

3. Игнаткин В.У. и др. Автоматизация метрологического обслуживания средств измерений промышленного предприятия / Игнаткин В.У и др. – М.: Издательство стандартов, 1988 – 208с.
4. Игнаткин В.У и др. Оценка, контроль и прогнозирование метрологической надежности средств измерений/ Игнаткин В.У и др. – М: Изд-во стандартов, 1991–190с.
5. Ігнаткін В.У., Віткін Л.М., Литвиненко В.А. Обґрунтування концепції оптимізації метрологічного обслуговування засобів вимірювальної техніки, оцінки його параметрів і показників функціонування/Системи озброєння і військова техніка. - Харків : ХУ ПС. -2008 – Вип. 3(15). – С.94-103.
6. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. –168с.
7. Matsumoto, M. and Nishimura, T. "Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudorandom Number Generator," ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, (1998), 8(1):3-30.
8. Gander, W. and W. Gautschi. Adaptive quadrature – revisited. BIT, Vol.40, 2000, pp. 84 – 101.

Науковий керівник д.т.н., проф.. Ігнаткін В.У.

пост. 17.04.12

Моделювання роботи вітроколеса при поривчастих вітрах

КОРЕНДІЙ В.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

Для визначення умов стійкої роботи вітроустановки з різноманітними видами навантажень при змінному поривчастому вітрі виконано математичне моделювання роботи вітроколеса. Наведений наближений розв'язок рівняння руху вітроколеса може бути використаний для аналізу режимів роботи будь-яких лопатевих горизонтально-осьових вітроустановок з відомою характеристикою аеродинамічного моменту та величиною моменту інерції вітроколеса. Аналіз отриманих результатів показав, що при поривчастому вітрі нестійкі режими роботи вітроустановок виникають часто, а для їх уникнення необхідно підвищувати швидкість вітроколеса понад номінальне значення.

Для определения условий устойчивой работы ветроустановки с различными видами нагрузок при переменном порывистом ветре выполнено математическое моделирование работы ветроколеса. Приведенное приближенное аналитическое решение уравнения движения ветроколеса может быть использовано для анализа режимов работы любых лопатных горизонтально-осевых ветроустановок с известной характеристикой аэродинамического момента и величиной момента инерции ветроколеса. Анализ полученных результатов показал, что при порывистом ветре неустойчивые режимы работы ветроустановок возникают часто, а для их избежания необходимо повышать быстроходность ветроколеса свыше номинального значения.

Mathematical modeling of wind-wheel operation is done for determination of stability conditions of wind turbine operation with different types of loadings at baffling gusty wind. Presented approximate solution of equation of wind-wheel motion may be used for analyzing of operation modes of any bladed horizontal axis wind turbines with known aerodynamic moment characteristic and value of wind-wheel inertial moment. The analysis of received results has shown, that unsteady wind turbines operation modes arise at gusty wind frequently, and for their avoidance it is necessary to boost the agility of the wind-wheel over its nominal value.

Вступ. На даний час для України поступово загострюється питання ощадного використання природних енергоресурсів. У контексті істотного зростання цін на нафту і газ у найближчі декілька років слід очікувати істотних змін у структурі виробництва та споживання енергії. Розширення виробництва енергії, очевидно, спостерігатиметься у бік зростання частки нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії.

Вагоме значення для зменшення витрат традиційних енергетичних ресурсів має використання енергії повітряних потоків. Нещодавно прийняті законодавчі акти про так звану «зелену енергетику» вселяють надію в інтенсифікацію використанні вітроустановок. Вітроенергетика на даний час розвивається найбільш динамічно у порівнянні навіть із такими потужними галузями, як атомна чи теплова. При цьому вона залишається однією з найбільш безпечних із погляду екології. Вітроустановки можуть використовуватися не тільки для виробництва електроенергії, але й у якості безпосереднього

механічного приводу багатьох машин і механізмів у промисловості та сільському господарстві (водонапірні та зрошувальні системи, механізми подрібнення і конвеєри для подачі кормів, обмелювання зерна, тощо).

У практиці експлуатації вітроенергетичних установок (ВЕУ) бувають випадки, коли навантаження на валу вітроколеса не відповідає характеристиці моменту, який ним розвивається. Така ситуація виникає, наприклад, при підключенні шнекового або транспортерного механізму, момент опору яких практично не змінюється при коливанні частоти обертання привідного валу. Дослідженню обертального руху вітроколеса та моделюванню взаємодії повітряного потоку з лопатями присвячено досить багато публікацій [1-6]. Проте залишаються недостатньо вивченими режими роботи ВЕУ при дії на неї вітрового потоку змінної інтенсивності. Тому метою даної роботи є визначення умов стійкої роботи вітроустановки з різноманітними видами навантажень при змінному поривчастому вітрі за

допомогою аналізу математичної моделі обертального руху вітроколеса.

Виклад основного матеріалу. Обертання лопатевого горизонтально-осьового вітроколеса відбувається під дією аеродинамічного моменту, гальмівного моменту тертя, пропорційного кутовій швидкості, та моменту навантаження з боку електрогенератора, гідравлічного чи пневматичного насоса, шнекового або транспортерного механізму тощо. Рівняння обертального руху вітроколеса в такому разі можна записати наступним чином [2]:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} + R_{TP} \cdot \omega = M_A - M_H, \quad (1)$$

де J – момент інерції вітроколеса; ω – кутова швидкість обертання вітроколеса; t – час; R_{TP} – коефіцієнт моменту в'язкого тертя; M_A – аеродинамічний момент; M_H – момент навантаження.

Відомо, що момент в'язкого тертя при обертанні вітроколеса на декілька порядків менший, ніж інші види навантажень, тому з достатньою для інженерних розрахунків точністю будемо використовувати рівняння (1) без другого доданку в лівій частині.

Характеристику аеродинамічного моменту довільного горизонтально-осьового лопатевого вітроколеса можна наближено апроксимувати квадратичною параболою [1, 3]:

$$M_A = \frac{\pi \cdot R^3 \cdot \rho \cdot V^2}{2} \cdot \left[\alpha \cdot \frac{\omega \cdot R}{V} - \beta \cdot \left(\frac{\omega \cdot R}{V} \right)^2 - \gamma \right], \quad (2)$$

де R – величина зовнішнього радіуса вітроколеса; ρ – густина повітря; V – швидкість повітряного потоку; α , β , γ – сталі коефіцієнти, величини яких можна визначити з експериментальних кривих аеродинамічного моменту вітроколеса, використовуючи, наприклад, метод найменших квадратів.

На рис. 1 проілюстровано апроксимацію аеродинамічного моменту вітроколеса АВЕУ6-4 [1]. Кривою 1 показано характеристику $\bar{M}_A = \frac{2 \cdot M_A}{\pi \cdot R^3 \cdot \rho \cdot V^2}$, отриману за експериментальними даними, а кривою 2 – параболу

$$\bar{M}_A = \alpha \cdot \frac{\omega \cdot R}{V} - \beta \cdot \left(\frac{\omega \cdot R}{V} \right)^2 - \gamma, \quad \text{з коефіцієнтами:}$$

$$\alpha = 0.031, \quad \beta = 0.02, \quad \gamma = 0.067.$$

Коливання інтенсивності (швидкості) вітрового потоку мають випадковий характер, а його статистичні характеристики відомі досить наближено, що створює додаткові труднощі при математичному описі аеродинамічних навантажень та, відповідно, при моделюванні роботи всієї вітроустановки. На рис. 2 зображено типову для території Прикарпаття часову залежність швидкості вітру протягом 20 с. Як бачимо, амплітуда пульсацій швидкості протягом однієї секунди може змінюватися в межах 2-6 м/с, що становить близько 20-60% від її номінального значення $V_{НОМ}$. При цьому пульсації впливатимуть на стійкість роботи ВЕУ.

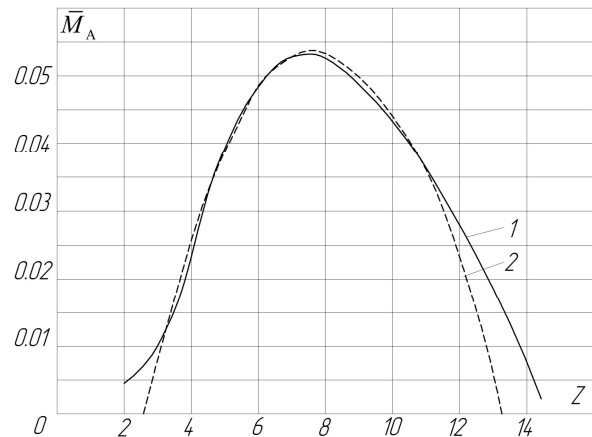


Рис. 1. Характеристика аеродинамічного моменту вітроколеса та її апроксимація

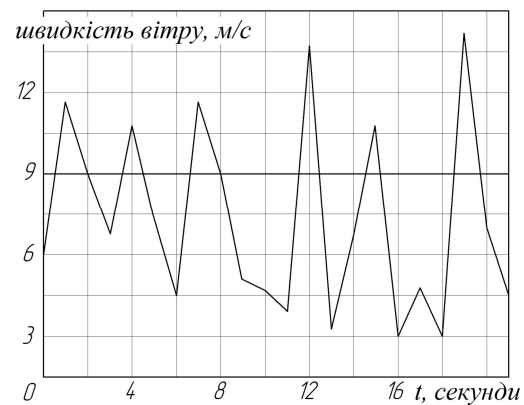


Рис. 2. Часова мінливість швидкості вітру

Для подальшого аналізу представимо швидкість вітру \bar{V} у безрозмірній формі у вигляді деякої довільної періодичної функції, яка задовольняє умови Діріхле. У такому випадку її можна розкласти на складові тригонометричного ряду. При розкладі за синусами представимо \bar{V} у наступному вигляді:

$$\bar{V} = 1 + \sum_1^n s \cdot \varepsilon_n \cdot \sin\left(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T}\right), \quad (3)$$

де $s = \Delta V / V_0$ – коефіцієнт пульсації швидкості вітру відносно середнього значення V_0 ($s = 0.2 \dots 0.6$); ε_n – відносна величина амплітуди коливань для n -ї гармоніки (для першої гармоніки $n = 1$, $\varepsilon_n = 1$).

Момент навантаження M_H на валу вітроколеса можна подати наступним чином:

$$M_H = M \cdot \omega^m, \quad (4)$$

де M – коефіцієнт пропорційності; m – показник степеня. У випадку застосування гвинтових насосів, шнекових або транспортерних механізмів $m = 0$, а величина M_H постійна. Коли ж вітроколесо використовується для приводу електрогенераторів або різних типів гідравлічних чи пневматичних насосів величина m може коливатися в межах $1 \dots 2$.

Підставляючи вирази (2), (3) і (4) у рівняння (1) та вводячи час \bar{t} як частину періоду T ($\bar{t} = t/T$), отримаємо диференціальне рівняння обертального руху горизонтально-осьового вітроколеса:

$$\frac{d\bar{\omega}}{dt} = 2 \cdot \pi \cdot K \cdot \left[a \cdot \left(\sum_1^n s \cdot \varepsilon_n \cdot \sin(2\pi n \cdot \bar{t}) \right) \cdot \bar{\omega} - b \cdot \bar{\omega}^2 - \gamma \cdot \left(1 + \left(\sum_1^n s \cdot \varepsilon_n \cdot \sin(2\pi n \cdot \bar{t}) \right)^2 \right) - c \cdot \bar{\omega}^m \right], \quad (5)$$

де $K = \frac{R^3 \cdot \rho \cdot V_0^2 \cdot T}{4 \cdot J \cdot \omega_0} = \frac{R^4 \cdot \rho \cdot V_0 \cdot T}{4 \cdot J \cdot Z_0}$; $a = \alpha \cdot Z_0$;

$$b = \beta \cdot Z_0^2; \quad c = \frac{2 \cdot M \cdot \omega_0^m}{\pi \cdot R^3 \cdot \rho \cdot V_0^2}, \quad Z_0 = \frac{\omega_0 \cdot R}{V_0}.$$

Величини ω_0 і Z_0 відповідають ustalеним значенням кутової швидкості та швидкохідності вітроколеса при середній швидкості вітру V_0 .

Рівняння (5) не розв'язується у квадратурах, тому доцільно використовувати метод «малого параметра», який дозволяє знайти наближений аналітичний розв'язок. Розв'язок рівняння (5) будемо шукати у вигляді суми ряду за степенями параметра s :

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2 \cdot s + \bar{\omega}_3 \cdot s^2 + \bar{\omega}_4 \cdot s^3 + \dots + \bar{\omega}_5 \cdot s^4, \quad (6)$$

де $\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_n$ – перше, друге і n -е наближення розв'язку, відповідно.

Результат аналітичного розв'язання для усталеного режиму можна подати у наступному вигляді:

$$\bar{\omega} = 1 + \sum_1^n \frac{K_2 \cdot \varepsilon_n \cdot s}{\sqrt{K_1^2 + n^2}} \cdot \sin \left(2\pi n \cdot \bar{t} - \arcsin \frac{n}{\sqrt{K_1^2 + n^2}} \right), \quad (7)$$

де для варіантів навантаження із показниками: $m = 0$ $K_1 = K \cdot (2 \cdot b - a)$; $m = 1$ $K_1 = K \cdot (2 \cdot b - a + c)$; $m = 2$ $K_1 = K \cdot (2 \cdot b - a + 2 \cdot c)$; при цьому $K_2 = K \cdot (a - 2 \cdot \gamma)$ для усіх варіантів навантаження.

Отриманий результат може бути сформульований наступним чином: якщо швидкість вітру за деякий проміжок часу може бути представлена у вигляді тригонометричного ряду кратних частот, то коливання кутової швидкості обертання вітроколеса за цей період можуть бути подані у вигляді цього ж ряду, але з часовим зсувом у фазі, при чому коефіцієнти ряду зменшують свою амплітуду тим більше, чим вищий порядковий номер гармонічної складової.

Перевірка точності аналітичного розв'язку проведена методом порівняння отриманих результатів із результатами чисельного розв'язання рівняння (7) із конкретними значеннями коефіцієнтів $\alpha = 0.031$, $\beta = 0.02$, $\gamma = 0.067$, які відповідають характеристичі аеродинамічного моменту вітроустановки АВЕУ6-4 [1]. У чисельному розрахунку приймалося також, що $\bar{V} = 1 + s \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \bar{t})$, де $s = 0.2; 0.4; 0.6$; K – коефіцієнт, який характеризує швидкодію вітроустановки, приймався у різних варіантах розрахунку рівним 1; 10; 100. Розрахунок проводився до повного затухання передіного процесу в періодичному вигляді. Приклад отриманих результатів для випадку $\bar{M}_H = M \cdot \bar{\omega}$ наведений на рис. 3. На ньому під номером 1 позначено

графік зміни відносної швидкості повітряного потоку $\bar{V} = 1 + s \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \bar{t})$, під номерами 2, 3 і 4 – графіки зміни кутової швидкості обертання вітроколеса при $\bar{Z} = 10$; $s = 0.4$, $K = 100; 10; 1$, відповідно.

Співставлення результатів чисельного та аналітичного розрахунку з однаковими вихідними даними показало, що похибка аналітичного розв'язку не перевищує 3-5% при визначенні амплітуди коливань частоти обертання вітроколеса.

Виконаний аналіз динаміки вітроколеса дозволяє також встановити можливість втрати стійкості системи вітроколесо-навантаження при $M_H = const$ і $M_H = M \cdot \omega$, яка спричиняє режим форсованого гальмування, зумовленого підвищенням моменту опору навантаження понад значення крутного моменту, який розвивається за рахунок аеродинамічних сил. У практиці експлуатації ВЕУ доведено, що при поривчастому вітрі нестійкі режими роботи виникають часто.

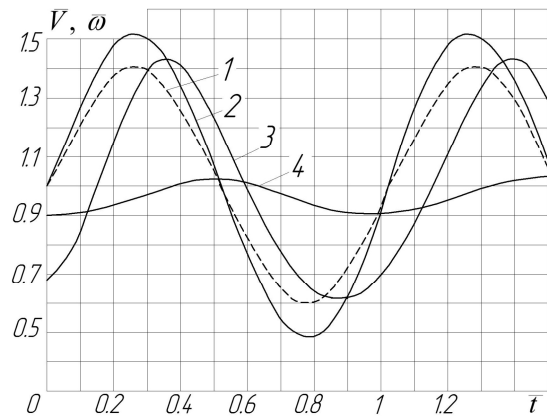


Рис. 3. Графічний розв'язок рівняння руху вітроколеса

Результати аналізу отриманих даних дозволили визначити допустимі значення розрахункової швидкохідності вітроколеса (Z_0). Вітроустановки з високою швидкодією ($K = 10; 100$), працюючи у змінному повітряному потоці в режимі, близькому до втрати стійкості, мають амплітуду коливань частоти обертання, яка перевищує амплітуду коливань швидкості вітру, що підтверджують результати розрахунків, наведені на рис. 4.

Для конкретної вітроустановки АВЕУ6-4 при навантаженні $M_H = const$ та коефіцієнті пульсації швидкості вітру $s = 0.4 - 0.6$, встановлено, що для забезпечення стійкої роботи розрахункова швидкохідність повинна бути піднята (рис. 4) до $Z_0 = 12$, що призводить до вимушеного зниження коефіцієнта використання енергії вітру приблизно у два рази [1]. Коефіцієнт швидкохідності K для АВЕУ6-4 знаходиться в межах 4-8. При лінійній залежності моменту опору навантаження від частоти обертання вітроколеса ($m = 1$) обмеження вибору розрахункової швидкохідності менш жорстке: розрахункова

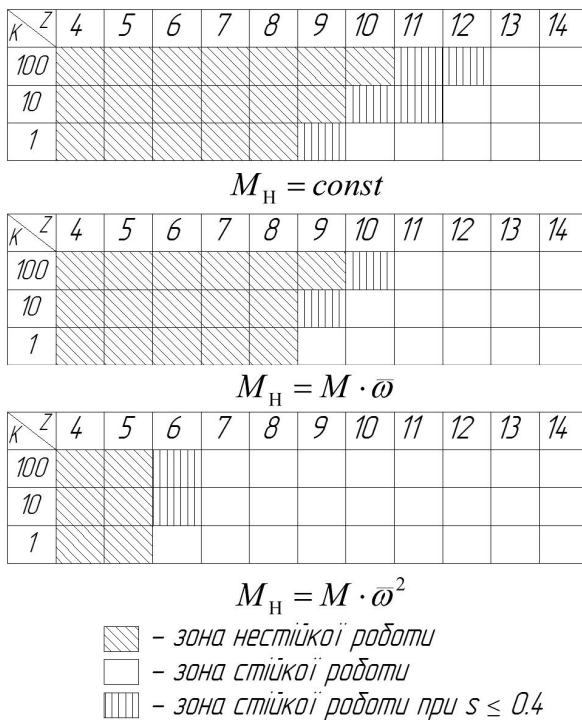


Рис. 4. Зони стійкої та нестійкої роботи вітроустановки при різних величинах моменту опору навантаження, швидкохідності та швидкодії вітроколеса

швидкохідність повинна бути вибрана, виходячи з умови $Z_0 \geq 10$, що призводить до вимушеного зниження коефіцієнта використання енергії вітру приблизно на 20%. При вентиляторній характеристиці моменту опору ($m = 2$) не виникає небезпеки нестійкої роботи вітроустановки. У цьому випадку слід використовувати вітроколесо в роботі з нормальним значенням швидкохідності (для АВЕУ6-4 $Z_H = 8.6$), який відповідає оптимальному режиму роботи у широкому діапазоні швидкостей вітру.

Наведений наближений розв'язок диференціального рівняння руху вітроколеса може використовуватися для аналізу режимів роботи будь-яких лопатевих горизонтально-осьових вітроустановок з відомою характеристикою аеродинамічного моменту та величиною моментів інерції вітроколеса й інших обертових частин.

Висновки

У статті обґрунтовано доцільність запровадження в енергетичному секторі нашої держави якомога більшої кількості установок, що працюють на відновлюваних джерелах енергії, таких як сонячна, вітрова, геотермальна та інші. Серед усіх видів альтернативних джерел енергії особливу увагу приділено вітроенергетиці як галузі, яка розвивається найбільш динамічно та чинить найменш шкідливий вплив на навколишнє середовище з погляду екології.

Як відомо, вітроустановки можуть використовуватися не тільки для виробництва електроенергії, коли в якості навантаження до вихідного валу вітроколеса при-

єднується генератор, але й для безпосереднього механічного приводу водяних насосів, транспортерів, січкарень та інших машин і механізмів. Тому навантаження на валу установки може залишатися постійним або змінюватися за лінійною чи квадратичною залежністю при зміні кутової швидкості обертання вітроколеса. При цьому слід враховувати мінливий характер інтенсивності (швидкості) повітряного потоку, коефіцієнт пульсацій якого може знаходитися у межах 20-60% від середнього значення.

Тому в даній роботі поставлена мета визначення умов стійкої роботи вітроустановки з різноманітними видами навантажень при змінному поривчастому вітрі за допомогою аналізу математичної моделі обертального руху вітроколеса.

Таким чином на основі диференціального рівняння обертального руху вітроколеса (1) з урахуванням змінного характеру швидкості повітряного потоку (3) та різних варіантів моменту опору навантаження на валу вітроколеса (4), записано закон зміни кутової швидкості його обертання (5). Використовуючи метод «малого параметра» знайдено наближений аналітичний розв'язок рівняння (5).

Проаналізувавши отриманий результат (7), зроблено наступні висновки: якщо швидкість вітру за деякий проміжок часу може бути представлена у вигляді тригонометричного ряду кратних частот, то коливання кутової швидкості обертання вітроколеса за цей період можуть бути подані у вигляді цього ж ряду, але з часовим зсувом у фазі, при чому коефіцієнти ряду зменшують свою амплітуду тим більше, чим вищий порядковий номер гармонічної складової. Для перевірки правильності отриманих аналітичних шляхом розв'язків, здійснено чисельне моделювання рівняння (7) у програмному комплексі MathCad, результати якого подано на рис. 3. Порівнюючи їх із результатами аналітичного розрахунку для однакових вихідних даних показало, що похибка між ними не перевищує 3-5%.

Виконаний аналіз динаміки вітроколеса дозволив також встановити можливість втрати стійкості системи вітроколесо-навантаження, яка спричиняє режим форсованого гальмування, зумовленого підвищенням моменту опору навантаження понад значення крутного моменту, який розвивається за рахунок аеродинамічних сил. На конкретному випадку експлуатації вітроустановки АВЕУ6-4 доведено, що при поривчастому вітрі нестійкі режими роботи виникають часто, а для їх уникнення необхідно підвищувати швидкохідність вітроколеса понад номінальне значення, що спричинятиме вимушене зниження коефіцієнта використання енергії вітру та, відповідно, зменшення потужності вітроустановки.

Отримані результати досліджень можуть бути застосовані при аналізі динамічної поведінки будь-яких лопатевих горизонтально-осьових вітроколес. У подальших етапах досліджень планується удосконалити існуючі математичні моделі вітроустановки, розглядаючи її як комплексну систему твердих (фундамент, башта, гондола, маточина вітроколеса) і пружних (лопати) тіл. В такому випадку кількість рівнянь Лагранжа другого роду для опису руху системи буде рівним п'яти. Перших три із них відображатимуть рух підсистем орієнтації вітроколеса (поворот гондоли за напрямком вітру), регулювання його кутової швидкості (поворот лопатей навколо власних поздовжніх осей) та розглянуте у даній статті обертання вітроколеса. Ще два рівнян-

ня характеризуватимуть параметри жорсткості лопатей при їх згині та кручення. Таким чином планується змоделювати коливні процеси лопатей при дії на них аеродинамічних, гравітаційних та інерційних навантажень внаслідок нерівномірного обертання описаних вище підсистем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Харитонов В.П. Условия рационального агрегатирования автономных ветроэлектрических установок: научные труды ВИЭСХ. Т. 86. / М.: ВИЭСХ. – 2000. – 270 с.
2. Кузьо І.В. Теоретичні аспекти моделювання вітроенергетичних установок / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – № 3. – С. 85-94.
3. Харитонов В.П. Работа электронасосной ветроустановки при порывистом ветре // Доклады Первой Всесоюзной научно-технической конференции по возобновляемым источникам энергии. – М., 1972. – Вып. 2. – С. 43-48.
4. Кузьо І.В. Математичне моделювання динаміки тихохідного вітроколеса / І.В. Кузьо, В.М. Корендій // Наукові нотатки. – 2011. – № 33. – С. 115-123.
5. Суббота А.М. Система управления ветроэнергетической установкой / А.М. Суббота, И.Ю. Дыбская, А.В. Заболотный // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 3 (37). – С. 61–67.
6. Буяльский В.И. Повышение эффективности управления ветротурбиной [Текст] / В.И. Буяльский // Вісник Севастопольського державного технічного університету. – 2008. – № 88. – С. 152–156.

пост. 20.04.12

Розподіл сил в канаті при багат шаровому його намотуванні

БЕЛЬМАС І.В., БОБИЛЬОВА І.Т., ЛУБИНЕЦЬ О.М.

Дніпродзержинський державний технічний університет

В роботі досліджено розподіл сил поміж шарами в багат шаровому тілі намотки. Показано, що теоретично можливі виникнення умовного від'ємного взаємного тиску шарів. Вказане може призводити до ковзання одного шару по іншому у разі прикладення дотичного зусилля.

В работе исследовано распределение сил между слоями в многослойном теле намотке. Показано условия возможного отрицательного давления, которые приводят к скольжению одного слоя по другому в случае приложения касательного усилия.

In work investigates the distribution of forces between layers in multilayer winding body. It is shown that theoretically possible occurrence of negative conditional mutual pressure layers. The above can lead to sliding of one layer to another in case of application of force tangent.

Актуальність роботи.

Процеси намотування гнучких тягових органів широко застосовуються в різноманітних напрямках техніки. Практика показує, що при багат шаровому намотуванні має місце втрата сталої форми. Дослідження умов виникнення втрати форми тіла намотки є актуально науково-технічною задачею.

Стан питання.

В роботі Панченко О.В. [1] досліджено напружений стан в тілі багат шарової намотки як системи не з'єднаних між собою шарів-кілець. При цьому не враховано, що сила розтягу каната прикладена на відстані осі обертання і створює момент кручення. Дія такої сили врахована в роботі Лубинець О.М., Бельмас І.В. [2].

Мета роботи – дослідження розподілу сил намотаному в декілька шарів на барабан підйомної машини в неперервному канаті, а не в канаті як системи кілець.

Постановка задачі.

Канат розглянемо як неперервний, намотаний в декілька шарів. Його внутрішній кінець приєднаний до барабана, зовнішній – навантажений зусиллям розтягу, прикладеним на відстані осі обертання.

Прийняті допущення.

Канат розглянемо як неперервний, намотаний в декілька шарів. Його внутрішній кінець приєднаний до барабана, зовнішній – навантажений зусиллям розтягу, прикладеним на відстані осі обертання.

Прийняті допущення.

Прийmemo що, товщина канату дорівнює нулю. Окремі шари тіла намотки з'єднані (склеєні) між собою нерухомо. Деформації підкорюються лінійному закону. По ширині канату сили розподілені рівномірно.

Результати дослідження.

Канат намотаний на бобіну в декілька шарів показано на рисунку 1. Зовнішній шар (будемо вважати його першим) навантажений лише силою розтягу P – силою, прикладеною з боку канату, що намотується на бобіну. Внутрішній, якому надамо номер M , взаємодіє з барабаном підйомної машини. Ширина каната незначна. Це дозволяє вважати, що канат має лише один трос намотаний за спіраллю Архімеда (Рис. 1).

Розітнемо навантаженому зовнішньому силою частину утвореного канатом тіла горизонтальною площиною ($a=0$). В результаті отримаємо систему тросів, що взаємодіють через гумову оболонку. Сформулюємо умови сумісності деформування усіх утворених частин канату: