

На рис. 5 представлено залежність коефіцієнта внутрішньої дифузії від температури для подрібненої "енергетичної" верби

Тому її можна апроксимувати такою залежністю:

$$D_w^i = D_w^{293} + 0,427 \cdot 10^{-10} \cdot (T - 293). \quad (6)$$

Відомі значення коефіцієнта дифузії вологи в навколишнє середовище під час сушіння залежать від структурної будови частинок, вологовмісту і температури і для різних об'єктів сушіння перебувають у межах від 10^{-6} (капілярно пористі матеріали) до 10^{-12} м/с (мало пористі матеріали) [12, 13], що корелюється із значеннями, які ми отримали.

Порівняння значень коефіцієнта внутрішньої дифузії, розрахованих за залежністю (6) з експериментально визначеними для температур (300-380 К) і швидкості руху теплового агента ($w = 0,26 \pm 2,0$ м/с), не перевищує 14,3 %

Висновки:

- Отримана розрахункова залежність дає змогу визначити коефіцієнт дифузії вологи з частинок подрібненої "енергетичної" верби в навколишнє середовище в широких межах температури (від 300 до 380 К) і швидкості руху теплового агента $w = 0,26 \pm 2,0$ м/с.
- Отримана розрахункова залежність дає змогу прогнозувати затрати теплової енергії, розрахувати оптимальні параметри процесу та встановити економічну доцільність застосування фільтраційного методу сушіння на етапі проектування сушильного обладнання.

Література

- Півняк Г.Г. Енергозбереження в промисловому секторі економіки України / Г.Г. Півняк // Наука та інновації. – 2006. – № 2.
- Кудря С.О. Законодавча база відновлюваної енергетики в Україні / С.О. Кудря // Відновлювана енергетика ХІІ століття : матер. 10-ї ювілейної Міжнар. наук. практ. конф. (14-18 вересня 2009 р). [Електронний ресурс]. – Доступний з http://www.ive.org.ua/conference_2009/kudrya%20res%20nikolaevka.pdf.
- Цивенкова Н.М. Альтернативні джерела енергії: чи врятують вони Україну від енергетичної залежності та екологічної катастрофи? / Н.М. Цивенкова, О.О. Самілін // Новини агротехніки. – 2009. – № 1.
- Гузьова І.О. Гідродинаміка та тепло масообмін при фільтраційному сушінні матеріалів кристалічної та аморфної структури : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.08 – Процеси і апарати хімічної технології / НУ "Львівська політехніка". – Львів, 2001. – 19 с.
- Ханик Я.М. Гідродинаміка процесу фільтраційного сушіння матеріалів, для яких властиве явище сідання / Я.М. Ханик, Я.М. Гумницький, В.М. Атаманюк, П.В. Білей // Науковий вісник УкрДІТУ : зб. наук.-техн. праць. – Сер.: Проблема деревообробного виробництва. – Львів : Вид-во УкрДІТУ. – 1994. – Вип. 2. – С. 29-39.
- Ханик Я.М. Гідродинаміка процесу фільтраційного сушіння матеріалів, для яких властиве явище сідання / Я.М. Ханик, Я.М. Гумницький, В.М. Атаманюк, П.В. Білей // Науковий вісник УкрДІТУ : зб. наук.-техн. праць. – Сер.: Проблема деревообробного виробництва. – Львів : Вид-во УкрДІТУ. – 1994. – Вип. 2. – С. 29-39.
- Чудинов Б.С. Вода в древесине / Б.С. Чудинов. – Новосибирск : Изд-во "Наука", 1984. – 248 с.
- Аксельруд Г.А. Кинетика фильтрационного процесса сушки / Г.А. Аксельруд, Я.Н. Ханьк, В.И. Топчий // Химическая технология. – 1986. – № 5. – С. 41-46.
- Атаманюк В.М. Дисперсні матеріали Механізм і кінетика фільтраційного сушіння / В.М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. – К., 2007. – № 4. – С. 24-29.
- Кіндзера Д.П. Сушіння паливних матеріалів у щільному шарі : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.08 – Процеси і апарати хімічної технології / НУ "Львівська політехніка". – Львів, 2003. – 20 с.

11. Никитин Е.Е. Концепция управления энергоэффективностью систем теплоснабжения поселенный / Е.Е. Никитин, Ин-т газа НАН Украины. – К. : Изд-во "Энерготехнологии и ресурсозбережение". – 2009. – № 2.

12. Муштаев В.И. Сушка дисперсных материалов. – М. : Изд-во "Химия", 1988. – С. 352.

13. Рудобахта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. – М. : Изд-во "Химия", 1980. – С. 248.

Атаманюк В.М., Гумницький Я.М., Мосюк М.И. Кинетика внутриматричного процесса сушки измельченной "энергетической" вербы

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению коэффициента внутренней диффузии влаги из пор и капилляров частиц измельченной быстрорастущей "энергетической" вербы при фильтрационной сушке.

Atamanyuk V.M., Humnyuk Yu.M., Mosyuk M.I. Kinetics of internal diffusive process of drying of the ground up "power" willow

The results of theoretical and experimental studies to determine the coefficient of internal diffusion of moisture from the pores and capillaries of the diffusion of the crushed particles rapidly growing "energy" willow during the dry filtration.

УДК 621.548+311.24

Доц. Р.В. Зінько, канд. техн. наук –
НУ "Львівська політехніка"

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ВІТРИЛЬНИХ З ЛОПАТЯМИ ВІТРИЛЬНОГО ТИПУ

Запропоновано класифікацію вітроподвигунів з урахуванням тенденцій їх розвитку. Проведено порівняння характеристик вітроподвигунів з лопатями гвинтового і вітрильного типу. Визначено потужність, яку відбирає ділянка лопаті елементарної площі тихохідного вітроколеса вітрильного типу.

Ключові слова: лопаті вітрильного типу, автономні вітроенергетичні установки, класифікація, оптимізація профілю поверхні лопаті.

Вступ. Існування нашої цивілізації полягає в нагромадженні і перетворенні енергії за різних видів діяльності. Будь-яка діяльність людини є діяльністю економічною, оскільки економіка – це процес обміну між людьми порціями енергії або їх інформаційними віддзеркаленнями у вигляді так званої вартості, бо вартість – це інформація про витрачену на виробництво товару або послуги енергії. За останніх 30-35 років споживання енергії в світі подвоюється кожні 10 років, цим підтверджується, що науково-технічний і економічний розвиток – це, насамперед, розвиток енергетичний.

Зі зростанням величини переробленої енергії зростає валовий продукт, а брак енергії і неправильний її перерозподіл призводить до фінансових і економічних криз. Тому економічної стабільності можна досягти через науково-технічний розвиток, важливою складовою частиною якого є розвиток енергетичного комплексу.

Енергоспоживання, що збільшується, протягом останніх десятиліть задовольняється здебільшого завдяки використанню традиційних енергоносіїв – вугілля, нафти, газу, торфу, води (гідроенергетика) та атомної енергії. Швидке зростання енергоспоживання, паніка на ринках енергоносіїв у вигляді стрімкого здорожчання палива і енергії, посилення геополітичних, економічних і екологічних проблем паливно-енергетичного комплексу потребують більш обґрунтованого і ретельного опрацювання принципів використання

природних ресурсів і стратегії розвитку енергетики. Тому з кожним роком дедалі актуальний пошук і освоєння альтернативних нетрадиційних джерел енергії, до яких, зокрема, належить вітроенергетика.

Огляд літературних джерел. У літературних джерелах [1-3] наведено описи конструкцій найпоширеніших вітрових двигунів. Але немає класифікації, яка б дала змогу побачити загальну картину розвитку конструкцій вітро-двигунів загалом. Наявні дослідження проводять для двигунів з гвинтовими лопатями [4]. Вітрові двигуни з іншими типами вітрових коліс досліджують експериментально, або розглядають на рівні аналізу конструкцій [5, 6].

Мета роботи. Класифікувати вітродвигуни. Розглянути особливості роботи вітродвигунів із лопатями вітрильного типу.

Основна частина. Класифікації наведено в державних стандартах [3]. Вони враховують основні конструкції більшості вітродвигунів, але не враховують нових тенденцій в конструкціях вітроустановок. До того ж не завжди проведено детальну класифікацію, наприклад з елементної бази приводу. Тому доцільно впорядкувати і розширити наявні класифікації (рис. 1).

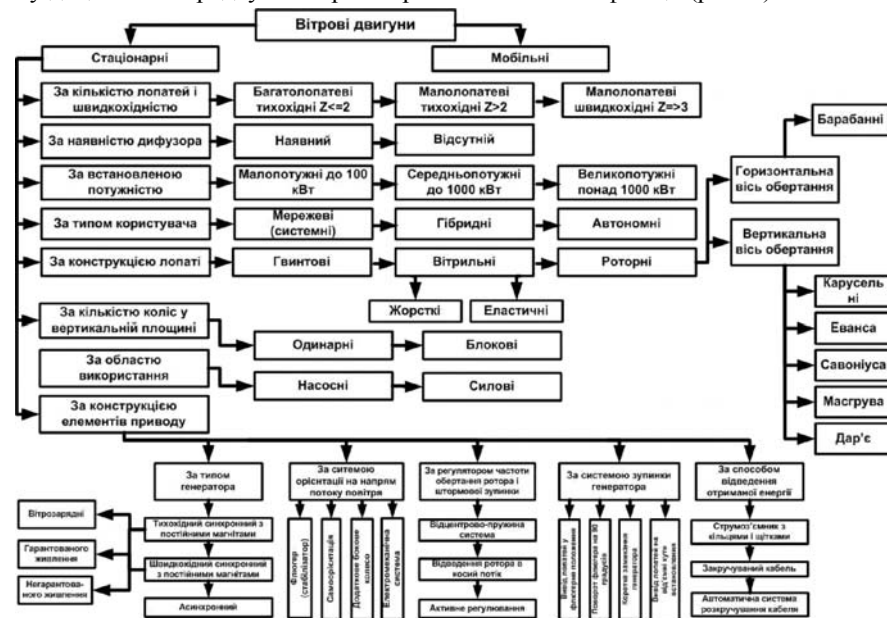


Рис. 1. Класифікація вітрових двигунів

Вітряні двигуни можна поділити на два великі класи – мобільні і стаціонарні.

До мобільних вітряних двигунів належать класичні вітрила і крила. Їх можна використовувати тільки для приведення в рух транспортних засобів, оскільки роботу вони можуть здійснювати лише при переміщенні в просторі. Причому без переналаштування це переміщення завжди буде лінійним – за напрямом вітру або під деяким кутом до нього. А оскільки їх конструкція достатньо жорстка і зазвичай допускає лише досить обмежені можливості

настройки, то і переміщатися вони можуть тільки разом з тим об'єктом, на якому вони встановлені або частиною якого вони є.

Стационарні вітряні двигуни можуть виконувати корисну роботу стаціонарно, залишаючись на одному місці. Рухаються тільки їх робочі елементи, які під дією потоку повітря переміщуються по замкненій траєкторії, здійснюючи циклічні рухи. Саме цей клас вітряних двигунів заслуговує розгляду насамперед, оскільки може використовуватися не тільки для переміщення транспортних засобів, отримуючи саме механічну форму енергії, але і для безпосереднього вироблення найбільш універсального і зручного для використання електричної енергії. До цього класу вітродвигунів належать різні вітроколеса – починаючи від крил класичного вітряного млина і закінчуючи сучасними роторними конструкціями з вертикальною віссю обертання.

Зараз спостерігається дві тенденції у вітроенергетиці: використання великопотужних вітроустановок, які працюють у складі вітроенергетичних станцій і застосування невеликих автономних вітроенергетичних установок (АВЕУ) для забезпечення конкретного споживача. В цьому випадку потужність АВЕУ обмежується 10-20 кВт і використовуються такі установки, наприклад, для окремих фермерських господарств, невеликих промислових виробництв, віддалених від енергопостачання туристичних баз, дачних поселень тощо. Тут можна виокремити переваги АВЕУ:

1. АВЕУ малої потужності встановлюють близько від житлових та виробничих приміщень. Саме тому АВЕУ повинні бути тихохідними, оскільки такі установки є більш екологічно чистими (частота та інтенсивність хвиль, що випромінює вітроколесо (ВК) під час роботи, малі).
2. Для малих господарств доцільно використовувати енергоустановки потужністю до 10...20 кВт.
3. ВК тихохідних АВЕУ технологічно виготовляти простіше.
4. Тихохідні АВЕУ ефективні за швидкості вітру 3...5 м/с.
5. Можливість легко адаптувати параметри АВЕУ під конкретне географічне місце розташування з його характерними вітрами.
6. Можливість використання модульної конструкції.
7. Термін окупності тихохідного АВЕУ – до 3 років.
8. Собівартість однієї кВт*год не набагато більша, ніж у електромережі.

Ефективне використання вітряків вимагає пристосування конструкції вітряка до конкретних умов експлуатації – відповідної території. Це необхідно, щоб врахувати вітровий потенціал території, де працюватиме АВЕУ. Розподіл енергетичних ресурсів потоку повітря (ПП) можна проаналізувати по кліматичній карті України.

Склавши карти розподілу ефективних швидкостей вітру, можна визначити, в яких районах найдоцільніше встановлювати АВЕУ того або іншого типу. Наприклад, на підставі розрахунків можна оцінити, яку частку сумарної потужності втрачає АВЕУ за межею інтервалу робочих швидкостей і яку – завдяки наявності верхньої межі. Якщо повторюваність швидкостей більша, то варто рекомендувати встановлювати в даному пункті малопотужнішу АВЕУ. На основі аналізу кліматичних карт для України можна умовно виділити середньорічні швидкості вітру (табл. 1).

Табл. 1. Частка середньорічних швидкостей вітру на території України

Потоки повітря	Швидкість потоку повітря, м/с	Середньорічні швидкості, %
Слабкі	до 3	70-80
Середні	3-5	15-20
Сильні	5-14	5-7
Дуже сильні	14-21	2-3
Штормові	21-25	1

З табл. 1 видно, що доцільно орієнтуватися на слабкі і середні вітри.

Проаналізувавши інформацію фірм-виробників, можна порівняти характеристики АВЕУ з лопатями гвинтового і вітрильного типу (табл. 2).

Табл. 2. Характеристики АВЕУ з лопатями гвинтового і вітрильного типу

Швидкості	Тип лопаті	Лопатеві	Вітрильний
Мінімальна швидкість ПП (швидкість рушання) $V_{зр}$, м/с		2,5-4	0,5-1,5
Максимальна швидкість експлуатаційна, $V_{\max \text{ експл}}$, м/с		25-45	15-30
Швидкість максимальної потужності, $V_{N \max}$, м/с		8-15	6-15

У ГОСТ Р 51237-98 "Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения" описано термін "ометаемая площадь ВК: (Swert area) Геометрическая проекция площади ВК на плоскость, перпендикулярную вектору скорости ветра". Оскільки нема аналогічного українського стандарту, можна запропонувати термін обігова площа ВК.

Хоча діаметри обігових площ однакові, робочі органи відрізняються конструкцією і розмірами. Тому і робоча площа в них неоднакова. Гвинтове ВК накладене на обігову площу перекриває приблизно тільки 10 % всієї обігової площі. Вітрильне ВК в аналогічних умовах закрий майже всю обігову площу.

Різниця характеристик визначається здебільшого "заповненістю" обігової площі, яку описують лопаті. Коли лопаті обертаються достатньо швидко, вся площа використовується достатньо ефективно і мало залежить від кількості і площі лопатей. Але за слабких вітрів вітрильні вітряки здатні перетворити в корисну роботу дуже слабкі ПП. У разі посилення вітру вони втрачають перевагу, і за сильних вітрів програють гвинтовим. Втрати на тертя ростуть разом з швидкістю.

За конструктивними характеристиками АВЕУ з лопатями гвинтового і вітрильного типу також відрізняються між собою (табл. 3).

Табл. 3. Конструктивні характеристики АВЕУ з лопатями гвинтового і вітрильного типу

	Гвинтові	Вітрильні
Інерційність при орієнтуванні на вітер	інерційні, використовують систему керування	майже миттєво налаштовуються на силу і напрям вітру
Технологічний процес виготовлення лопатей	складний	простий
Екологічність	створюють інфразвук	не створюють інфразвуку
Розгінний пристрій	починаючи з 3 кВт	непотрібний
Самоорієнтація	немає	є

У гвинтових швидкохідних ВК, починаючи зі швидкості 10 м/с – комлева (широка) частина лопаті рухає лопать (як вітрило), а за наявності сильного вітру кінцеві профілі (досягаючи великих швидкостей) використовують високі швидкості потоків обтікання, що вже з'явилися. На великих швидкостях обтікання і необхідно профілювати і "закручувати" (за розмахом) лопать. Наявна потужність – енергія ПП, що припадає на всю обігову площу, розподіляється так: центральна частина гвинтового колеса – двигун (рушій), а периферійна частина – перетворювач енергії (вже високих) швидкостей вітру в крутний момент вала генератора.

Подвійне перетворення наявної енергії дає змогу ефективно використовувати енергію ПП від 10-12 м/с, вирішуючи разом проблему швидкохідності генераторів.

У гвинтовому ВК між лопатями струмини повітря без перешкод потрапляють на протилежний бік ВК – вирівнюючи тиск. За відсутності різниці (перепаду) тиску немає і роботи. Основний недолік гвинтового ВК (для малих вітрів): окреслена кінцями лопатей обігова площа використовується малоефективно.

ВК вітрильного типу обертаються поволі, але мають велику потужність і момент. Віддалене щодо осі обертання розташування вітрил дає змогу утилізувати струмини слабого ПП. Примусового розкручування вітрило не потребує. Тканина вітрила дуже гнучко "підлаштовується" під будь-який повітряний потік, що дає змогу використовувати потужність (енергію) вітру з максимально можливим ККД без застосування спеціальної системи управління. Орієнтується ВК за вітром самостійно, а завдяки малій інерції і високий "флюгерності" ВК здійснює це швидко і без втрати потужності. Для вітрильного ВК нерівномірності в швидкості ПП по висоті не впливають на ефективність роботи, оскільки кожне вітрило великого радіусу, працюючи на загальну вісь, гнучко само налаштовується під силу і напрям локального ПП.

Окрім цього, вітрила в "робочому" стані створюють між собою систему повітряних каналів (щілин), повітря в яких перенаправляється в такому напрямі, що забезпечує збільшення потужності ВК, зокрема внаслідок ефекту приєднаних мас, оскільки збільшення швидкості повітря між вітрилами приводить до спаду тиску між ними, а відповідно, в ці зони спрямовуватиметься ПП, що "пролітають" поряд з ВК. Тобто ефективна площа перетину ПП, яка формуватиме підсумкову потужність ВЕУ більша від вітрильного ВК.

Відомо, що потужність ВЕУ прямо пропорційна обіговій площі і кубу швидкості вітру. Максимальна потужність вітряка з обіговою площею 1 м^2 за швидкості вітру 10 м/с приблизно становить:

$$N = \frac{\rho S V^3}{2} = \frac{1,2 \cdot 1 \cdot 10^3}{2} = 600 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3} = 600 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}} = 600 \text{ Вт}.$$

Оскільки вітрильний вітряк швидше повертається за вітром, ніж гвинтовий, самостійно обертається за вітрів, слабших за 1 м/с, то за однаковий час експлуатації вітрильний вітряк за тієї ж обігової площі забере з ПП більше енергії, ніж класичний гвинтовий.

Вітрильний вітряк внаслідок зміни напрямку вітру на 180° зберігатиме попередній напрям обертання. Гвинтовий через свою інерційність пропускає значну частину ПП, а на слабкі ПП, що прямують вздовж осі вітроколеса не в змозі реагувати. У разі зміни напрямку сильного вітру на 180° гвинтове ВК змінить своє обертання на зворотне.

ВК вітрильного типу вважається кільцевим нескінченним щільним крилом. У вітрильному ВК елементарна струмина ПП набігає на площину вітрила, відхиляється на 90° (якщо утримувати колесо), виходить (на периферію) і випускається через щілину (задня невідкріплена кромка вітрила). Через ці щілини йде вже відпрацьований ПП (він підпирається порціями повітря, що знову прибувають) – за межі обігової площі (пришвидчуючись). Або, якщо колесо не утримувати, струмина відхилиться на менший кут, віддавши енергію вітрилу, яке своєю чергою, передасть корисну енергію на вал генератора.

Збільшення швидкості повітря в щілинах між вітрилами приводить до спаду тиску між ними, а отже, в ці зони спрямовуватиметься ПП, що рухаються поряд з ВК. Як наслідок, підвищений тиск з навітряного боку ВК і розрідження з підвітряного боку. Різниця енергії цього перепаду тиску і визначає кількісно роботу вітряка. Вітрило реагує на будь-який ПП і створює необхідний перепад тиску. Вітрило здійснює роботу і коли рухається, і коли стоїть, чинячи опір вітру. У цьому випадку, вся потужність ПП перетворюється на роботу вітрила по відхиленню повітряного потоку, що потрапляє на обігову площу. Вітрило на великих вітрах виконує більше корисної роботи.

Малі швидкості ПП не дають змогу ефективно працювати лопатям, профіль яких базується на ефектах аеродинаміки. Тому в цих випадках видається за доцільне використовувати лопаті з профілем, який базується на розвертанні вектора швидкості ПП при його безпосередньому контакті з поверхнею лопаті. Для створення рушійної сили лопаті повинна обертатися не скоріше ПП, який потрапляє на елементарні її площинки. Оскільки швидкість ПП мала, тому і ВК для роботи в таких ПП називають тихохідним вітроколом (ТВК). Дослідженню роботи ТВК з прямолінійною твірною робочої поверхні лопаті присвячена робота [7]. Прямолінійність твірної значно спрощує технологію виготовлення лопаті, що значно впливає на показник вартості одиниці встановленої потужності БЕУ. Але для БЕУ невеликої потужності цей вплив зменшується.

У роботі [7] серед іншого покладається, що ВК має велику кількість лопатей (24 та більше). Це дозволило авторам цих робіт визначити оптимальну орієнтацію елементарної площини лопаті лише в місці розташування її маху, зберігаючи цю орієнтацію по всій прямолінійній ширині елементу лопаті. При цьому віддалі точок виділеної елементарної смужки лопаті від осі обертання ВК різнилися між собою незначно, тому що кількість лопатей була велика. Зменшення кількості лопатей ВК до 9-12 збільшує ці різниці. Тому вздовж радіуса кінцеві частини лопаті з прямолінійною твірною її робочої поверхні мають не оптимальну орієнтацію (рис. 2). З метою збільшення коефіцієнта корисної дії ВК пропонуємо лопаті, в якій оптимальна орієнтація її елементів підтримується не лише в місці розташування маху, але і на всьому колі довільного проміжного радіусу ВК (рис. 3).

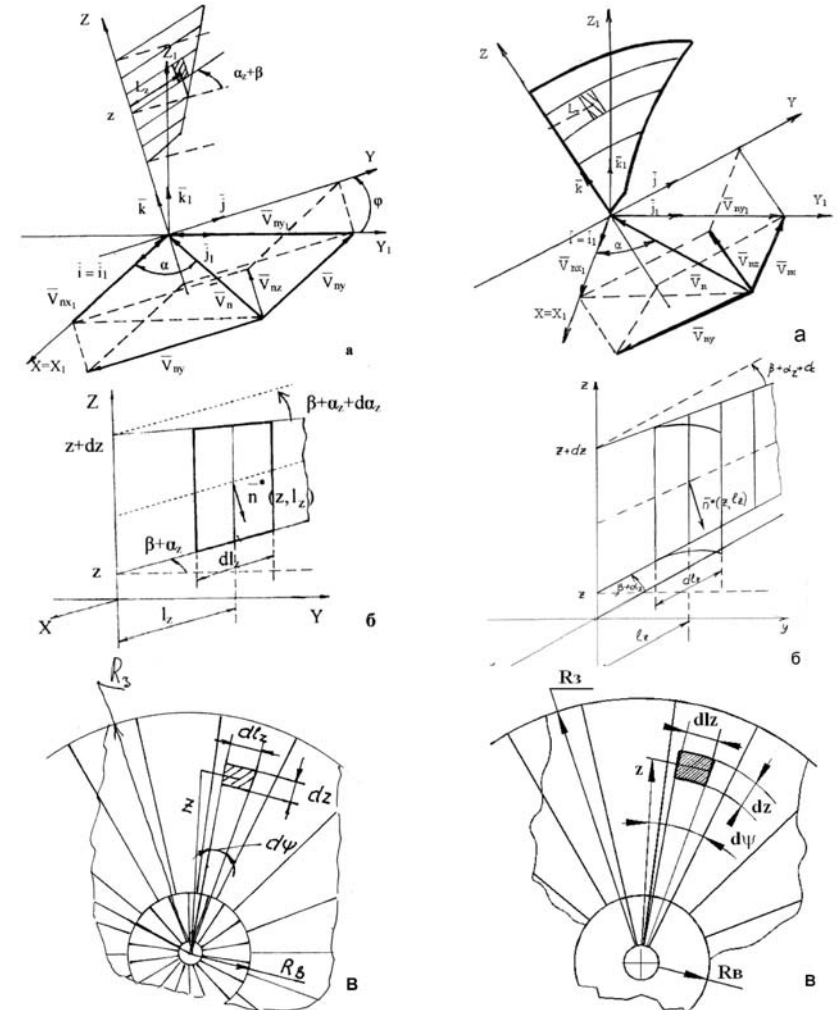


Рис. 2. Компоненти вектора швидкості ПП:

а – у нерухомій ($x_1y_1z_1$) та рухомій (xyz) системах координат;
б – орієнтація площинки елементарної площі в просторі;
в – лопаті з прямолінійною твірною її робочої поверхні

Рис. 3. Компоненти вектора швидкості ПП:

а – у нерухомій ($x_1y_1z_1$) та рухомій (xyz) системах координат;
б – орієнтація площинки елементарної площі в просторі;
в – лопаті постійного профілю робочої поверхні на її радіусі

У роботі [7] отримана залежність, що дає змогу визначати потужність $d^2N_{z,l}$, яку відбирає ділянка лопаті елементарної площі $dl_z \cdot dz$ тихохідного ВК, що має горизонтальну вісь обертання з горизонтального ПП (рис. 3). Вона має вигляд:

$$d^2N_{z,l_z} = A_1 \frac{d\varphi}{dt} z \cos \alpha_{z,l_z} V_n \left(A_2 + A_3 l_z \frac{d\alpha_z}{dz} \right) \cdot \left\{ V_n (A_2 \cos \alpha_{z,l_z} + A_3 \sin \alpha_{z,l_z}) - \frac{d\beta}{dt} l_z \cos \alpha_{z,l_z} - \frac{d\varphi}{dt} [z \sin(\alpha_z + \beta) \cos \alpha_{z,l_z} + l_z \cos(\alpha_z + \beta) \sin \alpha_{z,l_z}] \right\} \cdot dl_z dz \quad (1)$$

де: $A_1 = \rho_n \sin(\alpha_z + \beta)$; $A_2 = \cos \alpha \cos(\alpha_z + \beta) + \sin \alpha \cos \varphi \sin(\alpha_z + \beta)$; $A_3 = \sin \alpha \sin \varphi$; ρ_n , V_n – питома маса та горизонтальна швидкість ПП, що набігає на лопать; α_z – кут профілю лопаті на відстані z від осі обертання ВК; $\frac{d\alpha_z}{dz}$ – швидкість зміни кута профілю зі зміною відстані до осі обертання ВК; $\beta, \frac{d\beta}{dt}$ – кут та швидкість повороту самої лопаті навколо власної осі обертання (навколо маху); α – кут між вектором швидкості ПП та віссю обертання ВК; $\varphi, \frac{d\varphi}{dt}$ – кут повороту та кутова швидкість обертання ВК; l_z – відстань між віссю власного обертання лопаті та центром виділеної ділянки елементарної площі $dz \cdot dl_z$; α_{z,l_z} – кут між нормаллю до виділеної ділянки лопаті елементарної площі $dz \cdot dl_z$ та горизонтальною площиною.

Залежність (1) описує відбір потужності ділянкою лопаті елементарної площі ВК з горизонтальною віссю обертання від горизонтального ПП при їх довільних відносній орієнтації, кутах профілю лопаті та швидкості обертання ВК. Водночас, одним із найважливіших завдань є забезпечення максимально можливого відбору потужності зі слабких за потужністю ПП. У цьому випадку необхідно забезпечити перпендикулярність вектора ПП до площини розташування ВК (тобто $\alpha = 0$). Крім цього, лопаті розташовують так, щоби площа перекриття ВК була максимальною (тобто, $\beta = 0$ та $\frac{d\beta}{dt} = 0$).

Зазвичай, для поширених типів профілів лопатей ТВК значення α_{z,l_z} мале, тому допустимо вважати, що $\cos \alpha_{z,l_z} \cong 1$, а $\sin \alpha_{z,l_z} \cong 0$. Довжину dl_z ділянки лопаті елементарної площі $dz \cdot dl_z$ можна представити як $z d\psi$, де ψ – центральний кут ВК. ТВК відрізняються від швидкохідних ВК великою кількістю лопатей, які практично повністю перекривають собою всю площу ВК. Тому інтегрувати залежність (1) по ψ доцільно в межах від "0" до "2 π ". Тоді потужність, що відбирають з потоку повітря всі лопаті смужкою елементарної висоти dz , яка розташована на відстані z від осі обертання ВК, дорівнює

$$dN_z = 2\pi \rho z^2 \frac{d\varphi}{dt} \sin \alpha_z V_n \cos \alpha_z \cdot \left(V_n \cos \alpha_z - \frac{d\varphi}{dt} z \sin \alpha_z \right) dz. \quad (2)$$

Потужність, яку відбирає ТВК загалом з ПП, дорівнює

$$N = 2\pi \rho_n \int_{R_B}^{R_3} z^2 \frac{d\varphi}{dt} \sin \alpha_z V_n \cos \alpha_z \cdot \left(V_n \cos \alpha_z - \frac{d\varphi}{dt} z \sin \alpha_z \right) dz, \quad (3)$$

де R_B , R_3 – внутрішній та зовнішній радіуси ВК.

За відомих швидкості горизонтального ПП V_n , його питомої маси ρ_n , вибраних розмірів ВК – R_B , R_3 потужність, яку відбирає ВК з потоку, залежить від кутової швидкості ВК $\frac{d\varphi}{dt}$, яку можна розглядати як невідомий параметр, та кута профілю лопаті α_z , який можна розглядати як невідому функцію від поточного значення радіуса z . Це дає змогу залежність (3) розглядати як функціонал з невідомим параметром виду

$$N = \int_{R_B}^{R_3} F \left(z, \alpha_z, \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) \right) dz, \quad (4)$$

де внутрішніми дужками виділено невідомий параметр $\frac{d\varphi}{dt}$.

Отже, задача механіки щодо оптимізації швидкості обертання ТВК та профільного кута його лінійчастих лопатей за критерієм максимально можливого відбору потужності зі слабких ПП зводиться до математичної задачі пошуку екстремуму функціонала (4), що містить невідомий параметр $\frac{d\varphi}{dt}$. На підставі варіаційного числення задача пошуку екстремуму функціонала розв'язується побудовою диференціального рівняння Ейлера [8]. Аналіз структури підінтегрального виразу залежності (3) свідчить, що він не залежить від $\frac{d\alpha_z}{dz}$. Тоді рівняння Ейлера набуває такого вигляду:

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha_z} = 0. \quad (5)$$

Беручи часткову похідну від підінтегральної функції залежності (3) по α_z , і на підставі (5), прирівнюючи її до нуля, будемо мати:

$$\frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{z}{V_n} \cdot \lg^3 \alpha_z^{on} - 2 \lg^2 \alpha_z^{on} - 2 \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{z}{V_n} \cdot \lg \alpha_z^{on} + 1 = 0.$$

Розв'язок цього алгебраїчного рівняння за формулою Кардана дає змогу отримати залежність оптимального кута α_z^{on} профілю лопаті від її поточного радіуса z :

$$\lg \alpha_z^{on} = \pm 2 \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{2}{3} k^2 + 1 \right)} \cdot \cos \left\{ \frac{1}{3} \arccos \left[\frac{\frac{1}{6} k \left(\frac{16}{9} k^2 + 1 \right)}{\sqrt{\frac{64}{729} k^6 + \frac{32}{81} k^4 + \frac{16}{27} k^2 + \frac{8}{27}}} \right] \cdot \frac{+0}{\pm \frac{2}{3} \pi} \right\} + \frac{2}{3} k, \quad (6)$$

де $\frac{1}{k} = \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{z}{V_n}$, в яку швидкість ПП V_n та кутова швидкість обертання ВК $\frac{d\varphi}{dt}$ входять параметрами.

Підставляючи функцію оптимального кута α_z^{on} профілю лопаті в (3), отримаємо максимальне значення функціонала, тобто максимальне значення потужності N^{on} , яку може відібрати ВК з лопатями, що мають оптимальний кут профілю α_z^{on} :

$$N^{on} = 2\pi\rho_n \int_{R_b}^{R_3} z^2 \frac{d\varphi}{dt} \sin \alpha_z^{on} V_n \cos \alpha_z^{on} \left(V_n \cos \alpha_z^{on} - \frac{d\varphi}{dt} z \sin \alpha_z^{on} \right) dz. \quad (7)$$

Для визначення оптимальної ω_k^{on} кутової швидкості $\frac{d\varphi}{dt}$ обертання ВК необхідно прирівняти до нуля часткову похідну від N^{on} по $\frac{d\varphi}{dt}$, тобто

$$\frac{\partial N^{on}}{\partial \omega_k^{on}} = 0, \quad (8)$$

або чисельно, перебором визначити значення ω_k^{on} , при якому N^{on} з (7) набирає максимального значення.

Отже, залежності (6-8) дають змогу оптимізувати кут профілю лінійчастої лопаті ТВК та швидкість його обертання за критерієм максимально можливого відбору потужності зі слабких ПП.

Як зазначено у [9], не менш важливою задачею, ніж відбір максимально можливої потужності зі слабких ПП, є задача захисту лопатей ВК від сильних ПП, відбору з них лише максимальної проектної потужності. Цього можна досягнути двома шляхами: або збільшуючи кут β – кут повороту лопаті навколо маха, або збільшуючи кут α – кут між вектором швидкості ПП та віссю обертання ВК, повертаючи його. Другий шлях доцільно використовувати для ВК невеликого діаметра і малих швидкостей його обертання. В цьому випадку є можливість робити лопаті неповоротними.

Аналогічно до того, як залежність (3) була проінтегрована (залежність 5), можна проінтегрувати і залежність (1), в якій $\frac{d\varphi}{dt} \approx \omega_k^{on}$ та $\alpha_z = \alpha_z^{on}$. Інтегруючи чисельно, завжди можна визначити необхідні значення кутів β або α для того щоб потужність, що відбирається ВК з ПП була в межах допустимих величин.

Для перевірки правомірності аналітичних підходів, правильності отриманих математичних залежностей було розроблено дев'ятилопатевиий макет ВЕУ та випробувано його в аеродинамічній трубі Національного університету "Львівська політехніка". Результати експериментів показали правомірність прийнятих припущень та достатню для потреб практики точність результатів, отриманих аналітично.

Висновки. Запропоновано класифікацію вітро двигунів з урахуванням тенденцій їх розвитку. Проведено порівняння характеристик вітро двигунів з лопатями гвинтового і вітрильного типу. Визначено потужність, яку відбирає ділянка лопаті елементарної площі тихохідного вітроколеса вітрильного типу.

Література

1. Gumula S. Energetyka wiatrowa / S. Gumula, T. Knap, P. Strzelczyk, Z. Szczerba. – Krakow : AGH, 2006. – 402 s.
2. Manweell J.F. Wind Energy Explained, Theory, Design and Application / J.F. Manweell, J.G. McGovan, A.L. Rogers. – Chichester : John Wiley & Sons, LTD, 2002. – 590 p.
3. ГОСТ Р 51990-2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация.
4. Kira Grogg. Harvesting the Wind: The Physics of Wind Turbines Carleton College: Physics and Astronomy Comps Papers, 2005. – 10 p.
5. Бычков Н.М. Ветро двигатель с эффектом Магнуса. Теплофизика и аэромеханика / Н.М. Бычков. – 2005. – Т. 12. – № 1. 159- 175.
6. Научно-технический портал. Изобретения. [Электронный ресурс]. – Доступный з http://www.ntpo.com/patents_electricity/electricity_2/electricity_123.shtml. Перевірено 11.09.2011.
7. Зинько Р.В. Моделирование работы ветроэнергетической установки с лопатями постоянного профиля на радиусе ветроколеса / Р.В. Зинько, М.Б. Кудлик, Т.І. Круць, І.С. Лозовий // Комп'ютерні науки та інформаційні технології (CSIT-2008) : III Міжнар. наук.-техн. конф., 25-27 вересня 2008 року. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – С. 269-272.
8. Янг Л. Лекции по вариационному исчислению и теории оптимального управления / Л. Янг. – М. : Изд-во "Мир", 1974. – 488 с.
9. Твайдел Дж. Возобновляемые источники энергии : пер. с англ. / под ред. В.А. Коробкова / Дж. Твайдел, А. Уэйр. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.

Зинько Р.В. Особенности работы ветряков с лопастями парусного типа

Предложена классификация ветродвигателей с учетом тенденций их развития. Проведено сравнение характеристик ветродвигателей с лопастями винтового и парусного типа. Определена мощность, которую отбирает участок лопасти элементарной площади тихоходного ветроколеса парусного типа.

Ключевые слова: лопасти парусного типа, автономные ветроэнергетические установки, классификация, оптимизация профиля поверхности лопасти.

Zinko R.V. Features of work of wind turbines are with the blades of the wind-driven type

It is offered classification of wind engines taking into account their progress trends. of Comparing of descriptions of wind engines with the blades of spiral and wind-driven type. Certainly power which is taken away by the area of blade of elementary area of slow wind wheel of the wind-driven type.

Keywords: blades of the wind-driven type, autonomous wind energy station, classification, blade surface optimization.

УДК 674.815-41

Доц. Р.Г. Салабай, канд. техн. наук; доц. Р.О. Козак, канд. техн. наук; асист. І.І. Салабай – НЛТУ України, м. Львів

АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА СТРУЖКОВИХ ПЛИТ В УКРАЇНІ

Наведено обсяги виробництва стружкових плит в Україні за 1990-2010 рр. Проаналізовано динаміку їх виготовлення: зростання/зниження обсягів виробництва за цей період.

Ключові слова: стружкові плити, обсяги виробництва, виробники плит, динаміка виготовлення.

Стружкові плити (СП) – найпоширеніший матеріал, який застосовують у виробництві меблів, будівництві, вагоно-, судно- та автомобілебудуванні, а також у багатьох інших галузях та побуті.