

І.В. Кузьо, В.М. Корендій, Н.І. Прокорець
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра механіки та автоматизації машинобудування

АНАЛІЗ АЕРОДИНАМІЧНИХ ТА ІНЕРЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТИХОХІДНОГО ВІТРОКОЛЕСА

© Кузьо І.В., Корендій В.М., Прокорець Н.І., 2011

Поставлено задачу аналізу динаміки тихохідного вітроколеса, розроблення методики розрахунку його конструктивних елементів з урахуванням аеродинамічних, відцентрових, гіроскопічних, коріолісових сил та сил тяжіння, реалізації розробленої методики для конструювання лопатей вітроколеса вітроенергетичної установки потужністю 0.5 кВт.

The article raised the problem of dynamics analysis of low-speed wind-wheel, developing methods of calculation of its structural elements including aerodynamic, centrifugal, gyroscopic, gravitational and Coriolis forces, implementing the developed technique for constructing blades of the wind-wheel for wind-power installation with a capacity of 0.5 kW.

Постановка проблеми. Одна з основних перешкод для розвитку тихохідних вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності пов'язана із труднощами моделювання їхньої динамічної поведінки, оскільки на елементи вітроколеса в процесі експлуатації діють аеродинамічні, відцентрові, гіроскопічні, коріолісові сили, сили тяжіння тощо. Одні з найнебезпечніших (які не завжди вдається адекватно врахувати під час моделювання) динамічних ефектів з погляду міцності елементів вітроустановки (лопатей, башти тощо) виникають за час складного обертання вітроколеса, тобто при зміні положення його осі внаслідок зміни напрямку повітряного потоку.

Ще складнішою для дослідження та моделювання є гіроскопічна сила інерції, яка діє на лопать внаслідок її складного обертання одразу в трьох площинах (навколо трьох осей). Ця сила виникає, коли для стабілізації частоти обертання вітроколеса використовується механізм регулювання кута атаки лопатей. Найнебезпечніші гіроскопічні сили інерції виникають, коли в разі зміни напрямку вітрового потоку повертається вісь вітроколеса і одночасно при зміні швидкості потоку обертається лопать навколо власної осі, регулюючи кут атаки. Саме тому проблема теоретичного дослідження та моделювання динаміки вітроколеса є доволі актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [2] і [3] проаналізовано взаємодію повітряного потоку з горизонтально-осьовим вітроколесом, подано загальні відомості про вплив на нього вітрових сил, описано основні етапи конструювання вітроустановки та вибору (розрахунку) профілю лопатей. Проте зауважимо, що в цих публікаціях основну увагу приділяли саме аеродинамічній взаємодії повітряного потоку та лопатей вітроколеса, не враховуючи інших видів навантажень, про які ми згадували вище.

У статтях [1] і [4] здійснено спробу математично описати (змоделювати) аеродинамічні, відцентрові, гіроскопічні та коріолісові сили, які діють на вітроенергетичну установку, та проаналізувати її динамічну поведінку за інтегрованими розрахунковими схемами. Проте автори, подавши загальні математичні залежності вказаних сил, зупинились в основному на проектуванні та розрахунку за допомогою методу скінченних елементів опори (башти) вітроустановки. Тобто питання динамічної поведінки лопатей і загалом вітроколеса під дією вказаних вище навантажень залишається актуальним і цікавим для дослідження.

Формулювання цілі статті. Мета статті – проаналізувати динаміку тихохідного вітроколеса, розробити методику розрахунку його конструктивних елементів з урахуванням аеродинамічних, відцентрових, гіроскопічних, коріолісових сил та сил тяжіння, а також реалізувати розроблену методику для конструювання лопаті вітроколеса вітроенергетичної установки потужністю 0.5 кВт.

Виклад основного матеріалу. Виклад основного матеріалу статті подамо у такій послідовності: розпочнемо із аналізу аеродинамічних навантажень, після чого зупинись на силах, які виникають під час складного руху гондоли навколо башти, і закінчимо дослідженням навантажень, що виникають на ділянках лопатей при їх складному обертанні одразу в трьох площинах (навколо трьох осей). Після аналізу навантажень подамо наближену методику розрахунку конструктивних елементів вітроколеса з урахуванням вказаних вище сил та реалізуємо її на прикладі конструювання лопаті вітроколеса вітроенергетичної установки потужністю 0.5 кВт.

Основним фактором силового впливу на елементи конструкції ВЕУ є аеродинамічна взаємодія лопаті і повітряного потоку, що являє собою первинне (природне) джерело енергії.

Лопатеве вітроколесо працює за рахунок сили \vec{F}_Σ , яка виникає при набіганні на лопаті повітряного потоку. Силу \vec{F}_Σ можна розкласти на дві складові: силу \vec{F}_y , що перпендикулярна до потоку, і силу \vec{F}_x напрямлену вздовж потоку повітря. Силу \vec{F}_y називають аеродинамічною підйомною силою, а силу \vec{F}_x – силою аеродинамічного профільного опору лопаті.

Підйомна сила \vec{F}_y виконує корисну механічну роботу (обертання ВК), сила ж \vec{F}_x , навпаки, спричинює втрати енергії повітряного потоку. Співвідношення між \vec{F}_y і \vec{F}_x залежить передусім від форми поперечного перерізу лопаті й кута α_l нахилу його поверхні до напрямку потоку повітря. Тому основним завданням під час проектування лопаті є знаходження її оптимального профілю та кута атаки, які давали б змогу отримати максимальну підйомну силу \vec{F}_y і мінімальну силу опору \vec{F}_x .

На рис. 1 зображено векторну діаграму швидкостей та аеродинамічних сил для поперечного перерізу лопаті вітрового колеса з горизонтальною віссю обертання [2]. Горизонтальна вісь умовно являє собою вісь обертання вітроколеса. Вона збігається з напрямком вітру, позначеним вектором \vec{V}_n . Вертикальна вісь умовно позначає площину обертання вітроколеса. Напрямки аеродинамічних сил, які виникають на деякій елементарній ділянці лопаті, показано векторами \vec{F}_Σ , \vec{F}_x , \vec{F}_y , \vec{F}_l , \vec{F}_m .

Для зручності аналізу плану швидкостей і сил зробимо поперечний переріз лопаті на відстані r від осі обертання вітроколеса. Кут α_r позначає кут між хордою лопаті та площиною обертання вітроколеса; α_l – кут атаки повітряного потоку, який набігає на елемент лопаті зі швидкістю \vec{W}_B ; β – кут між напрямком швидкості повітряного потоку \vec{W}_B і площиною обертання вітроколеса; \vec{V}_n – швидкість вітру з наближенням до площини обертання вітроколеса; \vec{W}_B – швидкість вітрового потоку, який набігає на ділянку лопаті при обертанні вітроколеса; $\vec{\omega}r$ – колова швидкість елементарної ділянки лопаті; \vec{F}_Σ – сумарна сила, що виникає на ділянці лопаті під час набігання повітряного потоку, яка розкладається на підйомну силу \vec{F}_y і силу аеродинамічного профільного опору \vec{F}_x . Сумарну силу \vec{F}_Σ можна розкласти також на силу лобового тиску \vec{F}_l і тягову силу \vec{F}_m , коли вітроколесо нерухоме. Сила \vec{F}_m , що діє на ділянку лопаті в площині обертання вітроколеса, породжує обертовий момент, який приводить його у рух.

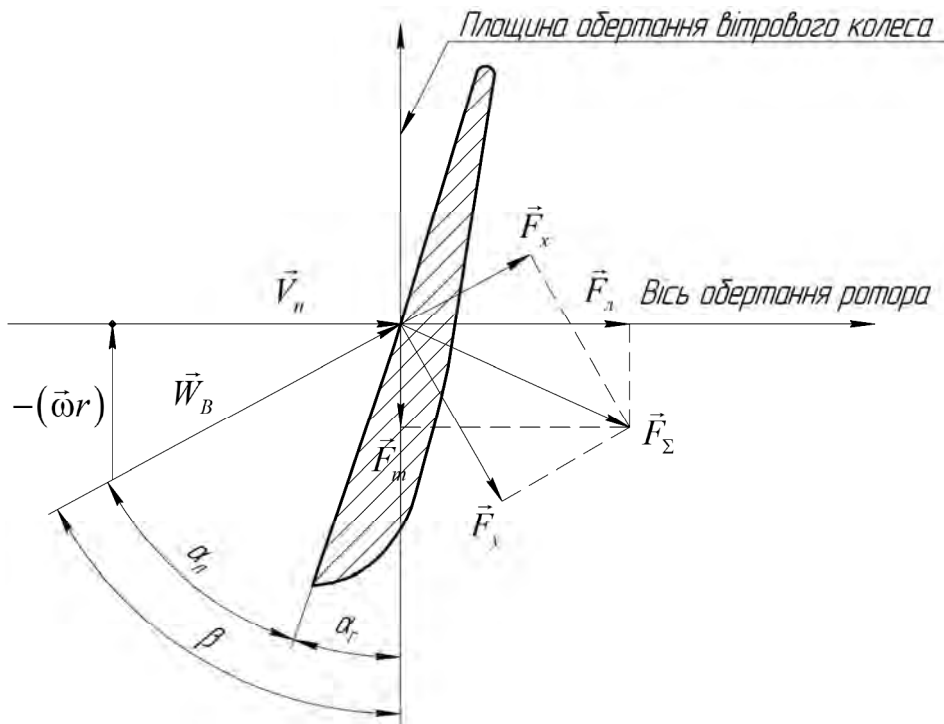


Рис. 1. Векторна діаграма швидкостей та аеродинамічних сил для поперечного перерізу лопаті вітроколеса з горизонтальною віссю обертання

Під час руху лопаті на елементарну ділянку лопаті, розміщену на відстані r від осі вітроколеса, в площині його обертання набігає повітряний потік не зі швидкістю \vec{V}_n , з якою дме вітер, а зі швидкістю \vec{W}_B , складеною зі швидкості вітру \vec{V}_n і колової швидкості $-(\vec{\omega}r)$. Геометричне додавання цих двох швидкостей і дає відносну швидкість потоку \vec{W}_B , що напрямлена до лопаті під кутом α_l . Величина цієї швидкості визначається за формулою [2]:

$$W_B = \sqrt{\omega^2 r^2 + V_n^2}. \quad (1)$$

Силу аеродинамічного профільного опору \vec{F}_x і підйомну силу \vec{F}_y можна визначити за такими залежностями [3]:

$$F_x = c_x \frac{\rho_n S}{2} (\omega^2 r^2 + V_n^2), \quad (2)$$

$$F_y = c_y \frac{\rho_n S}{2} (\omega^2 r^2 + V_n^2), \quad (3)$$

де ρ_n – густина повітря ($\rho_n = 1.29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ при температурі 0°C); S – площа лопаті; c_x – аеродинамічний коефіцієнт; c_y – коефіцієнт підйомної сили лопаті.

Сумарну ж силу \vec{F}_Σ , з якою повітряний потік діє на елементарну ділянку лопаті, можна визначити із такого співвідношення [2]:

$$F_\Sigma = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \frac{\rho_n S}{2} (\omega^2 r^2 + V_n^2) \sqrt{c_x^2 + c_y^2} \approx \frac{\rho_n S}{2} (\omega^2 r^2 + V_n^2). \quad (4)$$

Розглянувши аеродинамічні сили, які діють на лопаті вітроколеса, перейдемо до інших видів навантажень. При обертанні вітроколеса навколо власної осі на елементарну ділянку лопаті A масою m , яка розміщена на відстані r від осі обертання, діють відцентрова і тангенційна сили, а також сила тяжіння, які можна знайти із таких залежностей:

$$F_{\text{в.к}} = m\omega^2 r, \quad (5)$$

$$F_{Т.К} = m\epsilon r, \quad (6)$$

$$F_{ТЯЖ} = mg, \quad (7)$$

де ω і ϵ – відповідно, кутова швидкість і кутове пришвидшення ділянки лопаті при обертанні вітроколеса; g – пришвидшення вільного падіння.

Під час повороту гондоли навколо осі башти на ділянку A діятимуть відцентрова і тангенційна сили, а також інерційна сила від поворотного пришвидшення Коріоліса, які можна визначити за формулами, відповідно:

$$F_{В.Г} = m\omega_1^2 l, \quad (8)$$

$$F_{Т.Г} = m\epsilon_1 l, \quad (9)$$

$$F_{П.К} = 2m\omega_1 U \sin \beta_1, \quad (10)$$

де ω_1 і ϵ_1 – відповідно, кутова швидкість і кутове пришвидшення ділянки лопаті при обертанні гондоли навколо осі башти; l – відстань від ділянки A до осі башти; $U = \omega r$ – відносна швидкість, яка у цьому випадку дорівнює колівій швидкості при обертанні ділянки A навколо осі вітроколеса; β_1 – кут між швидкістю \dot{U} та віссю башти.

Ще одним небезпечним видом навантаження, яке діє на ділянку A лопаті, є гіроскопічні сили інерції, викликані її складним обертанням одразу навколо трьох осей, а також відцентрова і тангенційна сили, які виникають внаслідок обертання лопаті навколо власної осі у разі зміни швидкості повітряного потоку. Як відомо, одним із основних методів стабілізації частоти обертання вітроколеса є зміна кута атаки лопатей за допомогою їх повороту навколо власної осі. Відцентрову і тангенційну сили в такому випадку можна визначити за співвідношеннями:

$$F_{В.Л} = m\omega_2^2 b, \quad (11)$$

$$F_{Т.Л} = m\epsilon_2 b, \quad (12)$$

де ω_2 і ϵ_2 – відповідно, кутова швидкість і кутове пришвидшення ділянки A при обертанні лопаті навколо своєї осі в разі зміни швидкості повітряного потоку; b – відстань від ділянки A до осі обертання лопаті.

Що ж стосується гіроскопічних сил інерції, які виникають при обертанні лопаті навколо осі вітроколеса і гондоли навколо осі башти за одночасного повороту лопаті навколо власної осі, то їх можна наближено розкласти на дві складові: 1) обертання навколо осі вітроколеса і навколо власної осі; 2) обертання навколо осі башти і навколо власної осі. В такому разі ці дві сили можна описати співвідношеннями:

$$F_{Г.1} = 2m\omega U_1 \sin \beta_2, \quad (13)$$

$$F_{Г.2} = 2m\omega_1 U_1 \sin \beta_3, \quad (14)$$

де $U_1 = \omega_2 b$ – відносна швидкість, яка в цьому випадку дорівнює колівій швидкості при обертанні ділянки A навколо осі лопаті; β_2 – кут між швидкістю \dot{U}_1 та віссю вітроколеса; β_3 – кут між швидкістю \dot{U}_1 та віссю башти.

Наступним етапом нашого дослідження буде визначення властивостей описаних вище сил, тобто знаходження їх ліній дії, періодичностей тощо, та зображення їх на рис. 2 з метою створення наближеної моделі навантаження окремо лопатей (рис. 3–5) і вітроколеса загалом аеродинамічними, відцентровими, гіроскопічними, коріолісовими силами та силами тяжіння.

Аеродинамічні навантаження ми уже розглянули вище і подали їх план на рис. 1. Сили $\dot{F}_{В.К}$, $\dot{F}_{В.Г}$, $\dot{F}_{В.Л}$ завжди напрямлені по радіусу від осі обертання, відповідно, вітроколеса, башти і лопаті (див. рис. 2). Свого максимального значення перша досягатиме на зовнішньому радіусі лопаті при оптимальній частоті обертання вітроколеса, друга – на найвіддаленішій ділянці лопаті від осі башти за різкої зміни напрямку потоку повітря, третя – на краях по ширині лопаті при різкій зміні швидкості повітряного потоку. Сили $\dot{F}_{Т.К}$, $\dot{F}_{Т.Г}$, $\dot{F}_{Т.Л}$ діють в площині, перпендикулярній до осі

обертання (відповідно осі вітроколеса, башти і лопаті), а напрями їх перпендикулярні до радіуса обертання (тобто збігаються з дотичною до траєкторії руху ділянки) (див. рис. 2). Максимальні значення першої сили спостерігатимуться на зовнішньому радіусі лопаті за різкої зміни швидкості потоку повітря, другої та третьої – аналогічно до відповідних їм відцентрових сил.

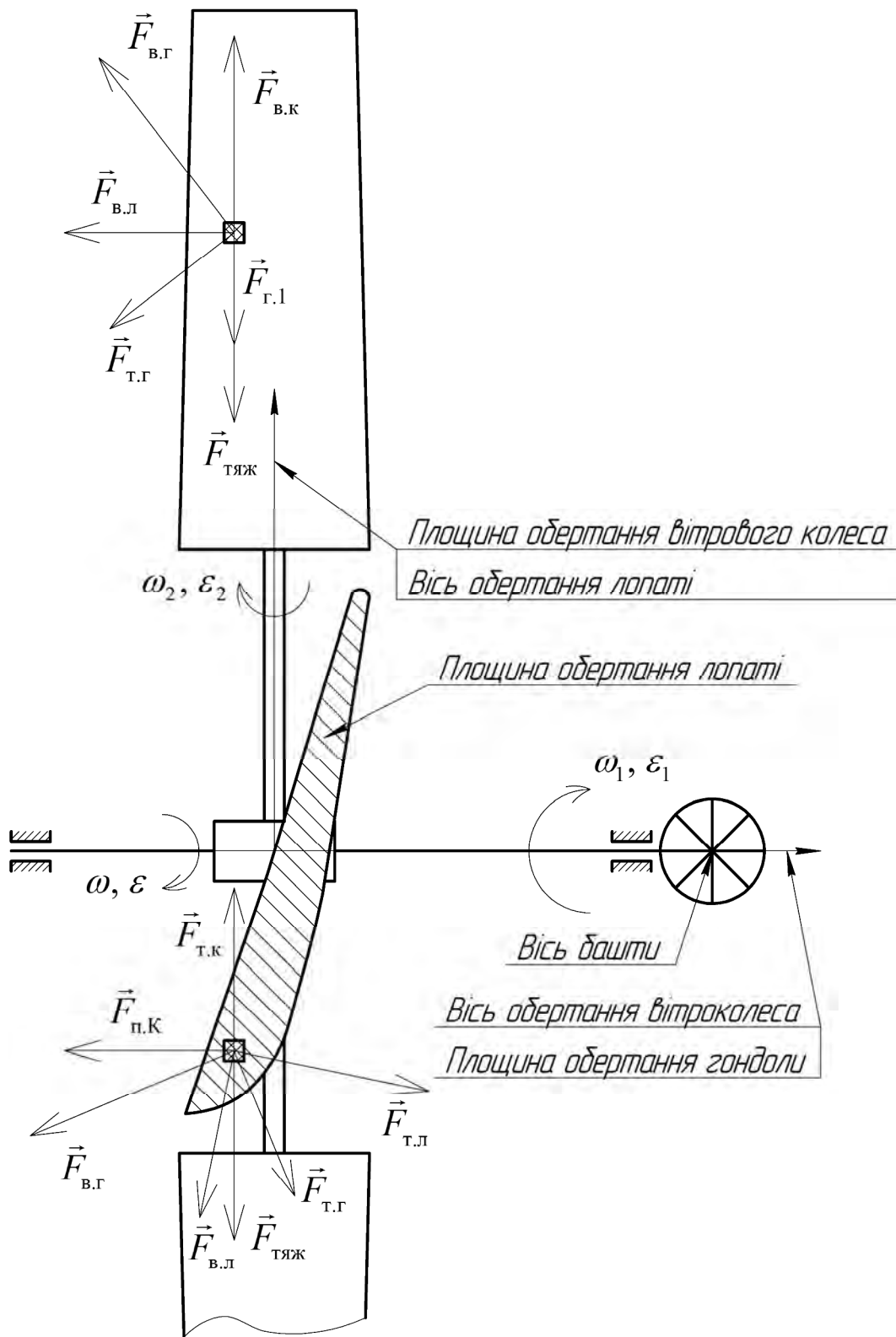


Рис. 2. Векторна діаграма відцентрових, гіроскопічних, коріолісових сил та сил тяжіння

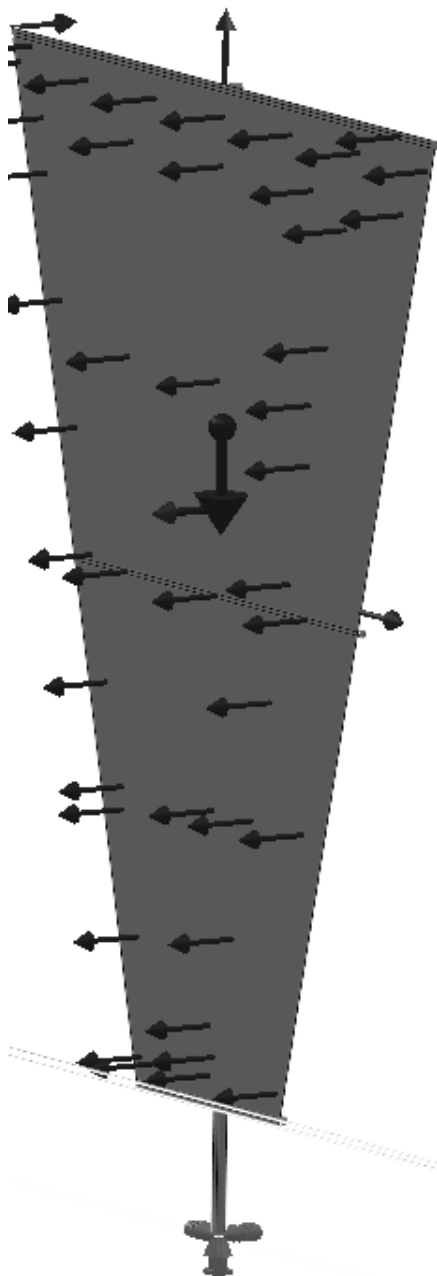


Рис. 3. Моделювання навантаження лопаті аеродинамічними та інерційними силами вітроустановки, тому можуть спричинити руйнування не тільки лопатей, але й всієї конструкції.

Тепер розглянемо кут β_2 , який може змінюватися від 0° до 90° . Візьмо для прикладу плоскі лопаті у статичному режимі. Якщо кут $\beta_2 = 0^\circ$, то лопать розміщена перпендикулярно до потоку повітря, а сумарна сила вітрового потоку перетворюється на силу аеродинамічного профільного опору, не виконуючи корисної роботи (підйомна сила дорівнює нулю). Якщо $\beta_2 = 90^\circ$, лопать буде паралельною до потоку повітря, тобто її поверхня не сприйматиме сили повітряного потоку. Оскільки $U_1 = \omega_2 b$ є випадковою величиною (залежить від зміни швидкості повітряного потоку), то сила $\dot{F}_{r,1}$ не є періодичною. Максимальне значення цієї сили наблизатиметься до $2m\omega U_1$ за різких та сильних поривів вітру.

Якщо осі лопатей встановлені перпендикулярно до осі вітроколеса, яка, своєю чергою, перпендикулярна до осі башти, то сила $\dot{F}_{r,2}$ дорівнюватиме нулю, оскільки кут $\beta_3 = 0$. Якщо під

Напрямки гіроскопічних сил інерції $\dot{F}_{r,1}$, $\dot{F}_{r,2}$ та сили від поворотного пришвидження Кориоліса $\dot{F}_{п.К}$ можна знайти за таким правилом [5]: необхідно спроектувати вектор відносної швидкості на площину, перпендикулярну до осі переносного обертання, і повернути отриману проекцію в цій площині на 90° в бік переносного обертання (див. рис. 2). Зрозуміло, що значення цих сил залежать як від абсолютних величин відносної швидкості та переносної кутової швидкості, так і від зміни кута між віссю переносного обертання та відносною швидкістю ділянки лопаті. Розглянемо спершу кут β_1 . Як впливає із залежності (10) та рис. 2, абсолютне значення інерційної сили від поворотного пришвидження Кориоліса $\dot{F}_{п.К}$ змінюватиметься від нуля до $2m\omega_1 U$ при зміні положення лопаті від горизонтального, коли напрям колової швидкості \dot{U} буде паралельним до осі башти, до вертикального (крайнього верхнього або нижнього), коли напрям \dot{U} буде перпендикулярним до осі башти. Звідси випливає, що сила $\dot{F}_{п.К}$ буде періодичною з періодом $T = \pi$, тому її можна записати за допомогою такого виразу:

$$F_{п.К} = 2m\omega_1 U \sin \beta_1 = 2m\omega_1 \omega r \sin(\omega t). \quad (15)$$

Як відомо, у разі дії періодичної сили $\dot{F}_{п.К}$ виникають коливання, а з наближенням частоти ω до частоти власних коливань лопатей виникають резонансні явища. Збуджені цією силою коливання передаються на вітроколесо і зрештою на башту

час конструювання вітроустановки порушуються вказані вище умови, то силу $\dot{F}_{Г.2}$ потрібно враховувати і можна визначити за формулою (14).

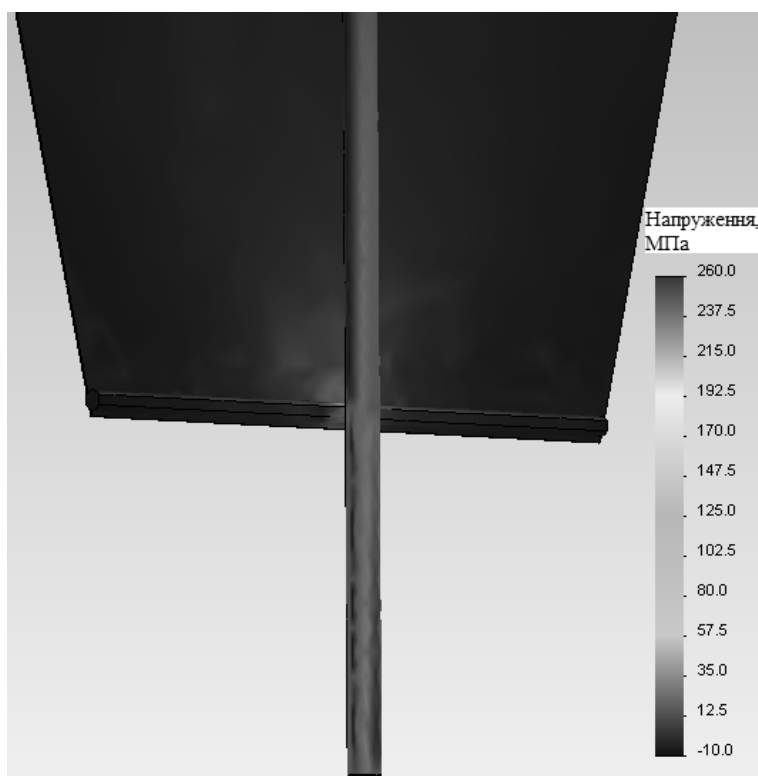


Рис. 4. Напруження, які виникають на осі лопаті в результаті дії на неї аеродинамічних та інерційних сил

Наступним етапом нашої роботи буде проектування плоскої лопаті тихохідного вітроколеса вітроенергетичної установки потужністю 0.5 кВт та реалізація методики її розрахунку у системі SolidWorks із застосуванням векторних діаграм сил, подані на рис. 1 і 2. Для отримання потужності 0.5 кВт із потоку повітря необхідно, щоб за швидкості 8 м/с радіус лопаті наближено дорівнював 1 м [2]. В нашому випадку вітроколесо тихохідне, тому для забезпечення великих значень коефіцієнта відбору потужності та коефіцієнта перекриття лопатей вони повинні бути якомога ширшими – 400 мм на зовнішньому радіусі й 200 мм – на внутрішньому. Як матеріал лопатей під час проектування вибираємо листову вуглецеву сталь, товщина якої 0.5 мм. Для збільшення жорсткості лопаті використовуємо три поперечні ребра, які приєднуємо до осі лопаті, що сполучається з віссю вітроколеса. Як матеріал для поперечних ребер і осі лопаті вибираємо сталеві прутки діаметром 6 і 10 мм, відповідно.

У додатку COSMOSWorks моделюємо навантаження лопаті, використовуючи рис. 1 і 2, та виконуємо дослідження напружень та деформацій її елементів. Результати моделювання подано на рис. 3–5.

Числові значення усіх невідомих параметрів для розрахунку аеродинамічних, відцентрових, тангенційних, гіроскопічних та коріолісових сил і сили тяжіння вибираємо із робіт [1–6]: розрахункова швидкість повітряного потоку $V_n = 8$ м/с; площа лопатей $S \approx 0.4$ м²; густина повітря $\rho_n \approx 1.225$ кг/м³; максимальна кутова швидкість обертання вітроколеса, гондоли, лопаті, відповідно $\omega \approx 4.2$ с⁻¹, $\omega_1 \approx 2$ с⁻¹, $\omega_2 \approx 6$ с⁻¹; радіус вітроколеса $r = 1$ м; маса лопаті $m \approx 2$ кг; пришвидшення вільного падіння $g = 9.81$ м/с²; максимальні кутові пришвидшення вітроколеса, гондоли і лопаті, відповідно $\varepsilon \approx 1$ с⁻², $\varepsilon_1 \approx 0.5$ с⁻², $\varepsilon_2 \approx 1.5$ с⁻²; максимальна відстань від ділянки лопаті до осі

башти та лопаті, відповідно $l = 1 \text{ м}$, $b = 0.2 \text{ м}$. Підставивши подані вище значення у формули (4)–(14), отримаємо максимальні числові значення аеродинамічних та інерційних навантажень: $F_{\Sigma} \approx 20 \text{ Н}$; $F_{\text{в.к}} = 35 \text{ Н}$; $F_{\text{т.к}} = 2 \text{ Н}$; $F_{\text{тяж}} = 20 \text{ Н}$; $F_{\text{в.г}} = 8 \text{ Н}$; $F_{\text{т.г}} = 1 \text{ Н}$; $F_{\text{п.к}} \approx 34 \text{ Н}$; $F_{\text{в.л}} \approx 1 \text{ Н}$; $F_{\text{т.л}} \approx 1 \text{ Н}$; $F_{\text{г.л}} \approx 10 \text{ Н}$.

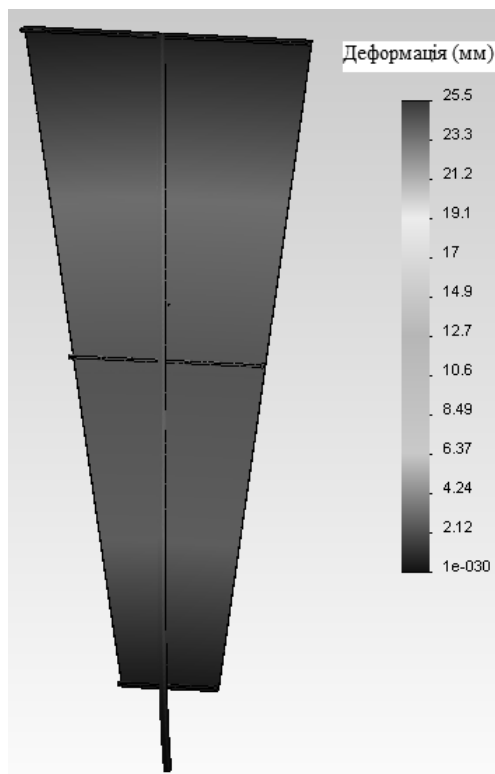


Рис. 5. Деформації ділянок лопаті під час взаємодії з повітряним потоком та внаслідок дії інерційних сил

Як бачимо із наведених графічних результатів моделювання навантажень плоскої лопаті тихохідного вітроколеса аеродинамічними, відцентровими, гіроскопічними, коріолісовими силами та силами тяжіння, максимальні напруження виникають на осі лопаті в місці її кріплення до осі вітроколеса (приблизно $\sigma_{max} = 260 \text{ МПа}$) та поступово зменшуються до зовнішнього краю лопаті (рис. 4). Враховуючи вказані вище напруження, можна визначити оптимальне значення діаметра осі лопаті. В нашому випадку діаметр 10 мм буде оптимальним, оскільки межа текучості матеріалу осі (легованої сталі) $\sigma_m \approx 600 \text{ МПа} > \sigma_{max} = 260 \text{ МПа}$, тобто необхідний коефіцієнт запасу міцності забезпечується. Максимальні деформації ділянок спостерігатимуться на зовнішньому радіусі лопаті і становитимуть приблизно 25 мм (рис. 5). Максимальний кут відхилення лопаті (на зовнішньому радіусі) становитиме 14° , тоді як середнє значення цього кута лежатиме у межах $4\text{--}5^\circ$. Знайдені кути відхилення не перевищують допустимих значень [2]. Отже, матеріал лопаті вибрано правильно.

Висновки. На підставі досліджень ми отримали такі результати:

1. Проаналізовано динаміку тихохідного вітроколеса та виведено аналітичні залежності (2) – (15), які дають змогу описати аеродинамічні, відцентрові, гіроскопічні, коріолісові сили та сили тяжіння, які діють на лопаті вітроколеса під час їх взаємодії з повітряним потоком та під час їх обертання навколо трьох осей (вітроколеса, башти і лопаті). Подано векторні діаграми вказаних вище сил (рис. 1–2), за допомогою яких можна створити наближену модель навантаження лопатей.

2. Розроблено методику розрахунку конструктивних елементів вітроколеса з урахуванням вказаних вище сил. Реалізовано розроблену методику для проектування плоскої лопаті тихохідного вітроколеса вітроенергетичної установки потужністю 0.5 кВт. Подано відповідні графічні залежності напружень, переміщень та відносних деформацій елементів лопаті (рис. 3–5).

1. Гайдайчук В., Носенко В. Динаміка вітроенергетичних установок під дією вітрових та інерційних навантажень // *Опір матеріалів і теорія споруд.* – 2008. – № 82. – С. 31–38. 2. Фатеев Е. *Как сделать самому ветроэнергетический агрегат.* – М., 1949. – 64 с. 3. <http://www.scoraigwind.co.uk/> 4. Гайдайчук В., Носенко В. О компьютерном моделировании динамического поведения и прочности конструкций ветроэнергетических установок // *Промислове будівництво та інженерні споруди.* – 2009. – №3. – С. 22–26. 5. Смерека І.П., Барвінський А.Ф., Білоус Б.Д., Кузьо І.В., Зінко Я.А. *Короткий довідник з теоретичної механіки.* – Львів, 2001. – 240 с. 6. Кузьо І., Корендій В. *Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності* // *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка».* – 2010. – № 679. – С. 61–68.