

УДК 539.3

Возбуждение колебаний ветроэнергетических установок гироскопическими силами инерции

¹Гуляев В.И., д.т.н., ²Гайдайчук В.В., д.т.н., ³Носенко В.П.

¹Национальный транспортный университет, Украина

²Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Украина

³ООО «Строительное предприятие № 7», Украина

Анотація. Проведений аналіз силових чинників, що визначають міцність і працездатність вітроенергетичних установок. Показано, що разом з аеродинамічними силами на динамічну поведінку ВЕУ суттєво впливають гіроскопічні сили інерції, викликані складним обертанням ротора.

Аннотация. Проведенный анализ силовых факторов, которые определяют прочность и работоспособность ветроэнергетических установок. Показано, что вместе с аэродинамическими силами на динамическое поведение ВЭУ существенно влияют гироскопические силы инерции, вызванные сложным вращением ротора.

Abstract. The analysis of force factors influencing on the strength and efficiency of wind power stations is performed. It is shown that besides the aerodynamic forces the essential effect on the dynamic behavior of wind power stations is provided by gyroscopic inertia forces generated by compound rotation of their rotors.

Ключевые слова: ветроэнергетические установки, гироскопические силы инерции, колебания

Введение. На сегодняшний день доля ветроэнергетики в мировом энергопроизводстве составляет 1 %, причем в некоторых странах на долю энергии, выработанной за счет ветра, приходится 20 % и более от общего объема энергопоставок. Финансовые ресурсы, ранее затрачиваемые на импорт ископаемых энергоносителей, сегодня "инвестируются" в новые рабочие места.

Азиатские страны, демонстрирующие темпы роста новых ветромощностей на уровне 48 %, стали новым мировым "локомотивом" этой отрасли, стремительно развивающейся. Однако европейские страны, хотя теряющие свою долю в мировой ветроэнергетике, все еще продолжают удерживать лидерство.

Учитывая дальнейшее развитие ветроэнергетических технологий, их разнообразие, а также дополнительный импульс, полученный отраслью в 2005 году, можно с уверенностью утверждать, что рост и распространение ветроэнергетики в мире будет наблюдаться и в ближайшие годы. Основываясь на данных Всемирной Ветроэнергетической Ассоциации, можно

предположить, что установленная мощность отрасли к 2010 году достигнет 120 000 МВт.

Украина характеризуется достаточно высокими энергетическими потенциалами ветрового потока в Карпатах, Крыму, Причерноморье и Приазовье, где среднегодовые скорости ветра на высоте 10 м составляют 5 и более метров в секунду, что ставит ветровую энергию на первое место среди возобновляемых источников для производства электрической энергии. В то же время, Украина принадлежит к энергодефицитным странам, так как покрывает нужды в энергопотреблении за счет собственных энергоресурсов приблизительно на 40 %, импортируя 75 % необходимого объема природного газа и 85 % сырой нефти и нефтепродуктов. Такая структура энергопотребления порождает монопольную зависимость экономики Украины от стран-экспортеров нефти и газа и является неблагоприятной для ее энергетической и национальной безопасности.

Энергетическое машиностроение в Украине имеет достаточный опыт производства, проектирования, строительства, эксплуатации и обслуживания, как ветроэнергетических установок, так и ветроэнергетических станций; в стране имеется достаточно высокий научно-технический потенциал и развитая производственная база. В последнее время развитию ветроэнергетического сектора способствует государственная поддержка, которая обеспечивает реализацию инициатив по усовершенствованию законодательства, структуры управления, созданию удобных условий для внутренних и внешних инвесторов.

Реализация государственных национальных программ в области ветроэнергетики на 2010 год предусматривает общее годовое производство электроэнергии на ветроэлектростанциях и автономных ветроустановках около 5,71 млн. Мвт/ч, что позволит обеспечить около 2,5 процентов от общего годового электропотребления в Украине. Поэтому проблема создания эффективных и надежных ветроэнергетических установок (ВЭУ) является актуальной.

Одно из основных препятствий развития ВЭУ связано с трудностями моделирования их динамического поведения. В процессе эксплуатации конструкции ВЭУ поддаются воздействию различного рода динамических нагрузок, основными из которых являются ветровые нагрузки и силы инерции вращательного движения лопастей. Их воздействия на колебания конструкции анализируются в работах авторов. В них показано, что особые динамические эффекты в лопастях (и башнях ВЭУ) возникают при сложном вращении ротора, когда его ось под действием ветрового потока разворачивается. Одним из опаснейших видов нагрузок, которая действует на лопасть, является гироскопическая сила инерции, вызванная ее слож-

ным вращением. Такой вид нагрузки реализуется, когда под действием ветрового потока, который меняет свое направление, ось ротора поворачивается, и лопасть начинает вращаться относительно двух осей одновременно. Тогда на элемент лопасти длиной dr действует периодическая гироскопическая сила. Поскольку эта сила действует с частотой ω , при ее приближении к частоте собственных колебаний лопасти возникают резонансные эффекты. Возбужденные ими колебания через втулку лопасти передаются и на башню, поэтому они могут привести к разрушению не только лопастей, но и всей конструкции. В работе проведенный анализ основных факторов, которые влияют на динамическое поведение и прочность ветроэнергетических установок. Сделаны выводы о необходимости комплексного подхода к расчету конструкций ВЭУ с учетом их предварительного напряжения силами инерции и гироскопического взаимодействия вращательных и линейных видов движения.

Динамические нагрузки на элементы конструкции ВЭУ. По теории крыла нагрузка dP на элементарную площадку лопасти шириною b и длиной dr , согласно [1 – 4] равна:

$$dP = C_y b dr \rho \frac{W^2}{2}, \quad (1)$$

где C_y – коэффициент подъемной силы крыла (лопасти); ρ – массовая плотность воздуха; W – относительная скорость воздушного потока, набегающего на элемент лопасти; r – расстояние элемента лопасти от оси вращения ветроколеса.

Относительная скорость воздушного потока:

$$W = \sqrt{\omega^2 r^2 + V^2},$$

где ωr – окружная скорость элемента лопасти; V – скорость ветра.

Следовательно

$$dP = C_y b dr \frac{\rho}{2} (\omega^2 r^2 + V^2). \quad (2)$$

Принимая $C_y b$ постоянными по длине крыла и интегрируя, получим полную нагрузку на крыло

$$P = C_y b \frac{\rho}{2} \int_{r_0}^R (\omega^2 r^2 + V^2) dr = C_y b \frac{\rho}{2} \left[\frac{\omega^2}{3} (R^3 - r_0^3) + V^2 (R - r_0) \right]. \quad (3)$$

Внося за скобку $(R - r_0)$, получим:

$$P = C_y b \frac{\rho}{2} (R - r_0) \left[\omega^2 \frac{R^2 + Rr_0 + r_0^2}{3} + V^2 \right]. \quad (4)$$

Вводим обозначения:

$b(R - r_0) = S$ – площадь лопасти (крыла);

$\frac{R^2 + Rr_0 + r_0^2}{3} = r_m^2$ – условный радиус крыла.

Подставляя S и r_m в уравнение (4), получим полную нагрузку на крыло:

$$P = C_y S \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V^2). \quad (5)$$

В моменты порывов ветра с большими скоростями, к которым ветроколесо не сразу может приспособиться, крылья могут быть перегружены. Отношение возможной максимальной нагрузки крыла P_{\max} , возникающей при порывах ветра, к рабочей нагрузке при расчетной скорости ветра P_p называется коэффициентом перегрузки.

$$n = P_{\max} / P_p. \quad (6)$$

Обозначим скорость ветра при порыве через V_n и напишем уравнения нагрузки на крыло при V и V_n

$$P = C_y S \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V^2); \quad (7)$$

$$P = C_{yn} S \frac{\rho}{2} (\omega^2 r_m^2 + V_n^2), \quad (8)$$

где C_{yn} – коэффициент подъемной силы при порыве ветра.

Во время поворота головки около оси башни $z' - z'$ на крыльях вращающегося ветряного колеса возникают, помимо аэродинамических сил, центробежные силы и силы гироскопические. Взяв точку A с массой m на лопасти, обозначим выражения этих сил:

— $Q = m\omega^2 r$ – центробежная сила, возникающая вследствие вращения ветроколеса около своей оси;

— $Q_1 = m\omega_1^2 l$ – центробежная сила, возникающая при повороте головки около оси $z'-z'$. Сила от поворотного ускорения Кориолиса $P = 2m\omega_1 U \sin \beta_1$, где l – расстояние точки A от оси $z'-z'$. Сила Q_1 направлена от оси $z'-z'$ параллельно l ; $U = \omega r$ – относительная скорость, в данном случае равная окружной скорости вращения точки A вокруг оси $X-X$. Направление силы P перпендикулярно относительной скорости U и оси вращения всей системы $z'-z'$. Угол β_1 составлен скоростью U и осью $z'-z'$. Эти силы вызывают осей OX , OY , OZ моменты M_x , M_y , M_z .

Полный момент, ломающий мах у втулки, равен [2]

$$M_z = 2I\omega\omega_1 \sin \omega t, \quad (9)$$

где I – момент инерции крыла относительно оси OX .

Расчетный момент, изгибающий мах (максимальный), когда мах стоит вертикально:

$$M_z = 2I\omega\omega_1. \quad (10)$$

Вал изгибается гироскопическим моментом всего ветроколеса. Он получается суммированием моментов от всех махов (для лопастей трех и больше)

$$M_y = I_0\omega\omega_1, \quad (11)$$

где I_0 – момент инерции всего ветряного колеса относительно оси OX .

Для двухлопастного ветряка

$$M_y = 2I_0\omega\omega_1. \quad (12)$$

Угловую скорость ω находим с помощью равенства $\omega = \pi n/30$, где n – число оборотов ветряного колеса в минуту.

Отметим, что расчет динамического поведения ВЭУ под действием рассмотренных нагрузок должен проводиться с учетом предварительного напряжения их конструкций центробежными силами инерции, которые влияют на их жесткость. Как показано в [5 – 8], из опаснейших видов нагрузок, которые действуют на лопасть, является периодическая гироскопическая сила инерции $dF = 2r\omega\omega_0 \sin \omega t \gamma dr$.

Динамика конструкции опоры ВЭУ. С учетом статических и динамических нагрузок, действующих на ветроэнергетическую установку в процессе ее эксплуатации, спроектирована и рассчитана треножная опора (рис. 1). Она представляет собой двухуровневую конструкцию, набранную из конических труб кругового сечения с конусностью 0,014. В нижнем уровне опоры три конические трубы сходятся под углом 15° по отношению до осевой линии опоры. Наружные диаметры нижних концов труб составляют 693 мм, наружный диаметр верхнего конца трубы в сечении, в котором производится ее косой срез, составляет 357 мм. Толщина нижних труб может составлять 8 мм, 7 мм, 6 мм, 5 мм. Центры нижних сечений труб отстоят от осевой линии опоры на расстоянии 4057 мм. К верхним и нижним концам труб приварены кольцевые оребренные фланцы толщиной 30 мм. В каждом из них имеется по 8 круговых отверстий, через которые проходят болты, связывающие опору с фундаментом на нижнем конце и соединительным фланцем на верхнем конце. С помощью соединительного фланца три трубы нижнего уровня соединяются с одной трубой верхнего уровня. Фланец имеет треугольную форму со скругленными углами, его толщина также равна 30 мм. Высота нижнего уровня до верхней плоскости треугольного соединительного фланца составляет 11651 мм.

Второй уровень конструкции представляет собой одиночную коническую трубу длиной 12000 мм. Толщина этой трубы может составлять 8 мм, 7 мм, 6 мм, 5 мм. При толщине трубы 8 мм наружный диаметр ее нижнего конца равен 974 мм, наружный диаметр верхнего конца составляет 638 мм. При уменьшении толщины этой трубы на 1 мм значения этих диаметров уменьшается приблизительно на 2 мм.

Конструктивное достоинство опоры данного типа заключается в легкости ее сборки из унифицированных трубчатых элементов. Кроме того, благодаря разнесу трех опорных фундаментных точек конструкции, достигается существенное снижение расхода бетона в ее фундаменте. При этом повышается общая устойчивость системы, ее жесткость и прочность с уменьшением расхода металла. В связи с этим конструкции такого вида могут быть использованы в качестве опор ветроэнергетических установок и других опорных систем. Такие конструкции должны быть повышенной прочности и жесткости при меньшем расходе материала и большей высоте конструкции.

Расчеты производились методом конечных элементов при ограничениях по жесткости и прочности согласно нормативной документации. При компьютерном моделировании общее число конечных элементов составило 66759.



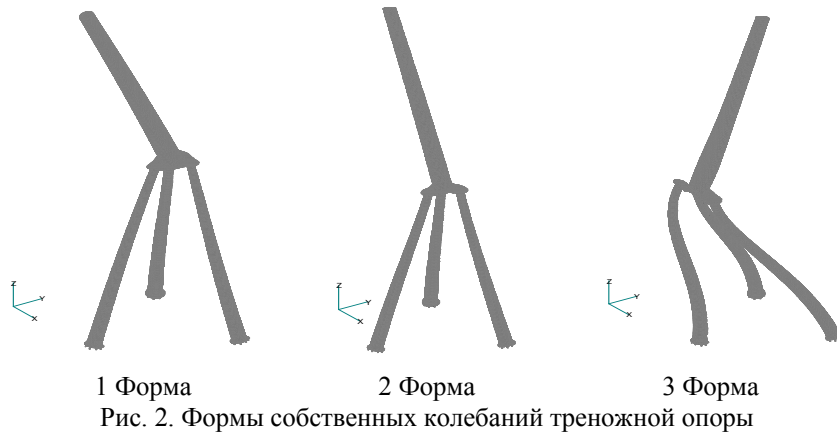
Рис. 1. Конструктивна схема складної треножної опори
(кінечно-елементна модель)

Считалось, що в верхній точці опори діють горизонтальна ($P_{гориз}$) і вертикальна ($P_{верт}$) сили, відношення між якими може складати $P_{гориз}/P_{верт} = 1/1; 2/1; 3/1$. С допомогою таких комбінацій можна моделювати відношення горизонтальної сили вітрового потоку до вертикальним силам тяжесті гондоли і ветроколеса в залежності від вітрових умов в даному регіоні. Крім того, що на кожен елемент конструкції діє вертикальна сила тяжесті власного ваги.

Було прийнято, що горизонтальне переміщення верхнього кінця опори u при самій небагприятній комбінації навантажень не повинно перевищувати $u \leq [u] = L/200$, а максимальне значення $\sigma_{Миз}$, підраховане по критерію Мізеса, не повинно перевищувати допустиме для сталі Ст.3 напруження $[\sigma] = 1,4 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$. Розрахунки свідчать, що другим критерієм виявився переважаючим і при виснаженні міцності конструкція зберігає свою достатньо високу жорсткість, що особливо важливо з точки зору надійного функціонування опори під динамічним впливом вітрових потоків і гіроскопічних сил інерції вращального руху ротора.

Для выбранных конструкций составных опор находились также три первые собственные частоты c_1, c_2, c_3 . Они могут быть использованы для проверки возможности возбуждения резонансных режимов вынужденных колебаний под действием периодических ветровых потоков и сил инерции вращательного движения ротора с неидеальной балансировкой (которая всегда присутствует в реальных системах). В связи с этим подчеркнем, что при проектировании систем ВЭУ следует избегать равенства или близости частот собственных колебаний c_1, c_2, c_3 и угловой скорости вращения ω ротора ветроустановки.

Формы свободных колебаний опоры, соответствующие трем найденным частотам, представлены на рис. 2. Можно видеть, что если двум первым частотам c_1 и c_2 соответствуют преобладающее колебание одной трубы верхнего уровня, то для частоты c_3 колебания опоры происходят с заметным преобладанием изгиба трех труб нижнего уровня.



Выводы

1. В данной работе поставлена и решена задача о динамическом поведении конструкции ВЭУ с учетом силового взаимодействия между его подконструкциями.
2. В связи с тем, что указанные тонкостенные конструкции являются сравнительно высокими и подвержены воздействию сжимающих нагрузок, выполнялась проверка их общей и локальной устойчивости. Расчеты засвидетельствовали, что опоры обладают более чем десятикратным запасом устойчивости, поэтому при их проектировании вопросы проверки устойчивости могут быть опущены.

Работа выполнена в рамках проекта 0109U002146.

Література

- [1] Андрианов В.Н., Быстрицкий Д.Н., Вашкевич К.П., Секторов В.Р. Ветроэнергетические станции – Москва, ГЭИ, 1960. – 323 с.
- [2] Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. – Москва, ОГИЗ, 1948. – 542 с.
- [3] Шефтер Я.И., Рождественский И.В. Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты. – Москва, “КОЛОС”, 1967. – 376 с.
- [4] Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. – Москва, ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 273 с.
- [5] Гуляев В.И., Соловьев И.Л., Худолий С.Н. Прецессионные колебания двухлопастного ротора с упругим невесомым валом при сложном вращении. // Проблемы прочности. – 2002. – №2. – С. 73 – 81.
- [6] Гуляев В.И., Худолий С.Н. Колебания криволинейных закрученных лопастей при сложном вращении. // Прикладная механика. – 2005. – 41, № 4. – С. 126 – 132.
- [7] Гайдайчук В.В., Носенко В.П. Динаміка вітроенергетичних установок під дією вітрових та інерційних навантажень. // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірн.— К.: КНУБА, 2008.— Вип. 82. – С. 31 – 38.
- [8] Гуляев В.И., Гайдайчук В.В., Носенко В.П. Основні проблеми теоретичного моделювання міцності вітроенергетичних установок. // Вісник НТУ, Ч. 1.— К.:НТУ, 2007. – № 15. – С. 367 – 372.

Надійшла до редколегії 28.07.2009