

УДК 539.3

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ЛОПАТЕЙ РОТОРІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Левківська Л.В.

Національний транспортний університет

Розглянуті сучасні конструктивні схеми вітроенергетичних установок. Створено обчислювальний комплекс для наукового моніторингу процесів проектування та функціонування вітроенергетичних установок. Проведено комп'ютерне дослідження явищ аеродинамічної дії потоків повітря на елементи ротора в режимах штатної та позаштатної роботи великопотужних вітроенергетичних установок. Встановлені можливі критичні стани конструкції вітроенергетичних установок, які пов'язані з порушенням їх міцності та виникненням резонансних коливань. Знайдені значення частот і форм власних коливань, які дозволяють контролювати вимушені коливання системи і відслідковувати її резонансні вимушені коливання.

Ключові слова: вітроенергетична установка, лопаті, складне обертання, коливання, резонанс.

Постановка проблеми. Вітроенергетичні установки (ВЕУ) перетворюють кінетичну енергію вітру в механічну або електричну енергію, зручну для практичного використання. Отримана таким чином механічна енергія часто використовується для підйому води у сільських або віддалених місцевостях, а електрична енергія – для побутових чи промислових потреб.

Вітроенергетика визнана у світі найбільш перспективною галуззю альтернативної енергетики. Із нетрадиційних джерел енергії кращі в порівнянні з вітроенергетикою економічні результати можуть забезпечити лише ГЕС середньої та великої потужності, та й то не завжди.

Світовий ринок вітроенергетики постійно розширюється. Уже 86 країн користуються енергією вітру. Серед них з найбільшими потужностями вітроенергетики – Китай, США, Німеччина, Іспанія та Індія. П'ятірка цих країн разом представляє 72% світової потужності вітроенергетики.

Причини позитивного розвитку світових ринків вітроенергетики, безумовно, включають економічні переваги енергії вітру та її зростаючу конкурентоспроможність по відношенню до

інших джерел електроенергії, а також гостру необхідність реалізації технологій без викидів з метою пом'якшення наслідків зміни клімату та забруднення повітря.

Світовий досвід показує, що найефективніше енергія вітру використовується в морських і прибережних районах, а також в гірських і пересічених місцевостях. З цієї точки зору територія України, має відповідні географічні характеристики і значну кількість перспективних для вітроенергетики зон. Найбільший вітровий потенціал мають значні території, прилеглі до Чорного і Азовського морів, а також Карпатський, Західно-Кримський і Східно-Кримський регіони. Крім того, є ділянки з підвищеним вітровим потенціалом в Донбаському регіоні і в Дніпропетровській області. При реалізації проектів з будівництва і введення в експлуатацію ВЕУ на усіх цих територіях, можна було б забезпечити близько 30% покриття потреб України в електроенергії.

Однак через окупацію Криму та розташування деяких вітростанцій на нині невідконтрольній Україні території (Луганська область) чи лінії зіткнення збройних сил України з терористичними

угрупкуваннями (Донецька область), їх проектне будівництво за запуск призупинено на невизначений термін. Тому у 2016 році всіма вітроенергетичними станціями материкової частини України було вироблено лише 1 125,0 млн кВт·год електроенергії, що відповідає приблизно 0,73% від загальної річної генерації електроенергії в країні або 0,8% від загальної встановленої потужності всіх енергогенеруючих об'єктів, розташованих на материковій частині України, а з урахуванням півострова Крим – 0,92%. Однак, експерти Української вітроенергетичної асоціації підраховали, що «зелена» електроенергія, вироблена за рахунок енергії вітру і поставлена в національну електромережу, вже дозволила скоротити викиди CO₂ в атмосферу на більш ніж 1 млн 329 тис тонн і забезпечила в еквіваленті більше 2 800 000 домашніх господарств при середньому їх споживанні 400 кВт·год на місяць або 4 500 000 сімей, що живуть в багатоквартирних будинках з середнім місячним споживанням електроенергії 250 кВт·год.

По призупинення розвитку великих вітроенергетичних проектів, в Україні сьогодні активно реалізуються невеликі проекти, призначені на забезпечення електроенергією домогосподарств та приватних підприємств, що знаходяться далеко від районних центрів і ліній електропередач. Невеликі вітроенергетичні установки (від 200 Вт до 20 кВт) привабливі тим, що їх можна достатньо швидко встановити та вони оптимально підходять там, де немає інших джерел енергії, або коли підключення до існуючих мереж занадто дороге. І що важливо – вітроустановки потужністю до 20 кВт не вимагають ніяких дозвільних документів та ліцензій на застосування.

Перспективність і актуальність створення ВЕУ малої потужності посилюється в Україні у даний час через неякісне і нестабільне енергозабезпечення населення наявним енергокомплексом, особливо у сільській місцевості, а також розвитком дачного будівництва, фермерських господарств і наявністю великої кількості інших дрібних споживачів. Проведені маркетингові дослідження ринку вітроенергетичного обладнання в Україні свідчать, що потенційні споживачі розраховують використовувати вітроустановки для таких основних потреб, як забезпечення живлення виробничого та побутового обладнання електричним струмом, водопостачання, помел зерна та подрібнення кормів, освітлення, нагрівання води та опалення, зарядження акумуляторів, аерація водосховищ та ін. Тому достатньо велика увага нині приділяється розробці різних типів ВЕУ, одним з яких є горизонтально-пропелерна вітроенергетична установка. Характерним режимом її роботи є переорієнтація робочого колеса, що обертається, вздовж напрямку повітряного потоку. При цьому лопаті вітроколеса (ротора) здійснюють складне обертання. Різні динамічні ефекти, що виникають при складному обертанні таких конструкцій, здійснюють суттєвий вплив на забезпечення їх міцності та надійності.

Враховуючи порівняно високу частоту виникнення непередбачених поломок ВЕУ, можна зробити висновок, що проблема теоретичного моделювання коливань лопатей роторів ВЕУ та їх дослідження при складному обертанні є досить актуальною та мало вивченою.

Аналіз основних досліджень і публікацій. В роботі [1] отримано лінійне рівняння махових коливань недеформованої лопаті гвинта при криволінійному русі гелікоптера. Коливання пружної консольної лопаті гвинта в режимі висіння розглянуті в [2]. У роботі [3] досліджуються нелінійні коливання лопатей ротора вітроенергетичних установок, обумовлених дією сил інерції, в [4] проведений розрахунок напружено-деформованого стану лопатей ротора ВЕУ під дією аеродинамічних сил, а в [5] запропоновані заходи для запобігання руйнувань лопатей вітроенергетичних установок від утоми їх матеріалу. Дана стаття присвячена проведенню аналізу динамічної стійкості лопатей роторів ВЕУ при складному обертанні й локальній стійкості стінок лопатей, виконанню розрахунку вільних коливань при їх складному обертанні.

Мета статті полягає у розробці методики теоретичного моделювання коливань лопатей роторів ВЕУ та дослідженні їх при складному обертанні.

Виклад основного матеріалу. Раніше при проектуванні роторів вітроенергетичних установок (в основному це були вітряки) вибиралася різна кількість радіальних лопатей. Однак пізніше були проведені спеціальні аеродинамічні дослідження з визначення оптимального числа лопатей у вітроколесі, а також у пропелерах авіаційних двигунів. В результаті цих досліджень було встановлено, що найбільш ефективним, з точки зору забезпечення найбільшої потужності, яка знімається з вітроколеса, є ротор з трьома лопатями. Було відмічено, що в роторах з великою кількістю лопатей аеродинамічні потоки, що формуються на кожній з них, взаємодіють один з одним і знижують при цьому аеродинамічні сили, що діють на кожну з лопатей.

Проектувалися також (та існують до теперішнього часу) ротори з двома лопатями. Однак, дволопатевої ротори не є динамічно збалансованими при їх складних обертаннях, коли додатково до обертання відносно власної осі ротор починає здійснювати також поворот разом з гондолою відносно вертикальної осі башти. В цьому випадку еліпсоїд інерції ротора перестає бути круговим еліпсоїдом і стає трьохосним. В результаті гіроскопічний момент сил інерції від складного обертання перестає бути стаціонарним і стає періодичним, викликаючи додаткову вібрацію всієї системи відносно горизонтальної осі, яка обертається разом із гондолою.

На відміну від дволопатевого ротора, ротори з великою кількістю лопатей є динамічно збалансованими і при складному обертанні генерують стаціонарний гіроскопічний момент сил інерції, що не викликає коливання всієї системи. Хоча при цьому, звичайно, гіроскопічні моменти, які діють на кожну з лопатей, є періодичними, з періодом, що дорівнює часу одного оберту ротора. У зв'язку з цим в останні роки використовуються вітрові колеса лише з трьома лопатями (рис. 1).

Тонкостінна пустотіла лопать може витримувати значні статичні і динамічні навантаження. У той же час в деяких її найбільш напружених місцях вона може втрачати стійкість і піддаватися локальному випинанню. Для уникнення цього ефекту, всередині лопаті може бути встановлено додаткове поздовжнє підкріплювальне ребро, що знижує ймовірність локальної втрати стійкості.

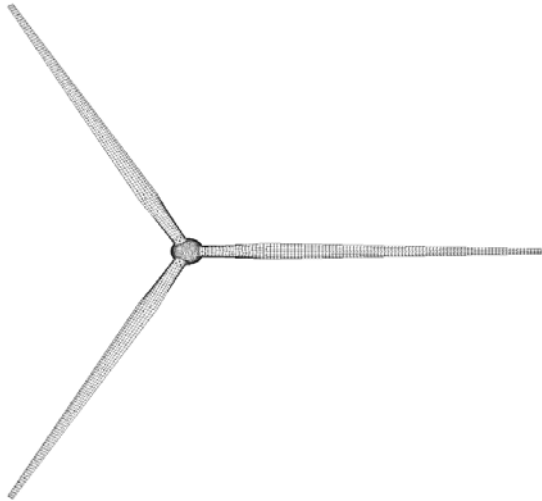


Рис. 1. Конструктивна схема трилопатевого ротора (вигляд вздовж осі обертання)

Своїми кореневими перерізами лопаті прикріплюються до головки центральної втулки, пов'язаної з обертальним валом (рис. 2).

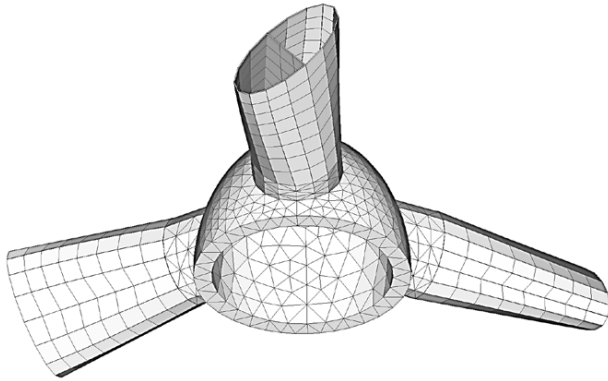


Рис. 2. Схема приєднання лопатей до валу, який обертається

В системі координат $Oxyz$, жорстко зв'язаній з ротором, рух системи радіально приєднаних до валу ротора лопаток має вигляд біжучої хвилі, яка обертається з кутовою швидкістю ω у напрямку, зворотньому напрямку власного обертання. При складному обертанні ротора в лопаті виникають згинні коливання із площини обертання з частотою, рівною ω , а також згинні і поздовжні коливання в площині обертання, що відбуваються з частотою, рівною 2ω . У порівнянні зі згинними амплітуда поздовжніх коливань лопаті мала, тому поздовжнє деформування лопаті можна не розглядати.

Максимальні значення переміщень лопаті із площини обертання досягаються в моменти часу, коли поздовжня вісь лопаті перпендикулярна площині повороту осі обертання. Для згинних коливань в площині обертання прогини максимальні, коли кут між віссю лопаті і площиною повороту осі обертання складає $n\pi/4$, де n – непарне число. Прогини лопаті як у площині, так і з площини обертання дорівнюють нулю в ті моменти, коли вісь лопаті лежить в площині повороту осі обертання ротора.

У розглянутому діапазоні зміни кутової швидкості власного обертання ω , верхня межа якого визначалась умовами міцності лопаті при

дії відцентрового навантаження, було виявлено, що лопаті здійснює згинні коливання в обох напрямках за першою власною формою.

Можливість виникнення при роботі розглянутої системи режиму резонансу безпосередньо пов'язана з визначенням частоти її власних коливань. Найнижча частота власних згинних коливань лопаті, що обертається, з урахуванням впливу на згин відцентрових сил інерції наближено може бути визначена згідно з теоремою Саусвелла за формулою

$$\omega_c^b \approx \sqrt{\omega_c^2 + \omega^2}, \quad (1)$$

де ω_c – перша власна частота згинних коливань стержня, ненапруженого відцентровими силами, ω – кутова швидкість його обертання навколо прямої, що проходить через кінець стержня перпендикулярно до його осі. Як слідує із співвідношення (1), для згинних коливань лопаті із площини обертання Oxy величина ω_c^b виявляється завжди більшою частоти вимушених коливань, рівної ω , що виключає можливість безпосереднього виникнення резонансу на цій частоті. Для руху в площині Oxy частота вимушених коливань дорівнює 2ω . Тому кутову швидкість ω , при якій виникає резонанс, можна визначити із умови

$$\omega_c^b \approx 2\omega \quad (2)$$

Із співвідношень (1) та (2), отримуємо

$$2\omega \approx \sqrt{\omega_c^2 + \omega^2},$$

звідки

$$\omega \approx \omega_c / \sqrt{3}. \quad (3)$$

Таким чином, при кутовій швидкості власного обертання $\omega \approx \omega_c / \sqrt{3}$ для коливань лопаті в площині обертання виникає режим резонансу.

Виконано також спектральний аналіз лопатей ВЕУ в різних станах їх попередніх напружень. Рівняння руху елементів конструкції в цьому аналізі записуються в формі

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0, \quad (4)$$

де $[K]$ і $[M]$ – відповідно матриці жорсткості і мас; $\{u\}$ – вектор динамічних переміщень.

В результаті відповідних підстановок рівняння (4) зведено до задачі на власні значення для системи алгебраїчних рівнянь

$$[K + \lambda_i^2 L]\{\psi_i\} = 0, \quad (5)$$

де $\{\psi_i\}$ – власний вектор (мода коливань), який відповідає власному значенню λ_i (кругова або циклічна частота).

П'ять значень s_i некрратних власних частот для різних діаметрів D ротора наведені в таблиці 1 (для випадку відсутності підкріплюючих ребер в лопатях) і таблиці 2 (для випадків лопатей з підкріплюючими ребрами). Обчислення проведені при різних значеннях кутової швидкості n власного обертання вітроколеса, яка змінювалась від $n = 0$ до $n = 80$ об/хв для колеса з $D = 17$ м і при n , яке змінюється від 0 до 16 об/хв при $D = 100$ м. В таблицях вказані також товщини h лопатей, що змінюються від $h = 3,5$ мм для $D = 17$ м і до $h = 30$ мм для $D = 100$ м.

Аналізуючи отримані результати, можна помітити, що зі збільшенням кутової швидкості обертання n частоти власних коливань зростають. При цьому введення підкріплюючого ребра також приводить до збільшення частот власних коливань, хоча і незначного.

На рис. 3 в аксонометричному зображенні під різними кутами зору показані форми коливань лопатей вітроколеса діаметром $D = 100i$ за першою частотою c_1 . Вони характеризуються не тільки

деформуванням лопатей із площини їх обертання, але також і їх закручуванням.

Рис. 4 демонструє п'ять перших форм власних коливань лопатей вітроколеса.

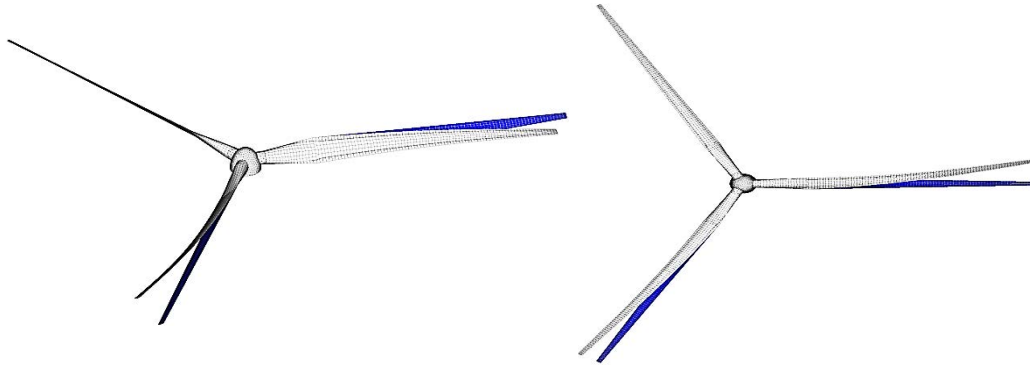


Рис. 3. Форми власних коливань за першою частотою вітроколеса діаметром $D = 100$ м під різними кутами зору

Таблиця 1

**Частоти власних коливань роторів вітроенергетичних установок
(лопаті без підкріплюючого ребра)**

			n (об/хв)	0	20	40	60	80
			1	$D = 17$ м	$h = 3,5$ мм	C_1 (Гц)	3.30600	3.33463
			C_2 (Гц)	13.36339	13.39215	13.47789	13.61904	13.81302
			C_3 (Гц)	17.04261	17.04876	17.06729	17.09845	17.14273
			C_4 (Гц)	32.91411	32.94415	33.03402	33.18304	33.39006
			C_5 (Гц)	60.49743	60.52608	60.61186	60.75433	60.95274
			n (об/хв)	0	7	14	21	28
			2	$D = 51$ м	$h = 10$ мм	C_1 (Гц)	1.10503	1.11555
			C_2 (Гц)	4.47732	4.48805	4.52005	4.57274	4.64517
			C_3 (Гц)	5.99617	5.99827	6.00460	6.01520	6.03017
			C_4 (Гц)	11.02178	11.03292	11.06624	11.12147	11.19815
			C_5 (Гц)	20.30863	20.32349	20.35170	20.40531	20.47993
			n (об/хв)	0	4	8	12	16
			3	$D = 100$ м	$h = 30$ мм	C_1 (Гц)	0.56303	0.56310
			C_2 (Гц)	2.28265	2.28272	2.31002	2.34365	2.38967
			C_3 (Гц)	3.05745	3.05746	3.06285	3.06965	3.07928
			C_4 (Гц)	5.61998	5.62005	5.64847	5.68380	5.73274
			C_5 (Гц)	10.35733	10.35739	10.38490	10.41918	10.46682

Таблиця 2

**Частоти власних коливань роторів вітроенергетичних установок
(лопаті з підкріплюючим ребром)**

			n (об/хв)	0	20	40	60	80
			1	$D = 17$ м	$h = 3,5$ мм	C_1 (Гц)	3.47359	3.50032
			C_2 (Гц)	13.77473	13.79860	13.86978	13.98695	14.14789
			C_3 (Гц)	16.65069	16.65706	16.67630	16.70885	16.75552
			C_4 (Гц)	33.70035	33.72544	33.80061	33.92548	34.09944
			C_5 (Гц)	61.89833	61.92293	61.99664	62.11923	62.29026
			n (об/хв)	0	7	14	21	28
			2	$D = 51$ м	$h = 10$ мм	C_1 (Гц)	1.15718	1.16963
			C_2 (Гц)	4.60639	4.62748	4.65445	4.69892	4.76016
			C_3 (Гц)	5.84105	5.85074	5.85692	5.86731	5.88208
			C_4 (Гц)	11.24735	11.28692	11.31463	11.36064	11.42473
			C_5 (Гц)	20.69709	20.76104	20.78841	20.83392	20.89742
			n (об/хв)	0	4	8	12	16
			3	$D = 100$ м	$h = 30$ мм	C_1 (Гц)	0.59120	0.59127
			C_2 (Гц)	2.35471	2.35477	2.37775	2.40611	2.44500
			C_3 (Гц)	2.98233	2.98235	2.98761	2.99429	3.00383
			C_4 (Гц)	5.74976	5.74982	5.77342	5.80286	5.84379
			C_5 (Гц)	10.58169	10.58175	10.60506	10.63419	10.67479

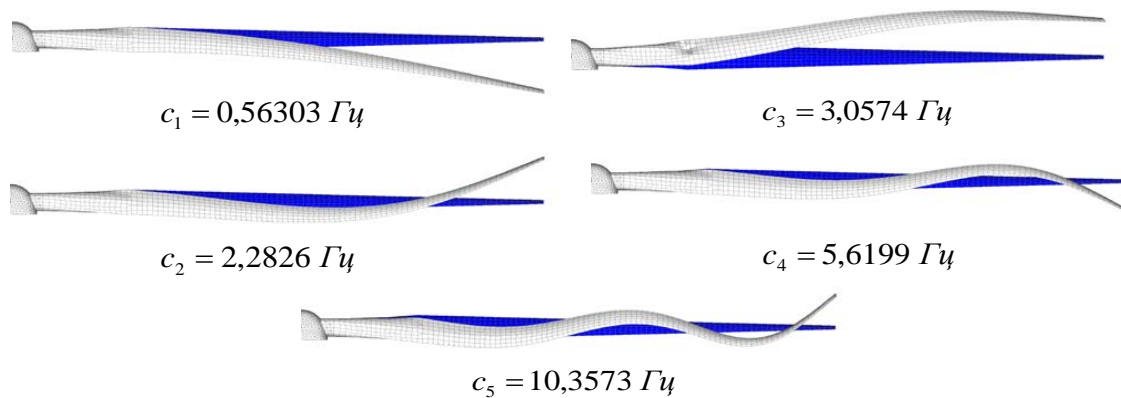


Рис. 4. Форми власних коливань за частотами c_1, \dots, c_5 лопаті вітроколеса діаметром $D = 100$ м

Як видно, зі збільшенням номеру c_i на формі коливань з'являються вузлові точки, число яких збільшується зі зростанням c_i , і, крім того, лопать набуває додаткового закручування. Знайдені значення частот і форм власних коливань дозволяють контролювати вимушені коливання системи і відслідковувати її резонансні вимушені коливання.

Висновки та пропозиції. Встановлено, що Україна характеризується досить високими енергетичними потенціалами вітрового потоку, а це ставить вітрову енергію на перше місце серед поновлюваних джерел для виробництва електричної енергії. Розглянуті сучасні конструктивні схеми вітроенергетичних установок і виявлено, що ротори з великою кількістю лопатей є динамічно збалансованими і при складному

обертанні генерують стаціонарний гіроскопічний момент сил інерції, що не викликає коливання всієї системи. Створено обчислювальний комплекс для наукового моніторингу процесів проектування та функціонування вітроенергетичних установок. Проведено комп'ютерне дослідження явищ аеродинамічної дії потоків повітря на елементи ротора в режимах штатної та позаштатної роботи великопотужних ВЕУ. Встановлені можливі критичні стани конструкції вітроенергетичних установок, які пов'язані з порушенням їх міцності та виникненням резонансних коливань. Знайдені значення частот і форм власних коливань, які дозволяють контролювати вимушені коливання системи і відслідковувати її резонансні вимушені коливання.

Список літератури:

1. Миль М.Л. и др. Вертолеты (расчет и проектирование). Кн. 4. Колебания и динамическая прочность. – М.: Машиностроение, 1966. – 456 с.
2. Hodges D.H., Ormiston R.A. Stability of Elastic Bending and Torsion of Uniform Cantilever Rotor Blades in Hover. AIAA, Paper № 73 – 405, March. 1973.
3. Гуляев В.И., Гловач Л.В. Динамічні процеси в лопатях вітроенергетичних установок // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – 2011. – № 8. – С. 23-31.
4. Левківська Л.В. Напружено-деформований стан лопатей вітроенергетичних установок під дією аеродинамічних сил // Вісник Національного транспортного університету. – 2011. – № 24. – С. 312-315.
5. Гайдайчук В.В., Левківська Л.В. Малоциклова утома матеріалу лопатей роторів вітроенергетичних установок Вісник одеської державної академії будівництва та архітектури Випуск 61, 2016. – С. 66-71.

Левковская Л.В.

Национальный транспортный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАСТЕЙ РОТОРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Аннотация

Рассмотрены современные конструктивные схемы ветроэнергетических установок. Создан вычислительный комплекс для научного мониторинга процессов проектирования и функционирования ветроэнергетических установок. Проведено компьютерное исследование явлений аэродинамического действия потоков воздуха на элементы ротора в режимах штатной и нештатной работы ветроэнергетических установок большой мощности. Установлены возможные критические состояния конструкции ветроэнергетических установок, связанных с нарушением их прочности и возникновением резонансных колебаний. Найдены значения частот и форм собственных колебаний, которые позволяют контролировать вынужденные колебания системы и отслеживать ее резонансные вынужденные колебания.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, лопасти, сложное вращение, колебания, резонанс.

Levkivska L.V.

National Transport University

INVESTIGATION OF WIND POWER STATION ROTOR BLADE VIBRATIONS

Summary

Modern design schemes of wind power station are considered. The computer complex has been created for scientific design and operation monitoring of wind power stations. Computer study aerodynamic air flows actions phenomena on the rotor elements in regular and abnormal wind power stations operation modes of high power has been carried out. The possible critical conditions for the design of wind power stations, associated with a violation of their strength and the occurrence of resonance vibrations, are established. The values of frequencies and forms of natural vibrations are found that allow one to control the forced vibrations of the system and track its resonant forced vibrations.

Keywords: wind power station, blades, complex rotation, vibrations, resonance.