

при проектуванні ВЕС попередньо розраховувати показники стійкості в можливих перетинах, уникати високих концентрацій ВЕС на обмеженій території, забезпечувати прогнозування швидкості вітру, узгоджувати уставки спрацьовування ВЕС з операторами мереж.

1. Кузнєцов М.П. Фактори впливу вітрової енергетики на стійкість енергосистеми // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 2. – С. 51–55.

2. СОУ-Н МЕВ 40.1.00100227-68:2012 Стійкість енергосистеми. Керівні вказівки. НТЦЕ НЕК Укренерго. Введ. в дію 21.10.2012 – 36 с.

3. Павловський В.В., Ленга О.В., Вишневський М.В. Дослідження стійкості режимів енергосистем з потужними сонячними та вітроелектростанціями. Методологічні питання. – 2012. – 22 с. // Електронний ресурс www.dmcc.com.ua.

4. Буткевич О.Ф., Левколюк А.В., Зорін Є.В., Буланая В.С. Про використання синхронізованих вимірів кутів напруги з об'єктів ОЕС України при визначеності допустимості її поточних режимів за запасами статичної стійкості // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 51–58.

5. Кузнєцов Н.П. Особенности моделирования мощности ветроэлектрических станций // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – №23. – С. 44–48.

6. Кузнєцов М.П. Гарантовані рівні участі ВЕС в покритті потужності енергосистеми // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 1. – С. 43–48.

7. Design and operation of power systems with large amounts of wind power. IEA WIND Task 25 final report, Helsinki, 2009. – 232 p.

8. Кузнєцов М.П. Особливості моделювання потужності вітрових електростанцій, розташованих на обмеженій території // Відновлювана енергетика. – 2014. – №4. – С. 57–61.

9. Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій потужністю більше 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж. НКРЕ України, AF-MERCADOS EMI. – 2011. – 43 с.

УДК 621.548

**В.М.Головко**, докт.техн.наук, **В.П.Коханевич**, канд.техн.наук, **М.О.Шихайлов**, **Н.В.Марченко**  
(Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

### **Вплив параметрів системи орієнтації ротора з використанням конструктивної схеми підпружиненого хвоста на статичні характеристики вітроустановки**

*Запропоновано математичну модель системи орієнтації ротора за допомогою флюгерної площини та з використанням конструктивної схеми підпружиненого хвоста. На її основі отримано статичні характеристики та криві потужності з урахуванням конструктивних параметрів, що дозволяє в 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 подпружиненного хвоста. 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.

Розвиток галузі малої вітроенергетики потребує постійного удосконалення вітроустановок у цілому та їх окремих складових частин, зокрема, систем орієнтації роторів. В роботі [1] були визначені як найбільш використовувані системи орієнтації, так і критерії для їх оцінювання. В процесі конструювання системи орієнтації перед розробником стоїть задача вибрати такі її пара-

метри, які дозволять забезпечити мінімальні енергетичні втрати.

В даній роботі для розгляду пропонується система орієнтації ротора за допомогою флюгерної площини, з виведенням ротора з-під вітру та за використання конструктивної схеми підпружиненого хвоста. Автори запропонували математичну модель даної системи орієнтації і на її

основі отримали статичні характеристики та криві потужності з урахуванням конструктивних параметрів, що дозволить проаналізувати вплив останніх на енергетичні втрати.

У загальному випадку систему орієнтації ротора за допомогою флюгерної площини хвоста з виведенням ротора з-під вітру та використанням конструктивної схеми підпружиненого хвоста можна розглядати як аеромеханічну систему з трьома ступенями свободи. Відповідно, умову її статичної рівноваги можна описати системою з трьох рівнянь:

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

де  $M_P$  – рушійний момент ротора;  $M_H$  – момент навантаження на роторі;  $M_{P_H}$  – поворотний момент, що створює ротор відносно осі повороту гондоли;  $M_{P_P}$  – момент від сили натягу пружини відносно осі повороту хвоста;  $M_{X_6}$  – момент від дії аеродинамічних сил на площину хвоста відносно осі повороту хвоста.

Ряд моментів та сил, що створюють відповідні моменти, є суттєво нелінійними і розраховуються та задаються у графічному вигляді, а частина сил визначається експериментальним шляхом для конкретної вітроустановки. Крім цього, у загальному випадку в рівняння, що входять до системи рівнянь (1), повинен входити реактивний момент, який з'являється у разі наявності вертикального валу. Оскільки конструкції вітроустановок із вертикальним валом на даний час практично не зустрічаються, то немає сенсу вносити реактивний момент у вищезгадані рівняння.

Також у загальному випадку в систему рівнянь (1) повинні входити моменти від сил тертя в опорно-поворотному механізмі та в шарнірах кріплення хвоста. Сили тертя впливають на положення ротора та хвоста відносно напрямку повітряного потоку, але наступні фактори дозволяють ними знехтувати. По-перше, в опорно-поворотних вузлах використовуються шарикопідшипники, в яких коефіцієнт тертя незначний. По-друге, в процесі роботи установки через пос-

тійні зміни швидкості вітру та його напрямку виникають вібрації, що сприяють встановленню ротора та хвоста в положення рівноваги.

Рівняння  $M_P = M_H$  відображає режими навантаження ротора, що змінюються в процесі роботи вітроустановки. Враховуючи те, що метою роботи є визначення впливу параметрів системи орієнтації ротора на статичні характеристики, доцільно провести даний аналіз для режиму, коли навантаження на роторі відповідає номінальному рушійному моменту ротора, що відповідає максимальному коефіцієнту використання енергії вітру установкою. З урахуванням даної умови рівнянням  $M_P = M_H$  можна знехтувати.

Рівняння  $M_{P_P} = M_{X_6}$  в системі рівнянь (1) визначає положення хвоста відносно повітряного потоку. Дане положення визначається аеродинамічними силами, що діють на флюгерну площину хвоста (які в свою чергу залежать від розмірів флюгерної площини, її аеродинамічного профілю і кута набігання повітряного потоку), та конструктивними розмірами хвостової балки. Конструктивні розміри елементів хвоста розраховуються таким чином, щоб хвіст у процесі роботи установки відхилився від напрямку повітряного потоку на кут  $5^\circ$ - $15^\circ$ . Ряд авторів [2] пропонує в розрахункових схемах прийняти даний кут постійним або рівним 0. В процесі роботи установки хвіст відхиляється на певний кут, який практично залишається незмінним при збільшенні (або зменшенні) швидкості вітру, оскільки при збільшенні сили лобового тиску на ротор збільшується величина аеродинамічної сили на флюгерній площині хвоста. Враховуючи вищезазначені аргументи, доцільно вважати, що хвіст відхиляється на певний кут, який у процесі роботи є незмінним, тобто  $\gamma_{X_6} = const$ , що дозволяє рівняння  $M_{P_P} = M_{X_6}$  виключити із системи рівнянь (1).

З урахуванням вищенаведених припущень система рівнянь (1) зводиться до одного рівняння, а саме:

$$M_{P_H} = M_{P_P} \cdot \quad (2)$$

Розглянемо сили, що входять до рівняння (2). Аеродинамічні сили, що діють на ротор при набі-

ганні повітряного потоку під кутом  $\gamma$ , створюють момент відносно осі повороту головки  $M_{Pn}$  і наведені на рис. 1. Тоді  $M_{Pn}$  можна записати так:

$$M_{Pn} = B(\varepsilon_{\Gamma} - \varepsilon_{\Delta}) + T \cdot l_{\Gamma}, \quad (3)$$

де  $B$  – сила лобового тиску на ротор;  $\varepsilon_{\Gamma}$  – величина зміщення осі ротора відносно осі обертання головки;  $\varepsilon_{\Delta}$  – додаткове зміщення центру лобового тиску на ротор через нерівномірне обтікання ротора повітряним потоком під певним кутом;  $T$  – тангенціальна сила;  $l_{\Gamma}$  – величина вильоту ротора відносно осі обертання головки.

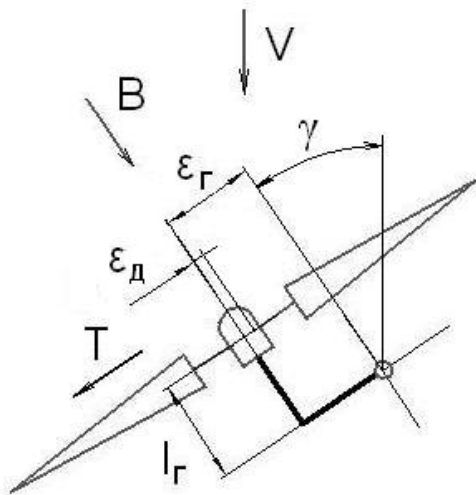


Рис. 1. План сил, що діють на ротор при набіганні повітряного потоку під кутом  $\gamma$ .

Величини  $B$ ,  $\varepsilon_{\Delta}$ ,  $T$  визначаються при випробуваннях в аеродинамічній трубі, але накопичений експериментальний матеріал [3] дозволяє встановити для них наступні аналітичні залежності:

$$B = B_H \cdot \cos^2 \gamma, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{1}{2} R \cdot k \cdot \gamma \cdot \cos \gamma, \quad (5)$$

де  $B_H$  – номінальна сила лобового тиску на ротор;  $k \cong 0,0015$ , якщо кут  $\gamma$  задається в градусах.

Номінальна сила лобового тиску на ротор складає:

$$B_H = \frac{1}{2} \rho \cdot C_T \cdot V^2 \cdot S,$$

де  $\rho$  – питома густина повітря;  $C_T$  – коефіцієнт лобового тиску (у відповідності з теорією Бетца для номінального режиму  $C_T = \frac{8}{9}$ );  $S$  – площа обмаху ротора.

Виразимо площу обмаху ротора через його радіус  $R$ , тоді вираз для номінальної сили лобового тиску на ротор набуде вигляду:

$$B_H = \frac{\pi}{2} \rho \cdot C_T \cdot V^2 \cdot R^2. \quad (6)$$

Величина тангенціальної сили  $T$  незначна і нею можна знехтувати.

З урахуванням виразів (4), (5), (6) вираз для моменту, що створює ротор відносно осі повороту головки, можна записати так:

$$M_{Pn} = \frac{\pi}{2} \rho \cdot C_T \cdot V^2 \cdot R^2 \cdot \cos^2 \gamma \times \left( \varepsilon_{\Gamma} - \frac{1}{2} R \cdot k \cdot \gamma \cdot \cos \gamma \right). \quad (7)$$

Розглянемо момент, який створює сила натягу пружини відносно осі повороту хвоста  $M_{Пр}$ . На рис. 2 наведено розрахункову схему пружинного механізму системи орієнтації.

Основні конструктивні параметри системи орієнтації, що пов'язані з пружинним механізмом, наступні:

- $\varepsilon_{Хв}$  – величина зміщення важеля хвоста відносно осі обертання головки;
- $\theta_{Вхв}$  – кут між важелем хвоста і віссю ротора;
- $\theta_{Впр}$  – кут між важелем пружини і віссю ротора;
- $l_{Впр}$  – довжина важеля пружини;
- $\gamma_{Хв}$  – кут установа хвоста відносно повітряного потоку;
- $l_{Хв}$  – відстань від вісі обертання хвоста до точки кріплення пружини до хвоста;
- $c$  – жорсткість пружини;
- $a$  – величина попереднього натягу пружини.

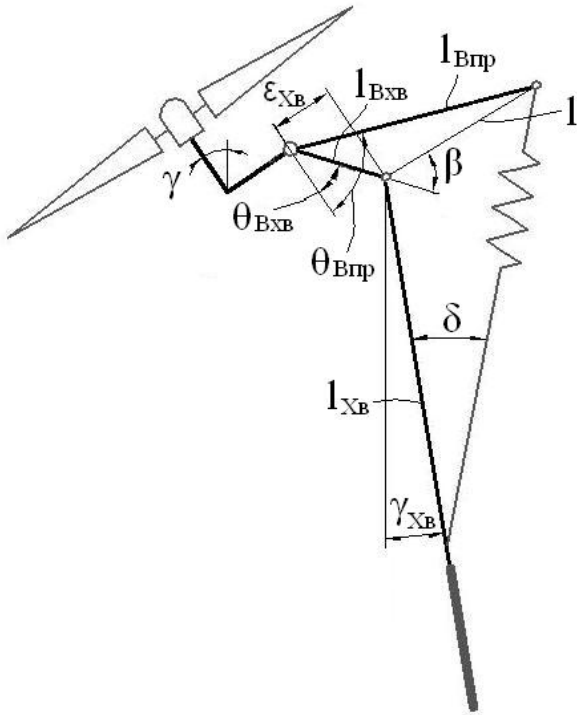


Рис. 2. Розрахункова схема пружинного механізму системи орієнтації.

Для отримання виразу для  $M_{Пр}$  введемо ряд додаткових параметрів:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_{Впр} - \theta_{Вхв}; \\ l_{Вхв} &= \frac{\epsilon_{Хв}}{\sin \theta_{Вхв}}; \\ l &= \sqrt{l_{Впр}^2 + l_{Вхв}^2 - 2l_{Вхв} \cdot l_{Впр} \cdot \cos \theta}; \\ \beta &= \pi - \arccos \left( \frac{l_{Вхв}^2 + l^2 - l_{Впр}^2}{2l_{Вхв} \cdot l} \right), \end{aligned}$$

де  $\theta$  – кут між важелем хвоста і важелем пружини;  $l_{Вхв}$  – довжина важеля хвоста;  $l$  – відстань від осі обертання хвоста до точки кріплення пружини до важеля пружини;  $\beta$  – зворотній кут між важелем хвоста і відрізком  $l$ .

Сила натягу пружини буде складати:

$$F_{Пр} = c(\Delta + a),$$

де  $\Delta$  – величина деформації пружини при розвертанні ротора.

Величина деформації пружини знаходиться з виразу:

$$\Delta = \sqrt{l^2 + l_{Хв}^2 - 2l \cdot l_{Хв} \cos[(\beta + \theta_{Вхв}) + (\gamma - \gamma_{Хв})]} - \sqrt{l^2 + l_{Хв}^2 - 2l \cdot l_{Хв} \cos[(\beta + \theta_{Вхв}) - \gamma_{Хв}]} \quad (8)$$

З урахуванням виразу (8) вираз для сили натягу пружини набуде вигляду:

$$F_{Пр} = c \left\{ \begin{aligned} &a + \sqrt{l^2 + l_{Хв}^2 - 2l \cdot l_{Хв} \cos[(\beta + \theta_{Вхв}) + (\gamma - \gamma_{Хв})]} - \\ &-\sqrt{l^2 + l_{Хв}^2 - 2l \cdot l_{Хв} \cos[(\beta + \theta_{Вхв}) - \gamma_{Хв}]} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Момент, що створює сила натягу пружини, буде складати:

$$M_{Пр} = F_{Пр} \cdot l_{Хв} \cdot \sin \delta,$$

де  $\delta$  – кут між важелем хвоста і пружиною.

Кут  $\delta$  знайдемо з виразу:

$$\delta = \arctg \frac{l \sin[(\beta + \theta_{Вхв}) + (\gamma - \gamma_{Хв})]}{l_{Хв} - l \cos[(\beta + \theta_{Вхв}) + (\gamma - \gamma_{Хв})]} \quad (10)$$

Остаточно вираз для  $M_{Пр}$  з урахуванням виразів (9) та (10) можна записати так:

$$\begin{aligned} M_{Пр} &= c \cdot l_{Хв} \left\{ \begin{aligned} &a + \sqrt{l^2 + l_{Хв}^2 - 2l \cdot l_{Хв} \cos[(\beta + \theta_{Вхв}) + (\gamma - \gamma_{Хв})]} - \\ &-\sqrt{l^2 + l_{Хв}^2 - 2l \cdot l_{Хв} \cos[(\beta + \theta_{Вхв}) - \gamma_{Хв}]} \end{aligned} \right\} \times \\ &\times \sin \arctg \frac{l \sin[(\beta + \theta_{Вхв}) + (\gamma - \gamma_{Хв})]}{l_{Хв} - l \cos[(\beta + \theta_{Вхв}) + (\gamma - \gamma_{Хв})]} \quad (11) \end{aligned}$$

Запишемо рівняння (2) в повному вигляді з урахуванням виразів (7) та (11):

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{2} \rho \cdot C_T \cdot V^2 \cdot R^2 \cdot \cos^2 \gamma \left( \epsilon_r - \frac{1}{2} R \cdot k \cdot \gamma \cdot \cos \gamma \right) &= c \cdot l_{Хв} \left\{ \begin{aligned} &a + \sqrt{l^2 + l_{Хв}^2 - 2l \cdot l_{Хв} \cos[(\beta + \theta_{Вхв}) + (\gamma - \gamma_{Хв})]} - \\ &-\sqrt{l^2 + l_{Хв}^2 - 2l \cdot l_{Хв} \cos[(\beta + \theta_{Вхв}) - \gamma_{Хв}]} \end{aligned} \right\} \times \\ &\times \sin \arctg \frac{l \sin[(\beta + \theta_{Вхв}) + (\gamma - \gamma_{Хв})]}{l_{Хв} - l \cos[(\beta + \theta_{Вхв}) + (\gamma - \gamma_{Хв})]} \quad (12) \end{aligned}$$

Вираз (12) дозволяє отримати функціональну залежність  $\gamma = f(V)$ , яка є статичною характеристикою та, відповідно, отримати криву потужності [1]. Оскільки отримання аналітичного виразу  $\gamma = f(V)$  є занадто громіздким, то розрахунок статичної характеристики проводився числовим методом.

Для аналізу впливу параметрів системи орієнтації ротора флюгерною площиною з одночасним виведенням ротора з-під вітру та з використанням конструктивної схеми підпружиненого хвоста на її статичні характеристики була вибрана вітроустановка ВД-6 з радіусом ротора  $R=3$  м. Основні параметри системи регулювання вітроустановки ВД-6, що входять у вираз статичної характеристики для конструктивної схеми з використанням підпружиненого хвоста, наступні:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Gamma} &= 0,2 \text{ м}; & \varepsilon_{X\theta} &= 0,2 \text{ м}; & l_{X\theta} &= 2 \text{ м}; \\ \theta_{Bx\theta} &= 20^{\circ}; & \gamma_{X\theta} &= 10^{\circ}; & \theta_{Bnp} &= 50^{\circ}; \\ l_{Bnp} &= 0,9 \text{ м}; & c &= 80 \text{ Н/м}; & a &= 2 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Ряд параметрів системи регулювання визначаються конструктивно в процесі компонування

установки ( $\varepsilon_{X\theta}$ ,  $\theta_{Bx\theta}$ ,  $l_{Bnp}$  тощо) і в подальшому розглядатися не будуть. Основні параметри, що визначають статичну характеристику системи регулювання конструктивної схеми з використанням підпружиненого хвоста та, відповідно, криву потужності, наступні:

- $c$  – жорсткість пружини;
- $a$  – величина попереднього натягу пружини;
- $\varepsilon_{\Gamma}$  – величина зміщення осі ротора відносно осі обертання головки;
- $\gamma_{X\theta}$  – кут установлення хвоста відносно повітряного потоку.

Крім цього у вітроустановці ВД-6 передбачена можливість регулювання відстані від осі обертання хвоста до точки кріплення пружини  $l_{X\theta}$ , а тому даний параметр також включений у подальший аналіз.

На рис. 3 і 4 наведені відповідно статичні характеристики та криві потужності вітроустановки ВД-6 при різних величинах жорсткості пружини регулювання.

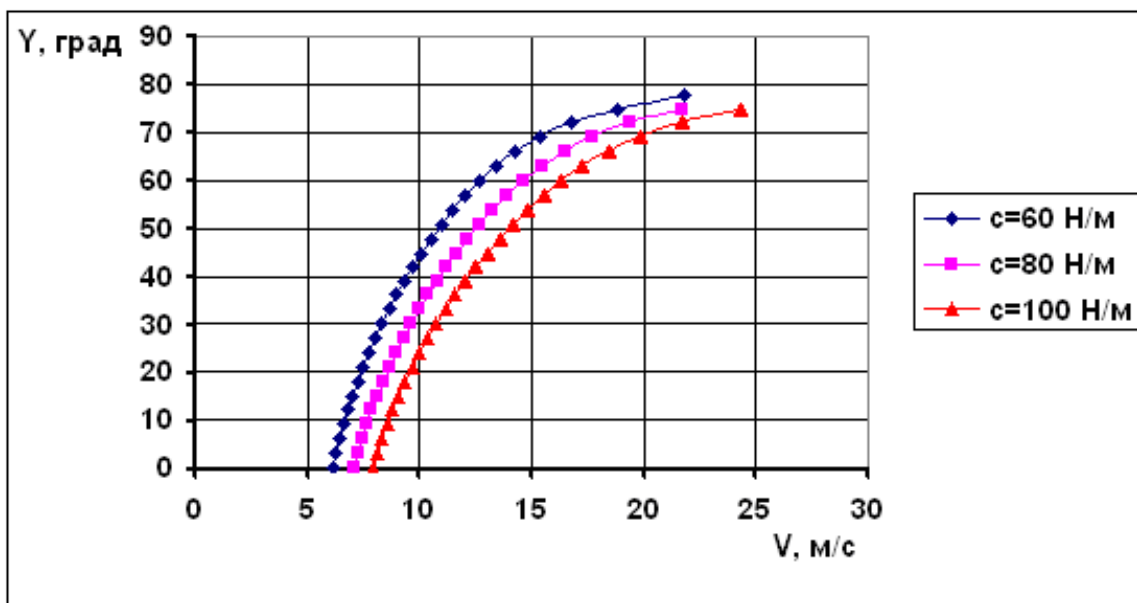


Рис. 3. Статичні характеристики вітроустановки ВД-6 при різних величинах жорсткості пружини регулювання.

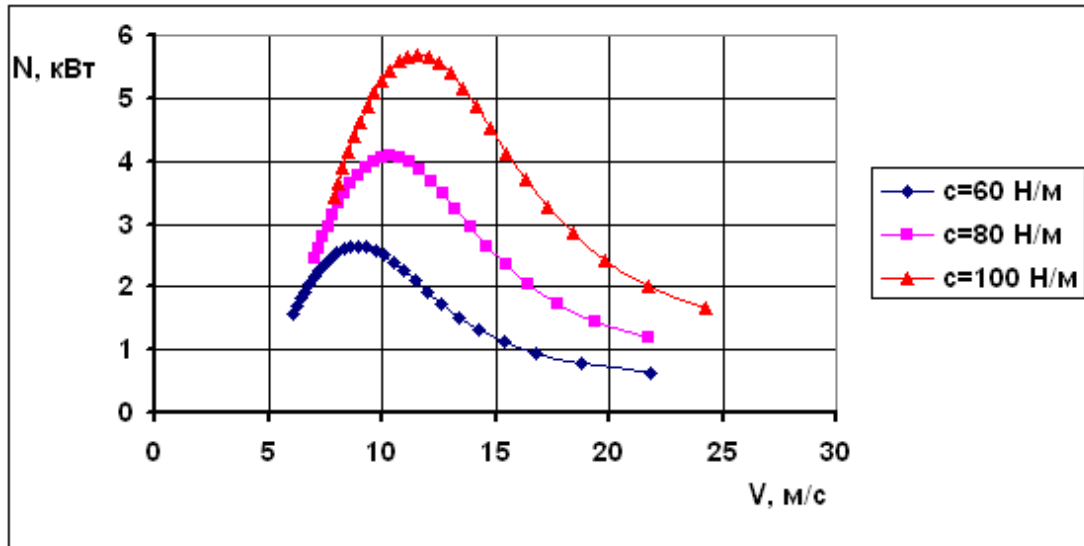


Рис. 4. Криві потужності вітроустановки ВД-6 при різних величинах жорсткості пружини регулювання.

Як видно з графіків на рис. 3 і 4, збільшення жорсткості пружини регулювання приводить до збільшення швидкості вітру, з якої починається регулювання (виведення ротору з-під вітру), і збільшується максимальна потужність вітроустановки при більшій швидкості вітру. При цьому необхідно зазначити, що криві статичних харак-

теристик та потужностей є практично ідентичними при різних величинах жорсткості пружини регулювання.

На рис. 5 і 6 наведені відповідно статичні характеристики та криві потужності вітроустановки ВД-6 при різних величинах початкового натягу пружини регулювання.

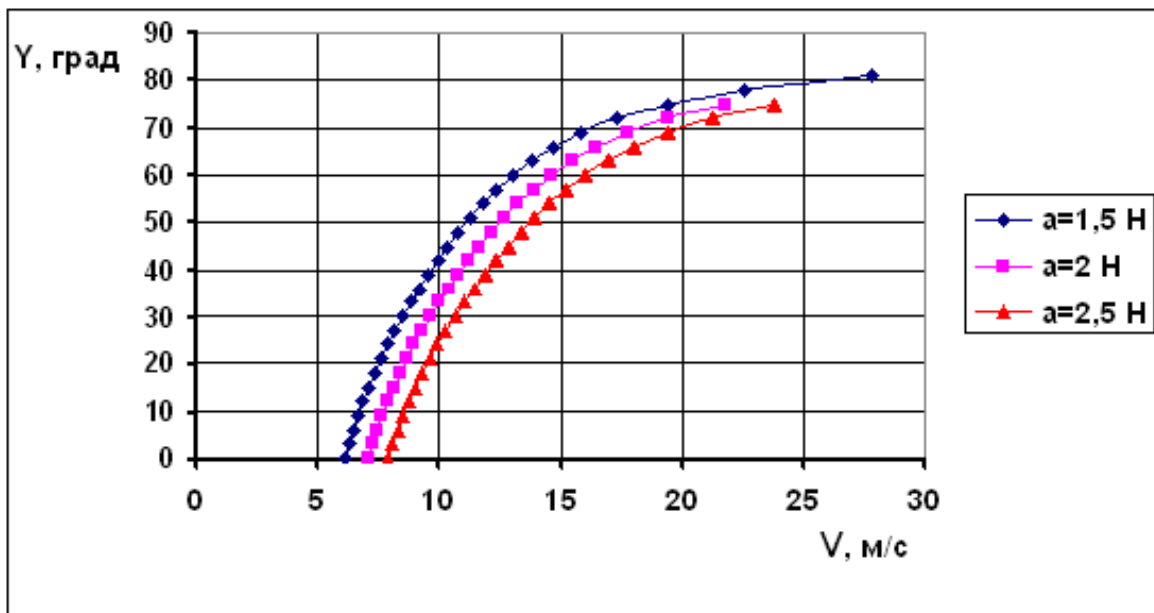


Рис. 5. Статичні характеристики вітроустановки ВД-6 при різних величинах попереднього натягу пружини регулювання.

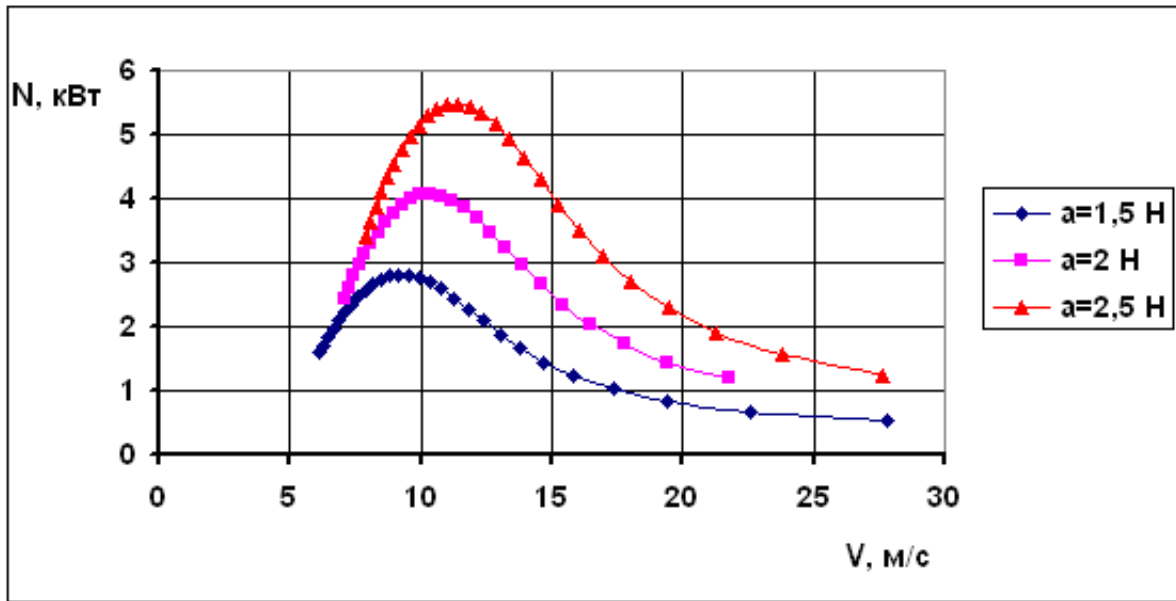


Рис. 6. Криві потужності вітроустановки ВД-6 при різних величинах попереднього натягу пружини регулювання.

Як видно з графіків на рис. 5 та 6, зміна кривих статичних характеристик та потужностей у залежності від попереднього натягу пружини регулювання ідентична, так як і в випадку зміни жорсткості пружини регулювання.

На рис. 7 і 8 наведені відповідно статичні характеристики та криві потужності вітроустановки ВД-6 при різних величинах зміщення осі ротора відносно осі обертання головки.

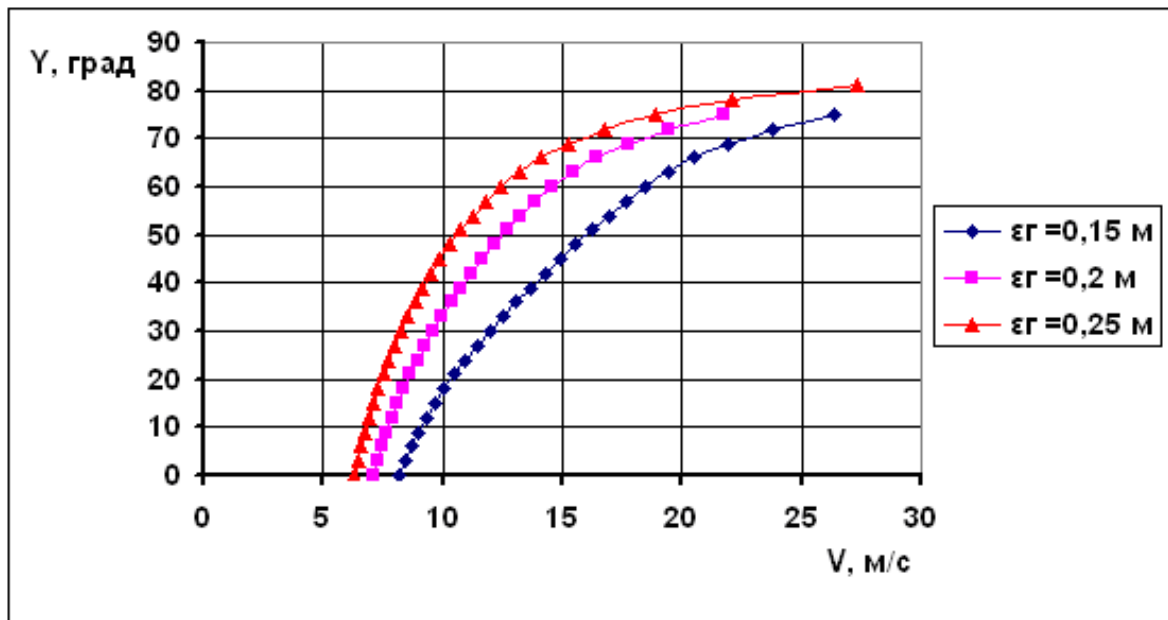


Рис. 7. Статичні характеристики вітроустановки ВД-6 при різних величинах зміщення осі ротора відносно осі обертання головки.

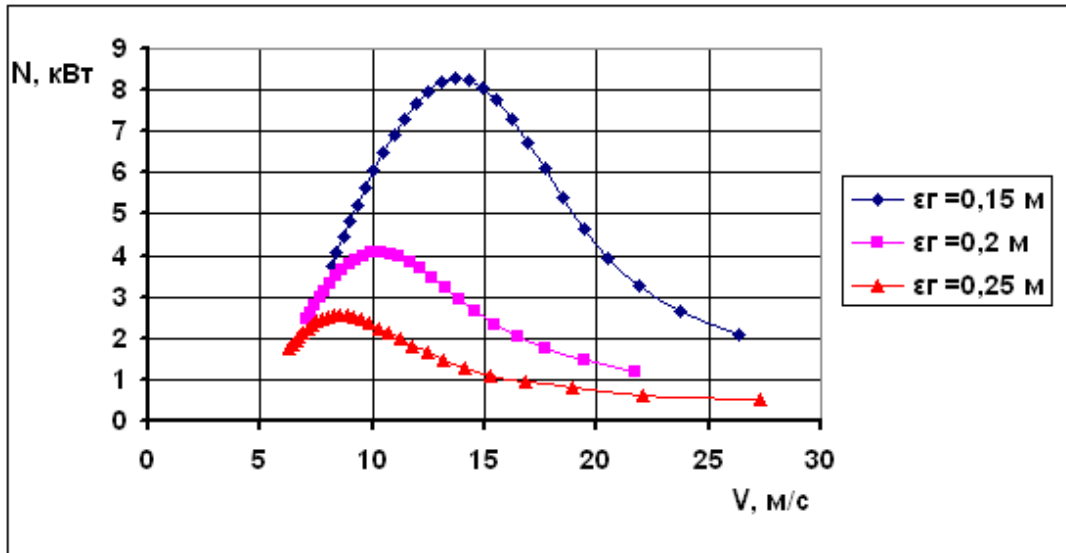


Рис. 8. Криві потужності вітроустановки ВД-6 при різних величинах зміщення осі ротора відносно осі обертання головки.

Аналізуючи графіки на рис. 7 та 8, можна констатувати наступне:

- при величинах зміщення ротора відносно осі обертання головки  $\epsilon_G \geq 0,2$  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  $\epsilon_G$  приводить до зменшення швидкості вітру, з якої починається регулювання максимальної потужності;
- при величинах  $\epsilon_G < 0,2$  м характер зміни

кривої статичної характеристики вже не є ідентичним кривим статичних характеристик при  $\epsilon_G \geq 0,2$  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. 9 і 10 наведені відповідно статичні характеристики та криві потужності вітроустановки ВД-6 при різних величинах кута установлення хвоста відносно повітряного потоку.

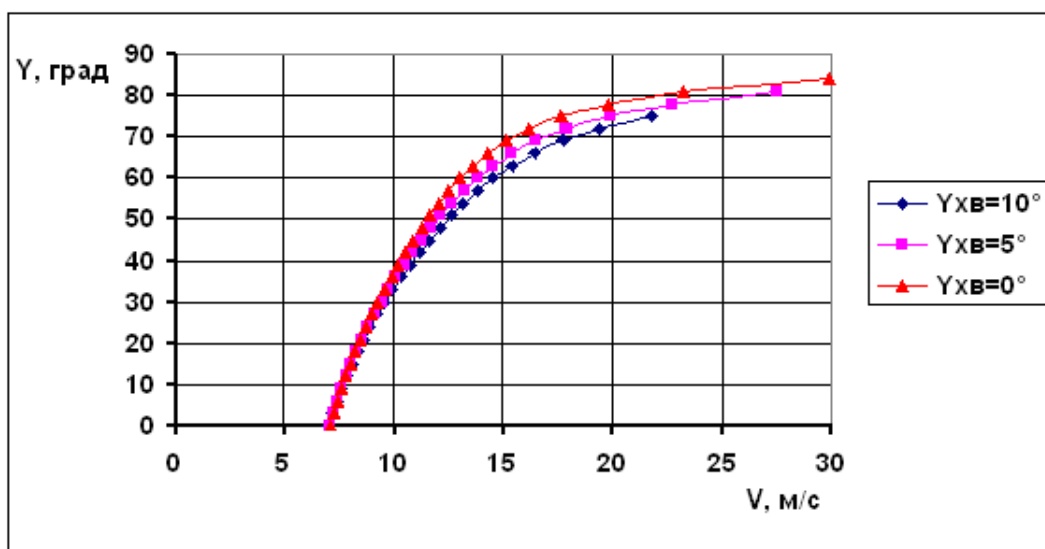


Рис. 9. Статичні характеристики вітроустановки ВД-6 при різних величинах кута установлення хвоста відносно повітряного потоку.



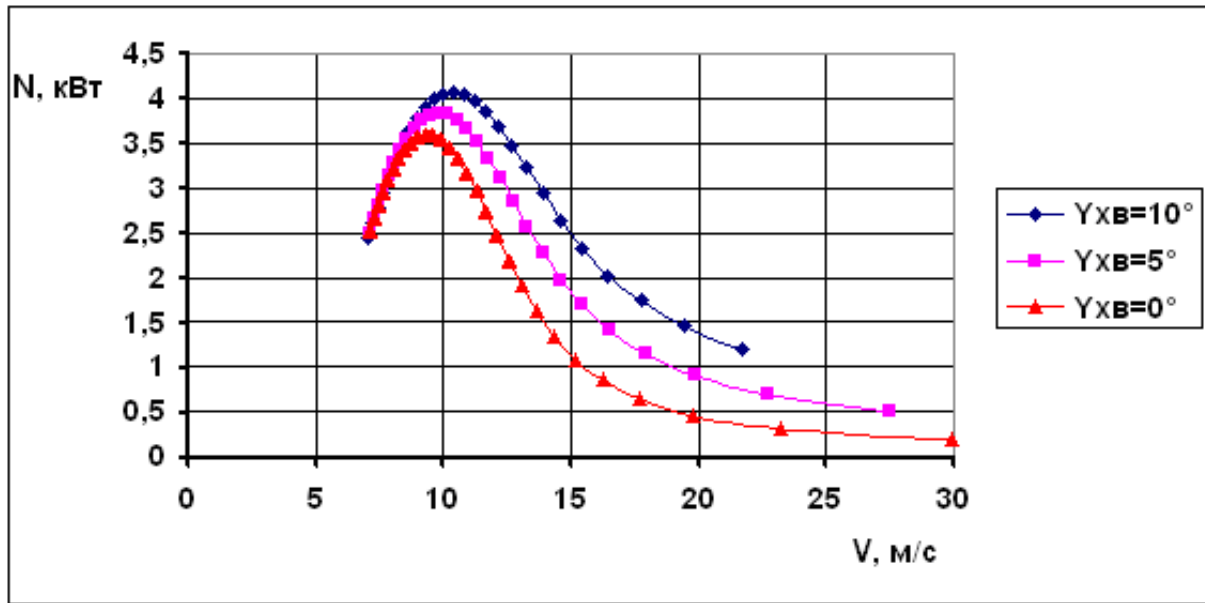


Рис. 10. Криві потужності вітроустановки ВД-6 при різних величинах кута установлення хвоста відносно повітряного потоку.

Як видно з рис. 9, зміна кута установлення хвоста відносно повітряного потоку істотно не впливає на статичні характеристики вітроустановки і в діапазоні швидкості вітру 7-11 м/с вони практично співпадають. Відповідно з кривих потужності на рис. 10 видно, що швидкість вітру, при якій починається регулювання, залишається незмінною при всіх значеннях кута установлення

хвоста відносно повітряного потоку, при цьому незначно збільшуються значення максимальної потужності зі збільшенням  $\gamma_{хв}$ .

На рис. 11 і 12 наведені відповідно статичні характеристики та криві потужності вітроустановки ВД-6 при різних величинах відстані від осі обертання хвоста до точки кріплення пружини до хвоста.

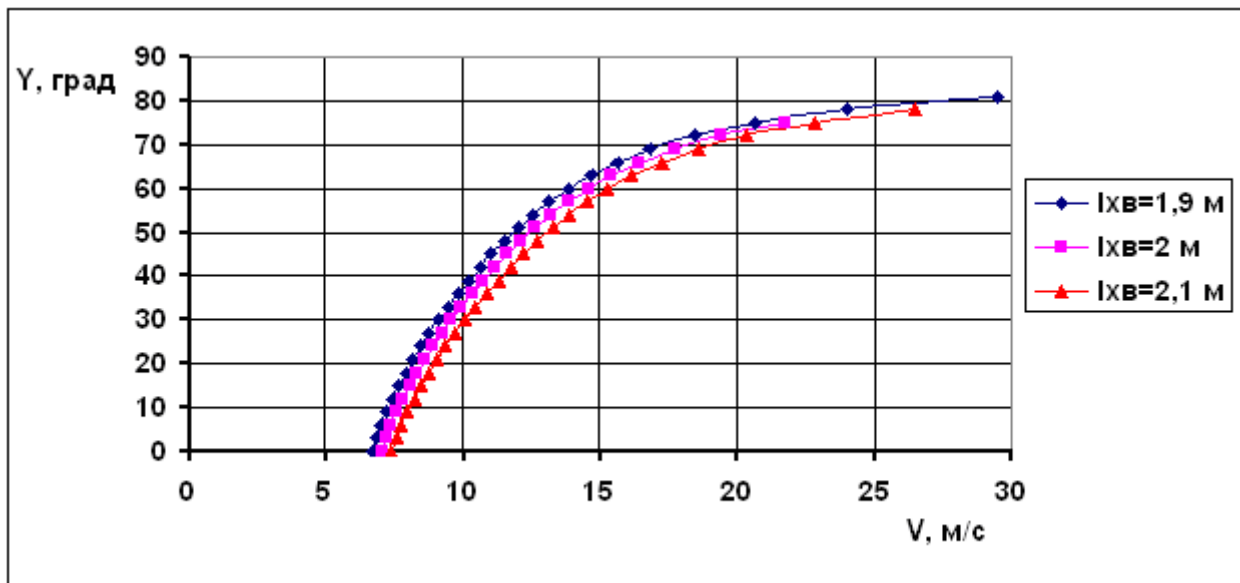


Рис. 11. Статичні характеристики вітроустановки ВД-6 при різних величинах відстані від осі обертання хвоста до точки кріплення пружини до хвоста.

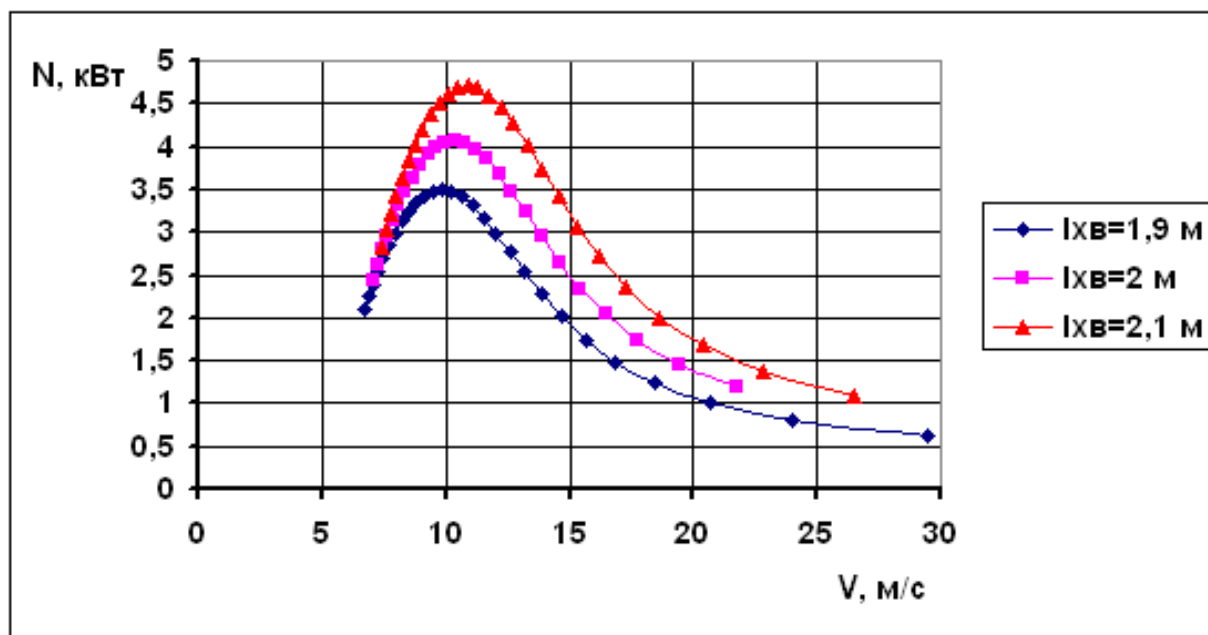


Рис. 12. Криві потужності вітроустановки ВД-6 при різних величинах відстані від осі обертання хвоста до точки кріплення пружини до хвоста.

Криві статичних характеристик та потужності (рис. 11 та 12) та характер їх зміни в залежності від величини відстані від осі обертання хвоста до точки кріплення пружини до хвоста ідентичні, як і у випадку зміни величин попереднього натягу та жорсткості пружини регулювання і фактично дозволяють компенсувати певний розбіг даних параметрів при виготовленні пружини, а також, при необхідності, регулювати величину максимальної потужності вітроустановки.

**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 початковий натяг і жорсткість пружини

регулювання та відстані від осі обертання хвоста до точки кріплення пружини до хвоста.

2. Вплив кута установа хвоста відносно повітряного потоку можна вважати незначним.

3. Величину зміщення осі ротора відносно осі обертання головки доцільно брати в межах  $\varepsilon_r \geq 0,2$  м для вітроустановок із діаметром ротора 6 м з метою зменшення впливу зміщення центру лобового тиску на ротор.

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

2. Фатеев Е.М. Ветроустановки. – Л.: ВИМЭ, 1946. – 244 с.

3. Ваишкевич К.П., Волостных В.Н. К расчету поворота на ветер головки ветродвигателя с помощью хвоста // Промышленная аэродинамика. – 1959. – Вып. № 13. – С. 91–105.