

## МАЛОЦИКЛОВА УТОМА МАТЕРІАЛУ ЛОПАТЕЙ РОТОРІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

В.В.Гайдайчук<sup>1</sup>, д.т.н., Л.В.Левківська<sup>2</sup>, к.т.н

<sup>1</sup>*Київський національний університет будівництва і архітектури,  
м. Київ*

<sup>2</sup>*Національний транспортний університет, м.Київ*

**Постановка проблеми.** Україна характеризується достатньо високими енергетичними потенціалами вітрового потоку в Карпатах, Криму, Причорномор'ї та Приазов'ї, де середньорічні швидкості вітру на висоті 10 м складають 5 і більше метрів за секунду, що ставить вітрову енергію на перше місце серед поновлюваних джерел для виробництва електричної енергії.

Основні переваги вітроенергетики – екологічність і низькі експлуатаційні витрати. Головною позитивною якістю вітроенергетики є її поновлюваність.

Однак сучасний стан розвитку альтернативної вітроенергетики в Україні характеризується досить низьким рівнем. Зростання галузі стримується відносно високою ціною установок, їх складністю в обслуговуванні і в найбільшій мірі частими поломками.

Як показує досвід експлуатації вітроенергетичних установок (ВЕУ) в країнах Європи протягом останніх 50 років однією із причин, яка суттєво стримує зростання отримання та використання вітрової електроенергії є складні статичні і динамічні умови їх експлуатації, що приводять до важко передбачуваних аеродинамічних і гіроскопічних резонансних коливань системи та її утоми або аварійного руйнування.

**Актуальність дослідження.** Одна із основних перешкод розвитку вітроенергетичних установок пов'язана з труднощами моделювання їх динамічної поведінки. Адже в процесі експлуатації конструкції ВЕУ піддаються впливу різного роду динамічних навантажень, основними з яких є вітрові навантаження і сили інерції обертального руху лопатей. Їх вплив на коливання конструкції ВЕУ аналізується в [1-2]. Однак, як показано в [3-6], особливі динамічні ефекти в лопатях виникають при складному обертанні ротора, коли його вісь під дією вітрового потоку розвертається. Вплив цих ефектів на загальну міцність і динамічну поведінку ВЕУ залишається мало вивченими до цього часу. Враховуючи порівняно високу частоту виникнення непередбачених поломок ВЕУ,

можна зробити висновок, що проблема теоретичного моделювання їх динаміки є досить актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як свідчить огляд наукової літератури, рекламних буклетів і технічної документації, що підготовлені фірмами виробниками ВЕУ, на теперішній час при їх проектуванні не аналізуються гіроскопічні сили інерції складного обертання лопатей, які можуть привести до резонансних коливань і спричинити утомні явища в конструкції та її руйнування.

Проектування ВЕУ проводиться на основі спрощених експериментальних моделей без спеціального урахування відмічених ефектів. У зв'язку з цим у більшості випадків аварії ВЕУ відбуваються вже на початковій стадії їх функціонування. Причому вони супроводжуються в основному руйнуванням лопатей ротора та їх відльотом на великі відстані. Вказані аварії широко спостерігались також і на вітрових установках в Україні. В закордонній практиці розробки вітроенергетичних установок доробка ВЕУ здійснювалась зміцненням лопатей в місцях їх безпосереднього руйнування і досягнення цим потрібної міцності конструкції вітроагрегата. В Україні така доробка зруйнованих ВЕУ середньої потужності не проводилась через малу серійність створених за іноземними ліцензіями ВЕУ середньої потужності, а високопотужні ВЕУ не вироблялись у зв'язку з їх високою вартістю. Тому до теперішнього часу не розроблені універсальні комп'ютерні методики для моделювання і передбачення аварійних ситуацій у високопотужних ВЕУ.

**Новизна наукового дослідження.** У запропонованій статті мета розроблення високонадійних ВЕУ підвищеної потужності та ефективності досягається за рахунок моделювання і прогнозування аварійних станів та їх виключення шляхом багатоваріантного проектування оптимальних конструктивних схем і елементів ВЕУ. Її досягнення базується на більш універсальних і точних комп'ютерних і експериментальних моделях механічної поведінки системи. Комп'ютерна модель представляє собою уточнені диференціальні рівняння високих порядків в частинних похідних, методи їх чисельного інтегрування та комп'ютерну програму для проведення чисельних експериментів.

Рівняння для розв'язку задач динаміки будуються високоточним методом скінчених елементів, який дозволяє врахувати трьохвимірний динамічний напружений стан лопатей ротора, гондоли та опорної башти з урахуванням гіроскопічних дій коливального руху елементів конструкції при складному обертанні, а також аеродинамічних потоків повітря.

**Виклад основного матеріалу.** При складному обертанні лопатей ВЕУ на них крім діючих сил починають діяти гіроскопічні сили, що

приводять до згинання лопатей в площинах їх обертання. В процесі роботи ВЕУ це може викликати утому матеріалу лопатей та їх руйнування.

Такий вид навантаження реалізується, коли під дією вітрового потоку, що змінює свій напрямок, вісь ротора повертається, і лопать починає обертатися відносно двох осей одночасно. Тоді на елемент лопаті довжиною  $dr$  діє періодична гіроскопічна сила

$$dF = 2r\omega\alpha_0 \sin \omega t \gamma dr, \quad (1)$$

де  $\gamma$  - погонна густина лопаті,  $r$  - відстань від осі обертання ротора до елемента, що розглядається.

Оскільки ця сила діє з частотою  $\omega$ , то при її наближенні до частоти власних коливань лопаті, виникають резонансні ефекти. Збуджені ними коливання через втулку лопаті передаються і на башту ВЕУ, тому вони можуть привести до руйнування не тільки лопатей, але і всієї конструкції системи.

Руйнування від малоциклової утоми – це руйнування в умовах повторного пружнопластичного деформування з числом циклів (до моменту утворення макротріщини або повного руйнування) до  $5 \cdot 10^4 - 10^5$ , яке є умовною границею мало- і багато циклової утоми для пластичних матеріалів та визначає середнє число циклів для зони переходу від пружнопластичного до пружного циклічного деформування. Для високоміцних сплавів перехідна зона зміщена в бік більшої довговічності, а для крихких – в бік меншої довговічності.

Розглядаючи руйнування від малоциклової утоми, розрізняють напруження в жорсткому і м'якому режимах. Циклічне деформування в пружній області в обох режимах супроводжується утворенням петлі гістерезису, яка характеризує роботу пружнопластичного деформування за повний цикл зміни зусиль. Зв'язки між напруженнями та деформаціями при циклічному навантаженні за межами пружності виражають діаграми пружнопластичного деформування за параметром числа півциклів.

Показники зміцнення при степеневій і лінійній апроксимації діаграм статичного і циклічного деформувань характеризуються параметрами  $m^{(0)}$ ,  $m^{(k)}$ ,  $\bar{E}_T^{(0)}$  та  $\bar{E}_T^{(k)}$ , які визначаються із залежності:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}^{(0)} &= e^{-m^{(0)}}; & \bar{S}^{(k)} &= \varepsilon^{-m^{(k)}}; \\ \bar{\sigma}^{(0)} &= \left(1 - \bar{E}_T^{(0)}\right) + \bar{E}_T^{(0)} e^{-m^{(0)}}; & \bar{S}^{(k)} &= 2 \left[1 - \bar{E}_T^{(k)}\right] + \bar{E}_T^{(k)} \varepsilon^{-m^{(k)}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тут  $\bar{E}_T = E_T/E$  – відносний модуль зміцнення,  $E_T$  – модуль зміцнення в пружнопластичній області ( $0 \leq E_T \leq E$ ),  $e$  – накопичена деформація,  $\varepsilon$  – диференціал,  $\bar{S}$  – подвоєна амплітуда напружень.

При малоцикловогому навантаженні розрізняють циклічно ізотропні та анізотропні матеріали, які зміцнюються, знеміцнюються та стабілізуються.

Матеріалам, які знаходяться в зміцненому стані (високі межі міцності і текучості), властиве знеміцнення, а матеріалам з низькими міцністими і високими пластичними властивостями – зміцнення. Зазначеним станам відповідають характерні особливості діаграм статичного (однократного) руйнування. При цьому матеріали, у яких рівномірна деформація невелика, схильні до циклічного знеміцнення, матеріали з великою рівномірною деформацією зміцнюються, а матеріалам, у яких рівномірна деформація і подовження на стадії локалізації деформацій (утворення шийки) приблизно рівні, властива циклічна стабільність.

Циклічно анізотропні матеріали – матеріали, в яких спостерігається неоднаковий опір циклічному деформуванню під час парних і непарних півциклів навантаження.

В залежності від циклічної ізотропності або анізотропності матеріалу, характеру зміни властивостей при мало цикловому навантаженні, режиму випробування (м'який, жорсткий, асиметрія та інші) односторонні деформації або накопичуються, або відсутні. Накопичення односторонніх деформацій для циклічно зміцнених матеріалів носить згасаючий з числом циклів навантаження характер; для матеріалів, які циклічно знеміцнюються і стабілізуються, можливе накопичення односторонніх деформацій, яке прогресує або стабілізується з числом циклів навантаження. Односторонньо накопичену деформацію визначають за величиною пружнопластичної  $(e^{(k)})$  або пластичної  $(e_p^{(k)})$  деформацій, або розкриття тріщини  $\delta(e^{(k)})$  досягнутої в процесі циклічного навантаження після  $k$ -го півциклу:

$$e^{-(k)} = e^{-(0)} + \sum_{k=1}^k (-1)^k \varepsilon^{-(k)}; \quad (3)$$

$$e_p^{-(k)} = e^{-(0)} - \bar{\sigma}^{-(0)} + \sum_{k=1}^k (-1)^k \varepsilon^{-(k)} = e^{-(0)} - \bar{\sigma}^{-(0)} + \sum_{k=1}^k (-1)^k \bar{\delta}^{-(k)}.$$

На рис. 1 показано характер зміни з числом циклів навантаження односторонніх деформацій для циклічно ізотропних та анізотропних матеріалів, які зміцнюються і стабілізуються. В ході малоциклового

навантаження можливі накопичення односторонніх деформацій у напрямках як парних, так і непарних півциклів, зміна напрямку процесу накопичення деформацій, а також зменшення накопичених односторонніх деформацій. В залежності від характеру і значень накопичення односторонніх деформацій розрізняють квазістатичне, від втомлюваності і змішане малоциклове руйнування.

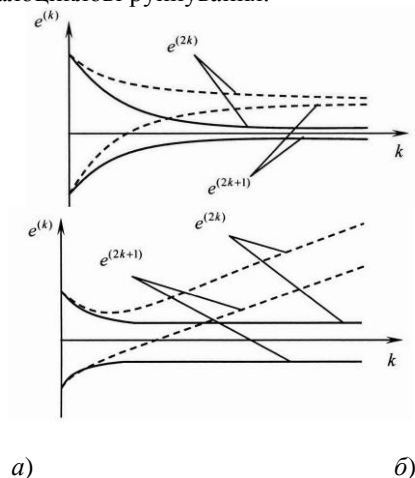


Рис. 1 Зміна з числом циклів навантаження деформацій при м'якому навантаженні циклічно ізотропного (суцільні лінії) або анізотропного (пунктирні лінії) матеріалу

Діапазон квазістатичних малоциклових руйнувань за числом циклів навантаження залежить від типу і стану матеріалу, а також режиму навантаження і може досягати  $10^3$  циклів та більше, займаючи область від однократного статичного розриву.

Змішане малоциклове руйнування спостерігається в перехідній області довговічностей між квазістатичним типом руйнування і руйнуванням від втомлюваності. Діапазон змішаного малоциклового руйнування за числом циклів навантаження може складати від десятків до декількох тисяч циклів.

Для виключення руйнування лопатей ВЕУ від втоми матеріалу необхідно виготовляти їх із циклічно ізотропних матеріалів, що зміцнюються та стабілізуються (рис. 1, а та б (суцільні лінії)).

**Висновки.** В роботі обґрунтована необхідність комплексного підходу до розрахунку конструкцій ВЕУ з урахуванням їх попереднього напруження силами інерції і гіроскопічної взаємодії обертальних та

лінійних видів руху. На основі проведеного комп'ютерного моделювання відмічених ефектів підтверджена небезпека дій гіроскопічних сил інерції на конструкцію пружного ротора та запропоновані заходи для виключення недопустимих резонансних ефектів і руйнувань ВЕУ.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Застосування розробленої методики комп'ютерного і експериментального моделювання критичних ситуацій функціонування вітрових установок та технології їх проектування дозволить створити оптимальні конструкції високонадійних вітроенергетичних установок підвищеної потужності та міцності і запобігти утомі їх матеріалу або аварійному руйнуванню.

### Summary

**Rotor blades nonlinear oscillations of wind-driven power plants are under investigation. Dynamic effects analysis appearing during complicated revolution of such constructions and influencing their strength and reliability control had been completed. Measures preventing rotor blades destruction of wind-driven power plants from their material fatigue had been suggested.**

### *Література*

1. Ляхтер В.М. Ветровые станции большой мощности. Обзорная информация. – М.: Информэнерго, 1987. – 72 с.
2. Харитонов В. П. Автономные ветроэлектрические установки. – Москва, ГНУ ВИЭСХ. 2006. – 273 с.
3. Гловач Л.В., Носенко В.П. Комп'ютерне моделювання динаміки лопатей вітроенергетичних установок // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2010. – № 85 – С. 143 – 152.
4. Гуляєв В.І., Гловач Л.В. Динамічні процеси в лопатях вітроенергетичних установок // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – 2011. – № 8. – С. 23 – 31.
5. Левківська Л.В. Напружено-деформований стан лопатей вітроенергетичних установок під дією аеродинамічних сил // Вісник Національного транспортного університету. – 2011. – № 24. – С. 312 – 315.
6. Гайдайчук В.В., Носенко В.П., Худолій С.М. Механіка конструкцій вітроенергетичних установок. – К.: Аграр Медіа Груп, 2013. – 263 с.