

УДК 621.548

І.В. Кузьо, д-р техн. наук, проф.,
В.М. Корендій, магістр,
Нац. ун-т "Львівська політехніка"

АНАЛІЗ ГРАВІТАЦІЙНИХ ТА ІНЕРЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ НЕРІВНОМІРНОМУ СКЛАДНОМУ РУСІ ЛОПАТЕЙ ВІТРОКОЛЕСА

І.В. Кузьо, В.М. Корендій. Аналіз гравітаційних та інерційних навантажень при нерівномірному складному русі лопатей вітроколеса. Виведено аналітичні залежності для визначення впливу гравітаційних та інерційних навантажень, які виникають внаслідок обертання лопатей навколо трьох осей: вітроколеса (при взаємодії з повітряним потоком), башти (при зміні напрямку вітру) та Землі, на динаміку лопатей. Подано формули для розрахунку осьових сил, а також навантажень згину і зрізу, які діють на елементарні ділянки лопатей при їх складному русі.

Ключові слова: лопаті вітроколеса, динаміка лопатей, гравітаційні навантаження, інерційні навантаження, навантаження при обертанні Землі.

И.В. Кузьо, В.М. Корендий. Анализ гравитационных и инерционных нагрузок при неравномерном сложном движении лопастей ветроколеса. Выведены аналитические зависимости для определения влияния гравитационных и инерционных нагрузок, возникающих в результате вращения лопастей вокруг трех осей: ветроколеса (при взаимодействии с воздушным потоком), башни (при изменении направления ветра) и Земли, на динамику лопастей. Представлены формулы для расчета осевых сил, а также нагрузок изгиба и среза, действующих на элементарные участки лопастей при их сложном движении.

Ключевые слова: лопасти ветроколеса, динамика лопастей, гравитационные нагрузки, инерционные нагрузки, нагрузки при вращении Земли.

Kuzyo, V. Korendiy. Analysis of gravity and inertial loadings in irregular compound motion of wind-wheel blades. Analytical dependencies are deduced for determining the influence of gravity and inertial loadings originating from blades' rotation round three axes: that of the wind-wheel (in interacting with the air stream), of the tower (in changing the wind bearing), and of the Earth, on blades dynamics. Formulae for calculating axial forces, a well as bend and shear loadings affecting elementary areas of blades in their compound motion, are presented.

Keywords: blades of a wind wheel, blade dynamics, gravity loadings, inertial loads, Earth rotation loadings.

Основний внесок в загальну структуру виробництва електроенергії роблять теплова енергетика класичного типу і атомна електроенергетика. Однак, можна виділити велику групу споживачів, централізоване живлення електроенергією яких від енергосистеми є менш рентабельним у порівнянні з живленням від автономних джерел (окремі фермерські та лісничі господарства, пасіки, дачі, невеликі гірські поселення тощо). В даному випадку практичний інтерес викликає дослідження можливостей використання вітроенергетичних установок як найбільш екологічно чистого джерела електроенергії для локальних споживачів малої потужності, що має змогу адаптуватися до кліматичних умов України.

Завдання моделювання навантажень лопатей вітроколеса є досить актуальним, оскільки при зростанні популярності альтернативних джерел енергії і особливо вітроенергетичних установок, гостро постають проблеми підвищення міцності й надійності їх конструкцій.

Питанням розрахунку динаміки і міцності лопатей та методам їх теоретичного моделювання присвячена численна наукова література [1...4]. Однак, як правило, головна увага в наявних на сьогоднішній день публікаціях приділяється режимам обертання лопатей навколо однієї або двох осей (вітроколеса і башти), і залишаються поза увагою режими складного руху вітро-

колеса внаслідок обертання Землі. В таких випадках поведінка лопаті стає дуже складною для моделювання, оскільки поряд із силами інерції простого обертання на неї діють коріолісові сили інерції складного руху, що періодично змінюються в часі.

Під час експлуатації вітроустановки на лопаті діє досить багато навантажень різної природи. Поряд з аеродинамічними навантаженнями, які уже досить детально вивчені [3, 4], найбільший вплив на коливні процеси чинять гравітаційні та інерційні сили.

Дослідження впливу гравітаційних та інерційних навантажень, які виникають при обертанні лопатей навколо осей вітроколеса, башти та Землі на динаміку лопатей, є досить актуальним, оскільки з розвитком вітроустановок та збільшенням їх габаритів гостро постають проблеми удосконалення математичних моделей вітроустановок та методик розрахунку міцності і надійності елементів їх конструкцій.

Розглянемо вітроустановку, яка складається із вітроколеса (абсолютно жорсткого диска з прямолінійними жорсткими лопатями), гондоли (жорсткого вала, на якому обертається вітроколесо) та башти (жорсткої балки, на якій встановлюється гондола з можливістю повороту). В такому випадку розміщення вітроустановки на поверхні Землі характеризується географічною широтою θ (рис. 1). Розмістимо систему координат $Oxyz$ таким чином, щоб вісь x була перпендикулярною до осі лопаті, вісь y — напрямлена вздовж осі вітроколеса, а вісь z — вздовж осі лопаті. Як видно із рисунка 1, початок координат (точка O) співпадає з віссю вітроколеса. В такому випадку лопаті можуть обертатися у площині N на деякий кут φ за рахунок повороту гондоли, в площині M , перпендикулярній до N , на деякий кут ψ за рахунок обертання вітроколеса та навколо Земної осі у площині V на деякий кут ξ .

Аналіз навантажень розпочнемо із гравітаційних сил. Схема їх дії на елементарні ділянки лопаті вітроколеса подана на рис. 2. Із нього видно, що гравітаційні навантаження залежать від кутового положення та розподілу маси за довжиною dl та шириною db елементарної ділянки лопаті dl . Якщо лопать вітроустановки розміщена у вертикальному положенні (кут $\psi=90^\circ$ або $\psi=270^\circ$), то в лопаті виникають навантаження лише в осьовому напрямку $F_{\text{то}}$, які при нерівномірному обертанні вітроколеса викликать змінні в часі напруження розтягу і стиску у площині M . При інших значеннях кута ψ виникає також згинальний момент $M_{\text{т}}$ і сила зрізу $F_{\text{тз}}$, які спричиняють змінні в часі напруження згину та зрізу у площині M . Запишемо аналітичні вирази для розрахунку вказаних сил і моменту:

$$F_{\text{то}} = G \cos \psi = \rho h g \cos \psi \int_0^R \int_0^B dl db; \quad F_{\text{тз}} = \rho h g \sin \psi \int_0^R \int_0^B dl db; \quad M_{\text{т}} = \rho h g \sin \psi \int_0^R \int_0^B l dl db, \quad (1)$$

де $G = \rho h g \int_0^R \int_0^B dl db$ — вага лопаті,

ρ — густина матеріалу лопаті,

h — товщина лопаті,

g — пришвидшення вільного падіння,

R — зовнішній радіус вітроколеса,

$B = B(l)$ — функція залежності ширини лопаті від її довжини.

Перейдемо до інерційних навантажень. При нерівномірному обертанні лопатей навколо осі вітроколеса на їх елементарні ділянки діють відцентрові $F_{\text{н1}}$ та дотичні $F_{\text{т1}}$ сили інерції. Ві-

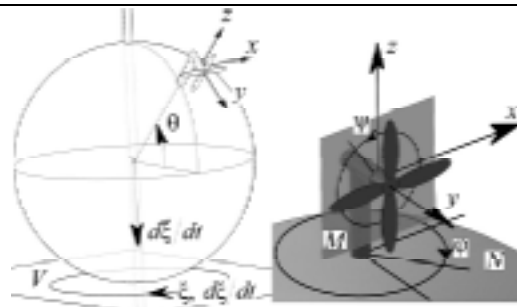


Рис. 1. Схематичне зображення обертального руху Землі, вітроколеса і гондоли

дцентрові навантаження завжди будуть напрямлені вздовж прямої, що з'єднує вісь вітроколеса і центр елементарної ділянки лопаті, та викликать осьові напруження розтягу. Дотичні сили інерції діятимуть перпендикулярно до прямої, що з'єднує вісь вітроколеса і центр елементарної ділянки лопаті, а їх напрямок може змінюватися в залежності від значення кутового пришвидшення вітроколеса. Отже, вказані сили спричинять у площині M змінні в часі напруження розтягу (від сили F_{n1}), згину (від згинального моменту $M_{зр1}$, що обумовлений силою $F_{\tau1}$) та зрізу (від сили зрізу $F_{зп1}$, що обумовлена $F_{\tau1}$). Схема дії відцентрових та дотичних інерційних навантажень при нерівномірному обертанні вітроколеса зображена (рис. 3), а значення усіх сил і моментів, які ними зумовлюються, можна обчислити за такими залежностями:

$$F_{n1} = -\rho h (d\psi/dt)^2 \int_0^R \int_0^B \sqrt{l^2 + b^2} dl db; \quad F_{\tau1} = -\rho h d^2\psi/dt^2 \int_0^R \int_0^B \sqrt{l^2 + b^2} dl db; \quad (2)$$

$$M_{зр1} = -\rho h d^2\psi/dt^2 \int_0^R \int_0^B (l^2 + b^2) dl db,$$

де l — радіус на лопаті від осі вітроколеса, на якому розміщена елементарна ділянка,
 b — відстань від осі лопаті до елементарної ділянки за шириною лопаті.

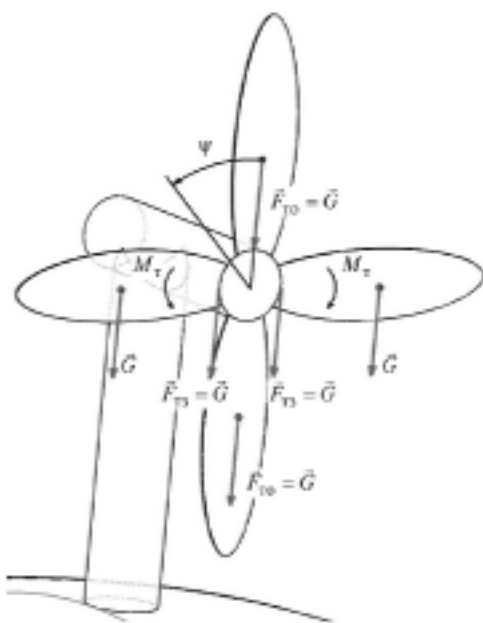


Рис. 2. Схема дії гравітаційних навантажень на лопаті вітроколеса

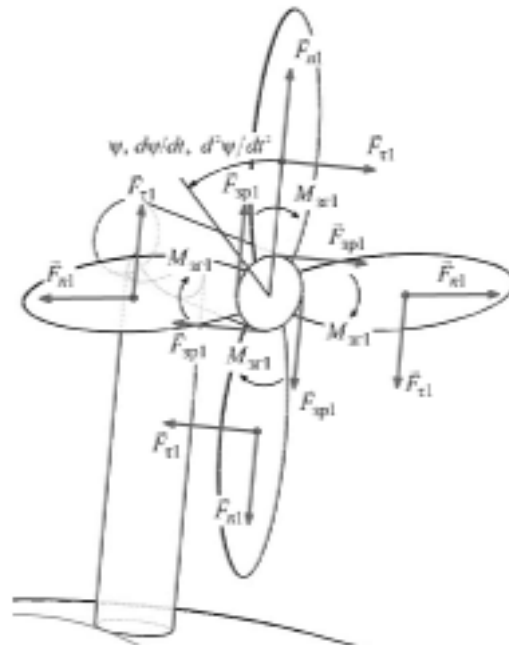


Рис. 3. Схема дії інерційних навантажень на лопаті при обертанні вітроколеса

При різкій зміні напрямку повітряного потоку матиме місце нерівномірне обертання гондоли разом із вітроколесом та лопатями навколо осі башти, що спричинить дію відцентрових F_{n2} та дотичних $F_{\tau2}$ сил інерції на їх елементарні ділянки. Відцентрові навантаження будуть напрямлені по прямій, що з'єднує вісь башти і центр елементарної ділянки, та викликать згинальні моменти $M_{зр2}$ і $M_{зр3}$ у площинах N і M . Дотичні сили інерції діятимуть перпендикулярно до прямої, що з'єднує вісь башти і центр елементарної ділянки, викликать згинальні моменти $M_{зр4}$ і $M_{зр5}$ у площинах M і N , а їх напрямок може змінюватися в залежності від значення кутового пришвидшення гондоли. Отже, вказані сили спричинять змінні в часі напруження розтягу (від осьових сил F_{o2} і F_{o3} — проєкцій сил F_{n2} і $F_{\tau2}$ на вісь Oz), зги-

ну (від згинальних моментів $M_{зр2}$, $M_{зр3}$, $M_{зр4}$ і $M_{зр5}$) та зрізу (від сил зрізу $F_{зр2}$ і $F_{зр3}$ — проєкцій сил F_{n2} і $F_{\tau2}$ на вісь Ox , а також сил зрізу $F_{зр4}$ і $F_{зр5}$ — проєкцій сил F_{n2} і $F_{\tau2}$ на вісь Oy). Схема дії відцентрових та дотичних інерційних навантажень при нерівномірному обертанні гондоли навколо осі башти зображена (рис. 4), а значення усіх сил і моментів, які ними зумовлюються, можна обчислити за такими залежностями:

$$\begin{aligned}
 F_{n2} &= -\rho h (d\varphi/dt)^2 \int_0^R \int_0^B \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db; & F_{\tau1} &= -\rho h d^2\varphi/dt^2 \int_0^R \int_0^B \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db; \\
 F_{o2} &= -\rho h (d\varphi/dt)^2 \sin \psi \cos \alpha \int_0^R \int_0^B \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db; \\
 F_{o3} &= -\rho h d^2\varphi/dt^2 \sin \psi \sin \alpha \int_0^R \int_0^B \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db; \\
 F_{зр2} &= -\rho h (d\varphi/dt)^2 \cos \psi \cos \alpha \int_0^R \int_0^B \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db; \\
 F_{зр3} &= -\rho h d^2\varphi/dt^2 \cos \psi \sin \alpha \int_0^R \int_0^B \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db; \\
 F_{зр4} &= -\rho h (d\varphi/dt)^2 \sin \alpha \int_0^R \int_0^B \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db; \\
 F_{зр5} &= -\rho h d^2\varphi/dt^2 \cos \alpha \int_0^R \int_0^B \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db; \\
 M_{зр2} &= -\rho h (d\varphi/dt)^2 \cos \psi \cos \alpha \int_0^R \int_0^B l \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db; \\
 M_{зр3} &= -\rho h d^2\varphi/dt^2 \cos \psi \sin \alpha \int_0^R \int_0^B l \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db; \\
 M_{зр4} &= -\rho h (d\varphi/dt)^2 \sin \alpha \int_0^R \int_0^B l \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db; \\
 M_{зр5} &= -\rho h d^2\varphi/dt^2 \cos \alpha \int_0^R \int_0^B l \sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2} dl db,
 \end{aligned} \tag{3}$$

де c — відстань від осі башти до місця кріплення лопатей;

α — кут між площиною обертання лопатей та прямою, що сполучає вісь башти і елементарну ділянку лопаті

$$\cos \alpha = \frac{l \sin \psi}{\sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2}}; \quad \sin \alpha = \frac{c}{\sqrt{c^2 + (l \sin \psi)^2}}.$$

Внаслідок обертання Землі навколо власної осі на вітроустановку в цілому і лопаті зокрема діють відцентрові сили інерції F_{n3} (рис. 5). Останні спричиняють змінні в часі напруження розтягу-стиску (від осьової сили F_{o4} — проєкції сили F_{n3} на вісь Oz), згину (від згинальних моментів $M_{зр6}$ і $M_{зр7}$, що діють у площинах N і M) та зрізу (від сил зрізу $F_{зр6}$ і $F_{зр7}$ — проєкцій сили F_{n3} на осі Ox і Oy).

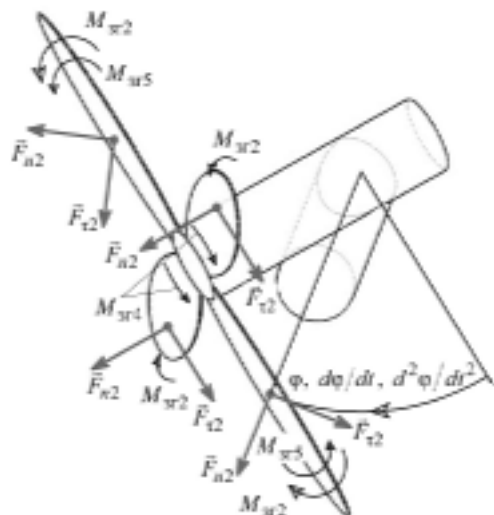


Рис. 4. Схема дії інерційних навантажень на лопаті при повороті гондoli навколо осі бапти

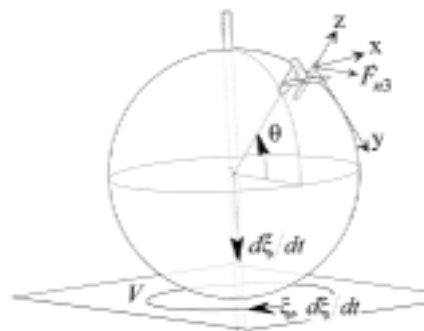


Рис. 5. Схема дії інерційних навантажень на лопаті при обертанні Землі

Схема дії відцентрових інерційних навантажень при обертанні Землі зображена на рисунку 5, а значення усіх сил і моментів, які ними зумовлюються, можна обчислити за такими залежностями:

$$\begin{aligned}
 F_{n3} &= -\rho h (d\xi/dt)^2 \int_0^R \int_0^B R_3 dl db; \\
 F_{o4} &= -\rho h (d\xi/dt)^2 (\cos \theta \cos \psi - \sin \theta \sin \psi \sin \varphi) \int_0^R \int_0^B R_3 dl db; \\
 F_{зр6} &= -\rho h (d\xi/dt)^2 (\cos \theta \sin \psi + \sin \theta \cos \psi \sin \varphi) \int_0^R \int_0^B R_3 dl db; \\
 F_{зр7} &= -\rho h (d\xi/dt)^2 \sin \theta \cos \varphi \int_0^R \int_0^B R_3 dl db; \\
 M_{зр6} &= -\rho h (d\xi/dt)^2 (\cos \theta \sin \psi + \sin \theta \cos \psi \sin \varphi) \int_0^R \int_0^B R_3^2 dl db; \\
 M_{зр7} &= -\rho h (d\xi/dt)^2 \sin \theta \cos \varphi \int_0^R \int_0^B R_3^2 dl db,
 \end{aligned} \tag{4}$$

де R_3 — відстань від осі Землі до елементарної ділянки лопаті (приймаємо наближено такою, що дорівнює добутку радіуса Землі ($r_3 \approx 6,37 \cdot 10^6$ м) на косинус географічної широти розміщення вітроустановки $R_3 = r_3 \cos \theta$).

У результаті проведених досліджень проаналізовано графічні схеми дії гравітаційних та інерційних навантажень на елементарні ділянки лопатей вітроколеса, виведено аналітичні залежності для визначення осьових і згинальних навантажень, а також сил зрізу, які можуть використовуватися в процесі моделювання динаміки (складного руху) лопатей та розрахунку елементів конструкції вітроустановки.

Література

- Кузьо, І. Обґрунтування розвитку вітроенергетичних установок малої та надмалої потужності / І. Кузьо, В. Корендій // Вісник НУ "Львів. політехніка". — Львів, 2010. — № 679. — С. 61 — 68.

2. Короткий довідник з теоретичної механіки / І. Смерека, А. Барвінський, Б. Білоус та ін. — Львів, 2001. — 240 с.
3. Гайдайчук, В. Динаміка вітроустановок під дією вітрових та інерційних навантажень / В. Гайдайчук, В. Носенко // Опір матеріалів і теорія споруд. — 2008. — № 82. — С. 31 — 38.
4. Исследование нагрузок на лопасть турбины электрической ветряной турбогенераторной установки / Н. Голубенко, А. Белогуров, С. Белогуров, А. Яцура // Вісн. інженер. акад. України. — К., 2008. — № 3 – 4. — С. 186 — 191.

References

1. Kuzyo, I. Obruntuvannia rozvytku vitroenerhetychnykh ustanovok maloi ta nadmaloi potuzhnosti [Substantiation of low- and sublow-power wind plants development] / I. Kuzyo, V. Korendii // Visnyk NU "Lviv. politekhnikha" [Herald of "Lviv Polytechnics" University. — Lviv, 2010. — # 679. — PP. 61 — 68.
2. Korotkyi dovidnyk z teoretychnoi mekhaniky [Concise reference-book in theoretical mechanics] / I. Smereka, A. Barvynskiy, B. Bilous etc. — Lviv, 2001. — 240 p.
3. Haidaichuk, V. Dynamika vitroustanovok pid diieiu vitrovykh ta inertiinykh navantazhen [Windmills dynamics under wind and inertial load] / V. Haidaichuk, V. Nosenko // Opir materialiv i teoriia sporud [Strength of materials and structural theory] — 2008. — # 82. — PP. 31 — 38.
4. Issledovanie nagruzok na lopast' turbiny elektricheskoy vetryanoy turbogeneratornoy ustanovki [Research of loads affecting the blades of an electrical turbine-generator windmill] / N. Golubenko, A. Belogurov, S. Belogurov, A. Yatsura // Visn. inzhener. akad. Ukrainy [Herald of Engineering Academy of Ukraine]. — Kyiv, 2008. — № 3 – 4. — PP. 186 — 191.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-ту Гутиря С.С.

Надійшла до редакції 19 вересня 2011 р.