

УДК 631.331:621.313.33:621.316

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359859

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ ОСЬОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ  
ПНЕВМОСЕПАРАТОРА ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ НАСІННЯ

- Вовк В.О.** аспірант, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5530-1115>, e-mail: [viacheslav.vovk@pdau.edu.ua](mailto:viacheslav.vovk@pdau.edu.ua);
- Ляшенко В.В.** канд. с.-г. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0177-6209>, e-mail: [viktor.liashenko@pdau.edu.ua](mailto:viktor.liashenko@pdau.edu.ua);
- Семенов А.О.** канд. фіз.-мат. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3184-6925>, e-mail: [asemen2015@gmail.com](mailto:asemen2015@gmail.com)

У роботі розглянуто питання підвищення енергоефективності та стабільності технологічного процесу калібрування насіння шляхом удосконалення електропривода осьового вентилятора пневмосепаратора. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до якості насіннєвого матеріалу та необхідністю зниження питомих енерговитрат у післязбиральній обробці зернових культур. Метою роботи є наукове обґрунтування та експериментальна оцінка енергоефективних режимів роботи асинхронного електропривода при застосуванні частотного регулювання. Об'єктом дослідження є електропривод осьового вентилятора пневмосепаратора з трифазним асинхронним двигуном потужністю 1,5 кВт, керованим перетворювачем частоти за законом  $U/f = \text{const}$ . Дослідження виконували в діапазоні частот 30–50 Гц із вимірюванням активної потужності, струму, коефіцієнта потужності, швидкості повітряного потоку та питомих енерговитрат. Встановлено, що навантаження має вентиляторний характер із квадратичною залежністю моменту та кубічною залежністю потужності від частоти обертання. Показано, що частотне регулювання забезпечує зниження активної потужності та питомих енерговитрат на 15–35 % порівняно з режимами прямого пуску та дроселювання, а також підвищує стабільність швидкості повітряного потоку до  $\pm 5$ –8 %. Найбільш раціональними є режими роботи в діапазоні 35–45 Гц, які забезпечують оптимальне поєднання енергоефективності та якості пневмосепарації. Отримані результати можуть бути використані для розроблення автоматизованих систем керування насіннеочисними машинами та підвищення ефективності електромеханічних систем агропромислового комплексу.

**Ключові слова:** електропривод; пневмосепаратор; осьовий вентилятор; частотне регулювання; асинхронний двигун; енергоефективність; калібрування насіння; питомі енерговитрати.

### Постановка проблеми

Сучасні технології післязбиральної обробки зернових культур висувають підвищені вимоги до якості калібрування насіння, стабільності технологічних режимів і зниження питомих енерговитрат. У структурі насіннеочисних ліній важливе місце займають пневмосепаратори з осьовими вентиляторами, ефективність роботи яких значною мірою визначається параметрами повітряного потоку. Нерівномірність швидкості повітря, її коливання у часі та по перерізу робочого каналу призводять до порушення траєкторій руху частинок, зниження селективності розділення та втрат повноцінного насіннєвого матеріалу.

У більшості серійних установок електропривод осьового вентилятора реалізований на базі нерегульованих асинхронних електродвигунів із прямим пуском, а регулювання продуктивності здійснюється механічними методами (дроселюванням або зміною геометрії каналу). Такий підхід не забезпечує адаптації швидкості обертання вентилятора до реальних потреб технологічного процесу та супроводжується значними непродуктивними втратами електроенергії. При цьому електропривод фактично виконує не лише функцію джерела механічної енергії, а й виступає ключовим

елементом керування процесом формування повітряного поля в робочій зоні пневмосепаратора.

Попри наявність досліджень, присвячених аеродинамічним аспектам пневмосепарації, питання узгодження електромеханічних режимів роботи електропривода з оптимальними параметрами повітряного потоку залишаються недостатньо опрацьованими. Відсутність науково обґрунтованих рекомендацій щодо застосування частотно-регульованих електроприводів у пневмосепараторах зумовлює суперечність між потребою підвищення енергоефективності та стабільності процесу і традиційними підходами до керування вентиляторами.

Отже, актуальним є вирішення науково-практичної задачі розроблення та обґрунтування енергоефективних режимів керування електроприводом осьового вентилятора пневмосепаратора, які забезпечували б зниження питомих енерговитрат і підвищення стабільності технологічного процесу калібрування насіння.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні технології післязбиральної обробки зернових і насіннєвих культур характеризуються підвищеними вимогами до якості калібрування, стабільності технологічних режимів та зниження питомих

енерговитрат [1–3]. Пневмосепаратори з осьовими вентиляторами широко застосовуються у складі насінно-очисних ліній завдяки простоті конструкції, універсальності та можливості безконтактної обробки матеріалу. Разом із тим, численні дослідження свідчать, що ефективність пневматичного розділення істотно залежить від стабільності та рівномірності повітряного потоку у робочому каналі, а не лише від його середнього значення [3, 4].

У більшості серійних пневмосепараторів електропривод осьового вентилятора реалізований на базі нерегульованих асинхронних електродвигунів із прямим пуском від мережі. Регулювання інтенсивності повітряного потоку при цьому здійснюється переважно механічними методами (дроселюванням, шиберами або зміною геометрії каналу), що не змінює електричний режим роботи двигуна і супроводжується значними непродуктивними втратами енергії [5, 6]. За таких умов електродвигун працює на номінальній частоті обертання незалежно від реальних потреб технологічного процесу, що знижує загальну енергоефективність установки.

Актуальні експериментальні та модельні дослідження процесів аеродинамічної сепарації зернових матеріалів показують, що навіть відхилення швидкості повітряного потоку на 10–20% по перерізу каналу або у часі призводить до порушення траєкторій руху частинок [3, 4, 5], зменшення селективності розділення та зростання втрат повноцінного зерна. Таким чином, електропривод вентилятора фактично виступає не лише джерелом енергоспоживання, а й ключовим керуючим елементом технологічного процесу, від якого залежить стабільність повітряного поля в робочій зоні.

У той же час більшість наукових публікацій, присвячених пневмосепараторам, зосереджені переважно на механічних і аеродинамічних аспектах процесу – формі каналів, товщині шару матеріалу, характеристиках повітряного потоку [3, 4]. Питання вибору типу електропривода, режимів його роботи та впливу електричних параметрів на енергетичну ефективність пневмосепараторів розглядаються фрагментарно або залишаються поза межами аналізу.

Водночас у суміжних галузях – вентиляційних, насосних та повітродувних системах – доведено, що застосування частотно-регульованих асинхронних електродвигунів дозволяє істотно знизити споживання електроенергії за рахунок реалізації законів подібності вентиляторних навантажень, відповідно до яких споживана потужність пропорційна кубу частоти обертання [6–8]. За даними експериментальних досліджень, перехід від дросельного регулювання до частотного дозволяє зменшити енергоспоживання вентилятора на 15–40 % залежно від режиму роботи.

Незважаючи на те, що частотно-регульовані електродвигуни широко застосовуються у вентиляційних, насосних і повітродувних установках, де використання перетворювачів частоти дозволяє знизити енергоспоживання на 20–40 %, їх застосування у системах

пневмосепарації зернових матеріалів досліджено значно менше. На відміну від класичних вентиляційних систем, у пневмосепараторах швидкість повітряного потоку безпосередньо впливає не лише на енергетичні показники установки, але й на траєкторію руху частинок зернової суміші та ефективність їх аеродинамічного розділення. Незважаючи на доведену ефективність частотного регулювання у промислових вентиляційних системах, потенціал цих технологій у пневмосепараторах насіння використовується недостатньо. Це зумовлено відсутністю науково обґрунтованих рекомендацій щодо узгодження електромеханічних режимів роботи електропривода [9, 10] з оптимальними аеродинамічними параметрами процесу сепарації [11], а також браком комплексних досліджень, у яких електропривод розглядався б як елемент системи керування технологічним процесом [9]. Тому вплив частотного керування електроприводом вентилятора на динаміку формування повітряного потоку та якість сепарації потребує окремого дослідження.

Важливою перевагою застосування перетворювачів частоти є також можливість реалізації плавного пуску електродвигуна. При прямому пуску асинхронного двигуна пускові струми можуть перевищувати номінальні у 5–7 разів, що супроводжується значними електродинамічними навантаженнями та механічними ударами у системі «двигун – вал – вентилятор». Використання частотного керування дозволяє здійснювати поступовий розгін електропривода з обмеженням пускового струму та зменшенням динамічних навантажень на механічні елементи установки.

Поряд із частотним регулюванням у практиці експлуатації вентиляторних установок застосовуються також механічні способи керування повітряним потоком, зокрема використання дросельних заслінок, шиберів або зміни геометрії повітряного каналу. У таких системах електродвигун працює на номінальній частоті обертання, а регулювання продуктивності здійснюється шляхом штучного збільшення аеродинамічного опору [12]. Це призводить до значних енергетичних втрат, оскільки надлишкова енергія розсіюється у вигляді турбулентних потоків та втрат тиску [12]. При цьому частотне керування дозволяє безпосередньо змінювати швидкість обертання вентилятора відповідно до потреб технологічного процесу, що забезпечує раціональне використання електроенергії.

З огляду на зазначене, дослідження електропривода вентилятора пневмосепаратора слід розглядати як елемент керування технологічним процесом формування повітряного потоку. Оптимізація режимів роботи електропривода дозволяє не лише зменшити енергоспоживання, але й підвищити стабільність аеродинамічного поля в робочому каналі, що безпосередньо впливає на ефективність розділення зернових сумішей.

Таким чином, наявна суперечність між зростаючими вимогами до енергоефективності та стабільності процесу калібрування насіння і традиційними підходами до побудови електроприводів

пневмосепараторів. Вирішення цієї проблеми потребує переходу до частотно-керованих електроприводів осьових вентиляторів, здатних забезпечити адаптивне формування повітряного потоку відповідно до технологічних вимог процесу та зниження питомих витрат електроенергії [10].

У ході досліджень порівнювалися режими прямого пуску електродвигуна, механічного дроселювання повітряного потоку та частотного регулювання електропривода [13].

Основні технічні параметри електропривода наведено в табл. 1.

**Мета статті**

Мета роботи є наукове обґрунтування та експериментальна оцінка енергоефективних режимів роботи електропривода осьового вентилятора пневмосепаратора шляхом застосування частотно-регульованого асинхронного електропривода.

**Матеріали та методи**

Об'єктом дослідження є електропривод осьового вентилятора пневмосепаратора, що використовується у технологічному процесі калібрування насіння зернових культур. Електропривод розглядався як складова частина електромеханічної системи формування повітряного потоку, від параметрів якої залежить стабільність аеродинамічного поля в робочому каналі пневмосепаратора та енергетична ефективність установки в цілому.

Як приводний електродвигун застосовувався трифазний асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором номінальною потужністю 1,5 кВт, призначений для роботи у тривалому режимі. Керування електродвигуном здійснювалося за допомогою перетворювача частоти зі скалярним законом керування  $U/f = \text{const}$ .

Регулювання режимів роботи електропривода здійснювалося шляхом зміни частоти живлення електродвигуна в діапазоні 30–50 Гц, що відповідало зміні частоти обертання осьового вентилятора та швидкості повітряного потоку в робочому каналі пневмосепаратора.

Вибір діапазону частот 30–50 Гц зумовлений технологічними особливостями процесу пневмосепарації. При частотах нижче 30 Гц швидкість повітряного потоку зменшується до значень, недостатніх для стабільного підняття частинок зернового матеріалу у висхідному потоці, що призводить до погіршення умов аеродинамічного розділення. Робота вентилятора на частотах, що перевищують номінальну 50 Гц, супроводжується зростанням механічних навантажень на робоче колесо та елементи привода, а також може призводити до порушення оптимальних умов сепарації через надмірне збільшення швидкості повітряного потоку.

Для оцінювання електричних та енергетичних показників електропривода проводилися вимірювання активної потужності, струму споживання та коефіцієнта потужності після стабілізації режимів роботи. Питомі енерговитрати процесу пневмосепарації визначалися як відношення спожитої електричної енергії до маси обробленого насіннєвого матеріалу.

Таблиця 1

Основні технічні параметри електропривода осьового вентилятора пневмосепаратора

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
1	Тип електродвигуна	–	Асинхронний, трифазний, з короткозамкненим ротором	–
2	Номінальна потужність	$P_n$	1,5	кВт
3	Номінальна напруга живлення	$U_n$	380	В
4	Номінальна частота живлення	$f_n$	50	Гц
5	Номінальний струм	$I_n$	3,2–3,6	А
6	Номінальна частота обертання	$n_n$	1450	об/хв
7	Кількість пар полюсів	$p$	2	–
8	ККД при номінальному режимі	$\eta_n$	0,80–0,83	–
9	Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi_n$	0,78–0,82	–
10	Тип навантаження	–	Вентиляторне (момент $M \sim n^2$ )	–
11	Спосіб керування	–	Частотне, закон $U/f = \text{const}$	–
12	Діапазон регулювання частоти	$f$	30–50	Гц
13	Діапазон частоти обертання	$n$	850–1450	об/хв
14	Клас ізоляції	–	F	–
15	Режим роботи	–	Тривалий (S1)	–

## Виклад основного матеріалу

Електропривод осьового вентилятора пневмосепаратора належить до класу електроприводів з вентиляторним (аеродинамічним) навантаженням, для яких характерна квадратична залежність моменту опору від частоти обертання та кубічна залежність споживаної потужності від швидкості обертання робочого органа. Такі закономірності є визначальними при аналізі енергетичної ефективності та виборі способу керування електроприводом [Помилка! Закладку не визначено.–5].

Для осьових вентиляторів момент опору на валу описується залежністю:

$$M_B = k_M n^2,$$

де  $M_B$  – момент опору вентилятора, Н·м;  $n$  – частота обертання, об/хв;  $k_M$  – коефіцієнт, що враховує геометрію вентилятора та властивості повітряного потоку.

Відповідна механічна потужність визначається як:

$$P_M = M_B \cdot \omega \sim n^3,$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання.

Зазначені залежності є класичними для вентиляторних установок і підтверджені як теоретично, так і експериментально в численних дослідженнях.

Саме кубічна залежність потужності від швидкості обертання пояснює низьку енергоефективність механічних методів регулювання продуктивності (дроселювання), за яких електродвигун продовжує працювати на номінальній частоті, а надлишкова енергія розсіюється у вигляді аеродинамічних втрат.

Альтернативними способами регулювання продуктивності вентиляторних установок є механічні методи, зокрема використання дросельних заслінок, шибєрів або зміна геометрії повітряного каналу. У таких системах електродвигун продовжує працювати на номінальній частоті обертання, а регулювання витрати повітря здійснюється шляхом штучного збільшення аеродинамічного опору системи. Це призводить до додаткових втрат енергії у вигляді турбулентних потоків та втрат тиску. На відміну від механічних методів, частотне регулювання забезпечує зміну швидкості обертання вентилятора відповідно до технологічної потреби, що дозволяє реалізувати закони подібності вентиляторних машин і досягти істотного підвищення енергоефективності електропривода.

У системах пневмосепарації найпоширенішим приводом осьових вентиляторів є трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, що обумовлено його конструктивною простотою, надійністю та низькими експлуатаційними витратами [7, 8, 13].

Застосування перетворювача частоти зі скалярним законом керування  $U/f = \text{const}$  дозволяє підтримувати приблизно сталий магнітний потік у повітряному зазорі двигуна в робочому діапазоні частот, що забезпечує стабільну механічну характеристику та допустимі значення пускового моменту [7].

Додатковою перевагою використання перетворювачів частоти є можливість реалізації плавного пуску електродвигуна. У разі прямого пуску асинхронного двигуна пускові струми можуть перевищувати номінальні у 5–7 разів, що супроводжується значними електродинамічними навантаженнями та механічними ударами в системі «двигун – вал – вентилятор». Застосування частотного перетворювача дозволяє здійснювати поступовий розгін електропривода з обмеженням пускового струму до 1,2–1,5 номінального значення, що зменшує механічні навантаження на вал, підшипники та робоче колесо вентилятора і сприяє підвищенню довговічності обладнання.

Електромагнітний момент асинхронного двигуна в усталеному режимі може бути представлений у спрощеному вигляді:

$$M_e \sim \frac{U^2}{f} \cdot s,$$

де  $U$  – напруга живлення;  $f$  – частота живлення;  $s$  – ковзання.

За умови виконання закону  $U/f = \text{const}$  зі зменшенням частоти живлення зменшується і напруга, що дозволяє зберегти працездатність двигуна при знижених швидкостях, що є достатнім для вентиляторних навантажень, у яких момент опору істотно зменшується зі зниженням швидкості [7].

Для вентиляторних систем виконуються закони подібності, які пов'язують основні аеродинамічні та енергетичні параметри з частотою обертання:

$$Q \sim n, \quad H \sim n^2, \quad P \sim n^3,$$

де  $Q$  – продуктивність вентилятора;  $H$  – напір;  $P$  – споживана потужність.

Частота обертання вентилятора визначається частотою живлення асинхронного електродвигуна і може бути описана співвідношенням:

$$n = \frac{60f}{p},$$

де  $f$  – частота живлення електродвигуна, Гц;  $p$  – кількість пар полюсів.

Швидкість повітряного потоку у робочому каналі пневмосепаратора пропорційна частоті обертання вентилятора і може бути представлена у вигляді:

$$v = k_v n,$$

де  $v$  – швидкість повітряного потоку;  $k_v$  – коефіцієнт, що враховує геометричні параметри вентилятора та каналу.

Таким чином, зміна частоти живлення електродвигуна дозволяє безпосередньо керувати швидкістю повітряного потоку, що визначає аеродинамічні умови процесу сепарації зернових матеріалів.

З наведених співвідношень випливає, що частотне регулювання є найбільш енергоефективним способом керування вентиляторними установками, оскільки дозволяє зменшувати продуктивність без додаткових гідравлічних або аеродинамічних втрат [6, 7]. За узагальненими даними, впровадження частотно-регульованих електроприводів у вентиляційних і повітрорудних системах забезпечує зниження енергоспоживання на

15–40% залежно від характеру навантаження та режимів роботи [6].

У пневмосепараторах стабільність швидкості повітряного потоку є критично важливою умовою ефективного калібрування насіння. Як показано в дослідженнях процесів аеродинамічного розділення зернових матеріалів, коливання швидкості повітряного потоку призводять до зміни траєкторій руху частинок і зниження селективності сепарації [2–4].

Нерегульовані електроприводи або режими дроселювання не забезпечують достатньої стабільності швидкості обертання вентилятора, що ускладнює підтримання оптимальних технологічних режимів. Натомість частотно-регульований електропривод дозволяє підтримувати задану частоту обертання з високою точністю, зменшуючи вплив зовнішніх збурень та зміни навантаження [6].

Електропривод осьового вентилятора у пневмосепараторі слід розглядати не лише як джерело механічної енергії, а як активний елемент керування технологічним процесом, який визначає як енергетичні, так і якісні показники калібрування насіння.

У результаті експериментальних досліджень отримано кількісні характеристики роботи електропривода осьового вентилятора пневмосепаратора при різних способах керування та в широкому діапазоні частот живлення асинхронного електродвигуна. Аналіз результатів спрямований на оцінювання впливу режимів керування електроприводом на електричні, енергетичні та аеродинамічні показники процесу пневмосепарації.

У табл. 2 наведено експериментальні дані щодо зміни частоти обертання вентилятора, активної потужності, струму споживання, коефіцієнта потужності та швидкості повітряного потоку в робочому каналі пневмосепаратора при частотному регулюванні електропривода в діапазоні 30–50 Гц.

Таблиця 2

Електричні, енергетичні та аеродинамічні показники електропривода осьового вентилятора при частотному регулюванні

f, Гц	n, об/хв	P, кВт	I, А	cosφ	v <sub>пов</sub> , м/с	Питома енерговитрата, кВт·год/т
50	1450	1,48	3,4	0,81	9,6	5,8
47	1360	1,28	3,0	0,80	9,0	5,1
45	1300	1,15	2,8	0,80	8,5	4,7
42	1210	0,98	2,4	0,79	7,9	4,1
40	1150	0,86	2,1	0,79	7,4	3,6
37	1060	0,72	1,8	0,78	6,8	3,2
35	1000	0,63	1,6	0,78	6,2	2,9
32	920	0,52	1,3	0,77	5,6	2,6
30	850	0,44	1,1	0,76	5,1	2,4

Аналіз даних табл. 2 свідчить, що зі зменшенням частоти живлення асинхронного електродвигуна

спостерігається істотне зниження активної потужності електропривода та струму споживання. Характер зміни потужності є нелінійним і відповідає кубічній залежності від частоти обертання вентилятора, що підтверджує вентиляторний характер навантаження.

Водночас коефіцієнт потужності cosφ у всьому діапазоні регулювання залишається в допустимих межах і не зазнає різких коливань, що свідчить про стабільний електричний режим роботи електродвигуна при застосуванні частотного керування.

Для оцінювання впливу способу керування електроприводом на стабільність технологічного процесу було проаналізовано коливання швидкості повітряного потоку в робочому каналі пневмосепаратора. Узагальнені результати наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Стабільність швидкості повітряного потоку при різних способах керування електроприводом

Спосіб керування	Середня швидкість повітря, м/с	Колівання швидкості, %
Прямий пуск	9,5	±15–18
Дроселювання	7,5	±12–15
Частотне регулювання	7,5	±5–8

Отримані результати показують, що при прямому пуску та механічному дроселюванні спостерігаються значні коливання швидкості повітряного потоку, зумовлені змінами аеродинамічного опору та нестабільністю навантаження електродвигуна. Натомість частотно-регульований електропривод забезпечує істотно вищу стабільність швидкості повітряного потоку, що є критично важливим для ефективного калібрування насіння.

Порівняльну оцінку питомих енерговитрат пневмосепаратора для різних способів керування електроприводом наведено в табл. 4.

Як видно з табл. 4, механічне дроселювання забезпечує лише обмежене зниження електроспоживання, оскільки електродвигун продовжує працювати на номінальній частоті обертання. Найбільший енергетичний ефект досягається при застосуванні частотного регулювання, за якого питома енерговитрата зменшується в середньому на 15–35 % залежно від режиму роботи та необхідної інтенсивності повітряного потоку.

Отримані експериментальні результати підтверджують, що частотно-регульований асинхронний електропривод осьового вентилятора забезпечує істотне зниження активної потужності та питомих енерговитрат пневмосепаратора при одночасному підвищенні стабільності швидкості повітряного потоку. Найбільш раціональними з точки зору поєднання енергоефективності та якості пневмосепарації є режими роботи електропривода в діапазоні частот 35–45 Гц, які можуть бути рекомендовані для практичного впровадження в насінноочисних машинах.

Таблиця 4

Порівняльні енергетичні показники пневмосепаратора при різних способах керування електроприводом

Спосіб керування	Частота обертання вентилятора	Активна потужність, кВт	Питома енерговитрата, кВт·год/т	Економія електроенергії, %
Прямий пуск	1450 об/хв	1,48	5,8	–
Дроселювання	1450 об/хв	1,32	5,2	10
Частотне регулювання	1000–1200 об/хв	0,75–0,95	3,6–4,2	15–35

### Висновки

У роботі експериментально підтверджено, що електропривод осьового вентилятора пневмосепаратора належить до класу вентиляторних навантажень із квадратичною залежністю моменту опору та кубічною залежністю споживаної потужності від частоти обертання, що визначає доцільність застосування частотного регулювання для підвищення енергоефективності.

Встановлено, що при частотному регулюванні асинхронного електродвигуна в діапазоні 30–50 Гц спостерігається істотне зниження активної потужності та струму споживання електропривода при збереженні стабільного коефіцієнта потужності, що свідчить про надійний електричний режим роботи двигуна.

Показано, що швидкість повітряного потоку в робочому каналі пневмосепаратора при частотному керуванні змінюється прогнозовано та характеризується підвищеною стабільністю, при цьому коливання швидкості не перевищують  $\pm 5\text{--}8\%$ , що є суттєво меншим порівняно з режимами прямого пуску та механічного дроселювання.

Порівняльний аналіз енергетичних показників показав, що механічне дроселювання повітряного потоку забезпечує лише обмежене зниження електроспоживання, тоді як застосування частотно-регульованого електропривода дозволяє зменшити питому енерговитрату пневмосепаратора на 15–35% залежно від режиму роботи.

Визначено, що найбільш раціональними з точки зору поєднання енергоефективності та стабільності технологічного процесу пневмосепарації є режими роботи електропривода осьового вентилятора в діапазоні частот 35–45 Гц, які забезпечують оптимальні аеродинамічні умови калібрування насіння.

Отримані результати підтверджують доцільність використання частотно-регульованого асинхронного електропривода як ефективного засобу керування процесом пневмосепарації та створюють передумови для впровадження автоматизованих систем керування насіннеочисними машинами з адаптацією режимів роботи до властивостей насінневого матеріалу.

### Перелік використаних джерел

- [1] Вовк В.О. Дослідження впливу параметрів повітряного потоку на ефективність калібрування насіння у пневмосепараторі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 72–78. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344653>.
- [2] The effect of selected factors on separation efficiency in a pneumatic conical separator / D. J. Choszcz et al. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Article 3051. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12073051>.
- [3] Khamyev V., Gulyev A., Boiko A. Justification of the design of pneumatic sorting machine for the preparation of selection seeds. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. Article 05008. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405008>.
- [4] Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel / S. Stepanenko et al. *Journal of Central European Agriculture*. 2022. Vol. 24, no. 1. Pp. 225–235. DOI: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732>.
- [5] Energy assessment of the pneumatic sieve separator for agricultural crops / Y. Mykhailov et al. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2021. Vol. 25, no. 1. Pp. 147–155. DOI: <https://doi.org/10.2478/agriceng-2021-0012>.
- [6] The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials / M. Panasiewicz et al. *Journal of Food Engineering*. 2012. Vol. 109, no. 3. Pp. 603–608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.010>.
- [7] Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream / Kroulík M., Hůla J., Rybka A., Honzík I. *Research in Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 62, no. 2. Pp. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.17221/32/2014-RAE>.
- [8] Kovalyshyn S., Dadak V., Konyk S. Intensification of the process of preparing small seed crop mixtures. *Acta Technologica Agriculturae*. 2015. Vol. 4. Pp. 108–112. DOI: <https://doi.org/10.1515/ata-2015-0021>.
- [9] Mathematical modelling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine / I. Badretdinov et al. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019. Vol. 17, no. 4. Pp. 529–534. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes17-22640>.
- [10] Air flow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method / J. Lukaszuk et al. *Research in Agricultural Engineering*. 2008. Vol. 54, no. 2. Pp. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.17221/8/2008-RAE>.
- [11] Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct / S. Kharchenko et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 10. Article 4383. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11104383>.
- [12] Research on characteristics of airway pressure loss in seeding-wheel-type pneumatic seeder / X. Zhang et al.

*Agriculture*. 2022. Vol. 12, no. 12. Article 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12122021>.

- [13] Обґрунтування раціональних параметрів електроприводів насосних агрегатів для систем агропромислового комплексу / Семенов А. О., Скрипник

В. О., Харак Р. М., Супрович О. С. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2024. № 3(496). С. 80–86. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).12](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).12).

## ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF THE AXIAL ELECTRIC DRIVE OF A PNEUMATIC SEPARATOR FOR SEED CALIBRATION

- Vovk V.O.** *postgraduate student, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5530-1115>, e-mail: [viacheslav.vovk@pdau.edu.ua](mailto:viacheslav.vovk@pdau.edu.ua);*
- Liashenko V.V.** *PhD (Agricultural Sciences), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0177-6209>, e-mail: [viktor.liashenko@pdau.edu.ua](mailto:viktor.liashenko@pdau.edu.ua);*
- Semenov A.O.** *PhD (Physics and Mathematical Sciences), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3184-6925>, e-mail: [asemen2015@gmail.com](mailto:asemen2015@gmail.com)*

The paper addresses the issue of improving the energy efficiency and stability of the technological process of seed calibration by upgrading the electric drive of the axial fan in a pneumatic separator. The relevance of the study is determined by the growing requirements for seed quality and the need to reduce specific energy consumption in post-harvest processing of grain crops. The aim of the research is to provide scientific substantiation and experimental evaluation of energy-efficient operating modes of an asynchronous electric drive when applying frequency control. The object of the study is the electric drive of the axial fan of a pneumatic separator equipped with a three-phase induction motor rated at 1.5 kW and controlled by a frequency converter according to the  $U/f = \text{const}$  law. The experiments were carried out within the frequency range of 30–50 Hz with measurements of active power, current, power factor, air velocity, and specific energy consumption. It was established that the load has a fan-type character with a quadratic dependence of torque and a cubic dependence of power on rotational speed. It is shown that frequency control ensures a reduction in active power and specific energy consumption by 15–35% compared with direct-on-line starting and throttling modes, and also increases the stability of air velocity to  $\pm 5$ –8%. The most rational operating modes are within the frequency range of 35–45 Hz, providing an optimal combination of energy efficiency and pneumatic separation quality. The obtained results can be used for the development of automated control systems for seed-cleaning machines and for improving the efficiency of electromechanical systems in the agro-industrial complex.

**Keywords:** electric drive; pneumatic separator; axial fan; frequency control; induction motor; energy efficiency; seed calibration; specific energy consumption.

### References

- [1] V. O. Vovk, “Doslidzhennia vplyvu parametriv povitrianoho potoku na efektyvnist kalibruvannia nasinnia u pnevmoseparatori” [“Investigation of the influence of airflow parameters on the efficiency of seed calibration in a pneumatic separator”], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 51, pp. 72–78, 2025. doi: [10.31498/2225-6733.51.2025.344653](https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344653). (Ukr.)
- [2] D. J. Choszcz, P. S. Reszczyński, E. Kolankowska, S. Konopka, and A. Lipiński, “The effect of selected factors on separation efficiency in a pneumatic conical separator,” *Sustainability*, vol. 12, article 3051, 2020. doi: [10.3390/su12073051](https://doi.org/10.3390/su12073051).
- [3] V. Khamyev, A. Gulyev, and A. Boiko, “Justification of the design of pneumatic sorting machine for the preparation of selection seeds,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 224, article 05008, 2018. doi: [10.1051/mateconf/201822405008](https://doi.org/10.1051/mateconf/201822405008).
- [4] S. Stepanenko, B. Kotov, A. Kuzmych, R. Kalinichenko, and V. Hryshchenko, “Research of the process of air separation of grain material in a vertical zig-zag channel,” *Journal of Central European Agriculture*, vol. 24, no. 1, pp. 225–235, 2022. doi: [10.5513/JCEA01/24.1.3732](https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732).
- [5] Y. Mykhailov et al., “Energy assessment of the pneumatic sieve separator for agricultural crops,” *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 25, no. 1, pp. 147–155, 2021. doi: [10.2478/agriceng-2021-0012](https://doi.org/10.2478/agriceng-2021-0012).
- [6] M. Panasiewicz, P. Sobczak, J. Mazur, K. Zawiślak, and D. Andrejko, “The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials,” *Journal of Food Engineering*, vol. 109, no. 3, pp. 603–608, 2012. doi: [10.1016/j.jfoodeng.2011.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.010).

- [7] M. Kroulík, J. Hůla, A. Rybka, and I. Honzík, “Pneumatic conveying characteristics of seeds in a vertical ascending airstream,” *Research in Agricultural Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 56–63, 2016. doi: **10.17221/32/2014-RAE**.
- [8] S. Kovalyshyn, V. Dadak, and S. Konyk, “Intensification of the process of preparing small seed crop mixtures,” *Acta Technologica Agriculturae*, vol. 4, pp. 108–112, 2015. doi: **10.1515/ata-2015-0021**.
- [9] I. Badretdinov, S. Mudarisov, M. Tuktarov, E. Dick, and S. Arslanbekova, “Mathematical modelling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine,” *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 17, no. 4, pp. 529–534, 2019. doi: **10.5937/jaes17-22640**.
- [10] J. Lukaszuk, M. Molenda, J. Horabik, B. Szot, and M. Montross, “Air flow resistance of wheat bedding as influenced by the filling method,” *Research in Agricultural Engineering*, vol. 54, no. 2, pp. 50–57, 2008. doi: **10.17221/8/2008-RAE**.
- [11] S. Kharchenko et al., “Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, article 4383, 2021. doi: **10.3390/app11104383**.
- [12] X. Zhang, Z. Wen, Q. Wang, H. Li, Z. Zhang, and J. Liu, “Research on characteristics of airway pressure loss in seeding-wheel-type pneumatic seeder,” *Agriculture*, vol. 12, no. 12, 2022. doi: **10.3390/agriculture12122021**.
- [13] A. O. Semenov, V. O. Skrypnyk, R. M. Kharak, and O. S. Suprovych, “Obgruntuvannia ratsionalnykh parametriv elektropyvodiv nasosnykh ahrehativ dlia system ahropromyslovoho kompleksu” [“Justification of rational parameters of electric drives of pumping units for agro-industrial complex systems”], *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admirala Makarova – Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, no. 3 (496), pp. 80–86, 2024. doi: **10.15589/znp2024.3(496).12**.

Стаття надійшла 02.02.2026

Стаття прийнята 28.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

**Цитуйте цю статтю як:** Вовк В. О., Ляшенко В. В., Семенов А. О. Енергоефективне керування осьовим електроприводом пневмосепаратора для калібрування насіння. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 53, том 2. С. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359859>.