

Г.Ю.МАРТЫНЕНКО, канд.техн.наук, доц., НТУ «ХПИ»;
Ю.В.СОЛЯНИКОВА, асп., НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С НИМИ

У роботі проведено огляд розвитку вітроенергетики на теперішній час. Розглянуто типи вітроенергетичних установок, їх особливості, переваги та недоліки. Також розглянуто проблеми динаміки та міцності конструктивних елементів та напрямки їх вирішення.

The article deals with the question of wind energy development. Types of windmills, their structural features, advantages and defects were considered. Also in the work researches problems dynamics and strength of constructions and offers decision their solutions.

В ХХІ столітті розвитими будуть те країни, де інтенсивно розвивається вітроенергетика (Програма ООН розвитку мирової енергетики).

Введение. Неравномерный нагрев лучами солнца земной поверхности и воздушных масс, находящихся над ней, вызывает постоянные перемещения воздуха из более холодных мест в более теплые. Таким образом, воздушные массы все время перемешиваются и перемещаются как в вертикальном направлении, так и параллельно земной поверхности. Постоянные перемещения воздушных масс в горизонтальных направлениях называются ветром. Ветер обладает определенным запасом кинетической энергии и характеризуется скоростью и направлением [1]. Преобразование кинетической энергии ветра в электрическую осуществляется при помощи ветроэнергетических установок (ВЭУ).

Существует множество способов прогнозирования скорости ветра. На ветровые ресурсы влияет рельеф Земли и наличие препятствий, расположенных на высоте до 100 метров. На высоте 100 метров и выше рельеф практически не влияет на скорость ветра и происходит увеличение ламинарных воздушных потоков [2]. Энергия ветра также подчинена сезонным изменениям погоды: более эффективная работа ВЭУ зимой и менее – в летние жаркие месяцы. Сила ветра формируется под действием ряда факторов, таких как атмосферное давление, циркуляционные процессы атмосферы, формы рельефа и другие. Количество энергии, произведенной при помощи использования силы ветра, зависит от плотности воздуха, от площади, охваченной лопастями ветротурбины при вращении, и пропорционально скорости ветра в 3 степени.

Прогнозирование скорости ветра является крайне важным фактором, способствующим долгосрочной и эффективной работе ВЭУ. Поэтому множество погрешностей при расчете показателей ветра, наряду с неблагоприят-

ными погодными условиями (песок, снег, дождь, лед, внезапные порывы ветра), снижают долговечность ветровых установок. Существуют специальные безопасные стандарты (такие как International Electrotechnical Commission – ИЕС), гарантирующие надежную работу ветровой установки. Стандарты определяют нагрузки, используемые в проектных расчетах для обеспечения безопасной работы ВЭУ, такие как внезапные сильные порывы ветра, действие молнии.

Наибольший ветровой потенциал наблюдается на морских побережьях, на возвышенностях и в горах.

Человечество издавна использует энергию ветра. Изначально ветродвигатели применялись для подъема воды, размола зерна и приведения в движение различных станков [3]. Наибольшее развитие ветроэнергетике пришлось на конец XIX ст., именно в это время начинается усовершенствование ветровых установок для производства электроэнергии. Энергия ветра является экологически чистой и относится к альтернативным источникам энергии. Актуальность и развитие ветроэнергетики обусловлено, в первую очередь, истощением нефтегазовых ресурсов планеты. Существует множество фирм занимающихся производством и монтажом ветровых установок. Ведущие страны мира в области ветроэнергетики: Германия, Дания, Великобритания, США, Франция. Лидером мирового производства и использования ВЭУ является Европа (61%), однако наблюдается рост ветроэнергетики и в странах Азии [4]. Распределение производства ВЭУ в мире изображено на рис. 1.

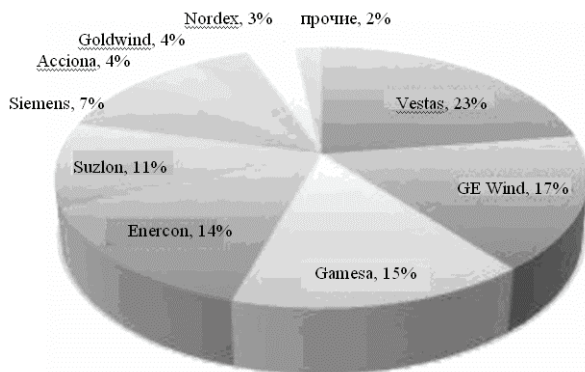


Рисунок 1 – Распределение производства ВЭУ между ведущими фирмами ветроэнергетики

На этом рисунке указаны фирмы производители и тот объем рынка, который они охватывают. Это Nordex (Германия), Goldwind (Китай), Acciona (Испания), Siemens (Германия), Suzlon (Индия), Enercon (Германия), Gamesa (Испания), GE Wind (США), Vestas (Германия).

Вопросами ветроэнергетики занимаются во всем мире. В Советском

Союзе уделялось значительное внимание исследованиям и разработкам новых типов ветродвигателей, составлялся кадастр ветровых ресурсов СССР. Этим вопросом занимались такие известные ученые, как Г.Х.Сабинин, Ю.В.Кондратюк и многие другие. Н.Е. Жуковским была разработана теория ветроколеса, который доказал, что максимальный аэродинамический коэффициент (он же КИЭВ, о котором будет сказано дальше) C_p равен 0,593. То есть при таком значении коэффициента наблюдается наиболее эффективная работа ВЭУ [5]. Впоследствии профессором Г.Х.Сабининым была разработана теория реальной ВЭУ [6]. Первая в Украине ветроэлектростанция (ВЭС) была сооружена в Крыму (около Балаклавы) в 1931 году. ВЭС – несколько ВЭУ, собранных в одном месте и объединенные в одну сеть.

Наибольшее развитие работы по ветроэнергетике получили в Великобритании, Дании, ФРГ и США. Среди иностранных ученых, занимающихся ветроэнергетикой можно выделить Е.Гольдинга (Великобритания), который ввел два коэффициента поправки скорости ветра [7], Б.Кетцольда (ФРГ), который осуществил попытку стандартизации ветроэнергетических характеристик пунктов наблюдений, Ю.Юля (Дания) и многих других.

Нельзя не отметить закон Бетца: ветер перед турбиной имеет более высокую скорость, чем за турбиной, таким образом, ротор забирает часть энергии на вращение. Масса воздуха остается неизменной [3]. Распределение воздушных масс изображено на рис. 2.

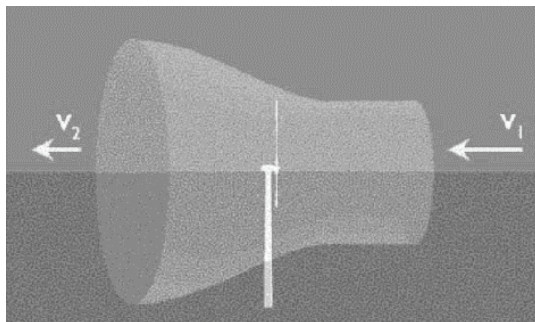


Рисунок 2 – Распределение воздушных масс перед и за ВЭУ

В середине 50-х годов прошлого века рост ветроэнергетики приостановился. Это было обусловлено активным развитием тепловой и атомной энергетики. После нефтяных кризисов 1973 и 1979 годов множество европейских стран стремилось снизить свою зависимость от импорта нефти [8]. Вследствие чего вторичное развитие ветроэнергетики в Европе пришлось на начало 80-х годов прошлого века.

Европа имеет значительный ветровой потенциал. Большинство стран Северной Европы обладает большими территориями мелководья, расположенными недалеко от береговой линии. Известно, что морские ветры более

сильные и продолжительные по сравнению с ветрами, дующими на суше. Именно это послужило развитию оффшорной ветроэнергетики (ВЭС, установленные на прибрежном шельфе незамерзающих морей) [4]. Морская ветроэнергетика способствует сохранению значительных земельных территорий, что немаловажно для густонаселенной Европы и Юго-Восточной Азии. Не смотря на очевидные преимущества, оффшорная ветроэнергетика имеет ряд недостатков. К ним относятся сложность проведения работ в морских условиях, высокая цена на ветротурбины, а также отсутствие четкой правительственной поддержки и большие затраты по подключению оффшорных ветропарков к энергосети [4]. Однако производство энергии на оффшорных ветряках существенно выше. Лидером оффшорной ветроэнергетики является Дания.

1 Цель исследования. Целью данной работы является обзор состояния ветроэнергетики в мире; выделение преимуществ и недостатков различных типов ВЭУ; определение вопросов, связанных со статической и динамической прочностью ветроустановок, а также определение способов повышения статической и динамической прочности, надежности и безопасности эксплуатации ВЭУ.

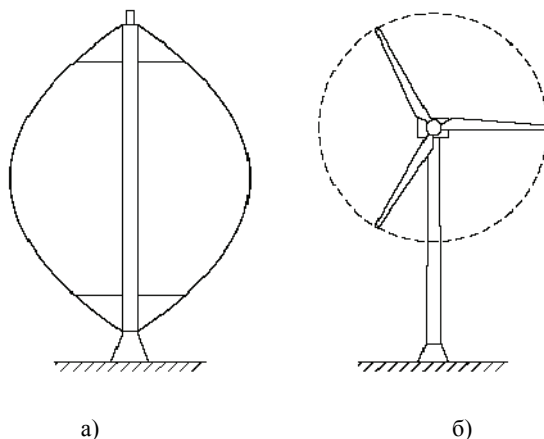
2 Типы ветрогенераторных установок. Современные ветрогенераторные установки – это машины, которые преобразуют энергию ветра в механическую энергию вращающегося ветроколеса, с последующим ее преобразованием в электрическую энергию. Поэтому их главная цель – получение как можно больше энергии из ветра. Рабочие характеристики ветровой турбины характеризуются тремя главными показателями: мощностью, крутящим моментом и осевой нагрузкой.

По конструктивным особенностям ветровые установки делятся на ВЭУ с горизонтальной и вертикальной осями вращения. Расположение ведущего вала ротора – части турбины соединяющей лопасти с генератором – считается осью машины [9]. Типы ВЭУ схематически приведены ниже на рис. 3.

Выходная мощность горизонтально–осевых ветрогенераторов зависит от размеров конструктивных элементов, формы и размеров лопастей. Чем больше диаметр ветроколеса, тем больший воздушный поток оно захватывает и тем больше энергии вырабатывает агрегат [3]. Зависимость мощности ВЭУ от диаметра ветроколеса (ВК) изображена на рис. 4.

Однако длина лопаток ограничена действием центробежных и изгибающих сил, переменных по величине и направлению. Все это существенно снижает надежность ВЭУ и сокращает сроки их эксплуатации. Обычно поломка механизма вызвана неисправной системой управления, чрезвычайными ветровыми условиями, усталостными трещинами или дефектами системы безопасности, например механизма торможения ротора, молниезащиты [10]. Таким образом, срок службы ВЭУ зависит от условий эксплуатации (средний

срок службы – 20 лет).



а) б)
Рисунок 3 – Типы ветрогенераторных установок
(а – вертикально-осевые; б – горизонтально-осевые)

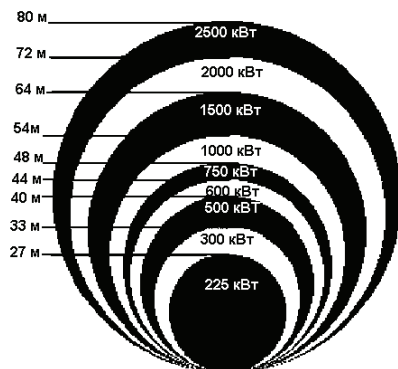


Рисунок 4 – Зависимость мощности ВЭУ от диаметра ветроколеса

При проектировании ВЭУ необходимо также учитывать такое явление как сдвиг ветра. Оно описывает процесс уменьшения скорости вихревых потоков по мере их приближения к поверхности земли. Если ветроэнергетическая установка имеет большой диаметр ротора, но высота ее башни незначительна, то в результате разницы давления ветра, воздействующего на концы лопастей, возможно разрушение ветрогенераторных установок, так как нагрузка на ВК неравномерна в окружном направлении [2].

По способу взаимодействия с ветром ВЭУ делятся на установки с жестко закрепленными лопастями без регулирования и на агрегаты, с изменяющимся углом лопастей. Последние имеют более высокую эффективность ис-

пользования ветра и вырабатывают больше электроэнергии. Однако они должны быть оснащены специальными подшипниками, которые часто являются причиной выхода из строя агрегатов. ВЭУ с жестко закрепленными лопастями более просты в обслуживании, но их эффективность использования ветрового потока ниже.

2 Преимущества и недостатки ВЭУ. Критерием эффективности ВЭУ являются коэффициент полезного действия (КПД) и коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ). КИЭВ – это число, которое показывает, какая часть воздушного потока используется ветроколесом. Однако часто критерием эффективности является КПД, так как часть вырабатываемой энергии уходит на механические потери, трение в подшипниках, неудачный монтаж всей установки и т.д. [12].

Крыльчатые ВЭУ (горизонтально-осевые) имеют высокий КИЭВ – 43% и составляют 90 % всех ветроустановок. Наибольшая эффективность их работы достигается при действии потока воздуха перпендикулярно к плоскости вращения лопастей-крыльев, поэтому у них предусмотрено специальное устройство для автоматического поворота оси вращения, так называемое крылостабилизатор. В целом, крыльчатые ВЭУ имеют высокую сложную конструкцию отдельных элементов, что является их недостатком. Главным недочетом является большая стоимость и значительные эксплуатационные расходы [2].

К преимуществам горизонтально-осевых ВЭУ относится высокая скорость вращения. Кроме того, они оснащены тормозным устройством и системой управления. Тормозное устройство используется для защиты от поломок при сильных порывах ветра и ураганах. Почти все ВЭУ большой мощности автоматически останавливаются, если скорость ветра превышает предельную величину (25 м/с). ВЭУ данного типа в неработающем режиме способна выдержать силу ветра до 50 м/с.

Управление ВК предусматривает процесс ориентации оси ротора ветродвигателя по направлению ветра. Различают несколько типов системы ориентации:

1. Флюгер (хвост) – отличается большой точностью, простотой конструкции, но имеет повышенную скорость поворачивания головки, увеличивает ее вес, усложняет уравновешивание.

2. Виндрозы – небольшие ветроколеса, расположенные перпендикулярно к плоскости вращения основного ветроколеса. Принцип работы состоит в том, что при действии ветра, направленного под углом к оси ВК, виндрозы начинают вращаться. Вследствие чего они поворачивают ВК перпендикулярно ветру.

3. Расположение ВД за вертикальной осью его поворота (вращающееся ВК играет роль флюгера, специальный механизм ориентации ветра отсутствует) [11].

К преимуществам вертикально-осевых установок (карусельных ВЭУ, ветроустановки Дарье или роторные) относятся нечувствительность к направлению ветра, возможность значительного упрощения конструкции установки (отсутствие поворотных устройств и систем). При работе вертикально-осевых установок реализуются более низкие уровни аэродинамических и инфразумов, меньшие теле- и радиопомехи. Вертикально-осевые ВЭУ более надежные за счет значительного упрощения конструкции, снижения уровня требований к изготовлению трансмиссий, улучшения условий монтажа и эксплуатации.

Крыльчатые ВЭУ используют подъемную силу, карусельные ВЭУ используют силу давления ветра.

ВЭУ подвергаются различным видам нагрузок, к которым относятся:

1. Аэродинамические (возникают вследствие действия воздушного потока, проходящего через лопатки и башню конструкции);
2. Гравитационные (вызванные гравитационным полем земли);
3. Инерционные;
4. Центробежные силы;
5. Гироскопические моменты;
6. Возмущающие силы, вызванные неравномерностью потока воздуха;
7. Рабочие (эксплуатационные) нагрузки, возникают вследствие различных режимов работы системы контроля (т. е поворот в горизонтальной плоскости, регулирование шага лопаток, различные рабочие режимы генератора) [13].

Для наиболее эффективной работы ВЭУ ее лопасти должны максимально взаимодействовать с ветровым потоком, проходящим через площадь вращения ВК. ВЭУ с большим количеством лопастей менее эффективны, чем ветрогенераторы с двумя или тремя лопастями, так как лопасти создают помехи (затененность) друг другу. Наибольшее распространение в мире получила конструкция ветрогенератора с тремя лопастями и горизонтальной осью вращения, поэтому в дальнейшем более подробно остановимся на этом типе ВЭУ. Наиболее применимым является асинхронный генератор, поскольку он имеет малую чувствительность к короткому замыканию и высокую степень защиты от внешнего воздействия. Однако применяют и другие типы генераторов, например, асинхронные.

3 Конструкционные особенности ВЭУ с горизонтальной осью вращения. Современные ветрогенераторы этого типа обычно состоят из следующих основных компонентов: лопасти, гондола, ротор, трансмиссия, генератор, система управления, башня. Схематическое изображение ВЭУ и ее конструкционных элементов изображено на рис. 5.

Существует несколько видов передачи ветровой мощности потребителю (гидравлическая, механическая, пневматическая, аэродинамическая). Около 90% ВЭУ используют механическую передачу энергии вращающегося ВК

генератору. Этот выбор обусловлен простой конструктивной особенностью и наиболее высоким КПД (0,85-0,95). Однако механическая передача имеет ряд недостатков: наличие мультипликатора и как следствие, передача колебаний ветрового потока на вал ВЭУ [11]. Мультипликатор (повышающий редуктор) – промежуточное звено между ветроколесом и электрогенератором, обеспечивает согласование с оборотами генератора. Исключения составляют ВЭУ малой мощности со специальными генераторами на постоянных магнитах, например установки фирмы Epercon [4]. Один из вариантов механической передачи приведен на рисунке 6.

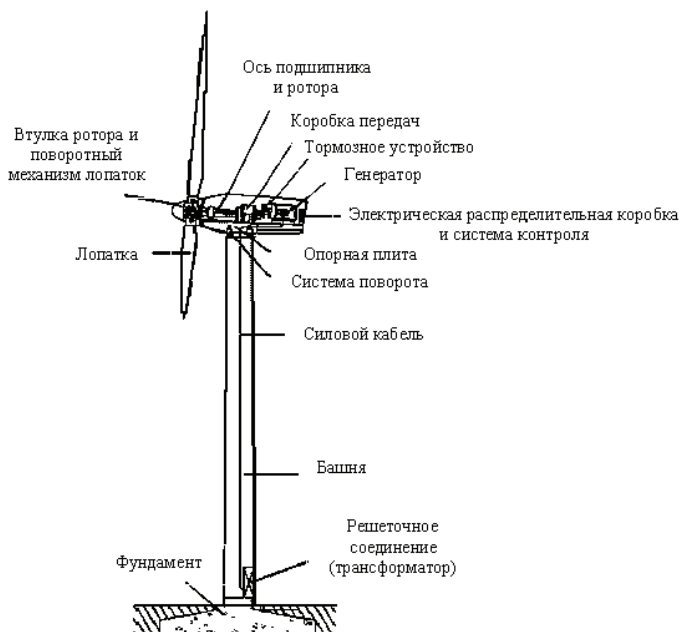


Рисунок 5 – Основные конструктивные элементы ВЭУ

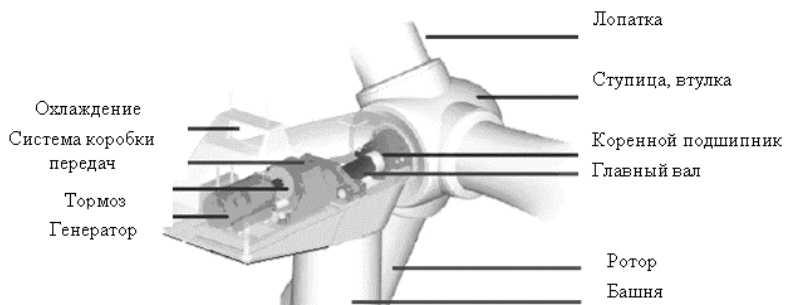


Рисунок 6 – Конструкционные элементы гондолы

На башню ВЭУ приходятся большие нагрузки от веса гондолы и ветроколеса (ВК). Для обеспечения устойчивости башни и для облегчения сборки ВЭУ составные части гондолы (коробка передач, генератор) могут размещать в основании башни, как показано на рис. 7 [12].

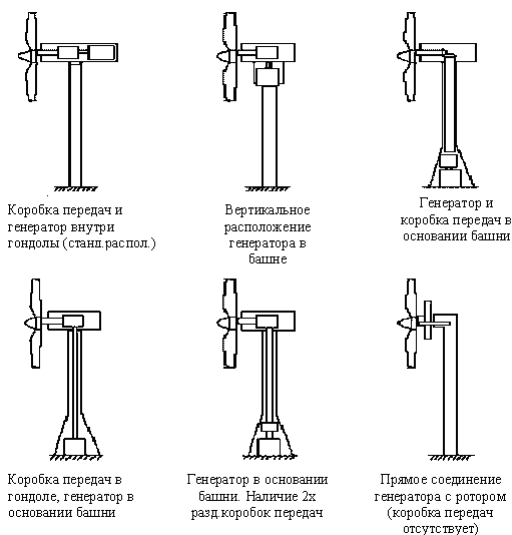


Рисунок 7 – Схематическое расположение конструктивных элементов гондолы

ВК ветровой турбины с горизонтальной осью вращения находится (вращается) в непосредственной близости от башни. Аэродинамический поток вокруг башни влияет на ротор, поэтому стараются придерживаться минимальных расстояний между ВК и башней (настолько близко, насколько позволяет длина гондолы) [14].

Лопатки являются наиболее нагруженным и опасным элементом ВЭУ. Зафиксированы случаи их отрыва и относа на расстояние нескольких сот метров. Это обусловлено внезапными порывами ветра и преждевременным износом. Они испытывают ветровые нагрузки, силу тяжести, инерционные нагрузки. Для их изготовления применяются различные материалы (стеклопластик, сталь, алюминий). Выбор зависит от многих факторов, таких как вес, жесткость, цена и требуемая усталостная прочность. Чаще всего используют стеклопластик. Для упрочнения и ужесточения лопатки между двумя оболочками наклеивается так называемая перегородка, прежде чем они связываются. Поскольку лопатка может иметь несколько перегородок, такая конструкция называется коробчатой. Она является главной частью лопатки, действующая как главная балка, которая связывает тонкую оболочку и определяет геометрию лопатки [14]. Коробчатая структура лопатки изображена на рис. 8.

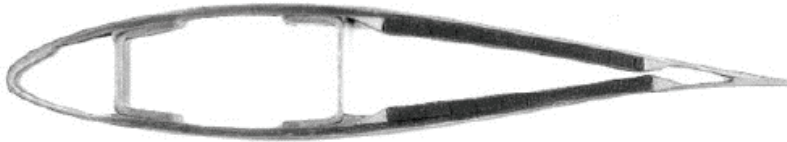


Рисунок 8 – Коробчатая структура лопадки

Для изготовления гондолы используют различные материалы. Ранее применялась стальная структура. В более современных ВЭУ гондолы изготавливаются из стекловолоконистого композиционного армированного материала. Такой выбор материала обусловлен хорошей звукоизоляцией и защитой от перепада температур.

Затраты на изготовление башни составляют примерно 20 % стоимости всей ВЭУ. При увеличении длины лопаток возрастает высота башни и, соответственно, выходная мощность ВЭУ[4]. Чем выше башня, тем большим нагрузкам она подвергается. Прочность башни зависит от материала изготовления, для ее производства применяют сталь или бетон.

4 Вопросы, связанные со статической и динамической прочностью конструктивных элементов ВЭУ. Нагрузки, которые испытывают элементы ВЭУ можно разделить на статические и динамические (изменяющиеся во времени). К первым можно отнести весовые нагрузки. К динамическим относятся нагрузки от дисбаланса ротора, моменты аэродинамических сил на ротор, вибрации, колебания узлов, элементов.

Причинами колебаний ВЭУ являются действия давления ветра, неравномерно распределенного в окружающем направлении, динамическая неуравновешенность ВК и вала, на котором оно размещено, а также сейсмические и другие природные воздействия.

Существенное значение с точки зрения динамической (усталостной) прочности могут иметь резонансные и околорезонансные колебания отдельных узлов ВЭУ (особенно для ВЭУ с переменной частотой вращения ветроколеса).

Вибрации могут приводить к поломкам и преждевременному износу частей ВЭУ. Воздействуя на башню, они передаются на фундамент и основание. В результате чего возможно возникновение усталостных трещин в сварных швах, в металле конструктивных элементов, снижение степени затяжки болтов в узлах сопряжения элементов и анкерных болтах. Как следствие, для фундаментов будет их преждевременный износ – растрескивание и разрушение [16].

Кроме того, колебания таких элементов ВЭУ как гондола, ступица ВК, лопасти и башня приводят к возникновению акустического шума. Акустический шум – совокупность различных по силе и частоте звуков, возникающих в результате колебательного движения частиц в упругих средах (твердых,

жидких, газообразных).

Шумовое воздействие можно разделить на механическое и аэродинамическое. Источником аэродинамического шума является взаимодействие лопасти с воздушными потоками (шум усиливается при прохождении лопасти мимо башни ветроустановки). Источниками механического шума являются работающие механизмы (генератор, мультипликатор, опорные узлы) [11].

Помимо акустического шума вокруг ВЭУ возникает опасный инфразвук частотой 6-7 Гц. Его источниками являются колебания ВК, воздушные полости секций башни, а также поток, обтекающий лопасти. Инфразвук воздействует на центральную нервную систему (ЦНС) человека, вызывает тревогу, страх [17]. Инфразвуковая частота вихревого звука, генерируемого при обтекании лопастей воздушным потоком, составляет примерно 0,6 Гц. Снижение шумов ВЭУ остается актуальным, так как за рубежом принят допустимый уровень шумов от ВЭУ величиной 45 дБ на расстоянии 100 – 400 м, в Украине же нормой считается уровень шума 85 дБ [17].

Следует отметить, что ВЭУ отрицательно воздействуют на экологию. Это гибель птиц, эксплуатация больших земельных территорий, помехи прохождения радиоволн (чаще всего вызываются металлическими молниеотводами лопастей генератора). Также существует субъективный фактор визуального воздействия.

Однако, известны способы решения этих проблем: чтобы птицы не попадали под вращающиеся лопасти, ветроколеса стали ограждать сетчатым кожухом; для избегания помех радиосигналам устанавливаются ретрансляторы. Для улучшения внешнего вида ветряных установок во многих крупных фирмах работают профессиональные дизайнеры.

ВЭУ оказывают и положительное влияние на экологию – они играют роль своеобразной защиты, препятствующей ветровой эрозии почвы [18].

Заключение. Ветроэнергетика является наиболее развивающейся отраслью промышленности. Средний показатель роста мирового ветроэнергетического сектора в год составляет более 26 % [4].

Существует ряд проблем, связанных с конструктивными элементами ВЭУ, приводящих к возникновению аварийных ситуаций (отрыв лопастей, вероятность возгорания гондолы). Пожары происходят по двум основным причинам: удар молнии или технические ошибки и неисправности. При технологических неисправностях возгорания возникают от перегрева и искрения, однако имеет место и человеческий фактор. В обоих случаях горят смазочные материалы, масла, трансмиссионные горючие жидкости и оболочка гондолы [15].

Немаловажными проблемами также являются производимый шум и излучение инфразвуковых волн, губительных для любых живых организмов.

Также на основании приведенных фактов можно сделать вывод, что при работе ВЭУ наблюдаются вибрации, колебания узлов, элементов, которые

могут приводить к поломкам и преждевременному износу.

К наиболее эффективным способам борьбы с вибрацией относится применение виброизоляционных прокладок из упругих материалов, динамических гасителей колебаний и демпферов, которые могут размещаться непосредственно между ветроагрегатом и основанием башни [16]. Снижение вибраций и шума зубчатых передач может быть достигнуто несколькими способами: изменением формы зубьев, фланкированием профилей зубьев, заменой в зубчатой паре материала колеса [19].

Повышение надежности эксплуатации ВЭУ на этапе проектирования и доводки конструкции может быть достигнуто при помощи новых математических и расчетных моделей, позволяющих адекватно отразить динамическое поведение, как отдельных ее элементов, так и ВЭУ как единой механической системы с учетом всего спектра действующих на нее нагрузок (с выделением расчетных случаев, соответствующих некоторым критическим состояниям). Это позволит снизить уровень вибраций и повысить динамическую устойчивость системы.

Список литературы: 1. *Шефтер Я.И., Рождественский И.В.* Изобретателю о ветродвигателях и ветроустановках. – М.: Министерство сельск. хозяйства СССР, 1957. – 142 с. 2. [www/URL: http://teplonasos.com/wind2009ru.html/](http://teplonasos.com/wind2009ru.html/) – Энергия ветра. – Загл. с экрана. 3. *Tony Burton, David Sharpe.* Wind energy handbook. – John Wiley & Sons Ltd, 2001. – 490 p. 4. *Сокут Л.Д.* Состояние и перспективы развития ветроэнергетики в мире и на Украине // Строительство и техногенная безопасность. – 2009. – № 27. – С. 93-105. 5. *Жуковский Н.Е.* Вихревая теория гребного винта. – М.: Научно-техн. издательство, 1937. – (ОНТИ НКТП СССР, полное собрание сочинений; том VI). 6. *Сабинин Г.Х.* Теория и аэродинамический расчет ветряных двигателей. – М.: Научно-техн. издательство, 1931. – (Труды ЦАГИ, вып. №4). 7. *Golding E.* The generation of electricity from the wind. – Spon, 1955. 8. *Коваленко В.М.* Исследования по ветроэнергетике в Сумском государственном университете // Вісник Сумського державного університету. – 1994. – № 1. – С. 84-89. 9. *Thomas Ackermann* Wind power in power systems. – John Wiley & Sons Ltd, 2005. – 691 p. 10. *Fernando DE. Bianchi.* Wind turbine control systems. – Springer, 2006. – 499 p. 11. *Янсон Р.Я.* Ветроустановки. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. – 36 с. 12. *Андреанов Н.В., Быстрицкий Д.Н.* Ветроэлектрические станции. – М.: Энергия, 1960. – 320 с. 13. *Martin O.L. Hansen* Aerodynamics of Wind Turbines. – Earthscan, 2008. – 181 p. 14. *Erih Hau* Wind turbines Fundamentals, Technologies, Applications, Economics. – Springer, 2006. – 783 p. 15. *Дмитриев Г.С.* Как уберечься от пожаров на ветроэнергетических установках. – М.: Энергия, 2006. – № 4. – С. 35-39. 16. *Горохов Е.В., Бусько М.В.* Оценка влияния резиноармированных опорных частей на динамическое поведение башенной конструкции // Вестник ДонГАСА. – 2001. – С. 145–152. 17. *Сокол Г.И.* Инфразвук – экологический вредный фактор в ветроэнергетике // Праці симпозіуму Консонанс, 2005. – С. 283-290. 18. *Туликін С.Н., Орлова Н.С.* Ветроэнергетические ресурсы. – Калининград: КГУ, 1998. – 31 с. 19. *Духанин Ю.А., Акулин Д.Ф.* Техника безопасности и противопожарная техника в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1973. – 304 с.

Поступила в редколлегию 10.11.2009