

УДК 621.363:621.313

СУДНОВИЙ ВІТРОГЕНЕРАТОР КОЛИВАЛЬНОГО ТИПУ

Штанько О.Д., Літвінова М.Б.

Херсонська філія Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова

Розроблено вітрогенератор коливального типу, котрий можна встановлювати на судні. Запропоновано крило гнучкої конструкції, яке дозволяє працювати генератору в автоколивальному режимі, а також конструкція стопорів і направляючих відповідних оптимальній роботі генератора.

Ключові слова: вітрогенератор, автоколивальний режим, крило, кут атаки.

Постановка проблеми. Енергія вітру відноситься до поновлюваних видів енергії. Її головна перевага – використання місцевих джерел. На цей час загальна енергія всіх вітроенергетичних пристроїв у світі складає близько 2 % всієї виробленої людством електричної енергії [1]. З урахуванням територіальних особливостей, вітроенергетика може внести суттєвий вклад у енергетичну незалежність України не тільки на суші, а й на морі.

Паралельно з розвитком потужних вітроустановок розвивається напрямок створення вітроустановок середньої потужності. Це генератори коливального типу. Ефективність їх порівняно із класичними істотно вище при досить малих розмірах. Саме вони можуть бути прикладом використання альтернативних джерел енергії у суднобудуванні і стати основою подальшої розробки конструкції суднового вітрогенератора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зареєстровано багато патентів на конструкції вітроенергетичних установок (ВЕУ) і методику одержання енергії, особливо – конструкцій вітроколів (ВК) [2, 3]. Усі ВЕУ підрозділяються за двома типами: ті, що використовують піднімальну силу вітру і ті, що використовують його силу опору. До першого типу відносяться ВЕУ з використанням піднімальної сили крила. Вони переважають у світовій вітроенергетиці, тому що можуть розвивати лінійну швидкість кінця лопаті (яка збігається з напрямком дії піднімальної сили вітру) значно більшу, ніж швидкість вітрового потоку [2]. Такі ВЕУ, у свою чергу, можуть бути класифіковані за орієнтацією вісі обертання ВК і за положенням ВК щодо всієї конструкції [4]. Установки з вертикальною віссю обертання позбавлені проблеми орієнтування на вітер. Вони одержали визнання за рахунок низької стартової швидкості (1–2 м/с), але не широко поширені через низький ККД вітро-ротора (15–18 %). Класичний представник – вітрогенератор Дар'є [4]. Більш поширені вітро-турбіни (пропелери) з горизонтальною віссю обертання. Класичний представник – крильчатий вітрогенератор [4]. Але роглянуті типи ВЕУ мають суттєві недоліки, що заважають їх використанню на судні. А саме: великий діаметр лопатей ВЕУ, високі вібраційні та шумові характеристики.

Умовам використання на судні найбільш відповідає вітрогенератор коливального типу. Існує низка проектів коливальних вітрогенераторів [3]. При їх використанні, як правило, підбирається найбільш оптимальний режим роботи крила шляхом зміни кута його атаки. Це дає можливість одержати більше значення коефіцієнта використання вітру, ніж у попередніх типах вітрогенераторів. Швидкість, з якої починається рух крила може бути менше 1 м/с, завдяки чому використовується низькоенергетична складова вітру. Тому існує виграш у загальній кількості енергії, отриманої від вітру. У вітчизняній літературі практично не зустрічається інформація про такий режим роботи вітрогенератора. Судячи з іноземних джерел, ККД використання може досягти 70–80 % [4]. За умови малих розмірів ВЕУ для використання на судні потужність одного такого генератора складатиме декілька одиниць кВт.

Мета статті – розробка суднового вітрогенератора коливального типу при використанні зміни форми крила з оптимальною конфігурацією.

Викладення основного матеріалу. У розробленому вітрогенераторі використовується крило у прямому його призначенні – створенні піднімальної сили і використанні вітрової енергії, що створила цю силу. Піднімальна сила і лобовий опір крила залежать від геометричних характеристик крила за його планом та профілем. Знання про розподіл сил щодо центру тиску може допомогти в одержанні максимальної піднімальної сили і регулюванні переходу в різні режими роботи вітрогенератора.

Переміщення центру тиску крила при зміні кута атаки. При зміні кута атаки змінюється розподіл тиску за профілем крила [5, 6], і тому центр тиску переміщується уздовж хорди несиметричного профілю, як показано на рис. 1. Наприклад, при негативному куті атаки α , що приблизно дорівнює -4° , сили тиску в носовій і хвостовій частинах профілю Y_1 і Y_2 , відповідно, спрямовані у протилежні сторони і рівні (рис. 1, $\alpha=-4^\circ$). Цей кут атаки називається кутом атаки нульової піднімальної сили. При трохи більшому куті атаки сили тиску, що спрямовані нагору, більше сили, спрямованої до низу. Їх рівнодіюча Y буде спрямованою за більшою силою (рис. 1, $\alpha=-1^\circ$), тобто центр тиску виявиться розташованим у хвостовій частині профілю. При подальшому збільшенні кута атаки місце, де існує максимальна різниця тисків зміщується ближче до носу крила, що, природно, викликає переміщення центру тиску за хордою до переднього краю крила (рис. 1, $\alpha=0-15^\circ$).

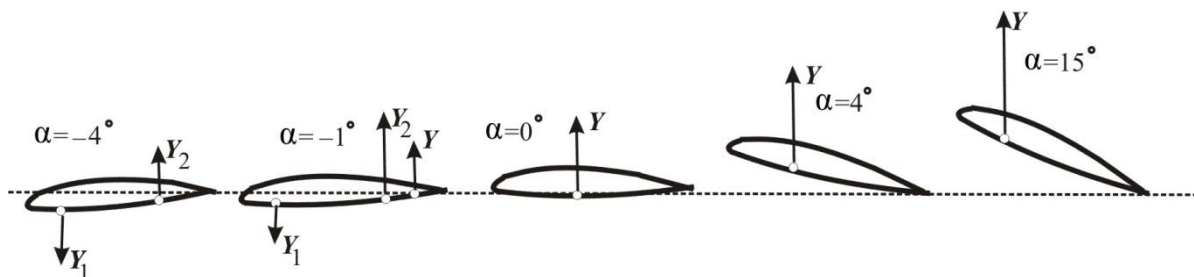


Рис. 1 – Переміщення центру тиску крила при зміні кута атаки

Поляра крила. На рис. 2 надано залежність, яка називається полярою [7].

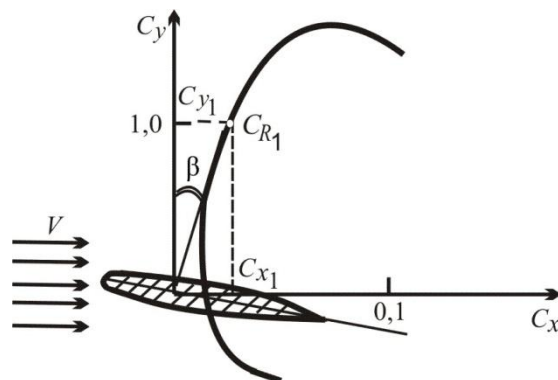


Рис. 2 – Принцип побудови поляри крила

Назва «поляра» пояснюється тим, що цю криву можна розглядати як полярну діаграму, побудовану на координатах коефіцієнта повної аеродинамічної сили C_R і φ , де φ – кут нахилу повної аеродинамічної сили R до напрямку швидкості потоку, що набігає (за умови, якщо масштаби C_y і C_x взяті однаковими). Для різних розрахунків характеристик крила особливо важливо знати одночасну зміну C_y і C_x в діапазоні різних кутів атаки. Для побудови поляри крило (або його модель) продувається у аеродинамічній трубці при різних кутах атаки. При продувці для кожного кута атаки аеродинамічними вагами заміряються величини піднімальної сили Y і сили лобового опору X , а потім обчислюють їхні аеродинамічні коефіцієнти. З формули піднімальної сили і сили лобового опору [7] знаходимо:

$$C_y = \frac{Y}{\frac{\rho \cdot v^2}{2} S} \quad \text{і} \quad C_x = \frac{X}{\frac{\rho \cdot v^2}{2} S}, \quad (1)$$

де ρ – питома вага повітря; v – швидкість повітря; S – площа крила.

Найвигідніший кут атаки ($\alpha_{\text{найв}}$) – це такий, при якому аеродинамічна якість крила є максимальною. Кут між віссю C_y і дотичною, проведеною з початку координат (кут якості β), на куті $\alpha_{\text{найв}}$ буде мінімальним. Тому для визначення $\alpha_{\text{найв}}$ потрібно провести з початку координат дотичну до поляри. Точка торкання буде відповідати $\alpha_{\text{найв}}$. Для сучасних крил $\alpha_{\text{найв}}$ лежить у межах 4–6°.

Носок, що відхиляється. Носок, що відхиляється, (рис. 3) застосовується на крилах з тонким профілем і гострою передньою крайкою для запобігання зриву потоку за передньою крайкою на більших кутах атаки [6, 8]. Змінюючи кут нахилу рухливого носка, можна для будь-якого кута атаки підібрати таке положення, коли обтікання профілю буде безвідривним. Це дозволить поліпшити аеродинамічні характеристики тонких крил на великих кутах α атаки. Аеродинамічна якість при цьому може зростати. Викривлення профілю відхиленням носка підвищує $C_{Y \text{ макс}}$ крила без істотної зміни критичного кута атаки.

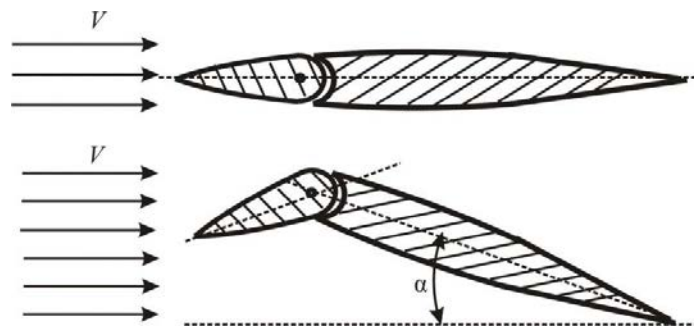


Рис. 3 – Носок крила, що відхиляється

Розробка принципу роботи крила вітрогенератора. Передбачається застосування носків і закрилків крила для регулювання напрямку піднімальної сили. «Нульове» положення крила, коли не виробляється енергія підйому, показано на рис. 4 а. При положенні закрилків на рис. 4 б, піднімальна сила спрямована вгору, а при положенні на рис. 4 в – вниз. У запропонованому механізмі регулювання відбувається лінійне переміщення вгору (рис. 4 б) і донизу (рис. 4 в) під дією піднімальної сили.

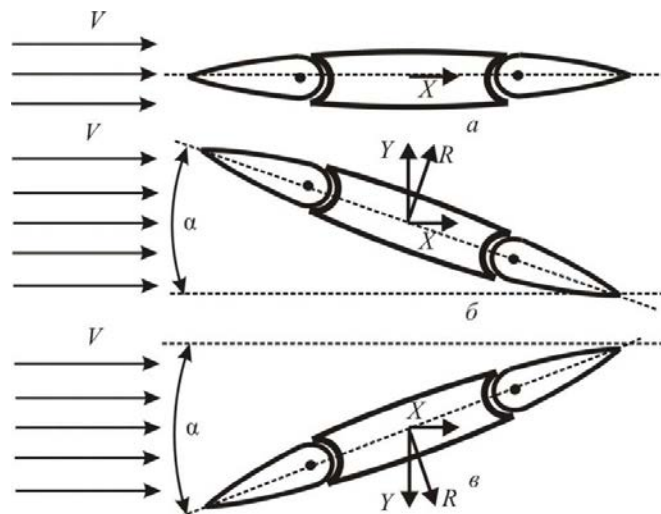


Рис. 4 – Основні положення крила вітрогенератора:
 а – нейтральне положення; б – підйом крила; в – опускання крила

Розглянемо підйом крила. У перехідному стані першою дією передбачається перекид кута носка на негативний щодо хорди центральної частини крила. При цьому піднімальна сила передньої частини (щодо кріплення крила) крила зменшується. За рахунок цього змінюється співвідношення моментів. Крило продовжує підніматися і виходить до точки, де кріплення крила дозволяє йому обертатися у вертикальній площині. За рахунок цього змінюється співвідношення моментів і крило вирівнюється і опускається горизонтально (рис. 5 а) із закріпленням його положення. Після цього закрилки переводяться під негативний кут щодо хорди центральної частини крила. У результаті цієї дії відбувається як би зсув площини хорди на 180° , або зміна напрямку піднімальної сили на протилежний. Далі відбувається опускання крила.

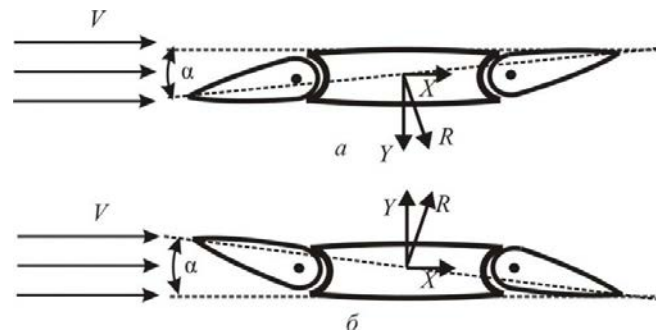


Рис. 5 – Перехідний стан крила: а – у верхньому положенні; б – у нижньому положенні

Розглянемо опускання крила. У перехідному стані першою дією передбачається перекид кута носка на позитивний щодо хорди центральної частини крила.

При цьому піднімальна сила передньої частини (щодо кріплення крила) крила зменшується. За рахунок цього змінюється співвідношення моментів. Крило продовжує опускатися і виходить до точки, де кріплення крила дозволяє йому обертатися у вертикальній площині. За рахунок цього змінюється співвідношення моментів і крило вирівнюється і опускається горизонтально (рис. 5 б). При цьому відбувається опускання всього крила і закріплення його положення. Потім закрилки переводяться під негативний кут щодо хорди центральної частини крила. У результаті цієї дії відбувається як би зсув площини хорди на 180° , або зміна напрямку піднімальної сили на протилежний. Далі відбувається підйом крила.

Розробка принципу кріплення і зміни руху крила. Прив'язку напрямку закрилків і носків пропонується забезпечити за допомогою магнітних засувок. Прив'язка проводиться тільки в одному положенні – нейтральному (рис. 4 а). Принцип кріплення показаний на рис. 6. При цьому рухливі сталеві вставки у вихідному стані притягнуті одна до одної і разом з магнітами утворюють замкнуте магнітне коло. При цьому потрібно прикласти істотне зусилля для розриву такого кола, що практично не має щілини. Після розриву закрилки (носок) вільно обертатимуться навколо своєї осі.

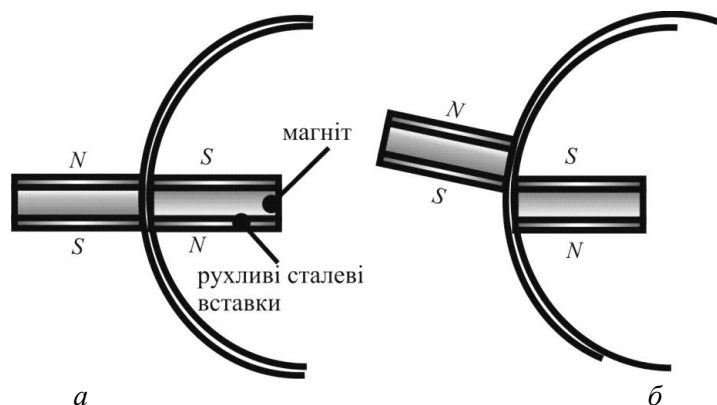


Рис. 6 – Конструкція фіксатора положення закрилок і носка крила:
а – у нейтральному стані; б – у рухливому стані

Після додавання напрямних зусиль під дією напору вітру закрилки (носок) повертаються і засувки проходять одна поблизу одної, сталеві вставки з'єднуються. При цьому фіксується їхнє нейтральне положення.

Розробка принципового пристрою зміни напрямку руху крила. Вимоги до цього пристрою є такими, що забезпечують наступне:

- поворот носка крила з нульового кута на негативний (рис. 7 а, б) або з нульового на позитивний (рис. 8 а, б) щодо хорди при підході до верхньої або нижньої межі, відповідно;
- поворот центральної частини крила у напрямку носка при підйомі (рис. 7 в) або опусканні (рис. 8 в);
- поворот носка у напрямку центральної частини з переходом руху крила на протилежний (рис. 7, 8 г);
- повернення положень носка і закрилків у нейтральне положення (рис. 7, 8 д).

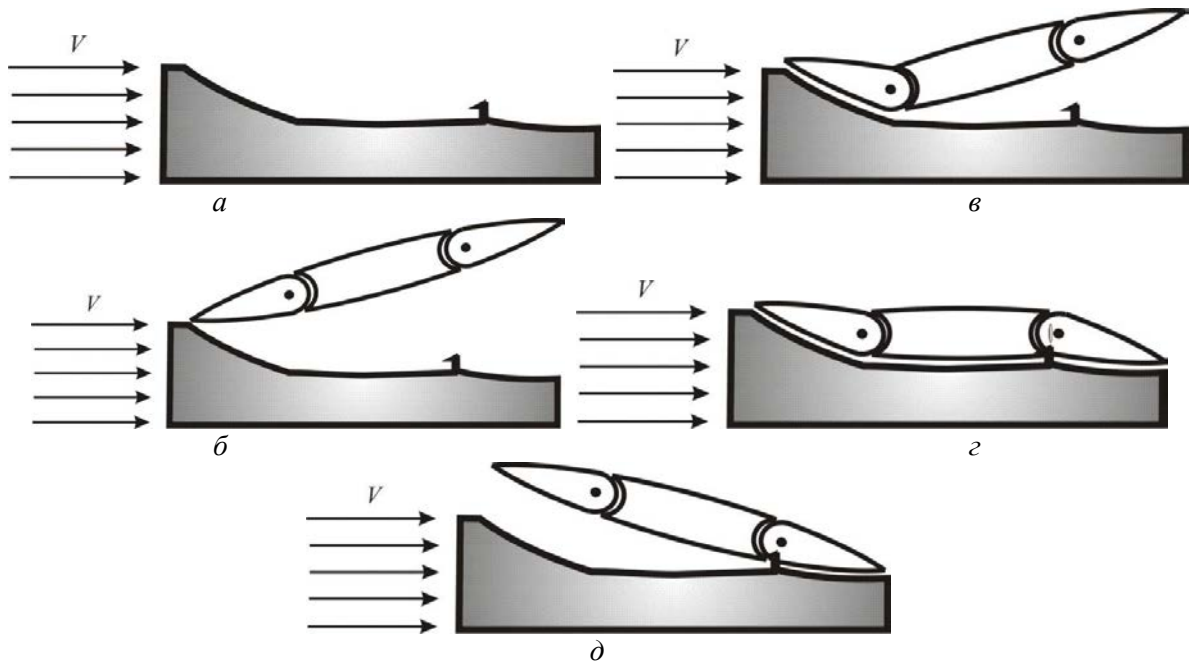


Рис. 7 – Проект нижнього стопора і процес зміни напрямку крила

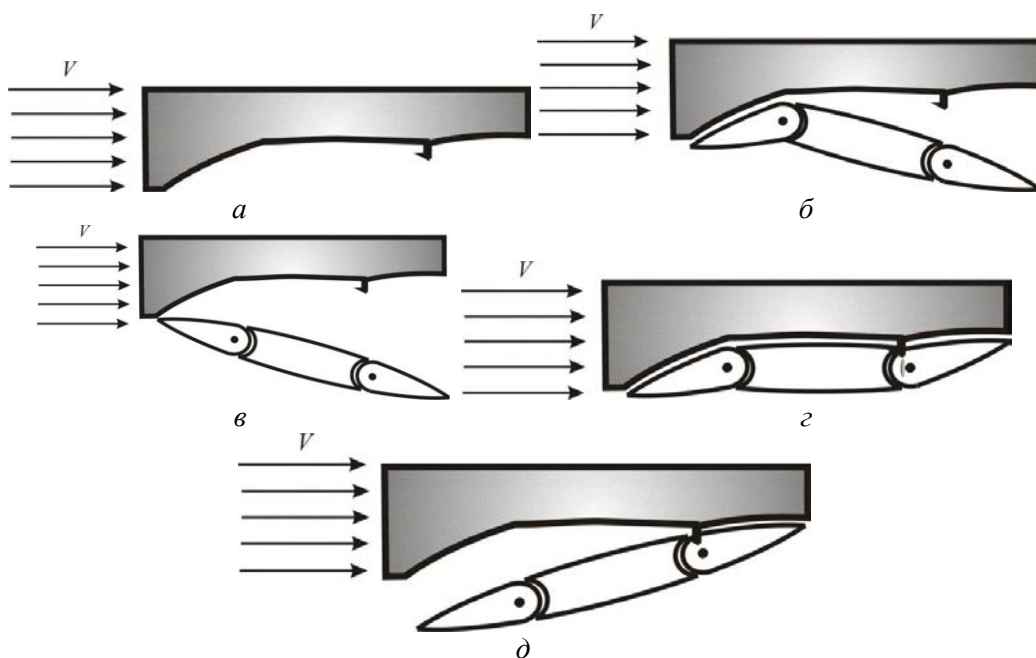


Рис. 8 – Проект верхнього стопора і процес зміни напрямку крила

Цього можна досягти чисто механічним способом, використовуючи енергію руху крила (напору вітру). Для цього необхідно встановити фігурний стопор на кінцях для зміни напрямку рухів крила. Проект такого стопора показаний на рис. 7 і рис.8.

Розробка принципу роботи пристрою зміни напрямку руху центральної частини крила. Пропонується така конструкція. У положенні (а) на рис. 9 крило опускається за напрямними. Зусилля крила фіксується стопорами.

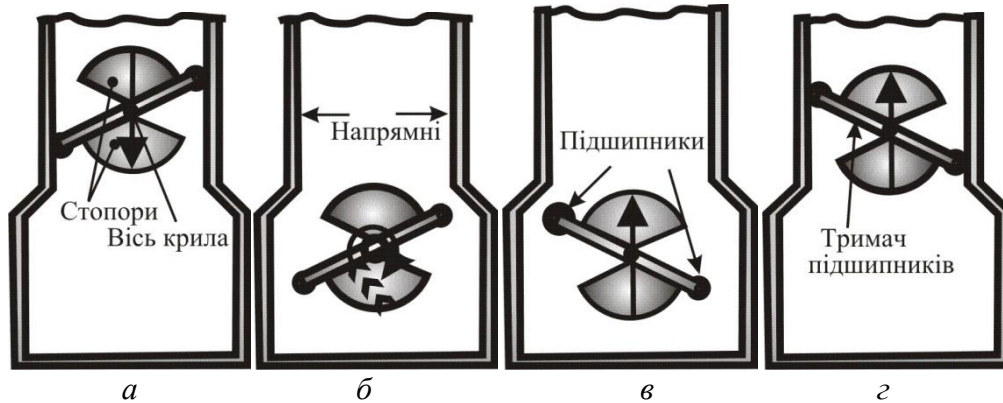


Рис. 9 – Процес зміни напрямку крила

Ковзання за напрямними проводиться за допомогою підшипників і має мінімальне значення. Це відбувається до моменту виходу осі крила у розширену область напрямних. Тут можливе обертання тримача з підшипниками (рис. 9 б). За рахунок стопора, розглянутого на рис. 7, 8, відбувається зміна зусиль на протилежні (рис. 9 в) і підйом крила. Після цього знову відбувається рух крила за напрямною, але тільки вгору (рис. 9 д) до верхньої межі, улаштованої строго симетрично нижній. І процес повторюється без додаткового регулювання зовні. Тобто рух відбувається у автоколивальному режимі. Період коливань регулюється забором енергії від руху крила. Загальний вигляд вітрогенератора коливального типу представлено на рис. 10.

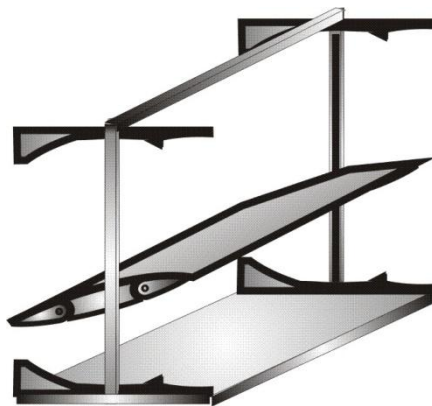


Рис.10 – Загальний вигляд вітрогенератора

Розрахунок вітрогенератора. Для спрощення розрахунку розділимо витрати енергії на створення піднімальної сили W_Y і витрати енергії, що йдуть на подолання опору вітру W_X , який набігає зі швидкістю V_0 :

$$W_Y = Y \cdot V_{\Pi}; \quad W_X = X \cdot V_0,$$

де Y – піднімальна сила X – сила опору руху, V_{Π} – швидкість підйому крила ($V_{\Pi} < V_0$).

Відповідно до визначення поляр (формула (1)), силу лобового опору X і роботу сил затримки $W_{\text{зат}}$ визначимо як:

$$X = C_X \rho \cdot S \cdot V_0^2, \quad W_{\text{зат}} = 1/2 \cdot C_X \rho \cdot S \cdot V_0^3.$$

У межах ламінарності повітряного потоку інших витратних механізмів немає.

Піднімальна сила Y може виконувати корисну роботу $W_{\text{кор}}$:

$$Y = C_Y \rho \cdot S \cdot V_0^2 \text{ і } W_{\text{кор}} = 1/2 \cdot C_Y \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^2 \cdot V_{\text{П}}. \quad (2)$$

Якщо ввести поняття якості крила, що існує в аеродинаміці літального апарата: $K = C_X / C_Y$, то співвідношення корисної роботи до витрат матиме вид:

$$W_{\text{кор}} / W_{\text{зат}} = K \cdot V_{\text{П}} / V_0.$$

Звідси витікає, що необхідно вибрати коефіцієнт якості як можна найбільшим (методика такого вибору описана на початку роботи), а також, що відбір енергії необхідно проводити при максимально можливій швидкості з урахуванням обмеження ($V_{\text{П}} < V_0$).

Розрахунок ККД вітрогенератора. З урахуванням значення піднімальної енергії (2) та енергії повітря, що набігає, ККД перетворення вітрової енергії η обчислюється за формулою:

$$\eta = \frac{C_Y \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^2 V_{\text{П}}}{\rho \cdot S \cdot V_0^3} = C_Y \frac{V_{\text{П}}}{V_0}$$

Це означає, що для одержання високого ККД необхідно: обирати кут атаки якнайбільшим до критичного; швидкість підйому крила також повинна бути якнайбільшою, тобто на початковому етапі підйому (опускання) треба дати розігнатися крилу до обраної швидкості. Крім цього, при установці на платформу, що рухається зі швидкістю $V_{\text{пл}}$, і при зустрічному вітрі V_0 маємо: $V_0 = V_{\text{пл}} + V_0$.

Витрати на лобовий опір повітрю з боку генератора та його вироблена енергія складатимуть:

$$W_{\text{зат}} = C_X \cdot \rho \cdot S (V_{\text{пл}} + V)^3; \quad W_{\text{кор}} = C_Y \cdot \rho \cdot S \cdot V (V_{\text{пл}} + V)^2 V_{\text{П}}.$$

Різниця між витратами складе:

$$\Delta W = \rho \cdot S \cdot (V_{\text{пл}} + V)^2 \cdot (C_Y V_{\text{П}} - C_X (V_{\text{пл}} + V)) = \rho \cdot S \cdot (V_{\text{пл}} + V)^2 \cdot C_X (KV_{\text{П}} - V_{\text{пл}} - V).$$

Коефіцієнт якості для крила становить порядку 10. Швидкість платформи щодо швидкості вітру невелика. Звідси значення приросту енергії при швидкості руху крила більше 1/10 від швидкості вітру буде позитивним. Тому із всіх відомих вітрогенераторів тільки генератор, який запропоновано у цій роботі, можна встановлювати на судно. Тому таку модель вітрогенератора можна вважати судновою.

Висновки. Таким чином, розроблено крило гнучкої конструкції, що дозволяє працювати генератору в автоколивальному режимі. Також розроблені конструкції стопорів, напрямних і відповідні умови для оптимальної роботи генератора. У результаті знайдено генератор коливального типу, котрий можна встановлювати на судні. Він не створює низькочастотних перешкод, є безпечним для птахів і може також встановлюватися на дахах будинків і споруд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Городов Р. В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии [Текст] / Р. В. Городов, В. Е. Губин, В. Е. Матвеев. – Томск : Из-во Томского политехнического университета, 2009 – 294 с.
2. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. Том 1. Ветроэлектрогенераторы [Текст] / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев – Харьков : Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2003, – 400 с.
3. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов [Текст] / Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

4. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. Том 2. Ветроэлектрогенераторы [Текст] / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев – Харьков : Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2004. – 519 с.

5. Харитонов В. П. Автономные ветроэлектрические установки [Текст] / В. П. Харитонов. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

6. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов [Текст] / Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

7. Ушаков Б. А. Атлас аэродинамических характеристик профилей крыльев [Текст] / Б. А. Ушаков, В. П. Красильщиков, А. К. Волков, А. Н. Гржекоржевский. – М. : Из-во БНТ НКАП, 1949. – 398 с.

8. Глаургет Г. Основы теории крыльев и винта [Текст] / Г. Глаургет – Л. : ГНТИ, 1931 – 179 с.

9. Янсон Р. А. Теория идеального горизонтально-осевого ветродвигателя в свободном атмосферном потоке : учебное пособие по курсу «Ветроэнергетика» [Текст] / Р. А. Янсон. – М. : Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005 – 36 с.

Штанько А.Д., Литвинова М.Б. СУДОВОЙ ВЕТРОГЕНЕРАТОР КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА

Разработан ветрогенератор колебательного типа, который можно устанавливать на судне. Предложено крыло гибкой конструкции, которое позволяет работать генератору в автоколебательном режиме, а также конструкция стопоров и направляющих, соответствующих оптимальной работе генератора.

Ключевые слова: ветрогенератор, автоколебательный режим, крыло, угол атаки.

Shtanko O.D., Litvinova M.B. VESSEL WIND ALTERNATOR OF THE OSCILLATING TYPE

We discuss the design of the wind alternator of the oscillating type, which can be installed on the vessel. The alternative wind turbines were analyzed. We came to a conclusion that there is a need to use the unique properties of the wing according to its intended purpose - getting the lift force of the wing. Methods of obtaining energy and the corresponding design of the alternator were developed. It is shown that even if the base of the alternator moves against the wind, there is a method of obtaining energy from the alternator in higher quantity than the expenses for the drag. What is more, using a flexible maintenance of consumption, the quantity of additional energy will exceed the amount of energy obtained without movements of the base.

A flexible wing design that allows you to operate the generator in oscillating mode as well as design guides and stops corresponding optimal operation of the generator. As a result, alternator of the of the oscillating type that can be installed on the vessel was created. It does not create low frequency noise, is safe for birds and can also be installed on the roofs of houses and buildings.

Keywords: wind alternator, self-oscillating mode, wing, angle of attack.

© Штанько О.Д., Литвинова М.Б.

Статтю прийнято
до редакції 30.11.14