

В. М. Корендій*, **Ю. О. Білецький****, **П. Р. Дмитерко*****, **Ю. В. Фурдас******
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 *кафедра механіки та автоматизації машинобудування,
 **кафедра електроприводу і комп’ютеризованих електромеханічних систем,
 ***кафедра технології машинобудування,
 ****кафедра теплогазопостачання та вентиляції

ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗВИТКУ ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЬОВИХ ВІТРОУСТАНОВОК З ЛОПАТЯМИ ВІТРИЛЬНОГО ТИПУ

© Корендій В. М., Білецький Ю. О., Дмитерко П. Р., Фурдас Ю. В., 2016

Обґрунтована доцільність подальшого розвитку горизонтально-осьових вітроустановок з лопатями вітрильного типу. Проведено аналіз їх конструктивних особливостей та визначено шляхи їх удосконалення та підвищення експлуатаційної ефективності. Розглянуто конструктивні та функціональні особливості окремих елементів і систем горизонтально-осьової вітроустановки. Проаналізовано системи орієнтації, регулювання потужності та протиштормового захисту вітроустановок з лопатями вітрильного типу. Обґрунтовано шляхи подальших науково-прикладних досліджень за цією тематикою.

Ключові слова: горизонтально-осьова вітроустановка, лопаті вітрильного типу, механізм регулювання потужності, система орієнтації, протиштормовий захист.

The expediency of the further development of horizontal-axis wind turbines with blades of sail type is substantiated in the article. The analysis of design features is conducted and the ways of their improvement and increasing of operational efficiency are defined. Structural and functional features of separate elements and systems of horizontal-axis wind turbine are considered. The systems of orientation, power control and anti-storm protection of wind turbines with blades of sail type are analyzed. The ways of further scientific and applied research on the presented subject are substantiated.

Key words: horizontal-axis wind turbine, blades of sail type, mechanism of power control, system of orientation, anti-storm protection.

Вступ. Ефективність перетворювання енергії повітряних потоків в інші види енергії (електричну, механічну, теплову тощо) значною мірою залежить від типу вітроустановки. Традиційно за розміщенням осі обертання вітроколеса розрізняють горизонтально- й вертикально-осьові вітроустановки; за кількістю лопатей – одно-, дво-, три- та багатолопатеві установки; за типом матеріалу, із якого виготовляються лопаті, – із жорсткими і вітрильними лопатями тощо.

Горизонтально-осьові вітроустановки із жорсткими лопатями переважно виконують одно-, дво- або трилопатеви (рис. 1, а). Як показують численні теоретичні й експериментальні дослідження, вони мають високу інерційність і низьку парусність та не можуть самозапускатися за невеликих швидкостей вітру (до 10 м/с), а тому потребують додаткових систем запуску й розгону вітроколеса [1; 2]. Розподіл тиску повітряного потоку на жорсткі лопаті є нерівномірним: більша частина повітряного потоку взаємодіє з центральною частиною лопаті, колова швидкість якої набагато нижча, ніж у периферійних областях. Це зумовлює необхідність збільшувати розмах лопатей до 10 м і більше з метою підвищення коефіцієнта використання енергії вітру. Ще одним недоліком “малолопатевих” швидкохідних вітроустановок є значні колові швидкості зовнішніх перерізів лопаті, які зумовлюють виникнення інфразвуків, вібрацій та небезпеки для птахів [1, 2]. Низька парусність таких вітроустановок також зумовлює необхідність використання додаткових

систем орієнтації вітроколеса за напрямком вітру: пасивних (з використанням хвостових стабілізаторів (рис. 3, б) або активних (із залученням механічного, електричного чи іншого приводу (рис. 3, а).



Рис. 1. Горизонтально-осьові вітроустановки з жорсткими (а) та вітрільними (б) лопатями

Вітроустановки з гнучкими лопатями розробляються у двох варіантах: з круговими вітрільними лопатями та з круговим вітрільним колесом. Найпоширенішими є установки, в яких використовуються вітрільні лопаті трикутної форми (рис. 1, б), які підбирають індивідуально залежно від розподілу швидкостей вітру у конкретній місцевості. Завдяки гнучкості матеріалу лопаті повітряний потік під час набігання на поверхню вітрила відхиляє його на певний кут і передає свою кінематичну енергію лопаті. Внаслідок таких особливостей вітрільна вітроустановка починає виконувати корисну роботу уже за швидкостей вітру 5 м/с, що вдвічі менше, ніж для вітроустановок із жорсткими лопатями [1; 2]. Більше того, вона генерує менше шуму і вібрацій, працює за нижчих кутових швидкостей, що зумовлює підвищення безпеки експлуатації та обслуговування. Висока парусність лопатей дає змогу спростити систему орієнтації вітроколеса за напрямком вітру через його встановлення за баштою (“downwind”) (рис. 3, в).

Постановка проблеми. Понад 90 % сучасних вітроустановок побудовані на основі горизонтально-осьової схеми з двома або трьома жорсткими лопатями [1]. Більшість із них орієнтовані на виробництво електроенергії номінальною потужністю понад 100 кВт та передачу її у загальну мережу. Автономні (немережеві) вітроустановки малої потужності (до 10 кВт) представлені понад 500-ма різновидами. Аналіз ринку таких вітроустановок показав, що переважна більшість із них налаштовані на роботу у номінальному режимі за швидкостей вітру понад 10 м/с [1].

Специфікою повітряних потоків внутрішньоконтинентальних територій, зокрема й більшої частини території України, є їхня мала питома потужність, що не дає змоги широко використовувати досвід світової практики будівництва вітроенергетичних установок. Саме через це актуальним завданням сьогодні є розроблення дешевих вітроустановок малої одиничної потужності, які здатні ефективно працювати за слабких середньорічних вітрів.

Одним із варіантів вирішення проблеми енергозабезпечення автономних споживачів малої потужності (невеликих фермерських господарств, промислових підприємств, дачних ділянок, віддалених від електромереж об'єктів військового, метеорологічного, туристичного, природоохоронного, телекомунікаційного призначення тощо) на територіях із низьким вітровим потенціалом є використання горизонтально-осьових вітроустановок з лопатями вітрильного типу. Це зумовлено тим, що вітрило фактично миттєво підлаштовується під силу і напрямок вітру за рахунок нехарактерного для "малолопатевих" вітроустановок збільшення активної площі лопаті від основи до зовнішнього контуру. Така конструкція лопаті дає змогу забезпечити запуск і генерування енергії вітроустановкою за швидкостей вітру від 1,5–2 м/с, що, своєю чергою, дає можливість істотно знизити час простою і збільшити тривалість активної експлуатації вітроустановки, а отже, й кількість виробленої енергії [1, 2].

Незважаючи на численні науково-прикладні розробки у галузі вітроенергетики, питання розрахунку і конструювання горизонтально-осьових вітроустановок із лопатями вітрильного типу сьогодні недостатньо опрацьовані, а самі установки порівняно мало представлені серійними (промисловими) зразками. Певною мірою це пов'язано із складністю організації ефективного протиштормового захисту установки, опису та дослідження аеродинаміки вітрильної лопаті, необхідністю застосування додаткових мультиплікаторів для забезпечення необхідної частоти обертання привідного вала електрогенератора або використання спеціальних тихохідних електрогенераторів із відповідними системами керування. Ці та інші проблеми зумовлюють необхідність подальшого дослідження горизонтально-осьових вітроустановок з лопатями вітрильного типу та розроблення інженерних методик їх розрахунку і конструювання.

Аналіз інформаційних джерел за тематикою досліджень. Незважаючи на велику інформаційність джерел, що розділяють горизонтально-осьові вітроустановки з лопатями вітрильного типу, сьогодні не існує єдиної інженерної методики їх розрахунку і конструювання. Частина досліджень, зокрема [3–7], проводяться у галузі аеродинаміки вітрильної лопаті, інша частина, зокрема [8–10], розглядає постійне удосконалення окремих систем і вузлів вітроустановки: системи орієнтації, системи регулювання потужності, системи протиштормового захисту, елементів приводу тощо. Окремо проводяться дослідження можливостей генерування різних видів енергії (електричної, механічної, теплової тощо) за допомогою таких вітроустановок [11–13]. Більшість наявних досліджень мало пов'язані між собою, тоді як існує потреба у комплексній інженерній методиці розрахунку і конструювання вітроустановки, яка дала б змогу звичайним споживачам без спеціальної освіти розробити й ефективно експлуатувати вітроустановку невеликої встановленої потужності. У такій методиці вітроустановка повинна розглядатися як єдина система, що складається із взаємопов'язаних аеродинамічної, механічної та електричної підсистем.

Мета і завдання досліджень. Основною метою роботи є обґрунтування доцільності подальшого розвитку горизонтально-осьових вітроустановок з лопатями вітрильного типу, аналіз їх конструктивних особливостей та визначення шляхів їх удосконалення та підвищення експлуатаційної ефективності. Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі завдання: розглянути конструктивні та функціональні особливості окремих елементів і систем горизонтально-осьової вітроустановки; проаналізувати системи орієнтації, регулювання потужності та протиштормового захисту вітроустановок з лопатями вітрильного типу; обґрунтувати шляхи подальших науково-прикладних досліджень за цією тематикою.

Загальний вигляд та принцип роботи вітроустановки. Як уже зазначалося, вітроустановка – комплексна система, яка складається із взаємопов'язаних аеродинамічної, механічної та електричної підсистем. На рис. 2 показано загальний вигляд твердотільної моделі, спроектованої у

САПР SolidWorks, та розробленого в НДЛ-40 Національного університету “Львівська політехніка” дослідного зразка горизонтально-осьової вітроустановки з лопатями вітринного типу. Вона складається з лопатей 1, які приєднуються до маточини вітроколеса 2. Маточину 2 встановлюють на валу 3, який через привід 4 з’єднується з електрогенератором 5. Вал вітроколеса 3 утримується в горизонтальному положенні за допомогою двох підшипникових опор 6, встановлених на плиті опорно-поворотного вузла 7, який приєднаний до вертикальної опори 8.



Рис. 2. Загальний вигляд твердотільної моделі та дослідного зразка горизонтально-осьової вітроустановки з лопатями вітринного типу

Повітряний потік, набігаючи на лопаті 1, спричиняє обертання вітроколеса, яке через маточину 2 приводить у рух вал 3, що передає обертальний момент до електрогенератора 5. Опорно-поворотний вузол 7 використовується для орієнтування вітроколеса за напрямком вітру. Маточина 2 передбачає шарнірне кріплення лопатей з метою встановлення додаткового механізму регулювання потужності, стабілізації частоти обертання й протиштормового захисту вітроустановки.

Системи орієнтування вітроколеса за напрямком вітру. Кількість енергії, яку здатне відібрати вітроколесо з потоку повітря, залежить від його положення щодо напрямку цього потоку. Вітроустановка розвиває максимальну потужність тільки тоді, коли площина обертання вітроколеса розміщується перпендикулярно до напрямку вітру. За будь-яких відхилень вітроколеса від напрямку вітру потужність, яку воно здатне розвинути, зменшується пропорційно до куба косинуса кута відхилення [1, 8]. У зв'язку з тим, що напрямок вітру безперервно змінюється, необхідно автоматично встановлювати площину обертання вітроколеса перпендикулярно до цього напрямку. Автоматична орієнтація за напрямком вітру здійснюється переважно чотирма способами [1]: 1) хвостовим стабілізатором (аналог флюгера) (рис. 3, б); 2) віндзорами (невеликими вітряками), які діють на поворотну частину вітроколеса через зубчасту передачу; 3) розміщенням вітроколеса позаду опори (рис. 3, в); 4) активною орієнтацією за допомогою електричних, гідравлічних або пневматичних приводів (рис. 3, а). Основні конструктивні особливості зазначених способів орієнтування, їх переваги, недоліки і сфери використання проаналізовані у [1, 2].

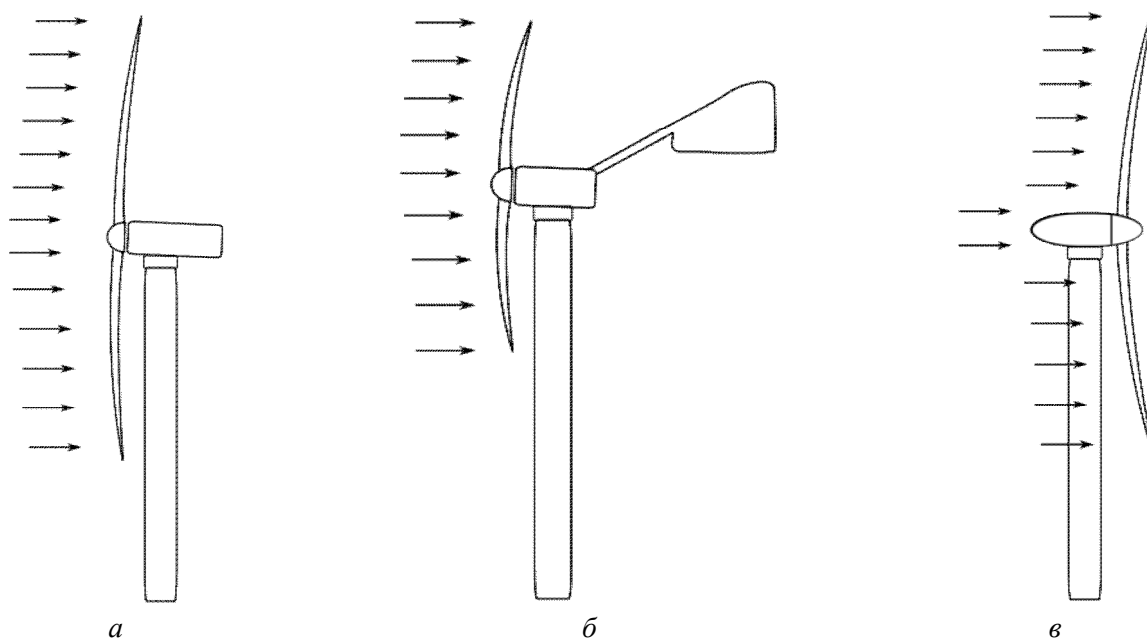


Рис. 3. Способи орієнтації вітроколеса за напрямком вітру

Зважаючи на високу парусність вітроустановки з вітрильними лопатями, одним із найпростіших і найприйнятніших способів автоматичної орієнтації вітроколеса за напрямком вітру є розміщення його за опорою (рис. 3, в). Основним регульованим параметром, який визначає точність орієнтування й ефективність роботи вітроустановки, у цьому випадку виступає величина “вильоту” вітроколеса, тобто відстань від вертикальної осі опорно-поворотного вузла до площини обертання вітроколеса (або маточини вітроколеса).

Під час роботи вітроколеса у косому потоці внаслідок несиметричного обтікання точка прикладення рівнодійної аеродинамічних сил зміщується із центра вітроколеса до переднього краю та вгору або вниз залежно від напрямку обертання [2]. На рис. 4 показано схему сил, що діють на площину вітроколеса за косою обдування. Рівнодійну F_p аеродинамічних сил можна розкласти на дві складові: силу лобового тиску F_L , перпендикулярну до площини обертання вітроколеса, і тангенціальну силу F_T , що діє у площині обертання. Ці сили створюють такі моменти:

$$M_x = F_T \cdot y_a; \quad M_y = F_L \cdot z_a + F_T \cdot l_1; \quad M_z = F_L \cdot y_a, \quad (1)$$

де y_a , z_a – координати, які визначають положення центра аеродинамічного тиску на вітроколесо; l_1 – відстань від осі повороту гондоли до місця закріплення вітроколеса.

Момент M_x чинить вплив лише на аеродинамічний крутний момент вітроколеса M_{a1} . За сталого напрямку обертання M_x збільшуватиметься або зменшуватиметься M_{a1} залежно від знака кута b . Момент M_y намагається повернути вітроколесо навколо вертикальної осі опори. Напрямок його дії завжди напрямлений так, щоб площина обертання вітроколеса розміщувалася перпендикулярно до напрямку вітру. Момент M_z діє на вітроколесо у вертикальній площині і сприймається опорними підшипниковими вузлами. Статичний стан системи орієнтації за заданої швидкості вітру V визначається за таким рівнянням:

$$M_y - M_{mp} = 0, \quad (2)$$

де M_{mp} – момент сил тертя в опорно-поворотному вузлі.

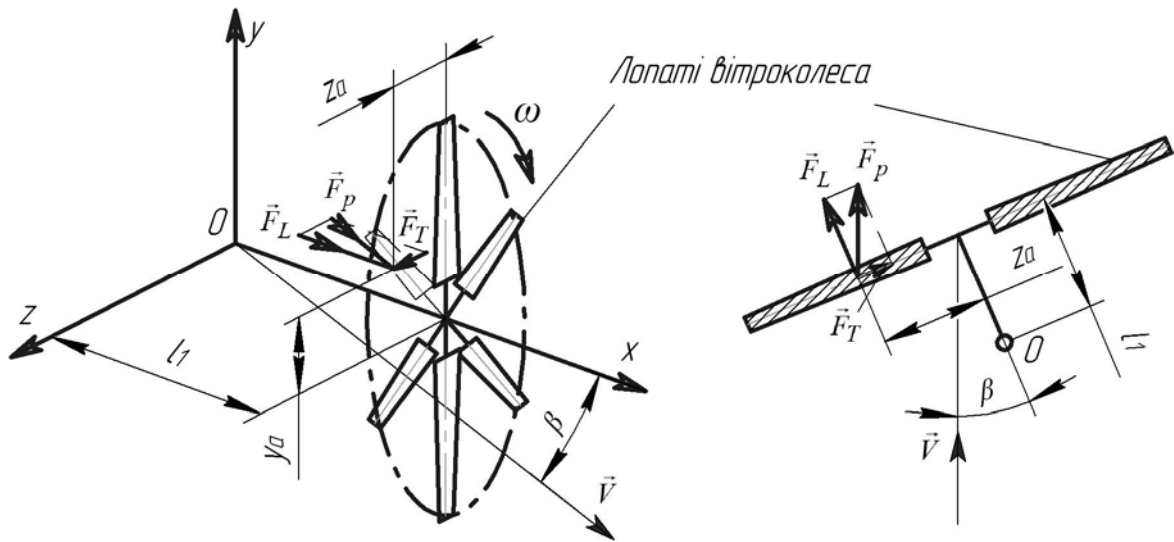


Рис. 4. Схема сил, які діють на вітроколесо за косою обдування

Експериментально доведено, що за однакових кутів β , значення координати z_a для довільного вітроколеса під час його роботи на номінальних режимах, наближається до величини координати центра аеродинамічного тиску на плоску квадратну або круглу пластину [2]. Тоді для довільного режиму роботи вітроколеса значення z_a можна наближено знайти за формулою [2]:

$$z_a = 0.5 \cdot R \cdot k_\beta \cdot \beta \cdot \cos \beta, \quad (3)$$

де R – зовнішній радіус вітроколеса; $k_\beta \approx 0.0015$ – апроксимаційний коефіцієнт.

Силу лобового тиску повітряного потоку на площину вітроколеса і тангенціальну силу F_T можна подати у вигляді [2, 8]:

$$\begin{aligned} F_L &= 0.5 \cdot C_L \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_n \cdot V^2; \\ F_T &= 0.5 \cdot \sqrt{1 - C_L^2} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_n \cdot V^2, \end{aligned} \quad (4)$$

де C_L – коефіцієнт лобового тиску повітряного потоку на вітроколесо; ρ_n – густина повітря.

Величину “вильоту” вітроколеса щодо вертикальної осі опори визначають залежно від необхідної точності орієнтації вітроколеса за напрямком вітру. Для цього необхідно задати максимально допустимий кут нечутливості та величину швидкості вітру, за якої він починає спрацьовувати. Кут нечутливості β_n приймають не більшим за $15\text{--}20^\circ$, а швидкість спрацювання V_S – у межах $1,5\text{--}2$ м/с [2, 8]. Тоді з урахуванням залежностей (1)–(4) матимемо вираз для знаходження мінімальної величини “вильоту” вітроколеса:

$$l_1 = \frac{M_{mp} - F_L \cdot z_a}{F_T} = \frac{M_{mp}}{0.5 \cdot \sqrt{1 - C_L^2} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_n \cdot V_S^2} - \frac{C_L}{\sqrt{1 - C_L^2}} \cdot 0.5 \cdot R \cdot k_\beta \cdot \beta_n \cdot \cos \beta_n. \quad (5)$$

Механізми регулювання потужності та протиштормового захисту вітроустановки

Мінливість швидкості потоків повітря надзвичайно ускладнює можливості використання енергії вітру. Швидкість вітру може змінюватися протягом однієї хвилини більше ніж у 2–3 рази, і при цьому спричиняти коливання енергії повітряного потоку у 8–27 разів [2]. Це зумовлює необхідність застосування спеціальних систем регулювання потужності залежно від потреб споживачів та протиштормового захисту вітроустановки за перевищення граничнодопустимі швидкості вітру. Аналіз систем регулювання потужності горизонтально-осьових вітроустановок показав, що сьогодні застосовуються три основні принципи [1]. Перший принцип полягає в ефекті зміни підйомної сили на нерухомих лопатях спеціального аеродинамічного профілю за зміни

частоти обертання ротора, т. зв. зрив потоку з поверхонь лопатей (рис. 7, *a*); другий принцип полягає у зміні підйомної сили під час регулювання кута атаки лопатей щодо набігаючого вітрового потоку (рис. 5, *б*); третій принцип – у керуванні потужністю ротора за зміни площі повітряного потоку, яку він охоплює (рис. 5, *в*, *г*). Основні конструктивні особливості зазначених способів регулювання, їх переваги, недоліки і сфери використання проаналізовані у [10].

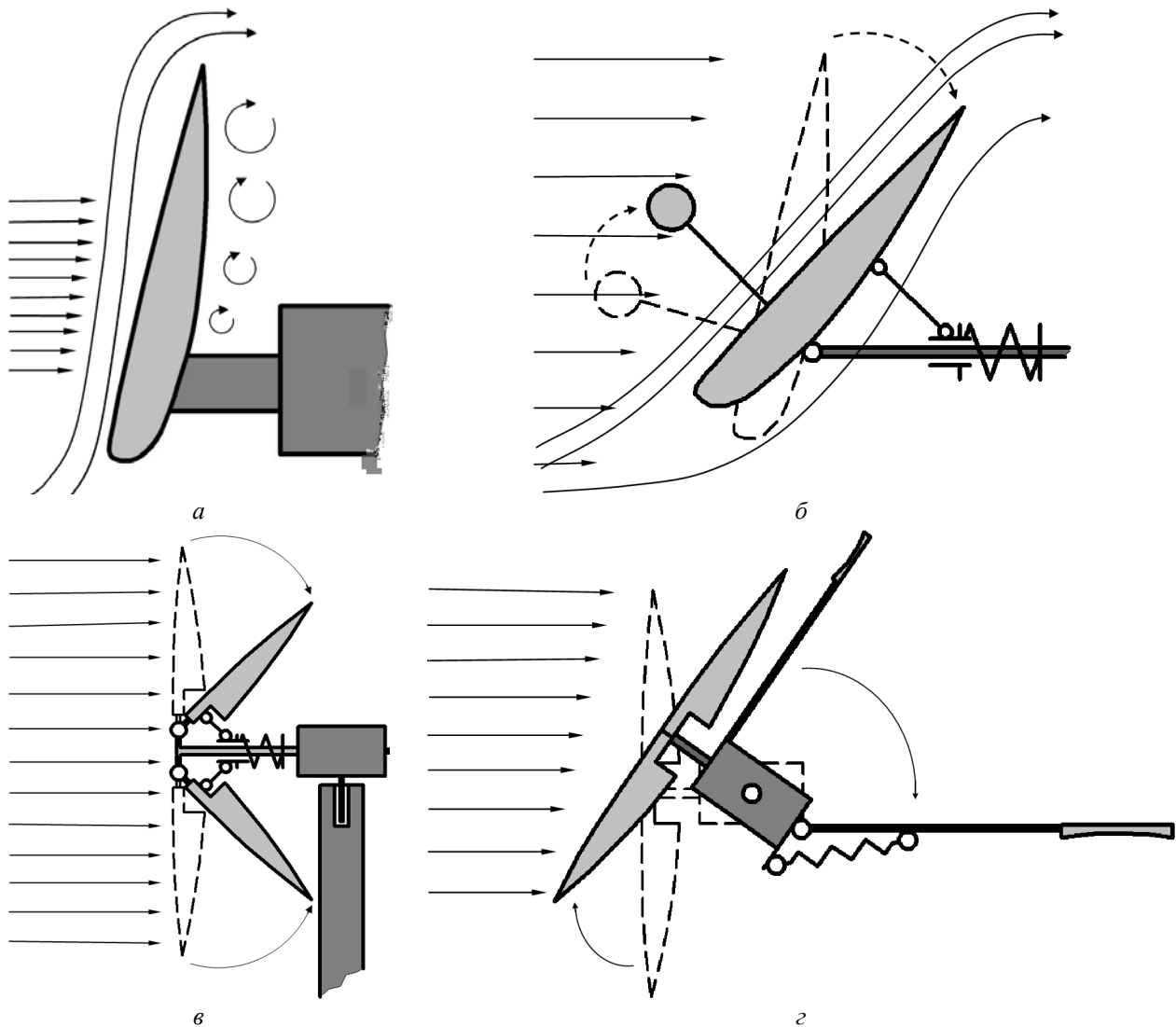


Рис. 5. Способи регулювання потужності вітроустановок

Зважаючи на значну парусність вітроустановок з лопатями вітрильного типу, одним із найпростіших і найприйнятніших способів регулювання потужності й протиштормового захисту є зміна площі обмаху вітроколеса за рахунок виведення його з-під вітру (вверх, вниз, в бік) або складання лопатей. Більшість механізмів складання лопатей працюють за принципом “парасольки”, згідно з яким лопаті мають можливість повертатися у напрямку, перпендикулярному до площини обертання вітроколеса (рис. 6) [9, 10]. За спрацювання механізму лопаті складаються вздовж осі вітроколеса, зменшуючи площу обмаху та знижуючи відбір потужності з повітряного потоку.

Цей метод регулювання може використовувати ефект зміни аеродинамічного лобового тиску повітряного потоку на поверхні лопатей у результаті збільшення чи зменшення швидкості вітру, що призводить до зміни куткового положення лопатей. Також здебільшого механізми складання лопатей додатково обладнуються певним типом інерційного регулятора, який переважно являє собою систему тягарців, розміщених симетрично до осі вітроколеса та з’єднаних за допомогою спеціальних важелів із лопатями [9, 10]. За збільшення чи зменшення частоти обертання

вітроустановки тягарці за рахунок зміни відцентрової сили інерції віддаляються або зближуються з віссю вітроколеса, змінюючи кутове положення лопатей.

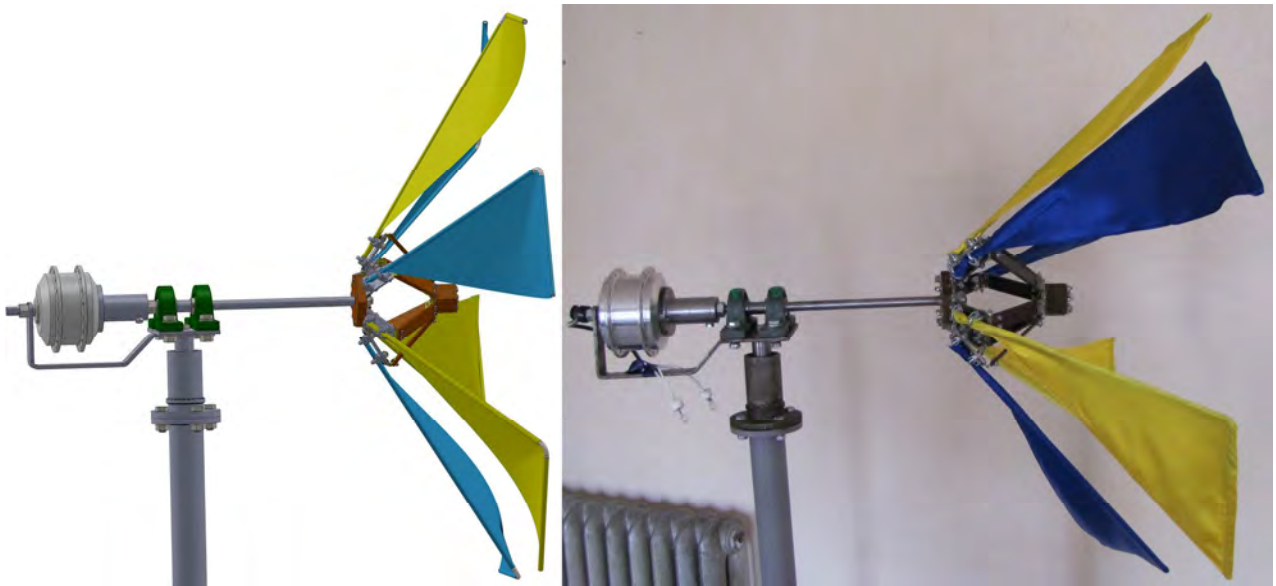


Рис. 6. Механізм складання лопатей

Основними регульованими параметрами, які визначають точність спрацювання механізму складання лопатей та ефективність роботи вітроустановки, у цьому випадку виступають жорсткість і початковий (попередній) розтяг регулювальної пружини (на рисунку не показана), яка встановлюється між маточиною вітроколеса і регулювальним повзуном. Основне завдання регулювальної пружини полягає у зрівноважуванні сили аеродинамічного лобового опору та автоматичному регулюванні кута нахилу лопатей залежно від швидкості повітряного потоку.

Жорсткісні параметри механізму складання, а саме коефіцієнт жорсткості k та початковий розтяг пружини a , визначаються за заданих конструктивних особливостей вітроустановки з умов її експлуатації: номінальне значення швидкості вітру $V_{ном}$, максимальні значення кута відхилення лопатей j_{3max} та експлуатаційної швидкості вітру V_{max} . У рівняння статичної рівноваги механізму складання лопатей, яке дорівнює нулю, суми моментів усіх сил щодо шарніра кріплення лопаті, підставляємо початкові і кінцеві параметри регулювання [9]:

$$\begin{aligned}
 & k \cdot \left(r_m \cdot \cos j_{3ном} + \frac{r_m \cdot \sin j_{3ном} \cdot (r_s - r_n + r_m \cdot \cos j_{3ном})}{\sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos j_{3ном})^2}} \right) \times \\
 & \times \left(a + r_m \cdot \sin j_{3ном} + \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos j_{3ном})^2} - \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m)^2} \right) = \\
 & = 0.5 \cdot C_{Lp} \cdot r_a \cdot \rho \cdot R^2 \cdot r_p \cdot V_{ном}^2; \\
 & k \cdot \left(r_m \cdot \cos j_{3max} + \frac{r_m \cdot \sin j_{3max} \cdot (r_s - r_n + r_m \cdot \cos j_{3max})}{\sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos j_{3max})^2}} \right) \times \\
 & \times \left(a + r_m \cdot \sin j_{3max} + \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos j_{3max})^2} - \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m)^2} \right) = \\
 & = 0.5 \cdot C_{Lk} \cdot r_a \cdot \rho \cdot R^2 \cdot r_p \cdot V_{max}^2,
 \end{aligned} \tag{6}$$

де $j_{3ном}$ – початковий кут встановлення лопатей ($j_{3ном} \approx 0$); C_{Lp} , C_{Lk} – початкове і кінцеве значення коефіцієнта лобового тиску; r_a – відстань від шарніра кріплення лопаті до точки

прикладення рівнодійної аеродинамічних сил ($r_a \approx 0.7 \cdot R$); r_s , r_n , r_m , l_s – геометричні параметри вітроколеса і механізму складання лопатей (рис. 7).

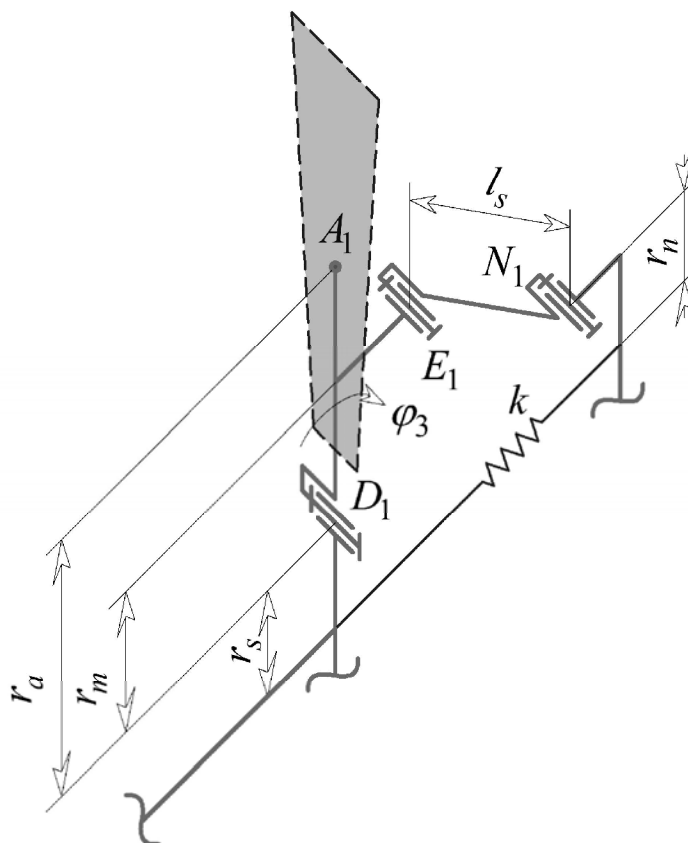


Рис. 7. Розрахункова схема механізму складання лопатей

Розв'язавши отриману систему (6) двох рівнянь з двома невідомими, знайдемо аналітичні залежності для жорсткісних параметрів k і a :

$$k = \frac{\left[\begin{aligned} & \left(r_m \cdot \cos \varphi_{3\max} + \frac{r_m \cdot \sin \varphi_{3\max} \cdot (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\max})}{\sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\max})^2}} \right) \times \\ & \quad \times 0.5 \cdot C_{Lnom} \cdot r_a \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_p \cdot V_{ном}^2 - \\ & - \left(r_m \cdot \cos \varphi_{3ном} + \frac{r_m \cdot \sin \varphi_{3ном} \cdot (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3ном})}{\sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3ном})^2}} \right) \times \\ & \quad \times 0.5 \cdot C_{Lmax} \cdot r_a \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_p \cdot V_{max}^2 \end{aligned} \right]}{\left[\begin{aligned} & \left(r_m \cdot \cos \varphi_{3ном} + \frac{r_m \cdot \sin \varphi_{3ном} \cdot (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3ном})}{\sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3ном})^2}} \right) \times \\ & \quad \times \left(r_m \cdot \cos \varphi_{3\max} + \frac{r_m \cdot \sin \varphi_{3\max} \cdot (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\max})}{\sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\max})^2}} \right) \times \\ & \left(\left(r_m \cdot \sin \varphi_{3ном} + \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3ном})^2} \right) - \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m)^2} \right) - \\ & \left(\left(r_m \cdot \sin \varphi_{3\max} + \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\max})^2} \right) - \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m)^2} \right) \end{aligned} \right]} \quad (7)$$

$$a = \frac{\left[\begin{aligned} & \left(r_m \cdot \cos \varphi_{3\max} + \frac{r_m \cdot \sin \varphi_{3\max} \cdot (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\max})}{\sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\max})^2}} \right) \times \\ & \times \left(r_m \cdot \sin \varphi_{3\text{ноч}} + \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\text{ноч}})^2} - \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m)^2} \right) \times \\ & \quad \times 0.5 \cdot C_{L\text{ном}} \cdot r_a \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_p \cdot V_{\text{ном}}^2 - \\ & - \left(r_m \cdot \cos \varphi_{3\text{ноч}} + \frac{r_m \cdot \sin \varphi_{3\text{ноч}} \cdot (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\text{ноч}})}{\sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\text{ноч}})^2}} \right) \times \\ & \times \left(r_m \cdot \sin \varphi_{3\max} + \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\max})^2} - \sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m)^2} \right) \times \\ & \quad \times 0.5 \cdot C_{L\max} \cdot r_a \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_p \cdot V_{\max}^2 \end{aligned} \right]}{\left[\begin{aligned} & \left(r_m \cdot \cos \varphi_{3\max} + \frac{r_m \cdot \sin \varphi_{3\max} \cdot (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\max})}{\sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\max})^2}} \right) \times \\ & \quad \times 0.5 \cdot C_{L\text{ном}} \cdot r_a \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_p \cdot V_{\text{ном}}^2 - \\ & - \left(r_m \cdot \cos \varphi_{3\text{ноч}} + \frac{r_m \cdot \sin \varphi_{3\text{ноч}} \cdot (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\text{ноч}})}{\sqrt{l_s^2 - (r_s - r_n + r_m \cdot \cos \varphi_{3\text{ноч}})^2}} \right) \times \\ & \quad \times 0.5 \cdot C_{L\max} \cdot r_a \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_p \cdot V_{\max}^2 \end{aligned} \right]}$$

Результати досліджень механізмів складання лопатей з відцентрово-аеродинамічними регуляторами наведені у [9].

Напрями подальших науково-прикладних досліджень. Подальші дослідження горизонтально-осьових вітроустановок з лопатями вітрильного типу планується проводити у трьох основних напрямках, які стосуються трьох базових підсистем вітроустановки: аеродинамічної, механічної та електричної. Кінцевою метою досліджень є розроблення єдиної інженерної методики розрахунку і конструювання горизонтально-осьової вітроустановки з лопатями вітрильного типу, яка б дала змогу звичайним споживачам без спеціальної освіти розробити й ефективно експлуатувати вітроустановку невеликої встановленої потужності. Зокрема, у межах досліджень, буде проведено:

- аналіз аеродинамічних навантажень на лопаті у процесі роботи вітроустановки; огляд конструктивних особливостей вітрільних лопатей та концентраторів повітряного потоку; дослідження впливу форми лопатей та концентраторів повітряного потоку на техніко-експлуатаційні показники роботи вітроустановки; удосконалення інженерної методики розрахунку геометричних параметрів лопатей вітрильного типу та концентраторів повітряного потоку для горизонтально-осьових вітроустановок;

- огляд конструктивних особливостей вітроколів та можливостей передачі крутного моменту з вала вітроколеса до споживача (електрогенератора, компресора, теплового перетворювача тощо); удосконалення механічних систем регулювання потужності, стабілізації частоти обертання та протиштормового захисту вітроустановок з використанням механізмів складання лопатей та повороту лопатей докола власних поздовжніх осей; аналіз інерційних та гравітаційних навантажень на лопаті під час обертання вітроколеса, повороту гондоли і складання (повороту) лопатей; удосконалення інженерної методики розрахунку вітроколеса, приводу вітроустановки та механізмів регулювання потужності та орієнтації;

- огляд можливостей та особливостей генерування електроенергії за допомогою вітроустановки; аналіз конструктивних та функціональних особливостей електрогенераторів та систем керування тихохідних вітроустановок малої потужності (до 10 кВт); аналіз можливостей

акумулювання вітрової енергії; удосконалення інженерної методики розрахунку окремих елементів електричної системи вітроустановки.

Висновки. Зважаючи на складну економічну та екологічну ситуацію у нашій країні, постійне подорожчання енергоресурсів та кліматичні умови внутрішньоконтинентальної території України, у роботі обґрунтована доцільність подальшого розвитку та якнайширшого використання горизонтально-осьових вітроустановок з лопатями вітрильного типу. Розглянуто конструктивні та функціональні особливості горизонтально-осьової вітроустановки з лопатями вітрильного типу на прикладі дослідного зразка, розробленого в НДЛ-40 Національного університету “Львівська політехніка”. Визначено шляхи удосконалення та підвищення експлуатаційної ефективності таких вітроустановок, зокрема підбором раціональних геометричних параметрів вітрильних лопатей, встановленням спеціальних концентраторів повітряного потоку тощо. Розглянуто конструктивні та функціональні особливості окремих елементів і систем горизонтально-осьової вітроустановки. Зокрема, проаналізовано системи орієнтації вітроколеса за напрямком вітру (активні з використанням електричного, механічного чи іншого приводу; пасивні з використанням хвостових стабілізаторів або з встановленням вітроколеса позаду опори). Зважаючи на високу парусність вітроустановки з лопатями вітрильного типу, обґрунтована доцільність використання пасивних систем орієнтації за допомогою встановлення вітроколеса позаду опори. Проаналізовано аеродинамічні навантаження на вітроколесо у процесі орієнтування, розглянуто статичний стан системи та виведено аналітичні залежності для встановлення необхідної величини “вильоту” вітроколеса. За результатами огляду способів регулювання потужності та протиштормового захисту вітроустановок (поворот лопатей навколо власних поздовжніх осей, виведення вітроколеса з-під вітру, складання лопатей тощо) встановлено, що найефективнішими у вітроустановках з вітрильними лопатями будуть способи, які ґрунтуються на зміні площі обмаху вітроколеса, зокрема спосіб складання лопатей. Запропоновано розрахункову схему механізму складання лопатей та проаналізовано статичний стан системи, на основі якого виведено аналітичні залежності для наближеного визначення жорсткісних параметрів механізму регулювання (жорсткості та попереднього розтягу регульовальної пружини). Обґрунтовано шляхи подальших науково-прикладних досліджень за цією тематикою. Зокрема наголошено на доцільності створення єдиної інженерної методики розрахунку і конструювання горизонтально-осьових вітроустановок з лопатями вітрильного типу, яка б дала змогу звичайним споживачам без спеціальної освіти розробити й ефективно експлуатувати вітроустановку невеликої встановленої потужності. У такій методиці вітроустановка повинна розглядатися як комплексна система, що складається із взаємопов’язаних аеродинамічної, механічної та електричної підсистем.

1. Дзензерский В. А. *Ветроустановки малой мощности* / В. А. Дзензерский, С. В. Тарасов, И. Ю. Костюков. – К.: Наук. думка, 2011. – 592 с. 2. Фатеев Е.М. *Ветродвижатели и ветроустановки* / Е.М. Фатеев. – М.: ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. – 544 с. 3. Кудлик М. *Оптимальні швидкості обертання тихохідного вітроколеса та профіль його лопатей за критерієм максимального відбору потужності зі слабких потоків повітря* / М. Кудлик, І. Лозовий // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. – 2001. – С. 63–67. 4. Кудлик М. *Вплив профілю лопаті тихохідного вітроколеса, орієнтації та швидкості його обертання та відбір ним потужності з потоку повітря* / М. Кудлик, І. Лозовий // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. – 2002. – С. 72–78. 5. Лозовий І. *Взаємодія повітряного потоку з робочими лопатями горизонтально-осьового вітроколеса та аналіз впливу їх геометрії на ефективність його роботи* / І. Лозовий, В. Придиба, М. Кудлик // *Машинознавство*. – 1998. –

№ 9, 10. – С. 17–20. 6. Кузьо І. В. Оптимізація геометрії лопатей тихохідного вітроколеса з метою максимізації відбору потужності з потоків повітря / І. В. Кузьо, В. М. Корендій, Н. І. Проконець // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2011. – № 702: Оптимізація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 59–68. 7. Зінько Р. В. Особливості роботи вітряків з лопатями вітрильного типу / Р. В. Зінько // Науковий вісник НЛТУУ: зб. наук.-техн. пр. – Львів: РВВ НЛТУУ. – 2011. – С. 101–111. 8. Корендій В. М. Розрахунок хвостового стабілізатора для орієнтації вітроколеса за напрямком вітру / В. М. Корендій // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2013. – № 760: Оптимізація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 62–67. 9. Корендій В. М. Математична модель та методика розрахунку інерційних і жорсткісних параметрів механізму складання лопатей горизонтально-осьової вітроустановки / В. М. Корендій // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Український міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2013. – № 47. – С. 56–65. 10. Korendiy V. M. Analysis of power regulation mechanisms of horizontal-axis wind turbines and prospects of their improvement / V. M. Korendiy, I. V. Kuzio, V. V. Vergeles // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2014. – № 788: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – С. 92–100. 11. Кузьо І. В. Теоретичні аспекти моделювання вітроенергетичних установок / І. В. Кузьо, В. М. Корендій // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – № 3. – С. 85–94. 12. Білецький Ю. О. Енергоформує оптимальне керування синхронним генератором з постійними магнітами у складі вітроелектроустановки без давача швидкості вітру / Ю. О. Білецький // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. – 2013. – № 36 (1009) – С. 403–407. 13. Щур І. З. Поліфункціональне енергоформує керування роботою вітроелектроустановки / І. З. Щур, Ю. О. Білецький // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – № 2 (26). – С. 79–82.