

## Секція 2

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

УДК 621.548

**В.М. КОРЕНДІЙ**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра механіки та автоматизації машинобудування

## АНАЛІЗ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОКОЛІС

© Корендій В.М., 2012

*Розглянуто найпоширеніші методи регулювання потужності та стабілізації кутової швидкості горизонтально-осьових вітроустановок. Вказано на їхні основні переваги і недоліки. Проаналізовано залежності потужності вітроустановки від швидкості набігаючого вітрового потоку під час використання кожної системи.*

*The most widespread methods of power regulation and stabilization of the angular velocity of horizontal axis wind turbines are considered. Their basic advantages and faults are indicated. The dependencies of wind turbine power from the speed of accumulated wind flow at the exploitation of each system are analyzed.*

**Постановка проблеми.** Мінливість швидкості й напрямку потоків повітря надзвичайно ускладнюють можливості використання енергії вітру. Швидкість вітру може змінюватися протягом однієї хвилини більш ніж у 2–3 рази, і при цьому спричиняти коливання енергії повітряного потоку у 8–27 разів [1]. Більшість машин (електрогенератор, гідравлічний чи пневматичний насос, шнековий чи транспортерний механізми, конвеєр тощо), які використовують для приводу вітроколесо (ВК), вимагають сталої частоти обертання привідного вала. Для виконання цієї умови у конструкції вітроколеса повинні бути передбачені спеціальні системи регулювання, які могли б забезпечити сталу частоту обертання його вала за зміни швидкості вітру за рахунок регулювання потужності, яку воно відбирає з потоку повітря.

Перетворюючи кінетичну енергію повітряного потоку в механічну енергію обертального руху вала ротора, вважалося б природно прагнути до повного використання вітру, який протікає через вітроколесо, незалежно від його швидкості. Однак таке завдання є недосяжним, оскільки ВК проектується і відповідно працює найефективніше лише за певної наперед заданої швидкості повітряного потоку, яка обирається з метою забезпечення протягом усього терміну експлуатації якомога вищого коефіцієнта використання вітроустановки (ВУ). Отже, ВУ працюватиме зі зниженою ефективністю за меншої за номінальне значення швидкості та відповідно відбиратиме максимальну потужність з потоку повітря за вищих значень. Тому під час розрахунку для початку регулювання і забезпечення міцності частин робочого механізму номінальну швидкість обирають відповідно до середньорічних показників. Наприклад, для районів із середньорічними швидкостями вітру до 5, 7 і понад 7 м/с можуть прийматися номінальні значення 8, 10 та 14 м/с відповідно [2].

Якщо ж під час проектування вітроустановки ставиться завдання забезпечити максимальний відбір енергії з повітряного потоку, то кожному значенню швидкості вітру повинна відповідати визначена частота обертання ротора, тобто вітроустановка повинна працювати зі змінною кутовою швидкістю. У цьому випадку завданням системи регулювання ВУ є забезпечення зміни кутової швидкості обертання ротора за заданим алгоритмом в усьому робочому діапазоні швидкості вітру (від пускової до допустимої робочої) та відповідно отримання максимальної вихідної потужності вітроустановки. Отже, система регулювання ВУ чинить істотний вплив на її продуктивність.

Аналіз систем регулювання горизонтально-осьових вітроустановок показав, що сьогодні застосовуються три основні принципи керування кутовою швидкістю ротора. Перший принцип полягає в ефекті зміни підйомної сили на нерухомих лопатях спеціального аеродинамічного профілю за зміни частоти обертання ротора – так званий зрив потоку з поверхонь лопатей; другий принцип полягає у зміні підйомної сили під час регулювання кута атаки лопатей стосовно набігаючого вітрового потоку; третій принцип – у керуванні потужністю ротора за зміни площі повітряного потоку, яку він охоплює [1]. Актуальним є питання аналізу переваг і недоліків кожної системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Доволі ґрунтовний аналіз можливостей регулювання потужності та стабілізації кутової швидкості обертання горизонтально-осьових вітроколес був зроблений у роботах Сабініна, Фатєєва та інших авторів ще у 30–40-х роках минулого століття [2]. Більшість сучасних досліджень у напрямку моделювання динаміки та удосконалення конструкції вітроустановок, наприклад [1, 3, 4], ґрунтуються саме на цих публікаціях. Проте з плином часу актуальним стає питання доцільності використання тих чи інших конструкцій систем регулювання для вітроустановок різного призначення (виробництво електроенергії, зрошувальні та водонапірні системи, шнекові і транспортні механізми, конвеєри тощо), враховуючи їх переваги і недоліки [5].

**Формулювання цілі роботи.** Проаналізувати існуючі конструкції систем регулювання потужності і стабілізації кутової швидкості горизонтально-осьових вітроколес, можливості їх застосування у різних типах вітроустановок та вказати на переваги і недоліки кожної з них.

**Зрив потоку.** Цей спосіб регулювання часто застосовується для вітроустановок із номінальною потужністю до 0,15–0,2 кВт і діаметром ротора 1,0–1,5 м [1]. Аеродинамічний ефект зриву потоку на лопатях зумовлений перетворенням ламінарного обтікання їх поверхонь повітряним потоком у турбулентний, який виникає за збільшення кута атаки лопаті внаслідок зростання швидкості вітру. Це явище може відбуватися як внаслідок збільшення швидкості вітру за сталої частоти обертання ротора, так і внаслідок зростання кутової швидкості вітроколеса за постійного вітру [5]. Для реалізації цього способу регулювання застосовують спеціальний аеродинамічний профіль, у якому руйнування ламінарного межового шару і виникнення зриву потоку з поверхні лопаті починаються із задньої кромки. За збільшення швидкості набігаючого повітряного потоку область зриву поступово збільшується та переходить до передньої кромки профілю (рис. 1). При цьому підйомна сила лопаті і кутова швидкість ротора зменшуються [1].

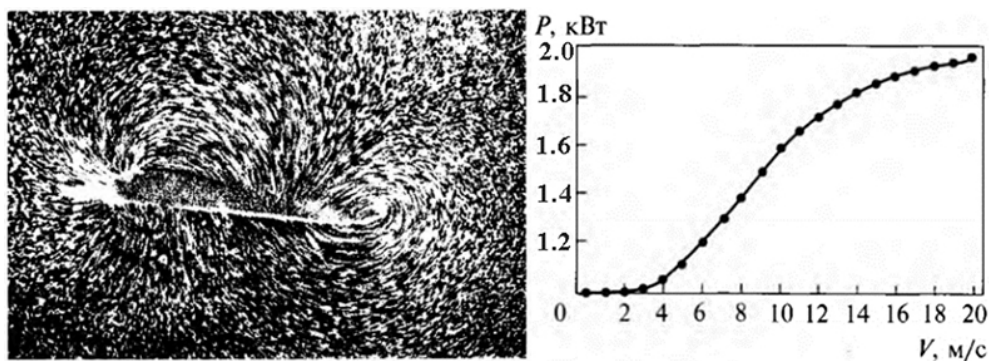


Рис. 1. Область виникнення турбулентного потоку та характеристика потужності вітроколеса під час регулювання зривом потоку

Спосіб регулювання зривом потоку використовує аеродинамічні характеристики профільованих лопатей без переміщення жодної з частин ротора. Головною перевагою цього методу є простота конструкції гондоли, що уможливорює знизити вартість та збільшити надійність вітроустановки, оскільки механізми регулювання частоти обертання ротора є основними джерелами відмов [1]. Варто зазначити, що використовуючи цей метод, необхідно враховувати чинники, які ускладнюють його аеродинамічний розрахунок і спричиняють значні похибки регулювання: 1) усі перерізи лопаті під час обертання ротора рухаються з різними швидкостями і мають різні кути атаки; 2) для окремих рухомих перерізів лопаті не існує стійких експериментальних характеристик, які доволі точно визначені в аеродинамічній трубі. На лопать постійно діють випадкові динамічні збурення від вітру, аеропружності конструкції, асиметрії геометричних та масових характеристик ротора; 3) збурений повітряний слід за лопаттю має складну структуру турбулентності та дуже впливає на динаміку наступної лопаті.

Оскільки керування кутовою швидкістю ротора досягається без будь-яких переміщень чи поворотів лопатей, то інколи вважається, що система регулювання потужності у таких вітроустановках відсутня. Варто відмітити, що під час використання розглянутого способу регулювання вітроустановки мають високий пусковий момент і порівняно велику продуктивність за низьких швидкостей вітру [1]. Головними ж недоліками регулювання зривом потоку є низька ефективність за сильних вітрів та необхідність постійного навантаження на генераторі. За перевищення вітром допустимої швидкості (навіть за пориву) ротор швидко втрачає керування і досягає критичної частоти обертання. Тому, застосовуючи цей спосіб, особливу увагу необхідно звертати на наявність додаткової системи обмеження кутової швидкості вітроколеса [4]. Потужність вітроустановок із регулюванням зриву потоку плавно зростає в усьому діапазоні робочих швидкостей вітру та обмежується тільки потужністю генератора (рис. 2).

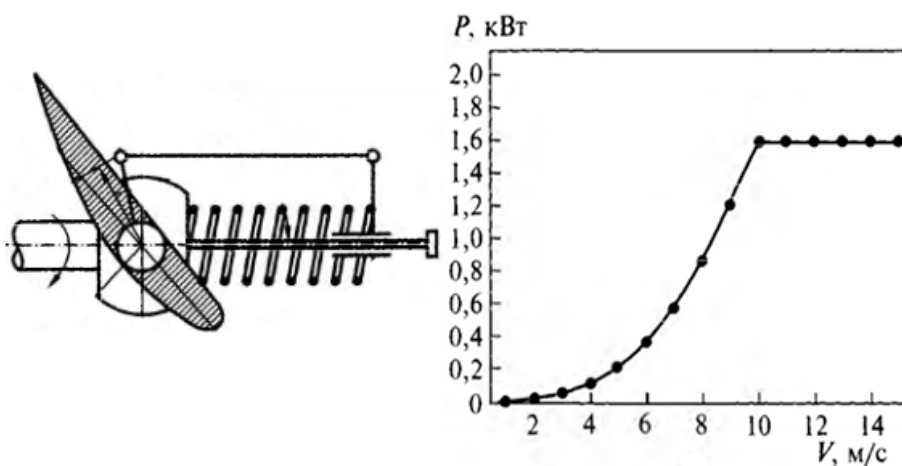


Рис. 2. Механізм повороту лопаті та характеристика потужності вітроколеса під час його застосування

**Поворот лопатей.** Ефективним способом регулювання потужності горизонтально-осьових вітроустановок є зміна кута встановлення лопатей. Під час використання цього способу лопаті повертаються навколо власних поздовжніх осей, змінюючи кут атаки стосовно напрямку вітрового потоку, тобто кут між хордою лопаті та векторною сумою швидкостей вітру і повітряного потоку, який набігає на лопать під час її обертання навколо осі ротора. Для регулювання потужності найчастіше використовують повільне гальмування, яке досягається поворотом лопаті у напрямку дії вітру. Кут атаки регулюють у межах  $25^\circ$ , внаслідок чого змінюється характер обтікання лопаті набігаючим повітрям та з'являється ефект зриву потоку, який призводить до зменшення підйомної сили і відповідно потужності вітроустановки [1].

У вітроустановках малої потужності переважно застосовують пасивне керування кутом встановлення лопатей, тобто без гідравлічних, електричних чи пневматичних приводів. Найчастіше використовують інерційне регулювання за допомогою різних механізмів, побудованих за принципом регулятора Уатта [1]. Останній являє собою вантажі, симетрично розміщені стосовно осі повороту лопаті. Під час обертання ротора відцентрова сила відхиляє вантажі, які через елементи зв'язку повертають лопать. При цьому кут відхилення лопаті залежить від частоти обертання. Різновидом інерційного регулювання є використання як регулятора Уатта маси самої лопаті (рис. 3). При цьому її центр ваги розміщають за поздовжньою віссю, що створює момент, який повертає лопать за збільшення кутової швидкості ротора. Точність інерційного регулювання доволі висока (похибка керування знаходиться у межах 5–6 %) [1].

У сучасних моделях вітроустановок малої потужності застосовують спосіб регулювання за точками максимальної потужності енергетичної кривої ротора. Крім інерційного пристрою Уатта, у систему входять датчі частоти обертання ротора і вихідної потужності генератора. Під час роботи вітроустановки система керування періодично проводить порівняння навантаження на генераторі зі значеннями заданої залежності потужності ротора від швидкості вітру. Отже, за рахунок електродинамічного пригальмовування вдається оптимізувати кутову швидкість обертання вітроколеса з метою забезпечення необхідного моменту на валу генератора. Швидкодія системи дає змогу доволі ефективно регулювати вихідну потужність залежно від змін швидкості вітру в усьому діапазоні – від пускової до номінальної [3].

Під час активного керування кутом встановлення лопатей їх повертають за допомогою електричного (електродвигун із редуктором), гідравлічного або пневматичного (гідро- або пневмоциліндрів) приводу за командою системи керування. Порівняно з іншими такі системи є складнішими та дорожчими. Тому їх застосовують у вітроустановках потужністю понад 20 кВт [1].

Під час використання способу повороту лопатей збільшення швидкості вітру до номінальної величини забезпечує плавне зростання потужності вітроустановки до максимального значення та підтримання його на постійному рівні до допустимої робочої швидкості вітру (рис. 2).

**Виведення ротора з-під вітру.** Регулюючи потужність ВУ виводом ротора з-під вітру, площину обертання ротора розміщають під гострим кутом до напрямку повітряного потоку. При цьому зменшується площа потоку, який проходить крізь ротор, та підйомна сила на лопатях. У такий спосіб вдається обмежити потужність ВУ за збільшення швидкості вітру. Цей спосіб регулювання є найпростішим і застосовувався ще у XIX ст. [2]. Виведення ротора з-під вітру може здійснюватися кількома способами: поворотом у бік стосовно вертикальної осі, відхиленням назад або нахилом вперед стосовно горизонтальної осі.

*Поворот ротора в бік стосовно вертикальної осі.* За такої схеми відхилення ВК здійснюється двома методами: за рахунок тиску повітряного потоку на бічну лопать, розміщену на гондолі за ротором (рис. 3, а), або за допомогою моменту стосовно вертикальної осі повороту гондоли, який створюється силою лобового тиску на лопаті. Плечем моменту є ексцентриситет  $e$ , що являє собою відстань від горизонтальної осі обертання ротора до вертикальної осі повороту гондоли (рис. 3, б). В обох випадках сила вітру, яка діє по один бік від вертикальної осі повороту гондоли на бокову лопать чи ротор, урівноважується пружиною, розміщеною по інший бік між хвостовим стабілізатором і гондолою [1]. За взаємодії з повітряним потоком гондола обертається навколо вертикальної осі, а хвостовий стабілізатор займає положення під кутом до напрямку вітру. В такий спосіб забезпечується рівновага всіх сил та фіксується положення гондоли у просторі для кожного значення швидкості вітру. При цьому момент пружини повинен дорівнювати сумарному моменту аеродинамічних сил, що діють на гондолу.

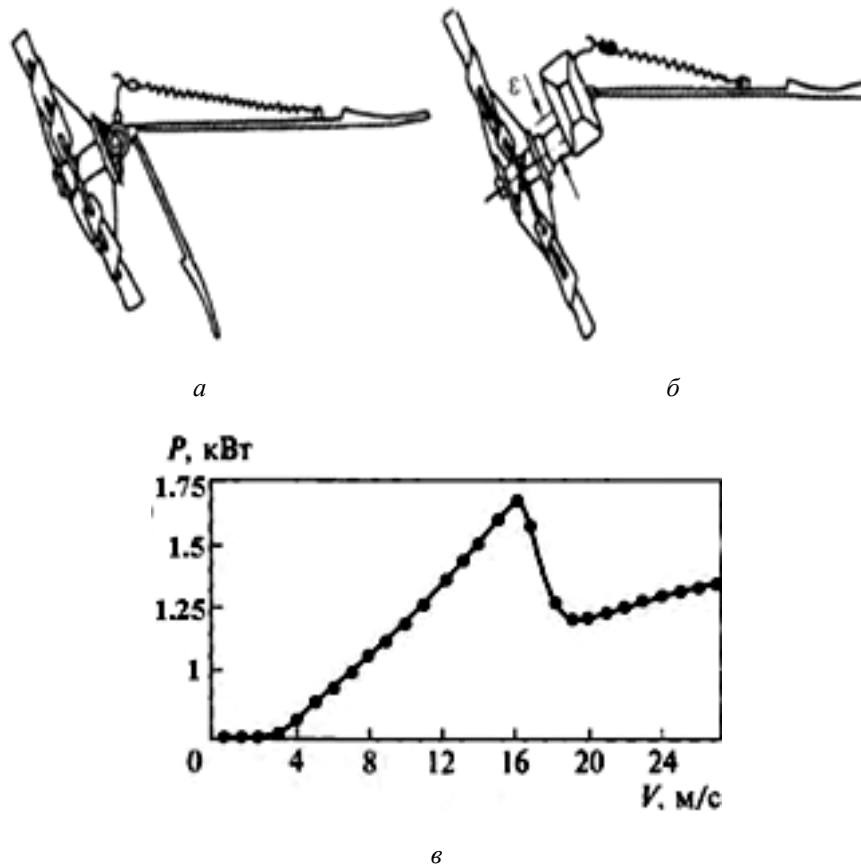


Рис. 3. Виведення ротора з-під вітру поворотом у бік: а – за допомогою бічної лопаті; б – за рахунок ексцентриситету осі лопаті; в – характеристика потужності вітроколеса

У деяких вітроустановках вісь обертання хвостового стабілізатора розміщена під невеликим кутом до вертикалі. За такої конструкції хвостовий стабілізатор, обертаючись навколо власної нахиленої осі, переміщається вгору, і під дією горизонтальної складової аеродинамічної сили намагається повернутися у вихідне положення, паралельне до осі обертання ротора. В такий спосіб його вага напрямлена в бік дії сили лобового тиску, що дає змогу за одних і тих самих розмірів хвостового стабілізатора збільшити силу, яка зрівноважує аеродинамічні моменти гондоли, або за одного і того самого значення зрівноважувальної сили зменшити розміри хвостового стабілізатора [1].

Завдяки використанню вказаного способу повороту ротора в бік стосовно вертикальної осі потужність вітроустановки за збільшення швидкості вітру зростає до свого номінального значення і продовжує збільшуватися далі до початку відхилення гондоли з ротором у бік, що спричиняє майже стрибкоподібне зниження потужності у межах 50 % (рис. 3, в). Отже, фактично в усьому діапазоні зміни швидкості вітру вихідна потужність вітроустановки значно нижча, ніж її номінальне значення. Це призводить до зменшення загальної кількості енергії, яка виробляється вітроустановкою, тобто зниження ефективності її роботи.

*Нахил ротора назад.* Виведення ротора з-під вітру може виконуватися відхиленням гондоли з ротором назад у результаті дії на лопаті аеродинамічних сил. Цей спосіб використовується для вітроустановок з хвостовим стабілізатором та розміщенням вітроколеса перед баштою з боку повітряного потоку. Аналогічно, як і у попередньому випадку, цей метод передбачає зменшення площі проєкції ротора на площину, перпендикулярну до напрямку повітряного потоку. Сила нахилу балансується або пружиною, або хвостовим стабілізатором.

*Нахил ротора вперед.* Цей спосіб застосовується у вітроустановках із самоорієнтацією ротора (рис. 4). Для цього використовують момент, який виникає на хвостовому стабілізаторі, розміщеному перпендикулярно до напрямку вітру на вертикальній штанзі. На відміну від регулювання шляхом повороту ротора в бік спосіб нахилу гондоли з ротором назад (вперед) дає змогу зменшити стрибкоподібні спади потужності до 20 % [1]. Отже, втрати потужності вітроустановки за великих швидкостей вітру будуть значно нижчими.

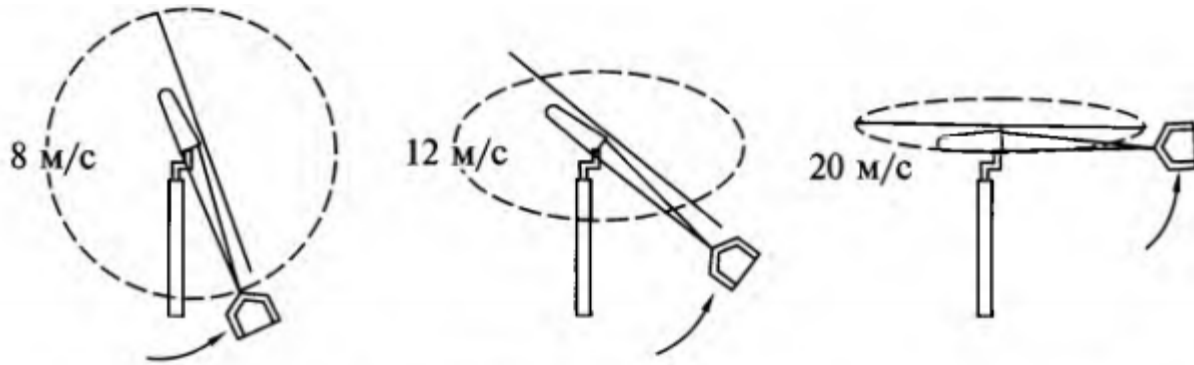


Рис. 4. Схема виведення ротора з-під вітру нахилом вперед

**Складання лопатей.** Пасивне відхилення (складання) лопатей у напрямку вектора швидкості вітру (рис. 5, а) не так широко застосовується, як інші методи. Під дією тиску вітрового потоку на поверхню лопатей останні відхиляються за його напрямком, зменшуючи площу ротора, яку він охоплює, і відповідно знижуючи відбір потужності. За зменшення швидкості вітру лопаті повертаються у вихідне положення за допомогою пружних елементів. Регулювання складанням лопатей дещо знижує продуктивність вітроустановки в діапазоні швидкостей вітру більших, ніж номінальна, однак за загальною ефективністю наближається до регулювання шляхом повороту лопатей, тобто до способу регулювання, який забезпечує найефективнішу роботу ВУ (рис. 5, б).

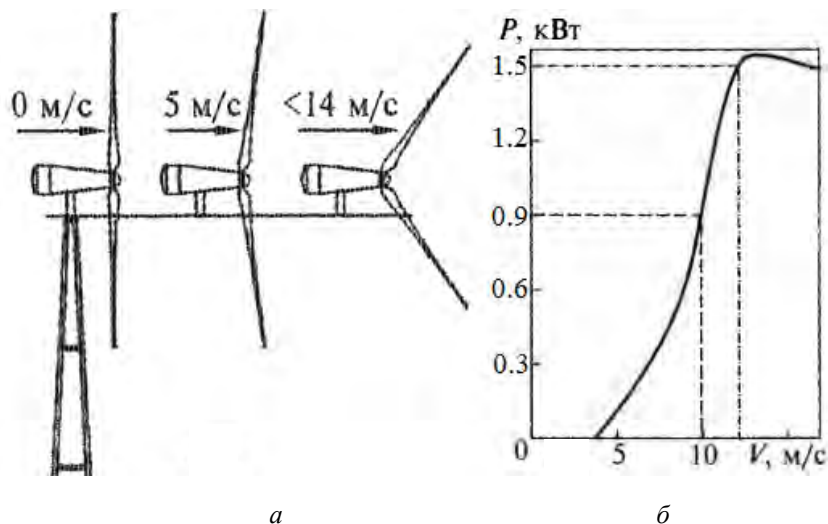


Рис. 5. Механізм складання лопатей та характеристика потужності вітроколеса під час його застосування

**Висновки.** Із проведеного порівняльного аналізу способів регулювання потужності горизонтально-осьових вітроустановок можемо зробити такі висновки: 1) системи регулювання зривом потоку (тобто без спеціальних механізмів) набагато дешевші й надійніші, ніж усі інші системи, однак за ефективністю значно поступаються системам повороту та складання лопатей; 2) система регулювання за допомогою зміни кута встановлення лопаті конструктивно і функціонально складніша, потребує надійного, кваліфікованого обслуговування і відповідно дорожча, ніж механізми зменшення площі ротора, яку охоплює повітряний потік (поворот у бік, відхилення назад, складання лопатей); 3) вітроустановки, які застосовують для регулювання потужності способи повороту і складання лопатей, найефективніші; 4) конструктивно найпростішими є механізми регулювання потужності шляхом повороту ротора в бік, проте продуктивність роботи ВУ під час їх застосування дещо нижча.

Із діаграми на рис. 6 бачимо, що зі збільшенням потужності зменшується кількість вітроустановок із регулювання зривом потоку і виводом ротора з-під вітру та збільшується застосування механізмів повороту лопатей. Отже, для потужніших вітроустановок намагаються використовувати надійнішу і ефективнішу, хоча й складнішу і дорожчу систему регулювання шляхом зміни кута атаки лопатей [1].

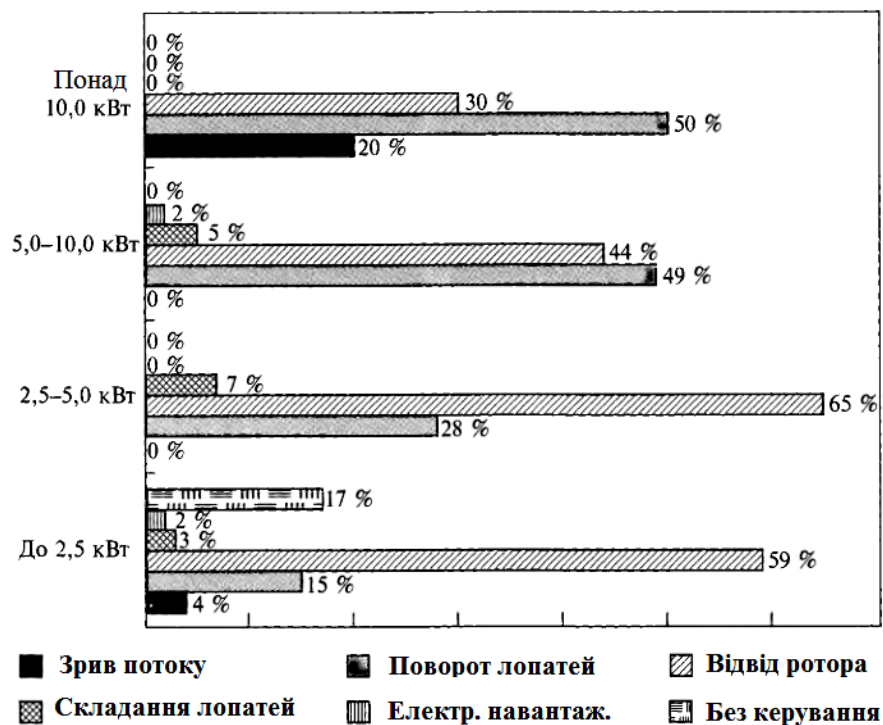


Рис. 6. Діаграма розподілу горизонтально-осьових вітроустановок за способом регулювання кутової швидкості обертання ротора

1. Дзензерский В.А. *Ветроустановки малой мощности* / В.А. Дзензерский, С.В. Тарасов, И.Ю. Костюков. – К.: Наук. думка, 2011. – 592 с. 2. Фатеев Е.М. *Ветродвижатели и ветроустановки* / Е.М. Фатеев. – М.: ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. – 544 с. 3. Корендій, В.М. Комп'ютерне проектування механізмів стабілізації кутової швидкості вітроколеса / В.М. Корендій, Н.І. Прокопеч // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. – 2011. – № 713. – С. 82–86. 4. Корендій В.М. *Моделювання навантажень та проектування тихохідного вітроколеса* / В.М. Корендій // *Наукові нотатки*. – 2011. – № 35. – С. 110–115. 5. Корендій, В.М. *Тенденції розвитку тихохідних горизонтально-осьових вітроустановок малої потужності* / В.М. Корендій // *Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: 4-та Міжнар. наук.-техн. конф., 24–26 квітня 2012 р.: матер. конф.* – Тернопіль, 2012. – С. 102–103.