

УДК 621.548

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

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІТРОВОЇ ТУРБИНИ

І.В. Кузьо, В.М. Корендій. **Комп'ютерне моделювання характерних режимів роботи вітрової турбіни.** На основі математичної моделі аеромеханічної системи вітрової турбіни з трьома ступенями вільності проведено чисельний аналіз характерних режимів роботи вітрової турбіни: зміна швидкості вітру при постійному моменті навантаження на валу вітроколеса; зміна моменту навантаження на валу вітроколеса при постійній швидкості вітру; зміна напрямку вітру при інших постійних параметрах. Подано відповідні графічні часові залежності частоти обертання вітроколеса для кожного з режимів роботи та проаналізовано характер перехідних процесів.

Ключові слова: аеромеханічна система, вітрова турбіна, вітроколесо, режим роботи, перехідний процес.

И.В. Кузьо, В.М. Корендий. **Компьютерное моделирование характерных режимов работы ветровой турбины.** На основе математической модели аэромеханической системы ветровой турбины с тремя степенями свободы проведен численный анализ характерных режимов работы ветровой турбины: изменение скорости ветра при постоянном моменте нагрузки на валу ветроколеса; изменение момента нагрузки на валу ветроколеса при постоянной скорости ветра; изменение направления ветра при других постоянных параметрах. Приведены соответствующие графические временные зависимости частоты вращения ветроколеса для каждого из режимов работы и проанализирован характер переходных процессов.

Ключевые слова: аэромеханическая система, ветровая турбина, ветроколесо, режим работы, переходной процесс.

I.V. Kuzyo, V.M. Korendiy. **Computer modeling of wind turbine typical operation modes.** Based on the mathematical model of wind turbine aeromechanical system with three degrees of freedom, the numerical analysis of wind turbine typical operation modes — the changing of the wind speed with constant load moment on the windwheel shaft, the changing of the load moment on the windwheel shaft with constant wind speed, the changing of the wind bearing with other constant parameters — is carried out. The corresponding graphic time dependences of the windwheel rotation frequency for each operation mode are presented and the transient processes type is analyzed.

Keywords: aeromechanical system, wind turbine, windwheel, operation mode, transient process.

Зростаючий дефіцит електроенергії, виснаження природних ресурсів органічного палива, технологічні й організаційні труднощі, які виникають при експлуатації висококонцентрованих енергетичних потужностей, екологічні проблеми атомної, теплової й гідроенергетики обумовили неабиякий інтерес до можливостей використання альтернативних джерел енергії, зокрема енергії повітряних потоків, яка на даний час вважається однією з найбільш досліджених, перспективних та екологічно чистих.

Широке впровадження автономних вітрових турбін (ВТ) малої потужності як для виробництва електроенергії, так і як безпосереднього механічного приводу багатьох сільськогосподарських і промислових машин (системи подачі води, зрошування угідь, подрібнення матеріалів тощо), спричинило підвищення вимог щодо ефективності й надійності роботи ВТ в умовах змінних за напрямком і швидкістю вітрів. Завдяки своїй конструктивній простоті, невеликій вартості та достатній точності функціонування у ВТ малої потужності набули відцентрові регулятори частоти обертання та хвостові стабілізатори для орієнтації вітроколеса (ВК) за напрямком вітру.

Завдання регулювання частоти обертання ВК шляхом повороту лопатей полягає в забезпеченні їх оптимального положення відносно напрямку повітряного потоку, при якому аеродина-

мічний момент ВК дорівнюватиме моменту навантаження за умови утримання частоти обертання ВК у потрібному діапазоні при зміні швидкості вітру. Завданням системи орієнтації ВК за допомогою хвостового стабілізатора є забезпечення перпендикулярності напрямку повітряного потоку до площини обертання ВК, що дозволить досягнути максимальної ефективності функціонування ВТ.

Найбільш вагомими сучасними вітчизняними дослідженнями систем регулювання потужності ВТ присвячені обґрунтуванню параметрів відцентрових регуляторів ВТ для отримання номінальних потужностей й частоти обертання ВК [1, 2], аналізу системи регулювання кутової швидкості ВК шляхом складання лопатей у напрямку повітряного потоку та виводу ВК з-під вітру [3, 4]. У цих та інших сучасних дослідженнях систем регулювання потужності вітрову турбіну розглядають як аеромеханічну систему з двома ступенями вільності: обертанням ВК та регульованим рухом лопатей, що не є абсолютно правомірним, оскільки не враховується обертальний рух гондоли при орієнтації за напрямком вітру.

Метою даної роботи є дослідження характерних режимів функціонування горизонтально-осьової ВТ малої потужності, базуючись на дослідженні, де ВТ розглядалася у вигляді аеромеханічної системи з трьома ступенями вільності: обертальними рухами ВК та лопатей навколо власних поздовжніх осей та поворотом гондоли навколо осі башти при орієнтації за напрямком вітру [5]. Характерними режимами роботи ВТ приймаються: поступова і раптова зміна швидкості вітру при постійному моменті навантаження на валу ВК, поступова і раптова зміна моменту навантаження на валу ВК при постійній швидкості вітру, раптова зміна напрямку вітру. Математична модель ВТ має вигляд [5]:

$$\begin{aligned} & (m_{\text{хв}} l_{\text{хв}}^2 + m_{\text{л}} b_{\text{л}}^2 + N m_{\text{л}} (b_{\text{л}}^2 + 0,5 R_{\text{л}}^2) + m_{\text{г}} (d_{\text{г}}^2 + l_{\text{г}}^2 / 12)) \ddot{\phi} = 0,5 \rho_{\text{п}} S_{\text{хв}} l_{\text{хв}} V(t)^2; \\ & \left(0,5 N m_{\text{л}} (R_{\text{л}}^2 + (b_{\text{л}} \cos \theta)^2) + \right. \\ & \left. + 0,25 m_{\text{л}} (r_{\text{м}}^2 + (r_{\text{м}} - c_{\text{м}})^2) \right) \ddot{\psi} + 2 N m_{\text{л}} b_{\text{л}}^2 \dot{\psi} \cos \theta \sin \theta \cdot \dot{\theta} = \\ & = -M(t)(\dot{\psi})^m + 0,5 \pi R^3 \rho_{\text{п}} V(t)^2 \left[\alpha(\dot{\psi} \cdot R/V(t)) - \beta(\dot{\psi} \cdot R/V(t))^2 - \gamma \right]; \\ & N m_{\text{л}} b_{\text{л}}^2 (0,5 \ddot{\theta} - (\dot{\psi})^2 \cos \theta \sin \theta) = -0,5 N C_{\theta} \theta^2 + 0,5 N b_{\text{л}} S_{\text{л}} \times \\ & \times \rho_{\text{п}} ((\dot{\psi})^2 (R_{\text{л}}^2 + (b_{\text{л}} \cos \theta)^2) + V(t)^2), \end{aligned} \quad (1)$$

де ϕ , ψ , θ — узагальнені координати системи, які виражають відповідно кути повороту гондоли навколо осі башти, вітроколеса навколо осі гондоли і лопатей навколо власних поздовжніх осей;

N — кількість лопатей;

$m_{\text{л}}$ — маса однієї лопаті;

$b_{\text{л}}$, $R_{\text{л}}$ — відстані до відцентрового тягарця, відповідно від поздовжньої осі лопаті та осі ВК;

$m_{\text{м}}$, $r_{\text{м}}$, $c_{\text{м}}$ — маса, зовнішній радіус і товщина маточини ВК, відповідно,

$m_{\text{хв}}$ — маса хвостового стабілізатора;

$l_{\text{хв}}$ — приведена відстань від центру мас хвостового стабілізатора до осі башти;

$b_{\text{м}}$ — відстань від осі башти до місця кріплення маточини ВК;

$m_{\text{г}}$, $l_{\text{г}}$, $d_{\text{г}}$ — маса, діаметр і довжина гондоли, відповідно;

$\rho_{\text{п}}$ — густина повітря;

$S_{\text{хв}}$ — площа хвостового стабілізатора;

$V(t)$, $M(t)$ — часові залежності швидкості повітряного потоку та коефіцієнта моменту навантаження на валу ВК;

m — показник ступеня у залежності моменту навантаження на валу ВК від кутової швидкості його обертання;

R — зовнішній радіус вітроколеса;

α, β, γ — коефіцієнти експериментальних кривих аеродинамічного моменту ВК;

C_0 — приведений коефіцієнт жорсткості пружини механізму регулювання;

S_d — ефективна площа аеродинамічного тиску на лопать.

На основі математичної моделі ВТ (1) проаналізовано характер протікання перехідних процесів у характерних режимах її роботи. Об'єктом дослідження використано вітроустановку американської фірми Wind Turbine Industries моделі Jacobs 31-20 номінальною потужністю 20 кВт, у якій обмеження частоти обертання вітроколеса відбувається шляхом повороту лопатей за допомогою відцентрового регулятора, а пасивна орієнтація за напрямком вітру здійснюється хвостовим стабілізатором [6].

Поступова і раптова зміна швидкості вітру при постійному моменті навантаження на валу ВК. На рис. 1 зображено плавне зростання частоти обертання ВК, спричинене поступовим збільшенням швидкості вітру до номінального значення $n_{\text{ном}} = 165 \dots 175$ об/хв, яке фіксується інерційно-жорсткісними параметрами відцентрового регулятора, та підтримання частоти на постійному рівні до досягнення критичної швидкості $V = 25$ м/с, коли лопаті переходять у флюгерне положення (крива 1). Припустимо, що в деякий момент часу $t_1 = 36$ с швидкість вітру раптово збільшується на 60 % від свого попереднього значення і надалі залишається постійною протягом усього перехідного процесу при незмінному значенні моменту навантаження на валу ВК. Показано (крива 2) скачок частоти обертання ВК та поступове згасання перехідного процесу, декремент якого залежить від інерційно-жорсткісних і демпфуючих параметрів відцентрового регулятора. Зростання частоти обертання ВК при плавному збільшенні швидкості вітру за умови відсутності у конструкції ВТ системи повороту лопатей зображено кривою 3. Видно, що стабілізація частоти зі збільшення швидкості вітру практично відсутня, що спричинятиме підвищення навантажень на лопаті та інші елементи ВТ, зниження її ресурсу, ефективності й надійності роботи.

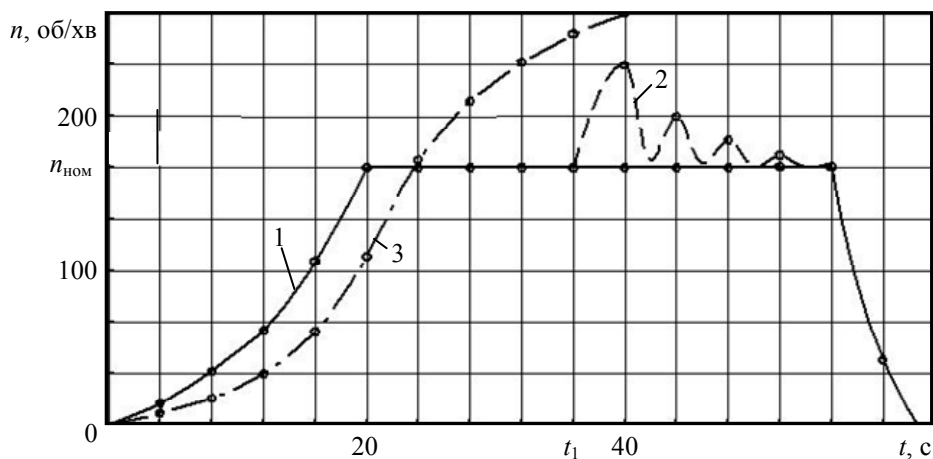


Рис. 1. Часова залежність частоти обертання ВК при зміні швидкості вітру та постійному моменті навантаження на валу ВК

Поступова і раптова зміна моменту навантаження на валу ВК при постійній швидкості вітру. На рис. 2 зображено плавне зростання частоти обертання ВК в режимі запуску до номінального значення $n_{\text{ном}} = 165 \dots 175$ об/хв, яке фіксується інерційно-жорсткісними параметрами відцентрового регулятора (крива 1). Робота ВТ в номінальному режимі передбачає рівність аеродинамічного моменту ВК та моменту навантаження на його валу. Таким чином, при посту-

повому зростанні моменту навантаження понад аеродинамічний момент ВК спостерігаємо плавне зменшення частоти обертання ВК аж до повної зупинки.

Перехідний процес раптової зміни моменту навантаження на валу ВК може супроводжуватися двома явищами. У першому випадку, коли раптове зростання моменту навантаження при $t_1 = 26$ с не перевищує аеродинамічного моменту ВК, частота обертання ВК різко зменшиться, однак після згасання перехідного процесу набуде попереднього значення (крива 2). Декремент згасання перехідного процесу, як і в попередньому випадку, залежатиме від інерційно-жорсткісних та демпфуючих параметрів відцентрового регулятора. У другому випадку припустимо, що під час роботи ВТ при постійній швидкості вітру момент навантаження раптово збільшився понад значення аеродинамічного моменту ВК і надалі протягом усього перехідного процесу залишився сталим. При цьому спостерігається різке зменшення частоти обертання ВК, а перехідний процес поступово затухає до повної зупинки ВК (крива 3).

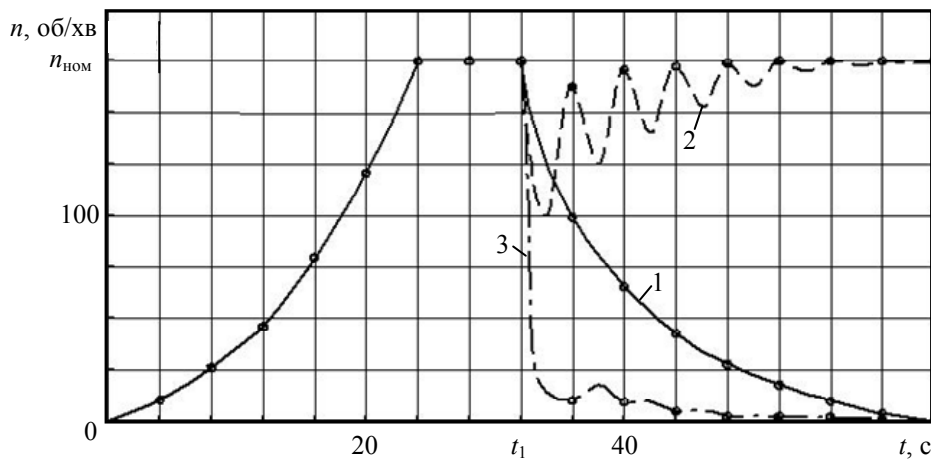


Рис. 2. Часова залежність частоти обертання ВК при зміні моменту навантаження на валу ВК та постійній швидкості вітру

Характер протікання перехідного процесу при раптовій зміні напрямку вітру буде відбуватися у деякому наближенні за функцією, зображеною кривою 2. Пульсуючий характер перехідного процесу в даному випадку залежить від інерційності, а саме від співвідношення мас хвостового стабілізатора і ВК, та геометричних розмірів системи. Результати чисельного аналізу математичної моделі (1) показали, що потужність вітроустановки зменшується пропорційно кубу косинуса кута φ відхилення осі вітроколеса від напрямку вітру (рис. 3). Тобто ефективність роботи вітрової турбіни суттєво залежить від точності функціонування системи орієнтації.

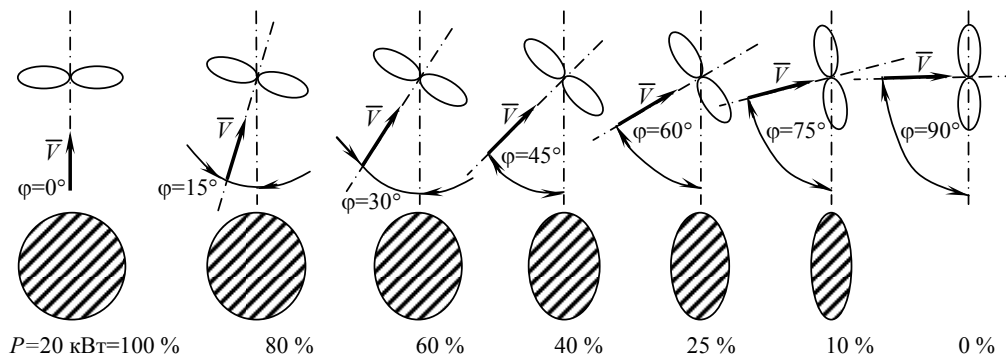


Рис. 3. Діаграми потужності ВТ в залежності від кута φ орієнтації осі ВК щодо напрямку повітряного потоку

Висновки:

— розглядаючи вітроустановку як аеромеханічну систему з трьома ступенями вільності, вдалося доповнити її існуючу математичну модель ще одним рівнянням та більш точно відобразити характер протікання основних перехідних режимів роботи;

— відсутність механізмів регулювання потужності і стабілізації кутової швидкості ВК не дозволить із достатньою ефективністю використовувати ВТ при швидкостях вітру, менших за номінальну, та знижує надійність роботи ВТ при швидкостях, більших за критичне значення, внаслідок перевантаження лопатей та інших елементів ВТ аеродинамічними силами і моментами, а також неконтрольованого зростання частоти обертання ВК. Для конкретної моделі вітроустановки за відсутності відцентрового регулятора при швидкостях вітру, менших за номінальну, частота обертання ВК у середньому на 20...30 % нижча, що свідчить про менший відбір потужності з потоків повітря, а отже і нижчу ефективність функціонування;

— система орієнтації ВК за напрямком вітру також суттєво впливає на відбір потужності з потоків повітря та зміну частоти обертання ВК, а тому обертальний рух гондоли необхідно враховувати при моделюванні роботи ВТ. Найбільш ефективна робота ВТ спостерігається при перпендикулярності напрямку повітряних потоків до площини обертання ВК, тоді як відхилення осі вітроколеса від напрямку вітру лише на 30° спричиняє зниження частоти обертання ВК і потужності вітрової турбіни приблизно на 40 %;

— для номінальної роботи ВТ необхідно забезпечити рівність аеродинамічного моменту ВК та моменту навантаження на його валу. Якщо аеродинамічний момент перевищить момент навантаження, то система регулювання автоматично підбере оптимальний кут положення лопатей для забезпечення їх рівності. Збільшення ж моменту навантаження понад значення аеродинамічного моменту спричинить зупинку вітроколеса;

— пульсації частоти обертання ВК при раптових змінах швидкості й напрямку вітру чи моменту навантаження на валу ВК спричинені інерційністю механізмів регулювання та орієнтації. При проектуванні вітрових турбін як безпосередніх механічних приводів різних машин необхідно враховувати можливості коливання потужності й частоти обертання ВК у певних межах та підбирати необхідні параметри систем акумулювання енергії, щоб забезпечити безперебійну роботу обладнання протягом усього робочого циклу. Що ж стосується конкретно розглянутої вітроустановки, то можемо констатувати, що пульсації частоти обертання вітроколеса у перехідних режимах роботи можуть сягати 40 % від її номінального значення.

Література

1. Коханевич, В.П. Динамічна стійкість системи регулювання ротора вітродвигуна з відцентровим регулятором / В. П. Коханевич // Відновлювана енергетика. — К., 2008. — № 3. — С. 47 — 54.
2. Коханевич, В.П. Статика регулювання роторів вітродвигунів відцентровими регуляторами при антифлюгенному регулюванні / В. П. Коханевич // Відновлювана енергетика. — К., 2009. — № 3. — С. 18 — 24.
3. Легошин, Д.В. Система регулювання частоти обертання вітротурбіни автономної ВЕУ малої потужності / Д.В. Легошин // Відновлювана енергетика. — К., 2009. — № 2. — С. 36 — 38.
4. Легошин, Д.В. Експериментальне дослідження вітроенергетичної установки з автоматичним згортанням головки / Д.В. Легошин // Відновлювана енергетика. — К., 2010. — № 1. — С. 61 — 64.
5. Корендій, В.М. Динаміка складного руху лопатей вітроустановки / В.М. Корендій // Науковий вісник НЛТУ України. — Львів, 2012. — Вип. 22.8. — С. 115 — 121.
6. Jacobs Wind Energy Systems: [Electronic resource] / Wind Turbine Industries, USQ. — <http://www.windturbine.net/documents/WTIC%20Brochure%202012.pdf>. — 10.07.12.

References

1. Kokhanevych, V.P. Dynamical Stability of a Wind Turbine Rotor Control System with a Centrifugal Regulator / V.P. Kokhanevych // Renewable Energy. — Kyiv, 2008. — # 3. — pp. 47 — 54.

2. Kokhanevych, V.P. The Statics of a Wind Turbine Rotor Regulation with Centrifugal Regulators and Feathered Control / V.P. Kokhanevych // *Renewable Energy*. — Kyiv, 2009. — # 3. — pp. 18 — 24.
3. Legoshin, D.V. The System of Wind Turbine Rotation Frequency Regulation of Autonomous Low-Power WPP. / D.V. Legoshin // *Renewable Energy*. — Kyiv, 2009. — # 2. — Pp. 36 — 38.
4. Legoshin, D.V. Experimental Study of Wind Power Plant with Automatic Head Stacking / D.V. Legoshin // *Renewable Energy*. — Kyiv, 2010. — # 1. — Pp. 61 — 64.
5. Korendiy, V. M. The Dynamics of Compound Motion of Wind Turbine Blades // *Scientific Herald of National Forestry Engineering University of Ukraine*. — 2012. — # 22.8. — Pp. 115 — 121.
6. Jacobs Wind Energy Systems: [Electronic resource] / Wind Turbine Industries, USQ. — Available at: <http://www.windturbine.net/documents/WTIC%20Brochure%202012.pdf>. — 10.07.12.

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

Надійшла до редакції 1 жовтня 2012 р.