

УДК 621.548

В.М. Корендій

Національний університет "Львівська політехніка"

МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ТИХОХІДНОГО ВІТРОКОЛЕСА

Проаналізовано гравітаційні та інерційні навантаження, що діють на лопаті вітроустановки, та подано комп'ютерний проект удосконаленого механізму повороту лопатей навколо власних осей, який використовується з метою стабілізації кутової швидкості тихохідного вітроколеса. У математичному описі навантажень враховано можливість неусталеного складного руху елементарних ділянок лопатей – обертання навколо трьох осей – башти (при орієнтації за напрямком вітру), вітроколеса (внаслідок взаємодії з повітряним потоком), лопатей (при зміні швидкості вітру з метою стабілізації частоти обертання вітроколеса).

Ключові слова: моделювання навантажень, тихохідне вітроколесо, складний рух лопатей, гравітаційні та інерційні навантаження, механізм стабілізації кутової швидкості.

Постановка проблеми. Сучасна вітроенергетика є однією з галузей енергетики, які найбільш динамічно розвиваються. За період із 2001 р. до 2010 р. сумарна потужність усіх вітроелектричних станцій у світі збільшилася приблизно у 8,5 разів [1]. При цьому зростає не тільки кількість вітростанцій, але й встановлена потужність одиничних вітроустановок.

Первинним силовим вузлом вітроенергетичної установки є вітроколесо. Найбільш важливою енергетичною характеристикою вітроколеса є механічна потужність. Під механічною потужністю вітроколеса, яке обертається з певною кутовою швидкістю, розуміють потужність, що відбирається з вітрового потоку і перетворюється у механічний момент обертання. На механічну потужність вітроколеса впливають аеродинамічний момент, який виникає при обтіканні лопатей вітровим потоком, та момент втрат. Для забезпечення контролю та регулювання механічної потужності вітроколеса найбільш широко у світовій практиці будівництва вітроустановок застосовують активне регулювання шляхом повороту лопатей навколо власних осей. У вітроустановках мегаватного класу для зміни кута атаки лопатей здебільшого застосовують електричні мотор-редуктори або гідравлічні сервоприводи. Що ж стосується тихохідних вітроколес малої та надмалої потужності, то у них переважають механічні відцентрові або пружинні регулятори положення лопатей відносно напрямку набігання повітряного потоку.

Лопаті вітроустановок постійно сприймають, перетворюють і передають динамічні навантаження, які за своїм походженням можуть бути аеродинамічними, гравітаційними або інерційними. Незалежно від їх джерела динамічні навантаження на лопаті впливають на масу і вартість майже усіх елементів конструкції. Тому важливо розробляти та удосконалювати методи розрахунку і керування динамічними навантаженнями, які діють на вітроустановку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізу динаміки вітроустановок присвячено досить багато публікацій [1-5]. Наявні на сьогоднішній день дослідження обмежуються моделюванням рухів лопатей навколо однієї або двох осей – башти і вітроколеса. При цьому нехтується можливістю повороту лопатей навколо власних осей, який має місце при використанні механізмів стабілізації кутової швидкості вітроколеса. Також на даний час недостатньо вивчено перехідні (неусталені) режими складного руху вітроколеса, коли, окрім відцентрових та коріюлісових сил інерції, на елементарні ділянки лопатей діють дотичні інерційні навантаження внаслідок обертання гондоли, вітроколеса і лопатей.

Що ж стосується механізмів стабілізації кутової швидкості вітроколес, то їх розробками займаються значна кількість наукових та дослідних установ, а їх аналізу та вдосконаленню присвячено численні публікації. У роботі [6] на основі аналізу інерційних та гравітаційних навантажень тихохідного вітроколеса з використанням принципів класичної механіки (принцип Д'Аламбера, теорема Коріюліса, теорема про зміну кількості руху тощо) розроблено математичну модель динаміки тихохідного вітроколеса, яка дозволяє визначати сумарні еквівалентні навантаження на елементарні ділянки лопатей при їх одночасному, неусталеному обертанні навколо трьох осей – башти, лопаті і вітроколеса, тобто при використанні механізму стабілізації. У патенті [7] описується будова і принцип роботи вітроенергетичної установки, у якій відцентровий механізм регулювання повороту лопатей складається із пружини, системи кривошипно-шатунних

механізмів і вантажів, які закріплені на певній відстані від осі вітроколеса з метою створення відцентрової сили. У роботі [8] запропоновано механізм з електричним приводом регулювання повороту лопатей навколо власних осей, який складається з електромагнітів і черв'ячного редуктора. Даний механізм забезпечує безконтактну передачу зусилля від статора на лопать через повітряний проміжок, що дозволяє збільшити надійність та довговічність його використання. У патенті [9] механізм повороту лопатей також складається із електромагнітів і черв'ячної передачі, однак у ньому застосовано гнучку оболонку з метою підвищення точності повороту лопатей. У патенті [10] запропоновано механізм повороту лопатей, що здійснюється з допомогою конічної передачі, системи важелів і вантажів, які призначені для перетворення повороту вала вітроколеса в поворот лопаті через саморегулюючу муфту.

Проаналізувавши існуючі на сьогоднішній день дослідження і публікації, в яких описуються механізми стабілізації кутової швидкості вітроколеса, можна зробити висновок, що проблема удосконалення механічних систем повороту лопатей навколо власних осей для тихохідних вітроколес є досить актуальною на даний час, оскільки більшість із сучасних механізмів стабілізації використовують електричні приводи з мікропроцесорним регулюванням або можуть застосовуватися лише для ВУ із швидкохідними горизонтально-осьовими вітроколесами.

Формулювання цілі статті. Метою даної роботи є комп'ютерне проектування удосконаленого механізму повороту лопатей навколо власних осей та аналіз гравітаційних й інерційних навантажень лопатей тихохідного вітроколеса при використанні вказаного механізму. При цьому конструкцією вітроустановки передбачена можливість обертання лопатей одночасно навколо трьох осей: навколо осі башти (при орієнтації ВУ за напрямком вітру); навколо осі вітроколеса (внаслідок взаємодії з повітряним потоком); навколо власної осі (при зміні швидкості вітру з метою стабілізації частоти обертання вітроколеса).

Виклад основного матеріалу. Прикладний характер дослідження.

Запобіжні пристрої вітроустановок призначені для обмеження інерційних сил і моментів, а також сил лобового тиску, що діють на лопаті, стабілізації частоти обертання вітроколеса з метою отримання якісної електроенергії, коли в якості навантаження використовується електрогенератор. У сучасній вітротехніці застосовують два основних методи контролю за навантаженнями лопатей вітроколеса: пасивне регулювання, коли лопаті конструктивно зафіксовані, та активне регулювання, коли лопаті мають можливість змінювати кут атаки. Найбільше розповсюдження на даний час мають механізми регулювання кутової швидкості вітроколеса за допомогою повороту лопатей навколо власних осей. У вітроустановках малої та надмалої потужності поворот лопатей здебільшого здійснюється механічними відцентровими або пружинними регуляторами.

Потужність, яка відбирається з повітряного потоку, також можна регулювати за допомогою механічного пружинного регулятора, що змінює кут атаки лопатей відносно напрямку вітру. Такий спосіб регулювання має аеродинамічну природу, тобто здійснюється виключно за рахунок зміни аеродинамічних властивостей лопатей вітроколеса. Спроекований на кафедрі механіки та автоматизації машинобудування НУ «Львівська політехніка» механізм керування поворотом лопатей зображений на схемах а) і б) рис. 1. Зміна кута атаки лопаті здійснюється за допомогою плоскої спіральної пружини і конічної зубчастої передачі.

До маточини 1 вітроколеса за допомогою гвинтів 2 кріпиться стакан 3. Вісь 7 лопаті 6 запресована у підшипники, які встановлено у стакані 3. Маточина представляє собою збірну конструкцію, яка складається із частин, що з'єднуються за допомогою кутників 12. На одному кінці кутники мають поздовжній паз призначений для центрування внутрішньої і зовнішньої частин маточини. Вітроколесо обертається на валу 8. На кінці кожної лопаті закріплені конічні шестерні 9, а валу вітроколеса встановлено підшипник 11, на якому зафіксовано зубчасте колесо 10. Між зовнішнім кільцем підшипника і конічним колесом запресована втулка 13, до якої жорстко кріпиться одним кінцем пружина 5. Другий кінець пружини 5 фіксується на валу 8 вітроколеса. Пружина у вільному стані забезпечує оптимальний кут атаки лопаті в межах 54° відносно площини обертання вітроколеса, значення якого визначене із умови максимального відбору потужності з потоків повітря [11]. Весь механізм із сторони дії повітряного потоку закритий аеродинамічним ковпаком 14, який кріпиться до маточини вітроколеса за допомогою приварених пластин, що підтискаються гвинтами до стаканів і призначений для зменшення втрат потоку у центральній частині вітроколеса. Профіль аеродинамічного ковпака спрямовує повітряні потоки на лопаті, підвищуючи коефіцієнт корисної дії установки.

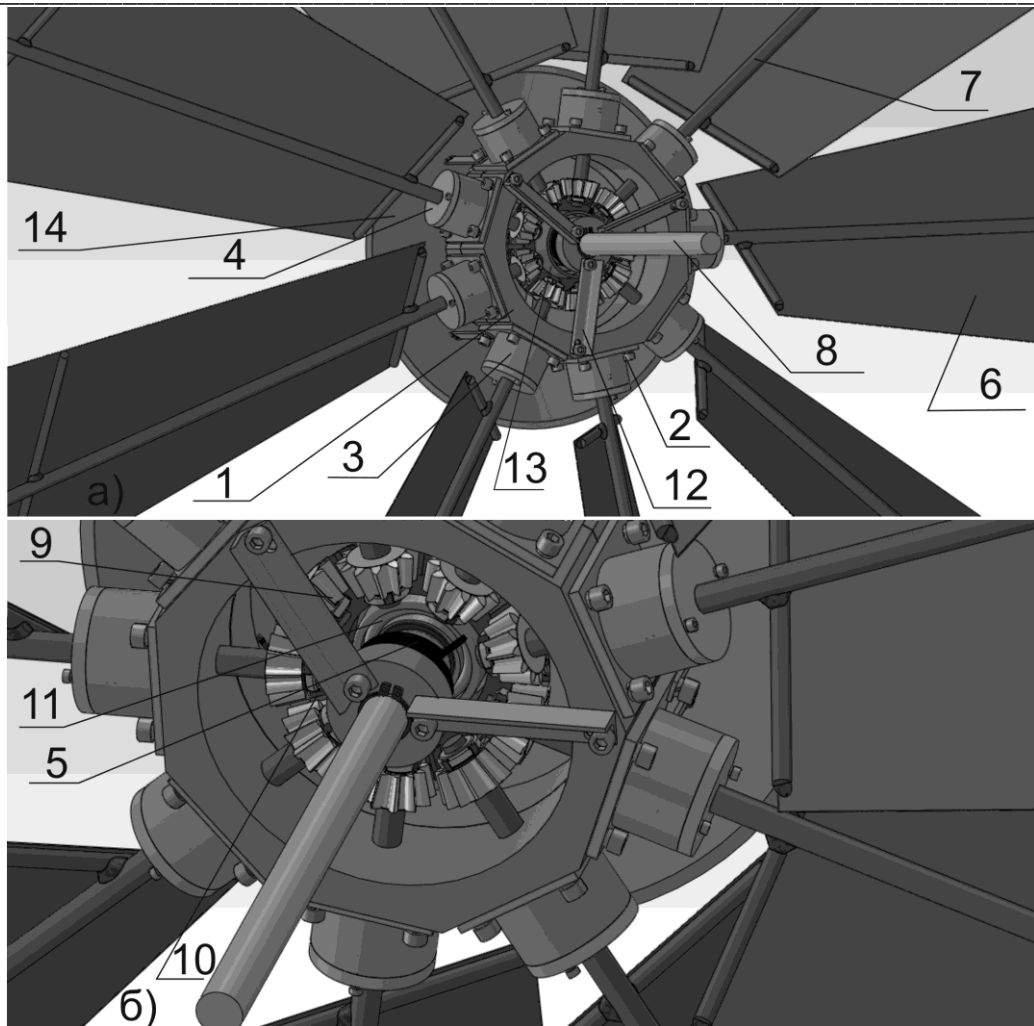


Рис. 1. Механізм регулювання повороту лопатей навколо власних осей

Запропонований механізм працює наступним чином. При зміні швидкості вітрового потоку змінюється сила лобового тиску, що призводить до повороту лопаті навколо власної осі. При цьому рух лопаті через конічні шестерні передається на колесо і, таким чином, при збільшенні швидкості вітру понад розрахункове значення пружина закручується, та, відповідно, при зменшенні – повертається у вихідне положення. Таким чином, під час поривів вітру зменшується площа лопаті, яка охоплюється повітряним потоком, зрівноважуючи тиск потоку повітря та зменшуючи відбір потужності з нього, тобто кутова швидкість обертання вала вітроколеса залишається сталою. Спроекований механізм забезпечує автономне керування кутом атаки лопатей у залежності від інтенсивності та напрямку повітряних потоків, стабілізацію частоти обертання вітроколеса, регулювання відбору потужності та збільшення терміну експлуатації ВУ. Такі механізми доцільно застосовувати у тихохідних вітроустановках малої і надмалої потужності.

Теоретичний аспект дослідження. Навантаження, які діють на елементи вітроустановки, поділяються на [1]: 1) гравітаційні й інерційні навантаження – статичні та динамічні навантаження, які діють на елементи вітроустановки і виникають в результаті дії сили тяжіння, обертання і вібрацій, а також сейсмічної активності земної кори; 2) аеродинамічні навантаження – статичні та динамічні навантаження, які виникають при обтіканні вітровим потоком рухомих і нерухомих частин конструкції вітроустановки. Вони залежать від частоти обертання вітроколеса, середньої швидкості й турбулентності вітрового потоку, аеродинамічних і аеропружних властивостей поверхонь елементів вітроустановки; 3) експлуатаційні навантаження, які діють на вітроустановку в процесі її роботи і виникають внаслідок керуючих впливів на елементи вітроустановки. До них можна віднести навантаження, які виникають у процесі регулювання частоти обертання вітроколеса шляхом повороту лопатей навколо власних осей або при увімкненні аеродинамічного гальма тощо; 4) інші навантаження, які можуть виникати протягом «життєвого» циклу вітроустановки і пов'язані з природно-кліматичними умовами, транспортуванням, встановленням, монтажем, обслуговуванням та ремонтом вітроустановки.

Кінематична схема вітроустановки при використанні механізму повороту лопатей навколо власних осей зображена на рис. 2. На схемі додатково подано напрямки гравітаційних та інерційних навантажень, які діють на елементарну ділянку лопаті та виникають при одночасному обертанні, відповідно, гондоли навколо осі башти і вітроколеса, гондоли навколо осі башти і лопаті навколо власної осі, вітроколеса і лопаті навколо власної осі. Закони руху гондоли, вітроколеса і лопаті, відповідно, описуються рівняннями: $\varphi = \varphi(t)$, $\psi = \psi(t)$, $\theta = \theta(t)$. Прийmemo інерційну систему координат $Ox\psi z$, вісь Oz якої співпадає з віссю башти, а осі Ox та Oy утворюють горизонтальну площину, в якій обертається гондола.

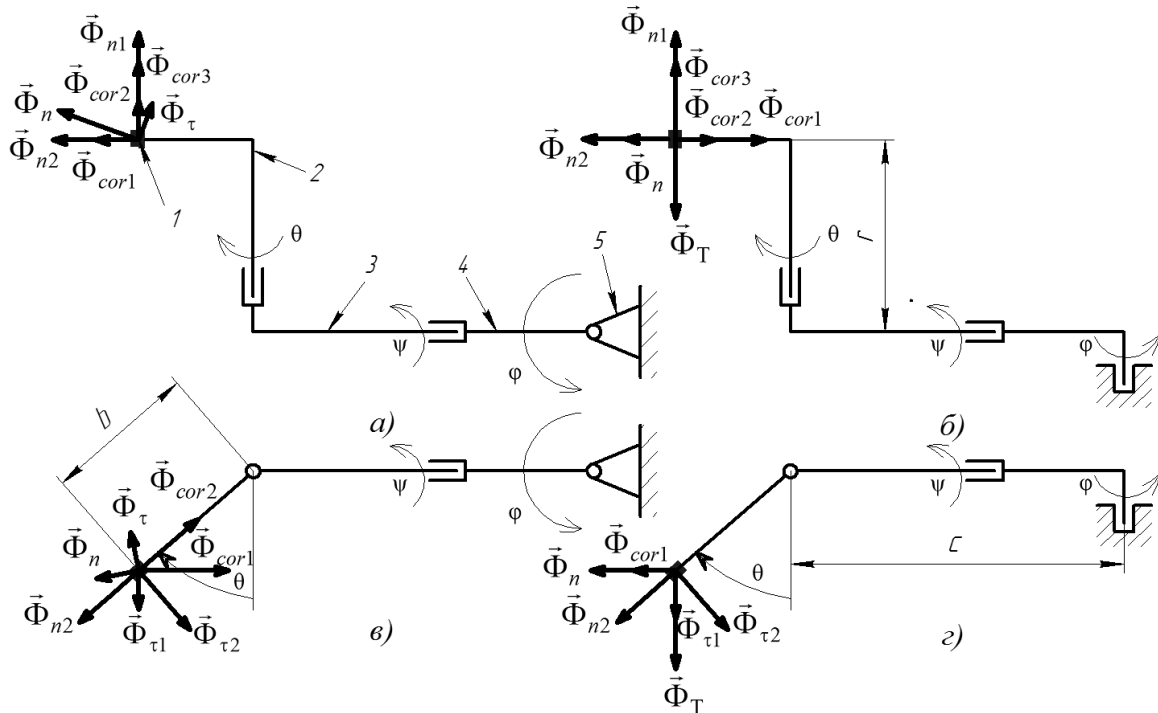


Рис. 2. Кінематична схема вітроколеса при використанні механізму повороту лопатей: 1 – центр ваги півлопаті, 2 – вісь лопаті, 3 – вісь вітроколеса, 4 – вісь гондоли, 5 – башта (фундамент)

На рис. 2 подані наступні сили: нормальні та дотичні інерційні навантаження при обертанні, відповідно, гондоли (Φ_n, Φ_τ), вітроколеса ($\Phi_{n1}, \Phi_{\tau1}$), лопаті ($\Phi_{n2}, \Phi_{\tau2}$); коріолісові сили інерції при одночасному обертанні: гондоли і вітроколеса (Φ_{cor1}), гондоли і лопаті (Φ_{cor2}), вітроколеса і лопаті (Φ_{cor3}); сила ваги півлопаті (Φ_T).

Інерційні та гравітаційні зусилля, які діють на лопаті вітроустановки були детально розглянуті в роботі [6]. Подамо лише кінцеві аналітичні вирази для їх визначення. Сумарне інерційне навантаження на центр мас півлопаті при обертанні гондоли навколо осі башти (при встановленні вітроколеса за напрямком вітрового потоку):

$$\Phi = m \cdot \sqrt{r^2 + b \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \psi + c \pm b \sin^2 \theta} \cdot \sqrt{d^2 \varphi / dt^2 + d\varphi / dt}^2, \quad (1)$$

де m – маса півлопаті, r – радіус лопаті, на якому розміщений її центр мас, b – відстань від осі лопаті до центра мас півлопаті, c – відстань від осі башти до осі лопаті.

Сумарне інерційне навантаження на центр мас півлопаті при обертанні вітроколеса навколо власної осі (внаслідок взаємодії з повітряним потоком):

$$\Phi_1 = m \cdot \sqrt{r^2 + b \cos^2 \theta} \cdot \sqrt{d^2 \psi / dt^2 + d\psi / dt}^2. \quad (2)$$

Сумарне інерційне навантаження на центр мас півлопаті при обертанні лопаті навколо власної осі (з метою регулювання кута атаки лопатей і стабілізації частоти обертання вітроколеса):

$$\Phi_2 = m \cdot b \cdot \sqrt{d^2 \theta / dt^2 + d\theta / dt}^2. \quad (3)$$

Сумарна гравітаційна сила, яка діє на центр мас півлопаті:

$$\Phi_T = m \cdot g, \quad (4)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – пришвидшення вільного падіння.

Вплив коріолісових сил інерції, які діють на центр мас півлопати в результаті одночасного обертання: 1) гондоли і вітроколеса (Φ_{cor1}); 2) гондоли і лопаті (Φ_{cor2}); 3) вітроколеса і лопаті (Φ_{cor3}), описується наступними аналітичними залежностями:

$$\begin{aligned} \Phi_{cor1} &= 2 \cdot m \cdot \sqrt{r^2 + b \cos^2 \theta} \cdot |d\varphi/dt \cdot d\psi/dt \cdot \cos \psi|; \\ \Phi_{cor2} &= 2 \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{\cos^2 \psi + \cos^2 \theta - \cos^2 \psi \cdot \cos^2 \theta} \cdot |d\varphi/dt \cdot d\theta/dt|; \\ \Phi_{cor3} &= 2 \cdot m \cdot b \cdot d\psi/dt \cdot d\theta/dt \cdot \sin \theta. \end{aligned} \quad (5)$$

Висновки. Проектування вітроустановок пов'язане з необхідністю розв'язання широкого спектру завдань із різноманітних областей техніки – матеріалознавства, машинобудування, електротехніки, електроніки, механіки тощо. Для отримання механічної енергії, наприклад, при підйомі води із свердловини, зрошуванні полів тощо, здебільшого застосовуються тихохідні багатолопатеві вітроустановки, які здатні розвинути максимально можливі крутні моменти на валу вітроколеса. Однак, на даному етапі розвитку вітротехніки у нашій країні такі установки розвиваються і проектується суто на аматорському рівні. Тому й виникає необхідність модернізації конструкції та удосконалення методик розрахунку динамічних навантажень механізмів і систем тихохідних вітроустановок з метою уточнення їх математичних моделей.

У даній роботі подано один із варіантів конструкції тихохідного дев'ятилопатевого вітроколеса, спроектованого на кафедрі механіки та автоматизації машинобудування Національного університету «Львівська політехніка», в якому забезпечено можливість аеродинамічного регулювання частоти обертання за допомогою механізму повороту лопатей навколо власних осей. Також подано аналітичні вирази для визначення сумарних інерційних та гравітаційних навантажень, а також коріолісових сил, які діють на центр мас півлопати в результаті одночасного обертання: 1) гондоли і вітроколеса; 2) гондоли і лопаті; 3) вітроколеса і лопаті. Ці навантаження необхідно враховувати при розрахунку елементів та систем вітроустановки поряд із аеродинамічними, експлуатаційними та іншими навантаженнями.

У подальших етапах дослідження планується зосереджувати увагу на процесах комп'ютерного моделювання роботи конкретних систем і елементів ВЕУ (руху лопатей, обертання вітроколеса, повороту гондоли за напрямком потоку повітря тощо), а також створювати експериментальні стенди для імітації режимів функціонування цих систем і елементів.

1. Елистратов, В.В. Проектирование и эксплуатация установок нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ветроэлектрические установки: учебное пособие / В.В. Елистратов, А.А. Панфилов. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2011. – 115 с.
2. Гайдайчук, В.В. Аналіз динаміки вітроенергетичних установок за інтегрованими розрахунковими схемами / В.В. Гайдайчук, В.Г. Дегтярь, В.П. Носенко // Збірник наукових праць Національного транспортного університету. – 2009. – № 19, ч. 2. – С. 212-216.
3. Гайдайчук, В.В. Динаміка вітроенергетичних установок під дією вітрових та інерційних навантажень / В.В. Гайдайчук, В.П. Носенко // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2008. – № 82. – С. 31-38.
4. Гвоздева, И.М. Моделирование динамики ветроэнергетической установки большой мощности / И.М. Гвоздева, В.Ф. Миргород, О.В. Глазева // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2010. – № 1 (77). – С. 53-57.
5. Голубенко, Н.С. Исследование нагрузок на лопасть турбины электрической ветряной турбогенераторной установки / Н.С. Голубенко, А.С. Белогуров, С.А. Белогуров, А.А. Яцура // Вісник інженерної академії України. – 2008. – № 3-4. – С. 186-191.
6. Кузьо, І.В. Математичне моделювання динаміки тихохідного вітроколеса / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – 2011. – № 32. – С. 115-123.
7. Пат. Российская Федерация, МПК 2205292 С1, 7F03D1/00. Ветроэнергетическая установка / Околов А.В., Авраменко С.А., заявитель и патентообладатель ЗАО "ЭлектроСпецКомплект". – № 2001130429/06; заявл. 02.11.01; опубл. 27.05.2003.
8. Пат. Российская Федерация, МПК В64С11/00, F03D7/00. Регулируемый воздушный винт / Литвиненко А.М., Свистунов А.А., заявитель и патентообладатель Воронежский

- государственный технический университет. – № 2008138336/11; заявл. 25.09.08; опубл. 20.02.2010.
9. Пат. Российская Федерация, МПК F03D7/02, Ветроколесо / Литвиненко А.М., заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. – № 2008144595/06, заявл. 11.11.2008; опубл. 27.05.2010.
10. Пат. Российская Федерация, МПК 2220321 С1, 7F03D7/04, Центробежный регулятор угла поворота лопастей ветроэнергетической установки / Веремеенко А.Е., Дмитриев В.С., Нырковский В.И., Обрезчиков В.В., Платонов Е.Н., Трусков В.Н., Фридман Б.М., Хайкин Р.Ш., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Государственное машиностроительное конструкторское бюро "Радуга" им. А.Я.Березняка". – № 2002115707/06, заявл. 14.06.2002; опубл. 27.12.2003.
11. Кузьо І.В. Оптимізація геометрії лопатей тихохідного вітроколеса з метою максимізації відбору потужності з потоків повітря / І.В. Кузьо, В.М. Корендій, Прокопеч Н.І. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – №702. – С. 59-68.

Рецензенти:

- 1) доктор технічних наук, професор Мартинців Михайло Павлович, професор кафедри «Прикладна механіка» Національного лісотехнічного університету України (м. Львів);
- 2) кандидат технічних наук, доцент Боровець Володимир Михайлович, заступник завідувача кафедри «Механіка та автоматизація машинобудування» Національного університету «Львівська політехніка».