

УДК 621.548

В.М.Головко, докт.техн.наук, **В.П.Коханевич**, канд.техн.наук, **М.О.Шихайлов** (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ), **В.І.Будько**, канд.техн.наук (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

Вплив параметрів системи орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" на статичні характеристики вітроустановки

Запропоновано математичну модель системи орієнтації ротора за допомогою флюгерної площини та з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі". На її основі отримано статичні характеристики та криві потужності з урахуванням конструктивних параметрів, що дозволяє у процесі проектування вибрати параметри даної системи, які забезпечують мінімальні енергетичні втрати.

Ключові слова: вітроенергетика, система орієнтації ротора, статичні характеристики.

Предложена математическая модель системы ориентации ротора с помощью флюгерной плоскости и с использованием конструктивной схемы "хвост на косом шарнире". На ее основе получены статические характеристики и кривые мощности с учетом конструктивных параметров, что позволяет в процессе проектирования выбрать параметры данной системы, которые обеспечивают минимальные энергетические потери.

Ключевые слова: ветроэнергетика, система ориентации ротора, статические характеристики.

Одним із критеріїв оцінки ефективності вітроустановок малої потужності є мінімізація у процесі роботи втрат, що визначаються їх складниками, до яких входять і системи орієнтації ротора. До найбільш використовуваних систем орієнтації, як було показано в роботі [1], відноситься система орієнтації ротора за допомогою флюгерної площини з виведенням ротора з-під вітру та з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі". В цій же роботі були запропоновані критерії оцінки такого типу систем, а саме їх статичні характеристики та криві потужності.

В роботі [2] було запропоновано математичну модель системи орієнтації ротора за допомогою флюгерної площини з виведенням ротора з-під вітру та з використанням конструктивної схеми підпружиненого хвоста; на її основі отримано статичні характеристики та криві потужності з урахуванням конструктивних параметрів, що дозволяє оцінити енергетичні втрати у процесі роботи вітроустановки та вибрати конструктивні параметри для мінімізації втрат. У даній статті пропонується провести аналогічну роботу для системи орієнтації ротора за допомогою флюгерної площини з виведенням ротора з-під вітру і з

використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" та порівняти дані системи в плані енергетичних втрат.

Система орієнтації ротора за допомогою флюгерної площини хвоста з виведенням ротора з-під вітру та використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" являє собою аеромеханічну систему з трьома ступенями свободи. Умову її статичної рівноваги можна записати як систему з трьох рівнянь, а саме:

$$\left. \begin{aligned} M_P &= M_H \\ M_{P_{\Pi}} &= M_{B_{X_6}} \\ M_{B_{X_6}} &= M_{X_6} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де M_P – рушійний момент ротора; M_H – момент навантаження на роторі; $M_{P_{\Pi}}$ – поворотний момент, що створює ротор відносно осі повороту гондоли; $M_{B_{X_6}}$ – момент від ваги хвоста відносно осі повороту гондоли; M_{X_6} – момент від дії аеродинамічних сил на площину хвоста відносно осі повороту гондоли.

В роботі [2] було проведено аналіз моментів, що входять у систему рівнянь (1), та зроблено

ряд припущень, котрі дозволяють звести дану систему рівнянь до одного рівняння, а саме:

$$M_{P_H} = M_{B_{X_6}} \quad (2)$$

Вираз для моменту, що створює ротор відносно осі повороту головки при набіганні повітряного потоку на ротор під кутом γ зі швидкістю V , використаємо з роботи [2]:

$$M_{P_H} = \frac{\pi}{2} \rho C_T V^2 R^2 \cos^2 \gamma \left(\varepsilon_T - \frac{1}{2} Rk \gamma \cos \gamma \right), \quad (3)$$

де ρ – питома густина повітря; C_T – коефіцієнт лобового тиску (у відповідності з теорією Бетца для номінального режиму $C_T = \frac{8}{9}$); ε_T – величина зміщення осі ротора відносно осі обертання головки; R – радіус ротора вітроустановки; $k \cong 0,0015$, якщо кут γ задається в градусах.

Розглянемо момент, який створює сила ваги хвоста відносно осі повороту хвоста $M'_{B_{X_6}}$ та відповідно осі повороту головки $M_{B_{X_6}}$. На рис. 1 наведено розрахункову схему сил для даної системи орієнтації ротора.

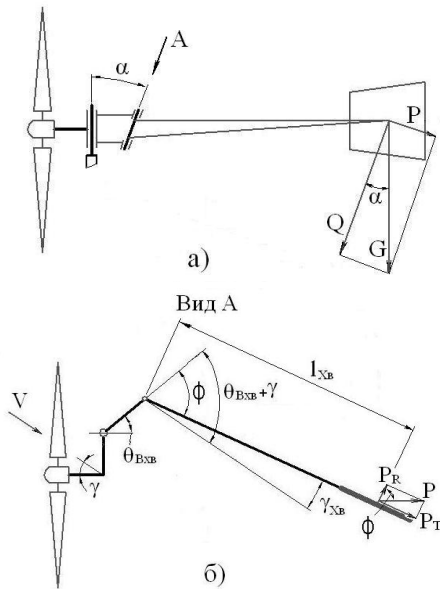


Рис. 1. Розрахункова схема сил для системи орієнтації з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі".

Силу від дії ваги хвоста G можна розкласти на дві сили (рис. 1а):

$$\begin{aligned} Q &= G \cdot \cos \alpha, \\ P &= G \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \quad (4)$$

де α – кут нахилу осі обертання хвоста до осі обертання ротора.

Сила Q направлена уздовж осі обертання хвоста і, відповідно, моменту створювати не буде. Розглянемо сили, що діють у площині, перпендикулярній до осі обертання хвоста (рис. 1б). Як і в попередньому випадку, силу P можна розкласти на дві складові:

$$\begin{aligned} P_R &= P \cdot \cos \phi, \\ P_T &= P \cdot \sin \phi, \end{aligned} \quad (5)$$

де ϕ – кут відхилення хвоста від осі важеля OO_1 (тобто від положення рівноваги).

Сила P_R не створює моменту відносно осі обертання хвоста, а момент від сили P_T буде складати:

$$M'_{B_{X_6}} = P_T \cdot l_{X_6},$$

де l_{X_6} – відстань від осі обертання хвоста до центру маси хвоста в площині, перпендикулярній до осі обертання хвоста.

З урахуванням виразів (4) та (5) запишемо вираз для $M'_{B_{X_6}}$:

$$M'_{B_{X_6}} = G \cdot \sin \alpha \cdot \sin \phi \cdot l_{X_6}.$$

Виразимо кут ϕ через кути $\theta_{B_{X_6}}$, γ та γ_{X_6} , а саме:

$$\phi = \gamma + \theta_{B_{X_6}} - \gamma_{X_6}. \quad (6)$$

З урахуванням виразу (6) запишемо в остаточній формі вираз для моменту від дії ваги хвоста G відносно осі його повороту:

$$M'_{B_{X_6}} = G \sin \alpha \cdot \sin(\gamma + \theta_{B_{X_6}} - \gamma_{X_6}) l_{X_6}. \quad (7)$$

Для визначення моменту, що створює сила від ваги хвоста відносно осі повороту головки, спроекуємо момент $M'_{B_{X_6}}$ на дану вісь (рис. 2).

$$M_{B_{X_6}} = M'_{B_{X_6}} \cdot \cos \alpha.$$

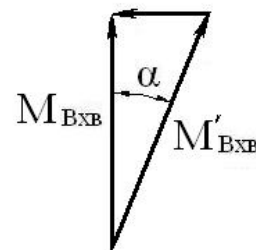


Рис. 2. План сил для визначення $M_{B_{X_6}}$.

Тоді, з урахуванням виразу (7), вираз для $M_{B_{X\epsilon}}$ запишемо так:

$$M_{B_{X\epsilon}} = G \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \sin(\gamma + \theta_{B_{X\epsilon}} - \gamma_{X\epsilon}) l_{X\epsilon},$$

а після перетворення отримаємо:

$$M_{B_{X\epsilon}} = \frac{1}{2} G \sin 2\alpha \cdot \sin(\gamma + \theta_{B_{X\epsilon}} - \gamma_{X\epsilon}) l_{X\epsilon}. \quad (8)$$

Відповідно з урахуванням виразів (3) та (8) рівняння (2) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \pi \rho C_T V^2 R^2 \cos^2 \gamma \left(\varepsilon_T - \frac{1}{2} R k \gamma \cos \gamma \right) = \\ = G \sin 2\alpha \cdot \sin(\gamma + \theta_{B_{X\epsilon}} - \gamma_{X\epsilon}) l_{X\epsilon}. \end{aligned} \quad (9)$$

Як було показано в [1], статична характеристика системи орієнтації з виведенням ротора з-під вітру являє собою функціональну залежність $\gamma = f(V)$. Рівняння (9) дозволяє отримати дану залежність, але аналітичний її вираз буде надто громіздкий. У даному випадку простіше з цих рівнянь отримати функціональну залежність $V = f(\gamma)$ і на її основі графічно побудувати статичну характеристику. Відповідно, перетворимо вираз (9) та отримаємо функціональну залежність $V = f(\gamma)$, а саме:

$$V = \sqrt{\frac{G \sin 2\alpha \cdot \sin(\gamma + \theta_{B_{X\epsilon}} - \gamma_{X\epsilon}) l_{X\epsilon}}{\pi \rho C_T R^2 \cos^2 \gamma \left(\varepsilon_T - \frac{1}{2} R k \gamma \cos \gamma \right)}}. \quad (10)$$

Для аналізу впливу параметрів системи орієнтації ротора флюгерною площиною з одночас-

ним виведенням ротора з-під вітру та з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" на її статичні характеристики була вибрана вітроустановка типу *Fortis Montana* з радіусом ротора $R = 3$ м.

Виходячи з виразу (10), основні параметри системи регулювання, що визначають статичну характеристику, наступні:

- G – вага хвоста;
- $l_{X\epsilon}$ – відстань від осі обертання хвоста до центру маси хвоста в площині, перпендикулярній до осі обертання хвоста;
- α – кут нахилу осі обертання хвоста до осі обертання ротора;
- ε_T – величина зміщення осі ротора відносно осі обертання гондоли;
- $\gamma_{X\epsilon}$ – кут установлення хвоста відносно повітряного потоку;
- $\theta_{B_{X\epsilon}}$ – кут між важелем хвоста і віссю ротора.

Початкові параметри системи регулювання вітроустановки типу *Fortis Montana*, які в подальшому будуть варіюватися, наступні:

$$\begin{aligned} G = 120 \text{ Н}; \quad l_{X\epsilon} = 4 \text{ м}; \quad \alpha = 15^\circ; \\ \varepsilon_T = 0,2 \text{ м}; \quad \gamma_{X\epsilon} = 10^\circ; \quad \theta_{B_{X\epsilon}} = 30^\circ. \end{aligned}$$

На рис. 3 і 4 наведені відповідно статичні характеристики та криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах ваги хвоста.

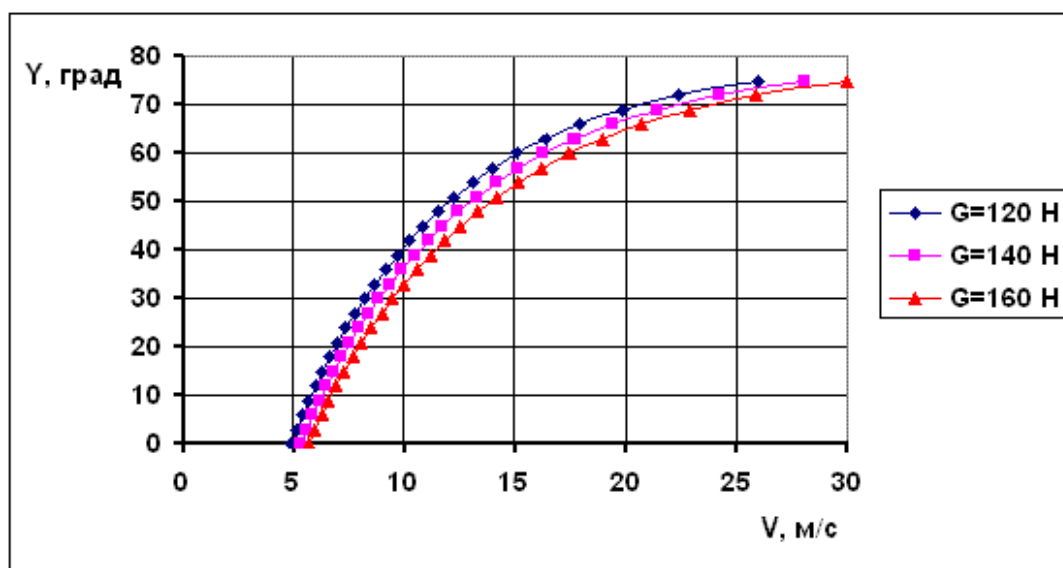


Рис. 3. Статичні характеристики вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах ваги хвоста.

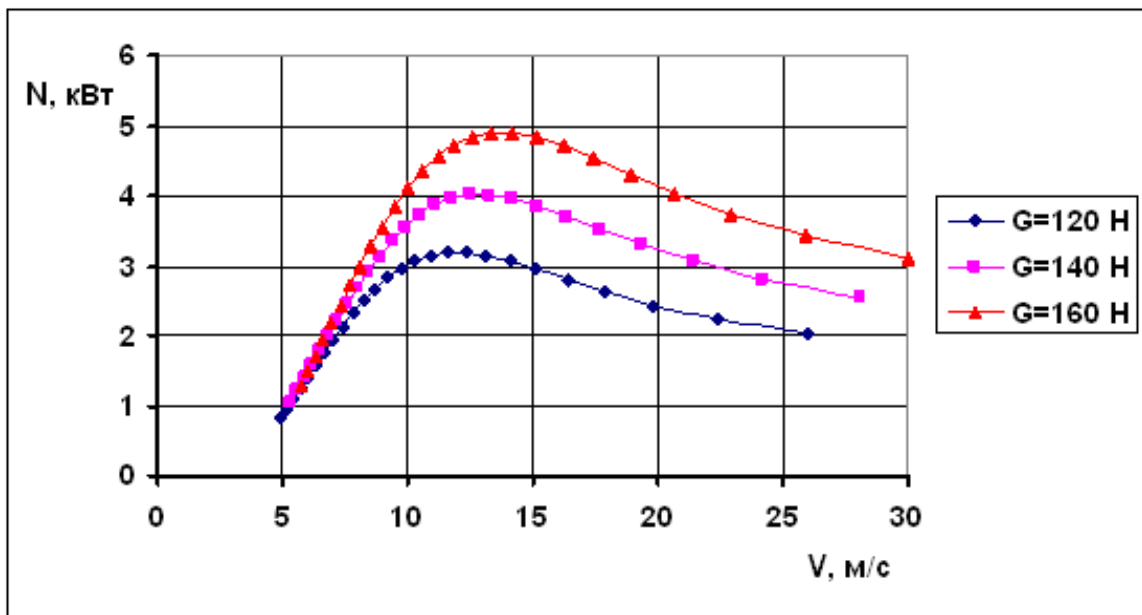


Рис. 4. Криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах ваги хвоста.

З графіків кривих статичних характеристик та потужностей на рис. 3 та рис. 4 можна зробити висновки, що збільшення ваги хвоста приводить до наступного:

- незначного збільшення швидкості вітру, з якої починається регулювання;
- збільшення максимальної потужності вітроустановки відповідно при більшій швидкості вітру;

• криві статичних характеристик та потужностей залишаються ідентичними при різних величинах ваги хвоста.

На рис. 5 і 6 відповідно наведені статичні характеристики та криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах відстані від осі обертання хвоста до центру ваги хвоста у площині, перпендикулярній до осі обертання хвоста.

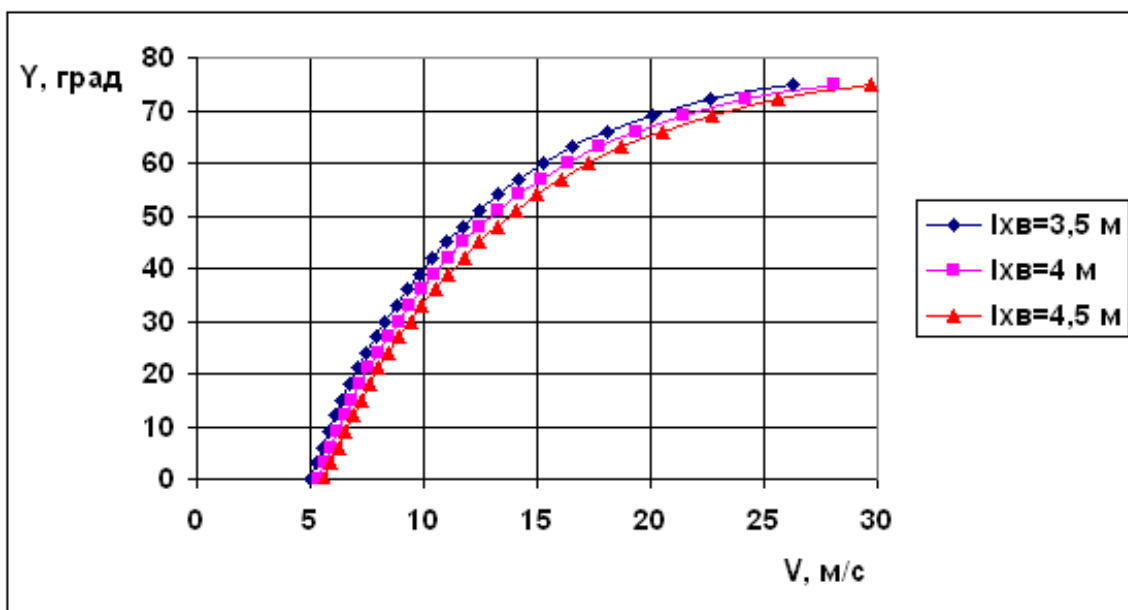


Рис. 5. Статичні характеристики вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах відстані від осі обертання хвоста до центру ваги хвоста в площині, перпендикулярній до осі обертання хвоста.

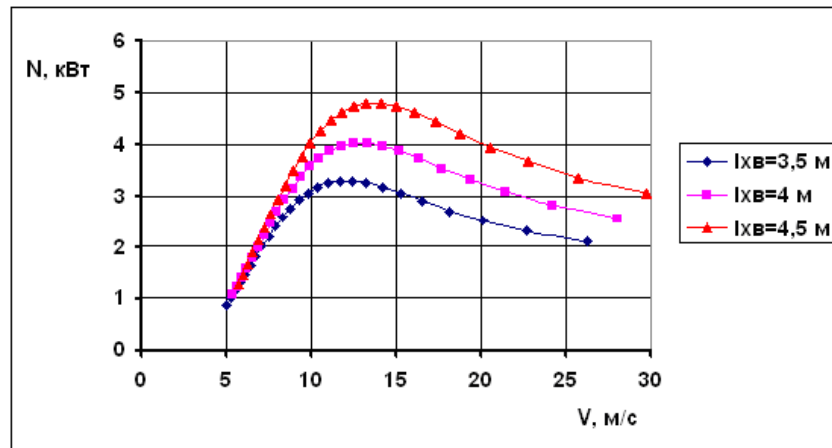


Рис. 6. Криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах відстані від осі обертання хвоста до центру ваги хвоста в площині, перпендикулярній до осі обертання хвоста.

Характер зміни кривих статичних характеристик та потужності в залежності від величин відстані від осі обертання хвоста до центру маси хвоста в площині, перпендикулярній до осі обертання хвоста, що наведені на рис. 5 і 6, ідентичний впливу на дані

криві ваги хвоста і не потребує окремого аналізу.

На рис. 7 і 8 наведені відповідно статичні характеристики та криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах кута нахилу осі обертання хвоста до осі обертання ротора.

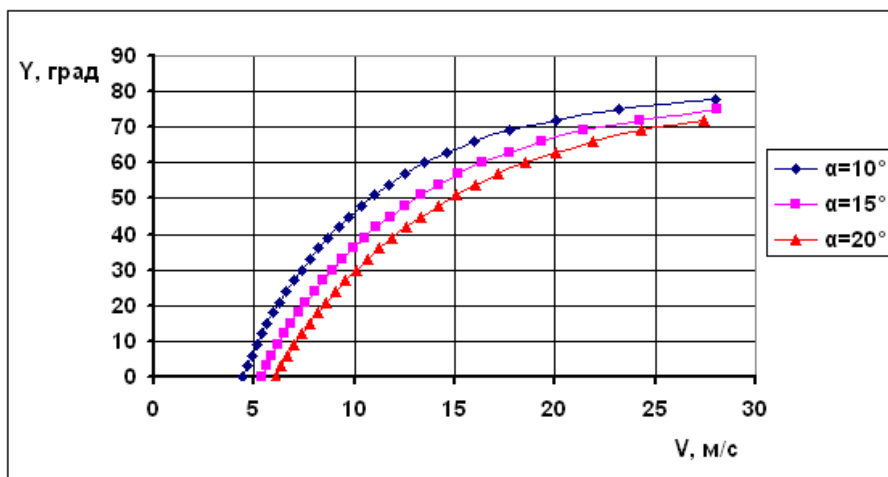


Рис. 7. Статичні характеристики вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах кута нахилу осі обертання хвоста до осі обертання ротора.

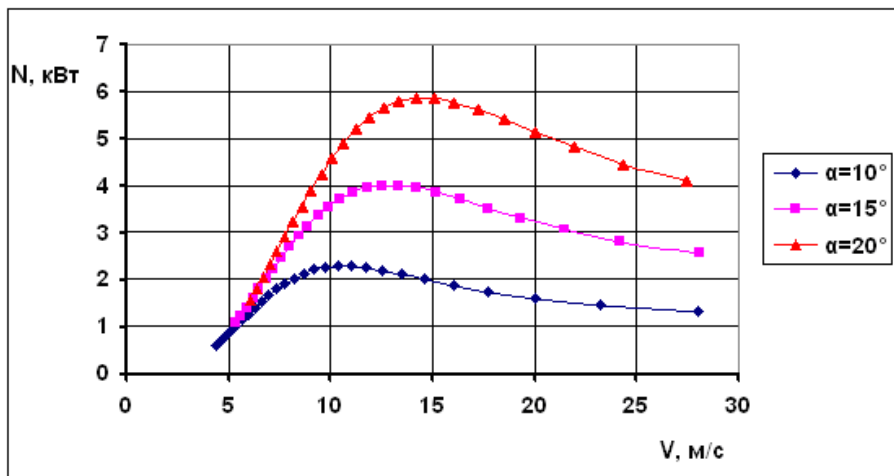


Рис. 8. Криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах кута нахилу осі обертання хвоста до осі обертання ротора.

Зміна кривих статичних характеристик і потужностей у залежності від величин кута нахилу осі обертання хвоста до осі обертання ротора (рис. 7 та 8) аналогічна зміні кривих у випадку зміни маси хвоста та відстані від осі обертання хвоста до центру маси хвоста в площині, перпендикулярній до осі обертання хвоста, але з певними відмінностями, а саме:

- збільшення кута α приводить до зменшення максимальної потужності вітроустановки;
- при менших величинах кута α максимальна потужність зі збільшенням швидкості вітру знижується більш плавно.

На рис. 9 і 10 наведені відповідно статичні характеристики та криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах кута установа хвоста відносно повітряного потоку.

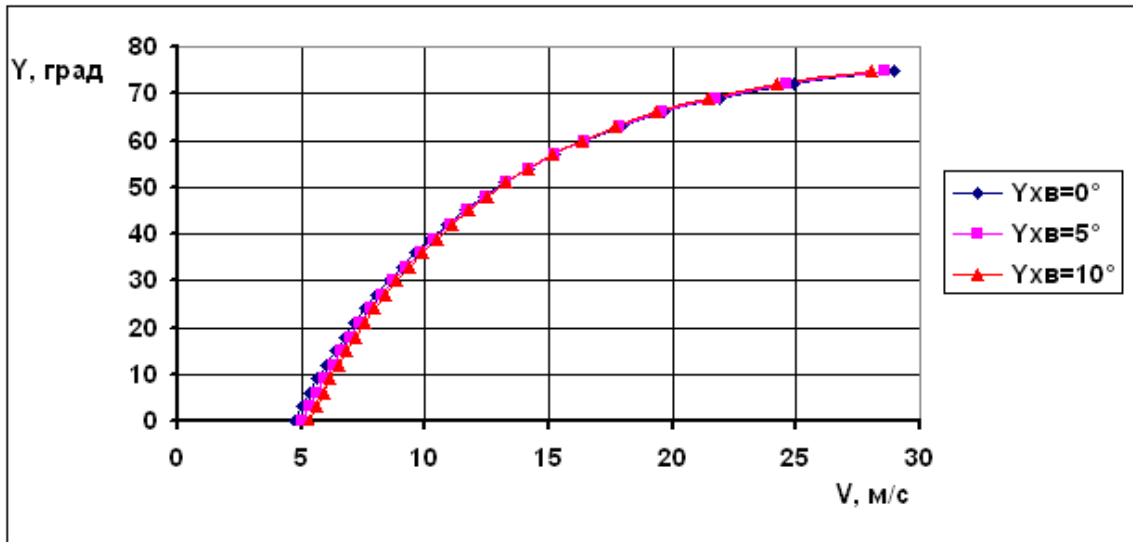


Рис. 9. Статичні характеристики вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах кута установа хвоста відносно повітряного потоку.

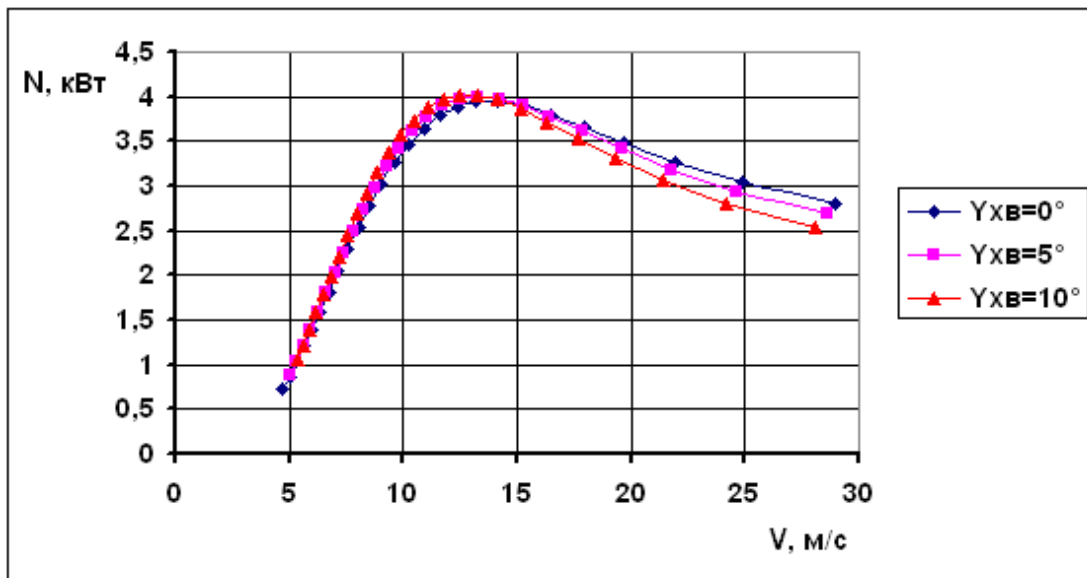


Рис. 10. Криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах кута установа хвоста відносно повітряного потоку.

З рис. 9 і 10 видно, що вплив кута установлення хвоста відносно повітряного потоку для конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" на характер кривих статичних характеристик та потужності практично незначний (навіть у порівнянні з конструктивною схемою "підпружинений хвіст" [2]). Статичні характеристики при $V > 10$ м/с прак-

тично співпадають; при цьому криві потужності незначно відрізняються швидкістю вітру, з якої починається регулювання, та в зоні вітрів $V > 15$ м/с.

На рис. 11 і 12 наведені відповідно статичні характеристики та криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах зміщення осі ротора відносно осі обертання гондоли.

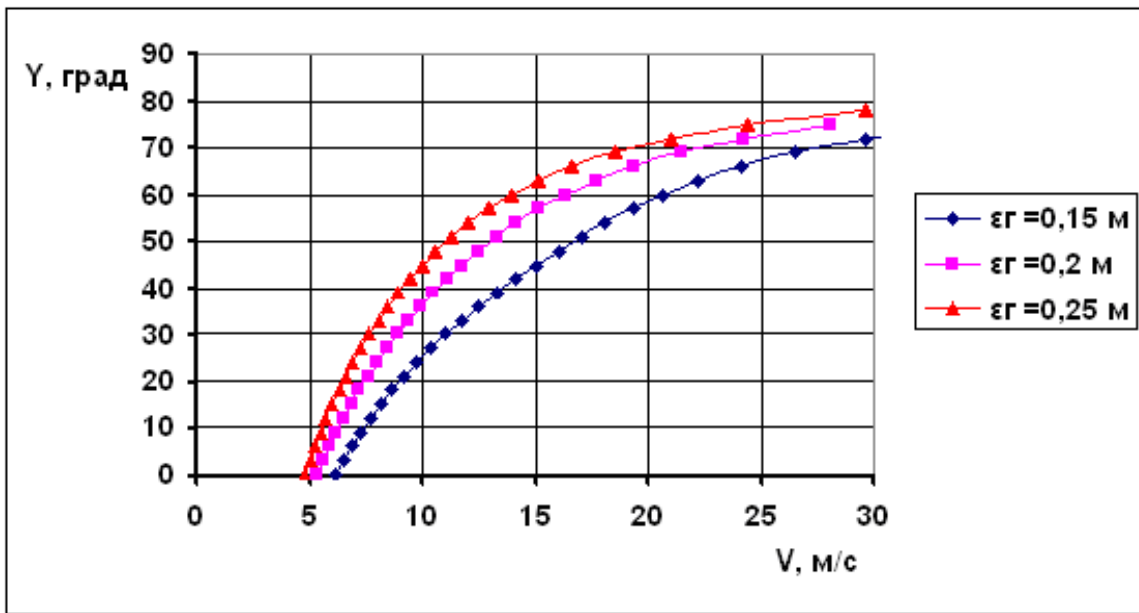


Рис. 11. Статичні характеристики вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах зміщення осі ротора відносно осі обертання гондоли.

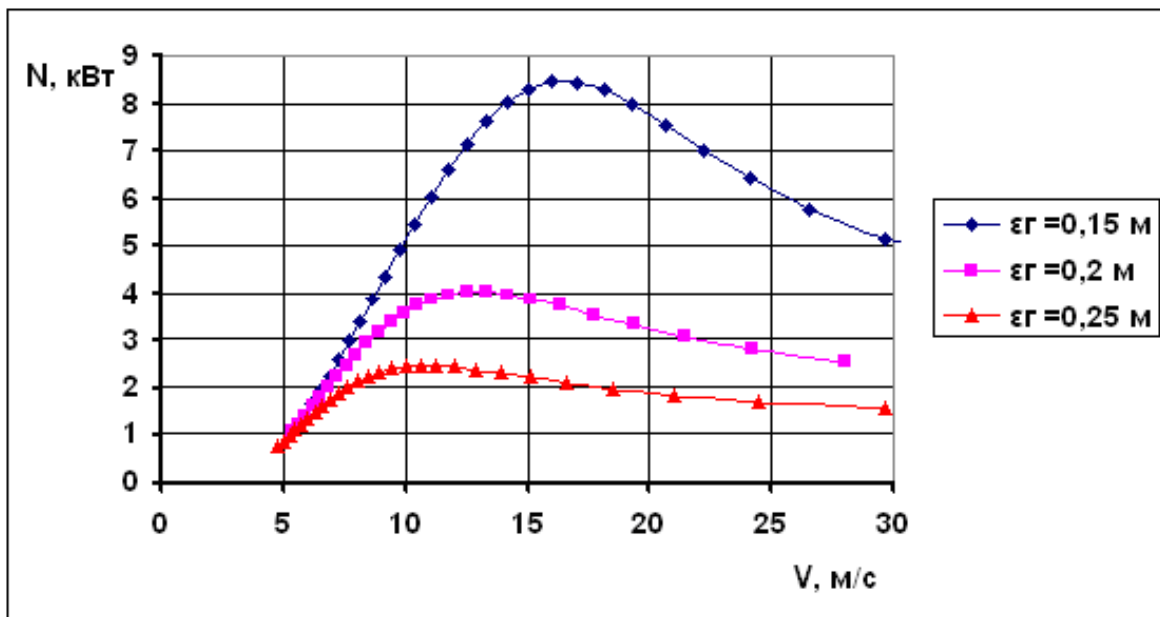


Рис. 12. Криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах зміщення осі ротора відносно осі обертання гондоли.

Аналізуючи графіки на рис. 11 та 12, можна констатувати, що характер змін кривих статичних характеристик та потужності співпадає з характером змін аналогічних кривих для вітроустановки з конструктивною схемою "підпружинений хвіст" (ВД-6) [2], а саме:

- при величинах зміщення ротора відносно осі обертання головки $\varepsilon_r \geq 0,2$ м зміна кривих статичних характеристик та потужності ідентична, як і у випадках зміни жорсткості та попереднього натягу пружини регулювання, з тією лише різницею, що збільшення ε_r приводить до зменшення швидкості вітру, з якої починається

регулювання максимальної потужності;

- при величинах $\varepsilon_r < 0,2$ м характер зміни кривої статичної характеристики вже не ідентичний кривим статичних характеристик при $\varepsilon_r \geq 0,2$ м, що приводить до різкого збільшення максимальної потужності вітроустановки при збільшенні швидкості вітру, з якої починається регулювання. Це викликано значним впливом зміщення центру лобового тиску на ротор.

На рис. 13 і 14 наведені відповідно статичні характеристики та криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах кута між важелем хвоста і віссю ротора.

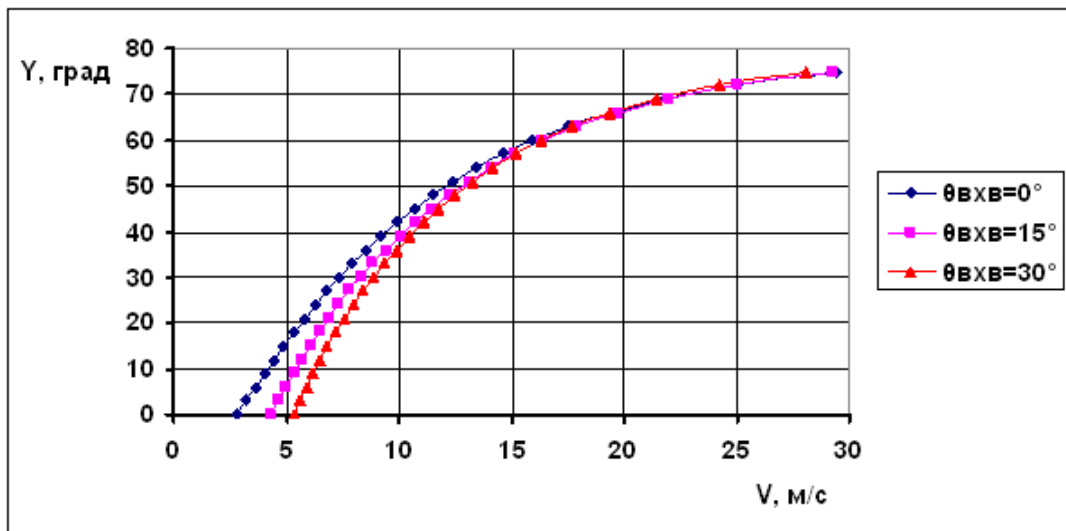


Рис. 13. Статичні характеристики вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах кута між важелем хвоста і віссю ротора.

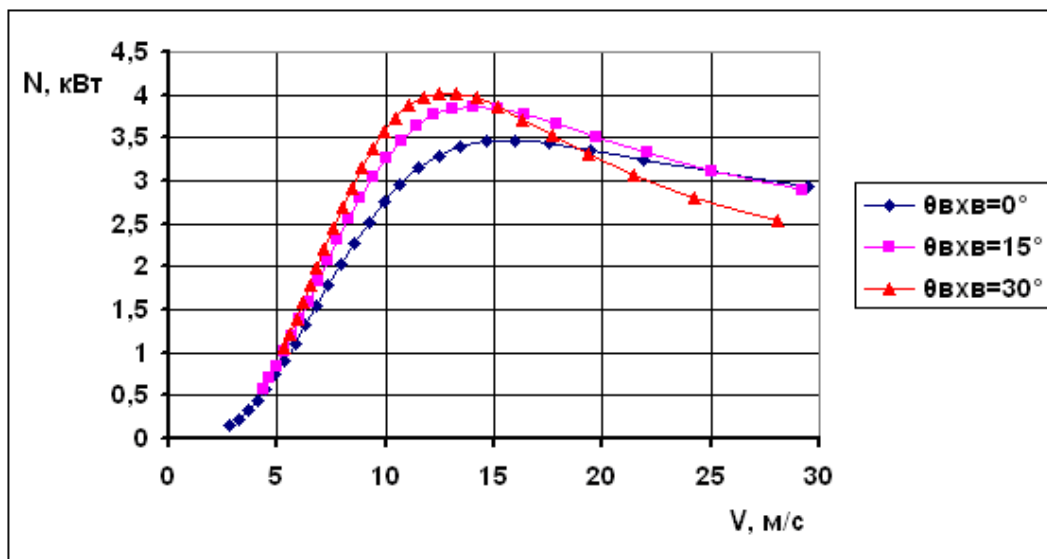


Рис. 14. Криві потужності вітроустановки *Fortis Montana* при різних величинах кута між важелем хвоста і віссю ротора.

Аналізуючи криві статичних характеристик та потужності в залежності від величини кута між важелем хвоста і віссю ротора (рис. 13, 14) можна констатувати, що даний кут дає можливість ефективно варіювати кривою потужності вітроустановки в залежності від вибору вітрового району експлуатації установки. Як і попередньо розглянуті параметри системи, регулювання зміною $\theta_{B_{X_6}}$ дозволяє змінювати величину швидкості вітру, з якої починається регулювання, та максимальну потужність. Зі збільшенням величини $\theta_{B_{X_6}}$ в широкому діапазоні збільшується швидкість початку регулювання (від 2,5 до 5,5 м/с), але незначно збільшується максимальна потужність (від 3,5 до 4 кВт). В той же час, при цьому змінюються кути нахилу кривої потужності як у зоні до точки максимальної потужності, так і після неї. Так, вибір $\theta_{B_{X_6}}$ у діапазоні 15-30° дозволяє наблизити криву потужності до теоретичної кривої потужності (рис. 15), що доцільно для вітроустановок, які плануються експлуатувати в районах із невисокими середньорічними швидкостями вітру. Відповідно вибір $\theta_{B_{X_6}}$ у межах від 0° до 15° дозволяє отримати криву потужності, яка плавно знижується після $V > 15$ м/с, що доцільно для вітроустановок у районах із високими середньорічними швидкостями вітру.

Проведені в роботі [2] аналогічні дослідження для системи орієнтації ротора за допомогою флюгерної площини з виведенням ротора з-під вітру та з використанням конструктивної схеми "підпружинений хвіст" (ВД-6) дозволяє порівняти дані системи орієнтації роторів. На рис. 15 наведено теоретичну криву потужності та криві потужності вітроустановок ВД-6 і *Fortis Montana*.

Як видно з рис. 15, крива потужності вітроустановки ВД-6 у діапазоні малих вітрів (0...8 м/с) практично співпадає з теоретичною кривою потужності. В той же час для вітроустановки *Fortis Montana* таке співпадання знаходиться в межах швидкості вітру 0...5,5 м/с. При цьому на більших швидкостях вітру після досягнення максимальної потужності у вітроустановки ВД-6 потужність різко зменшується у порівнянні з установкою *Fortis Montana* (так, при $V=16$ м/с потужність ВД-6 становить 2,3 кВт а *Fortis Montana* – 3,7 кВт). Тобто можна констатувати, що вітроустановки з системою орієнтації з використанням конструктивної схеми "підпружинений хвіст" доцільно розробляти та експлуатувати в районах із невисокими середньорічними швидкостями вітру, а вітроустановки з системою орієнтації з використанням конструктивної схеми "хвіст на косому шарнірі" – в районах із високими середньорічними швидкостями вітру.

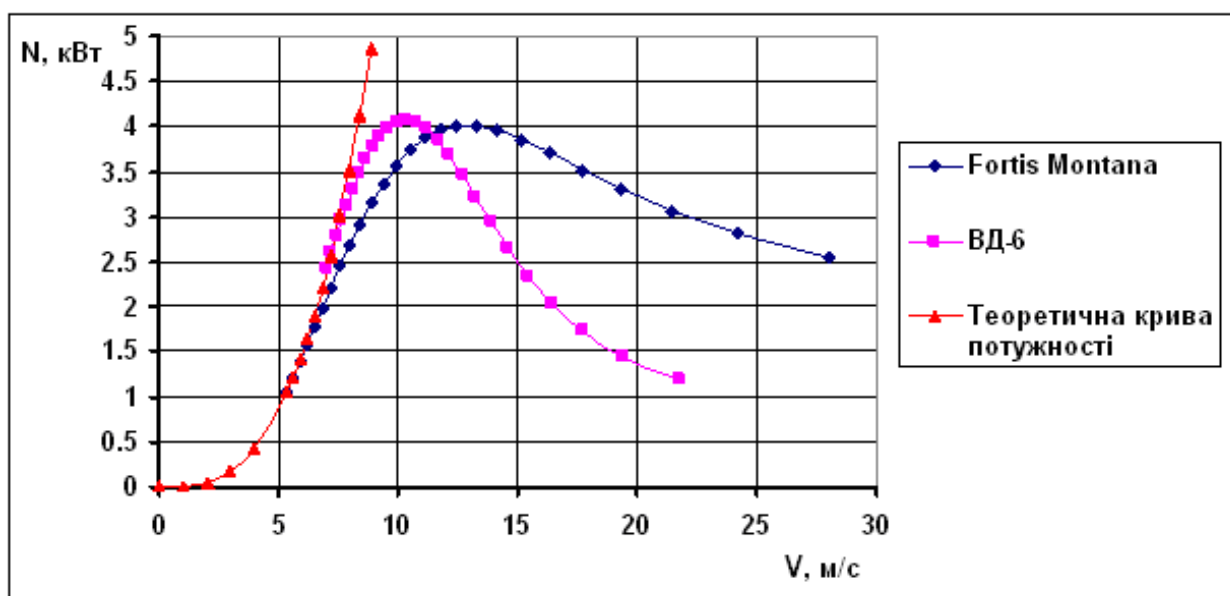


Рис. 15. Теоретична крива потужності та криві потужності вітроустановок ВД-6 і *Fortis Montana*.

Висновки. 1. В системі орієнтації можна виділити групу параметрів, вплив яких на статичні характеристики та на криві потужності приводить до зміни початкової швидкості регулювання (збільшення або зменшення) та величини максимальної потужності відповідно зі зміщенням їх у напрямку збільшення (або зменшення) швидкості вітру. Це – маса хвоста, відстань від осі обертання хвоста до центру маси хвоста в площині, перпендикулярній до осі обертання хвоста та кут нахилу осі обертання хвоста до осі обертання ротора.

2. Вплив кута установлення хвоста відносно повітряного потоку є незначним.

3. Величину зміщення осі ротора відносно осі обертання головки доцільно брати в межах

$\varepsilon_r \geq 0,2$ м для вітроустановок з діаметром ротора 6 м з метою зменшення впливу зміщення центру лобового тиску на ротор.

4. Зміна величини кута між важелем хвоста і віссю ротора змінює кути нахилу кривої потужності в зоні до точки максимальної потужності і після неї, що дозволяє адаптувати вітроустановку до різних середньорічних швидкостей вітру.

1. Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О. Аналіз систем орієнтації ротора вітроустановки малої потужності // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 2. – С. 55–60.

2. Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О., Марченко Н.В. Вплив параметрів системи орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми підпружиненого хвоста на статичні характеристики вітроустановки // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 3. – С. 30–39.

**ХІV МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА
ЕНЕРГЕТИКА В ПРОМИСЛОВІСТІ-2016**
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНЕ, ЕНЕРГЕТИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ, ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, КАБЕЛІ, ПРОВІДИ,
ПРОМИСЛОВА СВІЛОТЕХНІКА, ГІРНИЧІ МАШИНИ ТА ОБЛАДНАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, КВПІА

**ХІV МІЖНАРОДНИЙ ФОРУМ
ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС УКРАЇНИ:
СЬОГОДЕННЯ ТА МАЙБУТНЄ**




МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Україна, 02660
Київ, Броварський пр-т, 15
"Лівобережна"
тел./факс: (044) 201-11-57
e-mail: lyudmila@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua
www.tech-expo.com.ua

**8–10
листопада**

ОРГАНІЗАТОРИ:
Міністерство енергетики
та вугільної промисловості України
Міжнародний виставковий центр

Технічний партнер: *RealMedia*