12]. Для более детального исследования напряжений в отдельных слоях оболочки лопасти выполнен анализ напряжений в области соединения основания лопасти с аэродинамическими поверхностями в одной контрольной точке по толщине ламината, позволяющий проследить напряжения в отдельных слоях ламината и в переходных зонах между ними.

На рис. 3 приведены результаты исследования изменения напряжений по Мизесу по толщине оболочки, как под действием каждой из нагрузок отдельно, так и при их совместном действии. На рис. 3а даётся распределение напряжений в модели 1 с исходной ориентацией слоёв. Видно, что напряжение, вызванное ветровой нагрузкой, в слоях углепластика изменяется от 27 до 24 МПа от внешней поверхности в глубину и оно значительно превосходит напряжения от силы гравитации и центробежной силы. Общее напряжение в слоях углепластика изменяется от 40 до 36 МПа. Важно отметить также, что изменение напряжения от первого слоя ко второму и третьему происходит плавно, чем подтверждается правильный первоначальный выбор ориентации слоёв углепластика в оболочке. В слоях же стеклопластика нет равномерного распределения напряжений. Так, второй и четвёртый слои, с ориентацией 45° к главной оси лопасти, испытывают общее напряжение значительно выше других слоёв. В среднем это 37–39 МПа против 15–17 МПа в остальных слоях. Видно, что ветровая нагрузка в слоях стеклопластика также является силой, вносящей основной вклад в напряжение элементов лопасти. Следует отметить, что слой ПВХ, являющийся основой для слоёв ламината оболочки лопасти, испытывает слабое напряжение, меньше 0,5 МПа. Данный слой вместе с лонжеронами являются опорными элементами, образующими форму лопасти. Лонжероны, как отмечалось выше, также слабо нагружены. Но они, как несущие элементы лопасти, обеспечивают надёжность и долговечность конструкции лопасти при длительной эксплуатации. Следовательно, следует оставить их параметры без изменения.

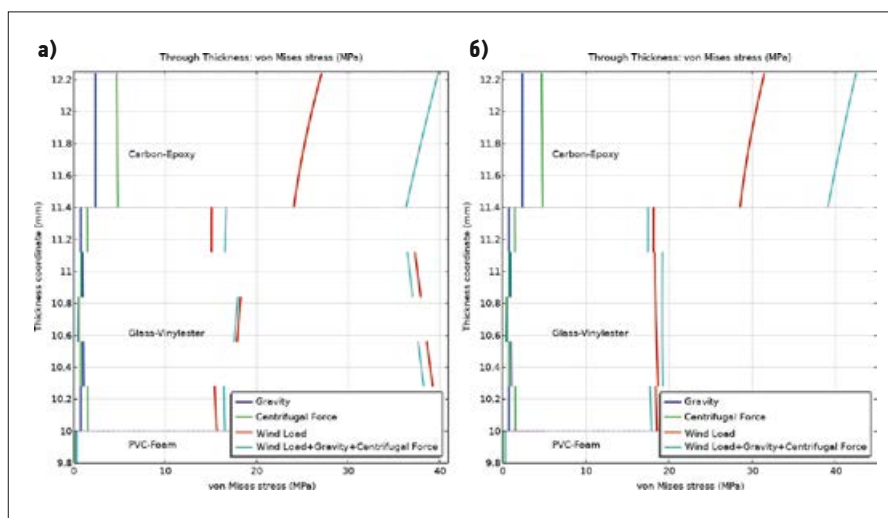


Рис. 3. Распределение напряжения по Мизесу в слоях оболочки по толщине в контрольной точке лопасти при различной ориентации слоёв стеклопластика {а — [0°/45°/90°/45°/0°] (модель 1); б — [90°/0°/0°/0°/90°] (модель 2)}



Малая ВЗУ Aeolus-H (50 кВт)



Однако выравнивание напряжений в слоях стеклопластика является желательным. Для этого в исходную модель структуры ламината стеклопластика вносятся изменения ориентации слоёв.

Как отмечалось ранее, стеклопластик и углепластик в ламинатах показывают высокие механические характеристики при действии на их волокна напряжений растяжения и сжатия. Исходя из задания действующих на лопасть в данном положении сил (рис. 1а), в модели 2 для слоёв ламината стеклопластика принята следующая ориентация: [90°/0°/0°/0°/90°]. На рис. 3б видно, что распределения напряжения от ветровой нагрузки и суммарного напряжения в слоях стеклопластика стали равномерными и составляют примерно 17–18 МПа. При этом изменения напряжений по Мизесу в элементах конструкции лопасти были несущественными. В то же время напряжение от ветровой нагрузки в слоях углепластика в контрольной точке несколько повысилось и стало равным 31–29 МПа. Повысились там же и значения напряжений от суммарной нагрузки до 39–42 МПа. Однако изменения напряжений в целом по лопасти не являются существенными для механических характеристик слоёв ламината. Следовательно, можно считать ориентацию слоёв ламината модели 2 более предпочтительной.

Повторение процесса моделирования в среде COMSOL Multiphysics занимает всего лишь несколько минут и при этом визуализирует каждую итерацию поиска оптимального решения, что не только удобно, но и несравнимо по затратам при решении аналогичных задач, например, путём натурных или физических экспериментов. В этом, несомненно, важное



преимущество математического моделирования сложных процессов на стадиях предпроектных исследований.

Очевидно, что для подтверждения эффективности других ВЭУ, отличающихся габаритами, электрической мощностью, материалами исполнения лопастей и дополнительными элементами структуры, также необходимо предварительное математическое моделирование функциональных характеристик работоспособности, позволяющее оперативно, с минимальными издержками находить оптимальные конструктивные решения.

Представленный материал исследования функциональных характеристик малых ВЭУ является частью комплексного их исследования, включающего решения более сложных задач, например, задач аэродинамики и вибрационного анализа.

### Заключение

1. Проведённое моделирование и исследование функциональных характеристик малых ВЭУ в среде COMSOL Multiphysics показало широкие возможности данного программного обеспечения при оперативной оценке проблемных мест функциональных характеристик механической части ВЭУ, что позволяет успешнее

**Повторение процесса моделирования в среде COMSOL занимает несколько минут и при этом визуализирует каждую итерацию поиска оптимального решения, что не только удобно, но и несравнимо по затратам при решении аналогичных задач путём натуральных экспериментов**



■ Малая ВЭУ Endurance E-3120 (50 кВт) производства компании Earthmill (Великобритания)

проводить параметрическую оптимизацию на стадиях проектных и технологических разработок.

2. Показано, что многие вопросы повышения эффективности функционирования ВЭУ ещё недостаточно проработаны и носят дискуссионный характер. Хотя многие научно-поисковые результаты уже опубликованы, но, к сожалению, они имеют предварительный статус и получены со значительными допущениями по сравнению с реальными условиями функционирования ВЭУ.

3. Полученные результаты данных исследований функциональных характеристик малых ВЭУ можно считать методической базой при выборе композитных материалов, комплектации ламинатов оболочки и оценки её прочности, а также работоспособности лопастей малых ветроэлектрических установок в целом. ■

1. О стимулировании производства электроэнергии с использованием возобновляемых источников: Распоряжение Минэнерго России от 28.07.2015 №1472-р.
2. Новости рынка: Рекордный рост мощностей ветроэнергетики [Электр. текст]. RenEn.ru; Журнал СОК. Режим доступа: с-о-k.ru. Дата обрац.: 17.03.2021.
3. ГОСТ Р 51990–2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация. — М.: Госстандарт РФ, 2003. 12 с.
4. ГОСТ Р 54418.1–2012 (МЭК 61400-1:2005) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 1. Технические требования. — М.: Стандартинформ, 2016. 87 с.
5. Обухов С.Г. Ветроэнергетические установки малой мощности. Технические характеристики, моделирование, рациональный выбор. — Саарбрюккен, Германия: Lambert Academic Publishing, 2012. 96 с.
6. Усачов А.Е., Сустин С.А., Исаев С.А. Оценка эффективности использования различных аэродинамических профилей для современной малой ВЭУ // Журнал СОК, 2019. № 5. С. 81–83.
7. 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: March 17, 2021.
8. Arumugam Pappu, Ramalingam Velraj, Bhaganagar Kiran. A pathway towards sustainable development of small capacity horizontal axis wind turbines — Identification of influencing design parameters & their role on performance analysis. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. Vol. 44. Web-source: sciencedirect.com. Access data: March 17, 2021.
9. Stress and modal analysis of a wind turbine composite blade. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access data: March 17, 2021.
10. Yeh Meng-Kao, Wang Chen-Hsu. Stress analysis of composite wind turbine blade with different stacking angle and different skin thickness. Joint International Conference on Materials Science and Engineering Application (ICMSEA) and International Conference on Mechanics, Civil Engineering and Building Materials (MCEBM). Nanjing, China. April 2017. Web-source: dpi-proceedings.com. Access data: March 17, 2021.
11. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование в COMSOL Multiphysics функциональных характеристик труб для ЖКХ из композитных материалов // Журнал СОК, 2019. №11. С. 37–41.
12. Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н. Моделирование в COMSOL Multiphysics условий армирования углепластиком изделий для ЖКХ // Журнал СОК, 2020. №3. С. 26–31.

References — see page 78.

**Modeling and research in COMSOL Multiphysics of the functional characteristics of small wind power plants. Pp. 72–77.**

**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)

1. *O stimulirovanii proizvodstva elektrojenergii s ispol'zovaniem vozobnovljaemykh istochnikov* [On stimulating the production of electricity using renewable sources]. *Rasporjazhenie Minjenergo Rossii ot 28.07.2015 № 1472-r* [Order of the Ministry of Energy of Russia dated July 28, 2015 No. 1472-r]. [In Russian]
2. *Rekordnyj rost moshhnostej vetrojenergetiki* [Record growth in wind power capacity]. *RenEn.ru; Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. Web-source: c-o-k.ru. Access data: Mart 17, 2021. [In Russian]
3. *GOST R 51990–2002* [State Industry Standard of Russia No. 51990–2002]. *Netradicionnaja jenergetika. Vetrojenergetika. Ustanovki vetrojenergeticheskie. Klassifikacija* [Unconventional energy. Wind power. Wind power installations. Classification]. Moscow. *Gosstandart RF* [Russian State Committee for Standardization, Metrology and Certification ("Gosstandart" Publishers)]. 2003. 12 p. [In Russian]
4. *GOST R 54418.1–2012 (MJeK 61400-1:2005)* [State Industry Standard of Russia No. 54418.1–2012 (IEC 61400-1:2005)]. *Vozobnovljaemaja jenergetika. Vetrojenergetika. Ustanovki vetrojenergeticheskie. Chast' 1. Tehnicheskie trebovanija* [Renewable energy. Wind power. Wind power installations. Part 1. Technical requirements]. Moscow. *Standartinform* [Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology and Conformity Assessment ("Standartinform" Publishers)]. 2016. 87 p. [In Russian]
5. S.G. Obuhov. *Vetrojenergeticheskie ustanovki maloj moshhnosti. Tehnicheskie harakteristiki, modelirovanie, racional'nyj vybor* [Low power wind turbines. Specifications, modeling, rational choice]. Saarbrücken, Germany. *Lambert Academic Publishing*. 2012. 96 p. [In Russian]
6. A.E. Usachov, S.A. Sustin, S.A. Isaev. *Ocenka jeffektivnosti ispol'zovaniya razlichnykh ajerodinamicheskikh profilej dlja sovremennoj maloj VJeU* [Preliminary assessment of the efficiency of using different aerodynamic profiles for a modern small wind power plant]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 5. Pp. 81–83. [In Russian]
7. N.H. Mostafa, M. Talaat, M.M. Ibrahim. Performance analysis and design a small horizontal axis wind turbine. "Comprehensive development of the Sinai Peninsula": The Association of Egyptian-American scholars 41st annual conference. 2014. Web-source: researchgate.net. Access data: March 17, 2021.
8. Pappu Arumugam, Velraj Ramalingam, Kiran Bhaganagar. A pathway towards sustainable development of small capacity horizontal axis wind turbines — Identification of influencing design parameters & their role on performance analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 44. Web-source: sciencedirect.com. Access data: March 17, 2021.
9. Stress and modal analysis of a wind turbine composite blade. COMSOL Multiphysics User's Guide. Web-source: comsol.com. Access data: March 17, 2021.
10. Meng-Kao Yeh, Chen-Hsu Wang. Stress analysis of composite wind turbine blade with different stacking angle and different skin thickness. Joint International Conference on Materials Science and Engineering Application (ICMSEA) and International Conference on Mechanics, Civil Engineering and Building Materials (MCEBM). Nanjing, China. April 2017. Web-source: dpi-proceedings.com. Access data: March 17, 2021.
11. V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. *Modelirovanie v COMSOL Multiphysics funkcional'nykh harakteristik trub dlja ZhKH iz kompozitnykh materialov* [Modeling in COMSOL Multiphysics of the functional characteristics of pipes from composite materials for housing and communal services]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 11. Pp. 37–41. [In Russian]
12. V.A. Suchilin, A.S. Kochetkov, N.N. Gubanov. *Modelirovanie v COMSOL Multiphysics uslovij armirovaniya ugleplastikom izdelij dlja ZhKH* [Modeling in COMSOL Multiphysics of conditions for reinforcing of carbon fiber products for housing and communal services]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2020. No. 3. Pp. 26–31. [In Russian]