УДК 681.51 https://doi.org/10.15407/itm2023.04.050

С. В. ТАРАСОВ, О. Н. МОЛОТКОВ

АЛГОРИТМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТІВ РОТОРА ДАР'Є ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ, КЕРОВАНОГО ЗМІНАМИ ДОВЖИНИ ЛОПАТЕЙ

Інститут транспортних систем і технологій
Національної академії наук України,
вул. Писаржевського, 5, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: olegmolotkov57@gmail.com

Характерною особливістю світової енергетики є надання дедалі більшої уваги розвитку відновлюваних джерел енергії. Складнощі забезпечення традиційними джерелами енергії – газом, вугіллям, нафтопродуктами, а також світові тенденції переходу до екологічно чистих джерел призводять до необхідності пошуку та заміни традиційних джерел. Серед альтернативних джерел енергії широкого поширення набули вітроенергетичні установки, що розміщуються на сприятливих територіях. Сучасні вітроенергетичні установки можуть бути двох типів: вертикально- або горизонтально-осьовими. Вертикально-осьові вітроенергетичні установки, на відміну від горизонтально-осьових, мають низку специфічних конструктивних переваг, таких як, наприклад, нечутливість до змін напряму вітру, які суттєво спрощують конструкцію і підвищують надійність вітроенергетичної установки. Обидва типи вітроенергетичних установок представляють собою складні в динамічному плані системи, які працюють в різних режимах, обумовлених як динамічними, так і технологічними і конструктивними особливостями. Узгодження перелічених особливостей покладається на відповідні системи керування, що здійснюють управління роботою ротора вітроенергетичної установки за допомогою залучення додаткових пристроїв, наприклад, генераторів різних типів. В сфері горизонтально-осьових вітроенергетичних установок розвинені підходи для вирішення ряду завдань управління системами, які використовують принцип зміни площі поверхні, що омітається. Розвиток такого підходу по відношенню до вертикально-осьових вітроенергетичних установок представляється задачею важливою та перспективною. Метою статті є розробка ефективних алгоритмів стабілізації швидкості обертів ротора вітроенергетичної установки, що забезпечують використання принципу зміни площі поверхні, яка омітається, а саме використання розсувних лопатей. Методами вирішення задачі є методи класичної теорії автоматичного управління і математичного моделювання. Новизна отриманих результатів полягає в розповсюджені концепції регулювання шляхом зміни площі, що омітається, на вертикально-осьові вітроенергетичні установки із ротором Дар'є, синтезі ефективних алгоритмів стабілізації швидкості обертів ротора вертикально-осьових вітроенергетичних установок із ротором Дар'є, керованих зміною довжини лопатей та визначення умов їх стійкості. Розроблені алгоритми можуть бути використані при обґрунтуванні конструктивних рішень під час проєктування вертикально-осьових вітроенергетичних установок із ротором Дар'є.

Ключові слова: *вітроенергетичні установки, ротор Дар'є, стабілізація обертів, стійкість, математичне моделювання.*

The world's power engineering features ever increasing attention to the development of renewable power sources. Difficulties in provision with traditional energy sources (gas, coal, and oil products) and the global trends of transition to green sources call for replacing the traditional sources with new ones. Among the alternative energy sources, wind power plants (WPPs) installed in suitable territories have received widespread use. Modern WPPs are of two types: vertical- and horizontal-axis ones. Vertical-axis WPPs, as distinct from horizontal-axis ones, have a number of specific advantages, such as, for example, insensitivity to wind direction changes, which significantly simplify the WPP design and increase the WPP reliability. Both WPP types are dynamically complex systems, which operate in different regimes depending on their dynamic and technological features. The task of matching these features is assigned to control systems, which control the rotor operation using additional devices, for example, generators of different types. For horizontal-axis WPPs, approaches to the solution of a number of system control problems have been developed on the basis of the principle of swept area variation. The development of a similar approach for vertical-axis WPPs seems to be an important and promising task. The goal of this paper is to develop efficient algorithms of WPP rotor speed stabilization using the principle of swept area variation, namely, telescopic blades. The problem is solved using methods of the classical automatic control theory and mathematical simulation. The novelty lies in extending the concept of control by swept area variation to Darrieus vertical-axis WPPs, synthesizing efficient algorithms for stabilizing the rotor speed of Darrieus vertical-axis WPPs controlled by blade length variation, and determining conditions for their stability. The algorithms may be used in substantiating design solutions for Darrieus rotor vertical-axis WPPs.

Keywords: *wind power plants, Darrieus rotor, rotary speed stabilization, stability, mathematical simulation.*

Вступ. Характерною особливістю світової енергетики є надання дедалі більшої уваги розвитку відновлюваних джерел енергії. Складнощі забезпечення традиційними джерелами енергії – газом, вугіллям, нафтопродуктами, а також світові тенденції переходу до екологічно чистих джерел призводять до необхідності пошуку та заміни традиційних джерел. Серед альтернативних джерел енергії широкого поширення набули вітроенергетичні установки (ВЕУ), що розміщуються на сприятливих територіях. Сучасні ВЕУ можуть бути двох типів: вертикально- або горизонтально-осьовими. Вертикально-осьові ВЕУ, на відміну від горизонтально-осьових, мають низку специфічних конструктивних переваг, таких як, наприклад, нечутливість до змін напряму вітру, які суттєво спрощують конструкцію і підвищують надійність ВЕУ.

У кожній ВЕУ є численні блоки та елементи, що забезпечують оптимізацію різних функцій, такі як контролери, що максимізують вироблення електроенергії відповідно до вітрових умов, захист системи від різних відмов обладнання або виникнення несправностей. Численні завдання такого роду покладаються на систему управління (СУ) роботою ВЕУ. До найважливіших функцій СУ відноситься обмеження швидкості обертання ротора і надлишкового виробництва електроенергії, що здійснюється відповідною системою стабілізації (СС). Такі СУ будуються на різних технічних принципах, наприклад, шляхом регулювання навантаження генератора [1], а в горизонтально-осьових ВЭУ шляхом зміни площі, що омітається – шляхом виведення ротора з-під вітру [1]. Ефективність способу стабілізації швидкості обертання ротора вітроустановок шляхом виведення ротора з-під вітру показано у роботах [1, 2]. Проаналізовано різні способи реалізації такого підходу [1], побудовано математичну модель горизонтально-осьової ВЕУ як об’єкта управління [2], проведено дослідження впливу параметрів довкілля на динаміку та стійкість системи стабілізації, підтверджено можливість забезпечення заданої величини перерегулювання.

У запропонованій роботі розглядаються особливості динаміки та управління швидкістю обертання ротора вертикально-осьових вітроустановок як об’єкта управління, що стабілізується зміною площі, яка омітається при обертанні ротора.

Основні принципи управління вітроенергетичними установками розглянуті у роботі [3]. Запропоновано способи збільшення вироблення потужності ВЕУ з постійною швидкістю обертання.

У роботі [4] проаналізовано спосіб збільшення корисної енергії горизонтально-осьової ВЕУ шляхом застосування для керування лопаті змінної довжини. Показано, що за рахунок зміни довжини лопаті потік енергії може бути збільшений на величину до 30 %.

Реалізація зміни конфігурації ротора вертикально-осьової установки за конструкцією може бути виконана двома способами:

1) шляхом зміни довжини траверс кріплення лопатей до осі обертання ротора;

2) шляхом зміни довжини лопатей.

Загальна математична модель динаміки ротора Дар’є змінної конфігурації отримана в роботі [5]. В ній розглянуті переваги лопатей змінної довжини для забезпечення ефективного функціонування ВЕУ, а саме їх використання:

– покращує продуктивність при малих вітрах;

– дозволяє вітроустановці продовжувати генерацію навіть при граничних швидкостях вітру;

– підвищує коефіцієнт потужності;

– дозволяє використовувати вітроустановки в областях з низькими швидкостями вітру;

– не викликає зміни моменту інерції ротора, що суттєво спрощує аналіз та синтез системи стабілізації;

– обмежує збиток при екстремальних вітрах, оскільки лопаті можуть бути максимально укорочені в цьому випадку;

що в підсумку суттєво зменшує вартість енергії, що згенерована.

Продовження цієї роботи, спрямоване на розвиток підходу до управління обертами ротора вертикально-осьових ВЕУ принципу зміни площі, що омітається, стає задачею важливою, такою що має значний практичний інтерес. У зв'язку із вищенаведеним доцільним вважається розв'язок задачі в роздільних каналах управління, а саме в каналі управління змінами довжини лопатей.

Метою статті є синтез та порівняльний аналіз алгоритмів стабілізації швидкості обертів ротора Дар'є вертикально-осьових ВЕУ, керованих зміною довжини лопатей. Методами вирішення задачі є методи класичної теорії автоматичного управління і математичного моделювання. Новизна отриманих результатів полягає в розповсюджені концепції регулювання шляхом зміни площі, що омітається, на вертикально-осьові ВЕУ із ротором Дар'є, синтезі ефективних алгоритмів стабілізації швидкості обертів ротора вертикально-осьових ВЕУ із ротором Дар'є, керованих зміною довжини лопатей, та визначення умов їх стійкості. Запропоновані та проаналізовані алгоритми стабілізації можуть бути використані при проєктуванні перспективних вертикально-осьових ВЕУ різної потужності.

Постановка задачі. Розглядається задача стабілізації швидкості обертів ротора вертикально-осьової ВЕУ із ротором Дар'є навколо оптимального значення швидкості μ_o, що відповідає максимуму потужності для відповідної швидкості вітру V_o [6]. Вважається, що відхилення параметрів руху ротора від оптимальних значень незначні і динамічні властивості ротора описуються рівнянням у відхиленнях

$$J\frac{d\Delta\mu}{dt} = \Delta M_a - \Delta M_г + \Delta M_у, \tag{1}$$

де $\Delta\mu$ – відхилення μ від μ_o, ΔM_a, $\Delta M_г$ та $\Delta M_у$ – відхилення моментів аеродинамічних сил, гальмівних сил генератора та управляючих сил відповідно, J – момент інерції системи ротор–трансмісія–генератор. Припускається, що зміни довжини лопатей відбуваються синхронно, а момент інерції ротора в процесі роботи контуру управління вважається незмінним.

Задача полягає в виборі та порівнянні алгоритмів формування зворотного зв'язку, що забезпечують стійкість замкнутої системи ротор–регулятор, відсутність статичної помилки регулювання та задовільні значення показників якості регулювання.

Моменти, що впливають на роботу ротора ВЕУ. Відносно ротора ВЕУ вважається, що він має три лопаті, жорстко пов'язані траверсами з опорно-підшипниковим вузлом, який передає крутильний момент на генератор через трансмісію. Деформації лопатей та траверс не беруться до уваги. Ефективність передачі енергії від ротора до генератора, а також ефективність роботи генератора відображаються відповідними к.к.д., що складають сукупний к.к.д. ¦ трансмісії і генератора.

В зазначених умовах потужність вітрового двигуна P_a та крутильний момент M_a можуть бути обчислені із співвідношень [1]

$$M_a = \frac{P_a}{\mu_o} , \tag{2}$$

$$P_a = \frac{1}{2} C_p {}^\circ S V^3 , \tag{3}$$

де C_p – коефіцієнт потужності, $^\circ$ – стандартна щільність атмосфери на рівні моря, S – площа поверхні, що омітається ротором.

Гальмівний момент генератора знайдемо з співвідношення

$$M_г = \frac{P_a \cdot ¦}{\mu_г} , \tag{4}$$

де $\mu_г$ – швидкість обертів генератора. Швидкості обертів ротора і генератора вважаються однаковими.

Лінеаризоване рівняння динаміки ротора. Будемо вважати, що стабілізація обертів ротора при змінах швидкості вітру ΔV досягається відповідними змінами лише довжини розсувних лопатей ΔH. Розкладаючи відхилення моментів аеродинамічних сил та генератора в правій частині рівняння (1) в ряди Тейлора відносно змінних ΔV, ΔH та викликаних ними відповідних змін $\Delta\mu$, залишаючи лінійні члени розкладу і обчислюючи часткові похідні потужності вітрового двигуна (3) та моментів (2), (4), отримуємо лінеаризоване рівняння динаміки ротора у відхиленнях

$$T \frac{d\Delta\mu}{dt} + \Delta\mu = k_1 \Delta V + k_2 \Delta H , \tag{5}$$

$$T = \frac{2J\mu_o^2}{C_p {}^\circ_o S_o V_o^3 (1-¦)} , \tag{6}$$

$$k_1 = \frac{3\mu_o}{V_o(1-¦)} , \tag{7}$$

$$k_2 = \frac{2R_o\mu_o}{S_o(1-¦)} , \tag{8}$$

де T – постійна часу, k_1, k_2 – коефіцієнти лінеаризації.

Пропорційно-інтегральний алгоритм. Сформуємо зворотний зв'язок за допомогою пропорційно-інтегрального алгоритму, який забезпечує відсутність статичної помилки регулювання

$$\frac{d\Delta H}{dt} = K \cdot \Delta\mu , \tag{9}$$

де $K = \mathrm{const}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку, ΔH – зміна довжини лопатей.

Рівняння (5), (9) утворюють рівняння замкнутої системи стабілізації, які після диференціювання рівняння (5) і підстановки в нього (9) зводяться до рівняння другого порядку

$$T\frac{d^2\Delta\mu}{dt^2} + \frac{d\Delta\mu}{dt} - K\cdot k_2\Delta\mu = k_1\Delta\dot{V} \ , \qquad (10)$$

звідки, використовуючи умову стійкості Гурвіца [7] – умову позитивності коефіцієнтів лівої частини (10), отримуємо єдину умову стійкості замкнутої системи

$$K < 0 \ ,$$

тому що коефіцієнти T та k_2 суворо позитивні.

Корені характеристичного рівняння замкнутої системи

$$Tp^2 + p - K\cdot k_2 = 0$$

є

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T} \pm \frac{1}{2T}\sqrt{1+4KTk_2} \ , \qquad (11)$$

і за умови $1+4KTk_2 > 0$ – дійсні та не обов'язково від'ємні, а за умови

$$1+4KTk_2 < 0 \qquad (12)$$

– комплексно-спряжені з від'ємними дійсними частинами. Підставляючи у співвідношення (12) вирази для T – (6) та k_2 – (8) і розв'язуючи його стосовно K, отримуємо умову для коефіцієнта зворотного зв'язку, яка гарантує стійкість замкнутої системи і наявність пари комплексно-спряжених коренів

$$K < -\frac{1}{4k_2T} \ .$$

Отриманий вираз коренів характеристичного рівняння показує, що ступінь стійкості [7, с.204] системи у випадку дійсних коренів завжди менше, ніж у випадку комплексно-спряжених коренів, тобто тривалість перехідного процесу у випадку дійсних коренів завжди більша, ніж у випадку комплексно-спряжених.

У зв'язку із цим випадок дійсних коренів вважається мало перспективним.

Пропорційно-інтегральний алгоритм з корекцією за прискоренням. Із співвідношення (11) видно, що у випадку комплексно-спряжених коренів характеристичного рівняння коефіцієнт зворотного зв'язку K впливає тільки на уявну частину коренів – на коливальність системи [7, с. 206], і не впливає на дійсну частину коренів – ступінь стійкості, що визначає тривалість перехідного процесу [7, с.204]. Скоригуємо рівняння зворотного зв'язку, ввівши в нього пропорційну залежність від прискорення $\Delta\dot{\mu}$

$$\frac{d\Delta H}{dt} = K_1\cdot\Delta\mu + K_2\frac{d\Delta\mu}{dt} \ . \qquad (13)$$

Тоді рівняння замкнутої системи при умові, що керування швидкістю обертів здійснюється лише змінами довжини лопатей, набуває вигляду

$$T\frac{d^2\Delta\mu}{dt^2}+(1-k_2K_2)\frac{d\Delta\mu}{dt}-k_2K_1\Delta\mu=k_1\Delta\dot{V}\ , \qquad (14)$$

та характеристичне рівняння системи буде

$$Tp^2+(1-k_2K_2)p-k_2K_1=0\ ,$$

корені якого

$$p_{1,2}=-\frac{(1-k_2K_2)}{2T}\pm\frac{1}{2T}\sqrt{(1-k_2K_2)^2+4k_2K_1T}\ , \qquad (15)$$

мають залежність дійсної та уявної частин від коефіцієнтів зворотного зв'язку K_1 і K_2, відповідно.

Умовами, що гарантують стійкість замкнутої системи (14) та наявність пари комплексно-спряжених коренів, є

$$K_1<0 \quad \text{і} \quad (1-k_2K_2)>0,$$

звідки отримуємо умови, що накладаються на коефіцієнти зворотного зв'язку

$$K_1<0 \quad \text{і} \quad K_2<\frac{1}{k_2}.$$

Слід зазначити, що коефіцієнти зворотного зв'язку забезпечують роздільні впливи на дійсну і уявну частини коренів, тобто на тривалість перехідного процесу та коливальність системи. Окрім того, вплив коефіцієнта K_2 на коливальність системи може бути, за необхідності, повністю скоригований зміною коефіцієнта K_1.

Кінцеве значення довжини лопатей, що встановлюється. Визначимо кінцеве значення ΔH, що встановлюється, для обох запропонованих алгоритмів.

Спрямуємо похідні в лівих частинах рівнянь (5) і (9) і розв'яжемо утворену систему рівнянь

$$\Delta\mu=k_1\Delta V+k_2\Delta H\ , \qquad (16)$$

$$0=K\Delta\mu \qquad (17)$$

щодо $\Delta\mu$ та ΔH. З другого рівняння безпосередньо маємо

$$\Delta\mu=0.$$

Підставляючи $\Delta\mu$ в перше рівняння, отримуємо

$$\Delta H=-\frac{k_1}{k_2}\Delta V\ . \qquad (18)$$

Підставляючи в (18) залежності (6) і (7), отримуємо

$$\Delta H = -\frac{3H_o}{V_o}\Delta V \quad . \tag{19}$$

Спрямувавши до нуля похідні лівої частини рівнянь (5), (13), а значить одночасно і другий член у рівнянні зворотного зв'язку (13), і провівши аналогічні перетворення, приходимо до того ж виразу (19) для значення ΔH, що встановлюється, при використанні скоригованого алгоритму.

Моделювання процесів стабілізації швидкості обертів ротора. Проведемо моделювання процесів стабілізації в замкнутих системах з запропонованими алгоритмами формування зворотних зв'язків. При виконанні розрахунків приймалося, що ВЕУ з *Н*-ротором Дар'є має конструктивні параметри близькі до ВЕУ-0420. В таблиці 1 наведено характеристики ВЕУ та умови роботи.

Таблиця 1 – Характеристики ВЕУ та умови її роботи, що використані в розрахунках

Характеристика	ВЕУ-0420
Довжина траверс (радіус R_o), м	12,5
Довжина лопатей (H_o), м	25
Момент інерції ротора (J), кг м^2	1352338
Швидкість потоку вітру (V_o), м/с	13
Коефіцієнт потужності (C_p)	0,46
Загальний к.к.д. (¦)	0,9
Густина повітря ($°_o$), кг/м^3	1,225

Довгострокові зміни швидкості вітру моделювались одиничною ступеневою функцією $\Delta V(t) = 1(t)$. Числові значення коефіцієнтів лінеаризованої моделі (5) наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Числові значення коефіцієнтів лінеаризованої моделі

Характеристика	Значення
Постійна часу T, с	297,3615
Коефіцієнт k_1, 1/м	6,4615
Коефіцієнт k_2, 1/(м с)	1,12

Пропорційно-інтегральний алгоритм. На рис. 1 і 2 наведено графіки залежності від часу відхилень $\Delta\mu$ і ΔH відповідно для трьох значень коефіцієнта зворотного зв'язку $K =$ -1,0; -10; -100; які позначені на рис. 1 і 2 цифрами 1, 2 і 3 відповідно. Обрані значення K відповідають умові існування комплексно-спряжених коренів.

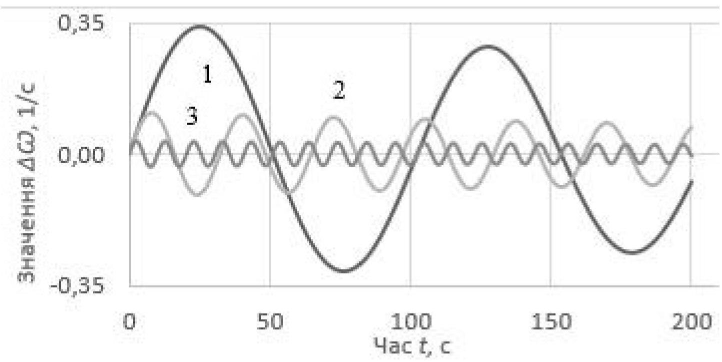

Рис. 1 – Залежності $\Delta\mu$ від часу t та коефіцієнта зворотного зв'язку K

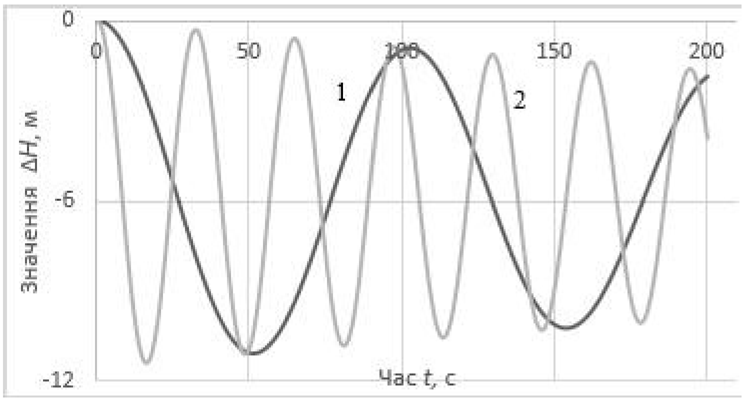

Рис. 2 – Залежності ΔH від часу t та коефіцієнта зворотного зв'язку K

Аналіз наведених на рис. 1 і 2 залежностей дозволяє зробити наступні висновки:

- $\Delta\mu$ і ΔH прямують до сталих значень: $\Delta\mu$ до нуля; ΔH до -5,77 м;
- ступінь стійкості замкнутої системи дуже мала;
- зростання за модулем коефіцієнта зворотного зв'язку призводить до зменшення перерегулювання, але практично не впливає на довжину перехідного процесу;
- із зростанням за модулем коефіцієнта зворотного зв'язку суттєво зростає коливальність системи, що несприятливо позначається на динаміці системи.

Пропорційно-інтегральний алгоритм з корекцією за прискоренням. Залежності від часу відхилень $\Delta\mu$ і ΔH обчислювались до декількох комбінацій коефіцієнтів зворотного зв'язку K_1 і K_2, наведених в таблиці 3. Там же наведені відповідні значення дійсної та модуля уявної частин коренів характеристичного поліному замкнутої системи.

Таблиця 3 – Вплив коефіцієнтів зворотного зв’язку на корені

№ за/п	Коефіцієнти зворотного зв’язку		Дійсна частина	Модуль уявної частини
	K_1	K_2		
1	–0,3	–10	–0,02051	0,026629
2	–0,5	–10	–0,02051	0,038242
3	–0,7	–10	–0,02051	0,047071
4	–1	–30	–0,05818	0,019538
5	–3	–30	–0,05818	0,088964
6	–6	–30	–0,05818	0,138615

Таблиця 3 демонструє роздільний вплив коефіцієнтів K_1 і K_2 на дійсну та уявну частини коренів характеристичного поліному замкнутої системи: коефіцієнт K_1 впливає лише на уявну частину, коефіцієнт K_2 – лише на дійсну частину.

На рис. 3 і 4 наведені графіки залежностей від часу відхилень $\Delta\mu$ і ΔH. Цифрами 1–6 позначені графіки залежностей, які відповідають строкам таблиці 3.

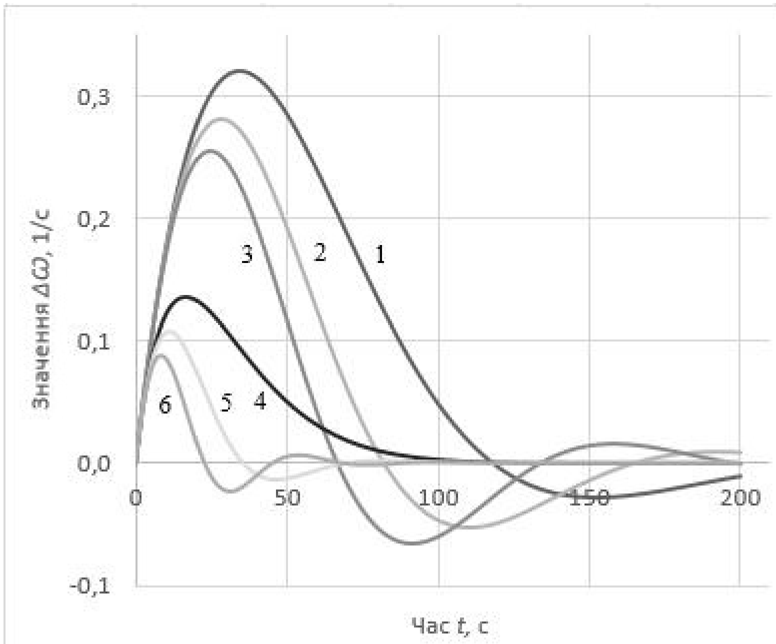

Рис. 3 – Залежності $\Delta\mu$ від часу t для значень коефіцієнтів зворотного зв’язку з таблиці 3

З наведених на рис. 3 і 4 графіків можна зробити такі висновки:

- перехід до більш складного алгоритму формування зворотного зв’язку не змінює кінцевих значень $\Delta\mu$ і ΔH;
- ступінь стійкості замкнутої системи суттєво зросла, а коливальність суттєво зменшилась;
- досягнуто роздільного впливу коефіцієнтів зворотного зв’язку на ступінь стійкості та коливальність системи;
- із зростанням за модулем коефіцієнтів зворотного зв’язку суттєво зменшуються перерегулювання та довжина перехідних процесів;

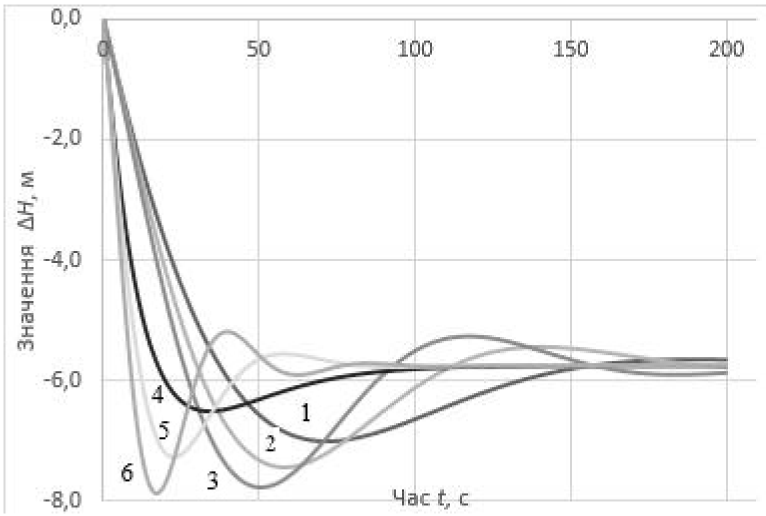

Рис. 4 – Залежності ΔH від часу t для значень коефіцієнтів зворотного зв'язку з таблиці 3

– проведена корекція алгоритму формування зворотного зв'язку суттєво підвищила ефективність роботи системи стабілізації та покращила показники якості перехідних процесів.

Висновки. Запропоновано алгоритми формування зворотного зв'язку, які забезпечують стійкість замкнутої системи стабілізації обертів ротора вертикально-осьових ВЕУ. Моделювання процесів стабілізації обертів ротора довело більшу ефективність та кращі показники якості регулювання пропорційно-інтегральним алгоритмом з корекцією за прискоренням у порівнянні з пропорційно-інтегральним. Запропоновані алгоритми можуть бути використані при обґрунтуванні конструктивних рішень при проєктуванні вертикально-осьових ВЕУ із ротором Дар'є.

1. *Дзензерский В. А., Тарасов С. В., Костюков И. Ю.* Ветроустановки малой мощности. К.: Наук. думка, 2011. 592 с.
2. *Оборский Г. А., Моргун Б. А., Бундюк А. Н.* Построение математической модели ветроэлектрической установки как объекта управления оборотами ротора. Праці Одеського політехнічного університету. 2013. Вип. 2(41). С. 142–147.
3. *Зубова Н. В., Удалов С. Н.* Основные принципы управления ветроэнергетической установкой. Научный вестник НГТУ. 2012. № 3(48). С. 53–161.
4. *Sharma R. N., Madawala U.* The Concept of Smart Wind Turbine System. 16-th Australasian Fluid Mechanics Conference, Crown Plaza, Gold Coast, Australia, December 2–7, 2007. P. 481–486.
5. *Тарасов С. В., Редчиць Д. О., Тарасов А. С., Дорош О. В.* Модель динаміки ротора Дар'є змінної конфігурації. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (ІТММ-2023), 22 березня 2023 р. Зб. наук. праць. Дніпро: Український державний університет науки і технологій. 2023. С. 208–211. https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.057.
6. *Tiago Andre dos Santos Marques*. Control and Operation of a Vertical Axis Wind Turbine. Dissertacao. 2014. 83 c. URL: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/844820067124338/dissertacao.pdf (дата звернення 17.06.2023).
7. *Бесекерский В. А., Попов Е. Н.* Теория систем автоматического управления. СПб.: Изд-во «Професия», 2003. 752 с. (Серия: Специалист).

Отримано 26.10. 2023,
в остаточному варіанті 28.11.2023