

ВОЗНЯК О.М.

Вінницький національний аграрний університет  
e-mail: alex.voz1966@gmail.com

ШТУЦЬ А.А.

Вінницький національний аграрний університет  
e-mail: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>

КОЛІСНИК М.А.

Вінницький національний аграрний університет  
e-mail: kolisnik30@gmail.com

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВІБРОЦЕНТРОБІЖНОГО СЕПАРАТОРА ЗЕРНА

Розвиток сільського господарства залежить від умов забезпечення якості та збереження вирощеної і виробленої продукції. Для вирішення цих завдань, зокрема, зернопереробні підприємства повинні мати добре оснащення, технічну базу, здатну забезпечити якісне сепарування зерна, що надходить без втрат протягом короткого терміну. Сепарація зернових має ключове місце не тільки в процесі переробки, а є одним з основних шляхів, що сприяють підвищенню врожайності зернових культур, так як процес сепарування сприяє відбору найбільш високоякісного (фізіологічно дозрілого) посівного матеріалу.

Робота з зерном базується на основних принципах, які включають в себе прогресивну технологію, поточкові методи обробки та автоматизацію процесу виробництва. Переважна більшість використовуваних на сьогоднішній день в сільському господарстві машин для сепарації мають досить низьку продуктивність, тому що переважно для очищення зернових сумішей використовують гравітаційні сили. Щорічно вимоги виробництва зростають і вимагають нових, найбільш енергетично і технологічно ефективних способів сепарування, а також створення або модернізації існуючих сепаруючих машин з більш високими показниками продуктивності, якості та ефективності розділення зернових сумішей.

Основною проблемою при розгляді питань вдосконалення з тимчасових зернових вібровідцентрових сепараторів є відсутність основи конструктивної схеми вібраційного приводу, яка дасть можливість здійснення заданого закону коливань з необхідною точністю і можливістю плавно регулювати амплітуду і частоту коливань робочого органу у вертикальній площині. Цікаві і широкі перспективи розвитку електроприводу пов'язані із застосуванням так званих лінійних двигунів. Лінійні двигуни можуть бути асинхронними, синхронними і постійного струму, повторюючи за принципом своєї дії відповідні двигуни обертового руху. Вібросепаратор і його електропривод дозволить значно поліпшити якість технологічного процесу, підвищити ефективність розподілу зернових сумішей і термін експлуатації машин [11]. Для повного розуміння стану питання розглянемо конструкції зерноочисних сепараторів, найбільш поширених на сільськогосподарських підприємствах нашої країни.

Ключові слова: система управління, лінійний асинхронний електродвигун, віброцентробіжний сепаратор, технологічні процеси, розробка, дослідження, удосконалення, зерно.

WOZNIAK A.M., SHTUTS A.A., KOLISNYK M.M.

Vinnitsia National Agrarian University

## JUSTIFICATION OF PARAMETERS AND DEVELOPMENT OF A LINEAR ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A VIBROCENTER GRAIN SEPARATOR

The development of agriculture depends on the conditions of quality assurance and preservation of grown and produced products. To solve these problems, in particular, grain processing enterprises must have a well-equipped technical base capable of ensuring high-quality separation of grain, which arrives without losses in the short term. Separation of cereals is a key place not only in the processing process, but also is one of the main ways to increase the yield of cereals, as the separation process contributes to the selection of the highest quality (physiologically mature) seed. Work with grain is based on basic principles, which include advanced technology, flow processing methods and automation of the production process. Post-harvest processing of grain must ensure the timely organization and timely execution of all its stages while ensuring the minimum possible values of energy and complexity of the process. The vast majority of separation machines used today in agriculture have a fairly low productivity, as most of them use gravitational forces to clean grain mixtures. Every year, production requirements are growing, and require new, most energy and technologically efficient methods of separation, as well as the creation or modernization of existing separating machines with higher productivity, quality and efficiency of separation of grain mixtures. Without theoretical and practical research, grain cleaning machines are impossible to further improve and create new, high-tech and energy-efficient structures. The main difficulty in considering improvements in temporary grain vibratory centrifugal separators is the lack of a basic design scheme of the vibrating drive, which will allow the implementation of a given law of oscillations with the required accuracy and ability to smoothly adjust the amplitude and frequency of oscillations in the vertical plane. Interesting and broad prospects for the development of electric drive are associated with the use of so-called linear motors. A large number of production mechanisms and devices have translational or reciprocating motion of the working bodies (lifting and transport machines, feed mechanisms of various machines, presses, hammers, etc.). As the drive of these mechanisms and devices, conventional electric motors were used in combination with special types of mechanical transmissions (crank mechanism, screw-nut transmission), transformed the rotational motion of the working body. Linear motors can be asynchronous, synchronous and direct current, repeating the principle of their operation of the corresponding motors of rotational motion.

Key words: Control system, asynchronous electric motor, vibration center separator, technological processes, development, research, improvement, grain.

### Постановка проблеми

Як відомо, процес сепарування зернових сумішей, тобто поділ їх на фракції, що відрізняються властивостями частинок, є однією з ключових технологічних операцій у процесах приймання, зберігання і переробки зерна.

На підприємствах зберігання та переробки зерна найбільш широкого спектру отримало сепарування [1]. Під час сепарування поряд з основними ознаками поділу, такими як розміри і форма частинок, на процес впливають (сприяють або ускладнюють) щільність, коефіцієнт тертя поверхні. Однією з основних проблем для подальшого вдосконалення й підвищення ефективності сепарування плоскими решетами є використання сил гравітації при розділенні зернових сумішей.

Найбільш перспективними серед плоскорешітчастих машин є віброцентробіжні зернові сепаратори (ВЦС), які для інтенсивного сепарування оброблюваної зернової суміші використовують сили інерції обертання і вібрації.

Таким чином, застосування вібрації при сепаруванні зернових сумішей викликає досить великий інтерес. Для подальшого, більш широкого використання зернових сепараторів на основі вібрації на сільськогосподарських підприємствах необхідне подальше дослідження технології вібропідготовки, конструкції.

### Результати досліджень

Розглянуто питання сепарування сипучих зернових сумішей за допомогою лінійного асинхронного електроприводу віброцентробіжного сепаратора зерна. Розглянуто існуючі конструкції коливальних приводів віброцентробіжних зернових сепараторів, наведено їх порівняльні характеристики.

Дослідження процесів сепарування зернових сумішей в зернових сепараторах проведені багатьма вченими. Серед них можна відзначити роботи П.С. Берника, Л.В. Ярошенка, О.В. Солоної, О.В. Цуркана, Я.І. Лейкіна, І.І. Блехмана, І.Е. Кожуховського та інших.

Метою дослідження є обґрунтування параметрів і розробка лінійного асинхронного електроприводу віброцентробіжного сепаратора зерна.

Широке поширення у фермерських господарствах отримали плоскорешітчасті зерноочисні сепаратори. На рисунку 1 представлений очищувач вороху ОВС-25С. Даний агрегат призначений для попередньої та первинної очистки зернових круп'яних, зернобобових культур, кукурудзи, соняшника, насіння ріпаку від різних бур'янів та домішок.



Рис. 1. Очищувач вороху ОВС-25С

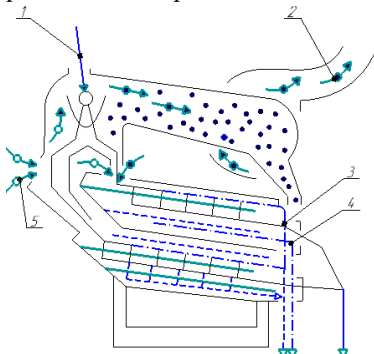


Рис. 2. Технологічна схема роботи ОВС-25С:  
1 - основний потік; 2 - чисте повітря; 3 - великі домішки; 4 - дрібні домішки; 5 - відпрацьоване повітря

осідають у відстійній камері.

Зернова суміш, яка пройшла попередню очистку повітрям, попадає на верхній і нижній стани. Процес очищення на верхньому і нижньому станах абсолютно аналогічний. Очищене зерно потрапляє на задній приймач. Після приймача очищене зерно за допомогою шнека подається у нижню частину транспортера.

Однак невисока ефективність поділу існуючих плоскорешітчастих сепараторів не відповідає щорічно зростаючим вимогам промисловості, а подальше підвищення якості сепарування зернової суміші в сепараторах даного типу обмежена силами гравітації.

*Відцентрові сепаратори.* У пошуку найбільш ефективних і продуктивних способів очищення зернових мас багатьма дослідниками було відмічено відцентрове сепарування.

За результатами роботи численних дослідників виникла велика кількість різних конструкцій відцентрових сепараторів, які дають змогу створювати інерційне поле із зусиллям, що в кілька разів перевищує шум зусилля поля сил тяжіння. Відцентрове сепарування характеризується фактором поділу, званим числом Фруда.

$$F = \frac{R_6 \cdot \Omega_6^2}{g},$$

де  $R_6$  – радіус решета, м;

$\Omega_6$  – кутова швидкість обертання робочого органа, рад/с.

На рисунку 3 представлений віброцентробіжний зерновий сепаратор «Промінь», робочими органами якого є циліндричні похилі решета, призначені для очищення зернових культур від великих, дрібних і легких домішок на елеваторах, заводах, механізованих токах та інших об'єктах переробки зерна.



Рис. 3. Віброцентробіжний зерновий сепаратор «Промінь»

Віброцентробіжний зерновий сепаратор, представлений на (рисунку 4), із складається ситового і повітряного сепараторів. Вихідна зернова суміш, яка надходить у машину через приймальний патрубок 1, очищається від легких бур'янистих домішок за допомогою продувки зустрічним потоком повітря. Після цього зерно надходить в ситовий барабан 2, де очищається від домішок, що відрізняються від зерна основної культури розмірами. Отримані при

роботі сепаратора фракції окремо виводяться з машини через випускні патрубки 3. Очищення сит від застряглих зерен здійснюється за допомогою блоків рухомих щіток ковзання.

Ситовий сепаратор (ситовий барабан) дає можливість виконувати попереднє очищення, первинне очищення, вторинну очистку (сортування, калібрування).

Підвищення частоти обертання ситового барабана сприяє збільшенню відцентрових сил, які притискають зернову масу до поверхні барабана. Отже, збільшується сила тертя шарів зернової суміші з поверхнею сит і між собою, що різко зменшує швидкість пошарового руху зерна і продуктивність, підвищує травмування зернових частинок, але при цьому зростає ефективність поділу. Для цього застосовують різні способи, наприклад, використовують додатковий обдув за допомогою потоку повітря, надають ситовому барабану осьові або обертальні коливання.

Зазначені способи використані в зернових вібраційно-відцентрових сепараторах.

*Вібровідцентрові зернові сепаратори.* У порівнянні з поділом зернових сумішей із застосуванням сил гравітації (в плоскорешітчастих машинах) надання робочим органам сепаратора коливальних рухів уздовж осі обертання дає можливість значною мірою збільшити продуктивність і ефективність процесу сепарування. Віброцентробіжні зерноочисні машини, в порівнянні з плоскорешітчастими, мають суттєві переваги з огляду на те, що:

- вібрація робочих органів дає змогу знизити сили тертя і зчеплення між зерновими частинками. Це збільшує їх рухливість (зернова маса починає вести себе як рідина) і дозволяє підвищити ступінь просівання зернових частинок через отвори решета;

- вібрація сприяє більш якісному процесу перерозподілу зернової суміші в шарі і по поверхні решета, що значно збільшує ефективність сепарування;

- коливання робочого органа з певними значеннями амплітуди і частоти спільно з обертотворним рухом сприяє підвищенню ефективності сепарування, що є актуальним при сепаруванні важкорозподільних сумішей.

Лінійний асинхронний двигун дає можливість відмовитися від перетворення виду руху, при перетворенні електричної енергії в поступальний рух другорядного елемента. Серед технічної різноманітності лінійних електродвигунів особливий інтерес викликає плоский лінійний асинхронний трифазний двигун, представлений на (рисунку 5).

Лінійний асинхронний двигун (ЛАД) має досить просту конструкцію, дешевий у виготовленні і володіє широким розмаїттям конструктивних рішень. ЛАД значно дешевший за електродвигуни постійного струму й при цьому його надійність більша в три рази. В якості ротора (другорядного елемента) використано ЛАД робочого органа технологічної машини, при цьому його форма може мати різні варіації. При цьому тягове зусилля, індуктором, становить для малих ЛАД в межах 0,3 Н/см<sup>2</sup>, для середніх, і великих ЛАД до 0,6 Н/см<sup>2</sup> [1; 3].

Отримання поступального руху робочого органа технологічного обладнання призводить до необхідності застосування в схемах лінійного електроприводу режиму противмикання, що веде до великих

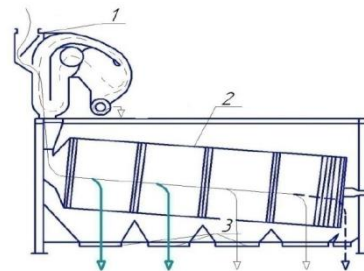


Рис. 4. Технологічна схема віброцентрового зернового сепаратора «Промінь»: 1 - приймальний патрубок, 2 - ситовий барабан, 3 - випускні патрубки

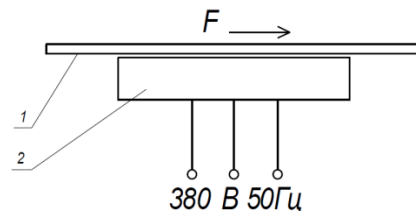


Рис. 5. Плоский односторонній ЛАД: 1 – другорядний елемент (ротор); 2 – індуктор (статор)

втрат і є енергетично доцільним, якщо технологічний процес вимагає додаткового нагріву робочого органа.

Отже, для більшої енергетичної ефективності приводу коливального руху на базі лінійного електродвигуна його потрібно спростити. Найбільш енергетично і економічно ефективним способом спрощення, є застосування накопичувачів енергії. Таке технічне рішення дає можливість виробляти повернення робочого органа машини в початковий стан за допомогою збереженої енергії пружних елементів і дозволяє знизити споживання енергії з мережі [3].

Найбільш ефективними накопичувачами є різного роду пружні елементи, з яких переважно циліндричні гвинтові пружини. Вони дешеві у використанні прості у виготовленні, в налаштуванні і в установці, мають високі експлуатаційні характеристики [6].

Також, вибираючи в якості приводу вібраційного руху плоский ЛАД, варто враховувати, що двигун має великий немагнітний зазор, що позитивно позначається на роботі двигуна, підвищуючи його надійність при роботі в режимі частих пусків, знижуючи пусковий струм [1].

З урахуванням вищесказаного, можна зробити висновок, що перспективним напрямком вдосконалення і підвищення техніко-економічних показників ЛАД вібраційного приводу є застосування ЛАД. Це дасть можливість забезпечити конструктивно-технологічну простоту приводу, дозволить збільшення довговічності машини і значно скоротити експлуатаційні витрати. Дасть можливість легко здійснювати пуск також під навантаженням плавно регулювати амплітуду коливання робочого органа шляхом імпульсного управління.

*Дослідження приводних характеристик вібровідцентрового сепаратора з лінійним асинхронним електроприводом.*

Проектування коливальних приводів робочого органа вібровідцентрового сепаратора (ВЦС) у вертикальній площині на базі плоского ЛАД повинне бути функціональним і раціональним, тобто має забезпечити певний закон коливань для виконання технологічного процесу і збереження якості сепарування зернової суміші, повинна мати високу енергетичну ефективність, мінімальні витрати та монтаж, витрати на технічне обслуговування і капітальний ремонт [6].

Вибір раціонального електроприводу здійснюється за основними приводними характеристиками робочої машини: технологічної, кінематичної, механічної, амплітудно-частотної, навантажувальної та енергетичної [12].

Аналіз дослідження приводних характеристик ВЦС на базі плоского ЛАД здійснювали за допомогою математичної моделі, описаної в [12], при наданих параметрах схеми заміщення плоского ЛАД:  $R_1 = 4,08 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = 0,145 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = 0,9 \text{ Ом}$ ,  $X / m = 4,7 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 5,0 \text{ Ом}$ , полюсне ділення  $\tau = 0,036 \text{ м}$ ,  $V_0 = 3,6 \text{ м/с}$ . Модель [6] була розвинена і доповнена з урахуванням нового технічного рішення [8].

Першочергово, при математичному дослідженні ВЦС з плоским ЛАД головне значення мали приводні характеристики, при моделюванні було прийнято допущення і розглянута спрощена модель руху зернової суміші.

*Механічні характеристики.* Основою коливального приводу є лінійний асинхронний електродвигун, механічна характеристика якого залежить від тягового зусилля та швидкості робочої машини. Дана характеристика необхідна для аналізу перехідних процесів і дозволяє визначити можливості пуску електроприводу і його стійкої роботи, а також для подальшої побудови навантажувальної діаграми приводу [6].

Переймаючись різними значеннями фазної напруги  $U_\phi$  шляхом математичного моделювання з використанням графічного побудовувача ХУ Graph [10], була отримана механічна характеристика ЛАД, яка представлена на рисунку 6.

Як видно з рисунку 6 при зниженні напруги швидкість ідеального холостого ходу залишається постійною, а максимальне тягове зусилля двигуна зменшується приблизно пропорційно квадрата зниження напруги.

Навантажувальна характеристика (діаграма) коливального приводу ВЦС, визначається технологічною характеристикою, яка була розглянута в [6]. Характеристика дає можливість визначити режим роботи електродвигуна в коливальному приводі і являє собою залежність зусилля робочої машини від часу [6].

Як видно з навантажувальної діаграми, представленої на рисунках 7, 8, 9, навантаження на двигун змінне, з миттєвим наростанням сил та опорів. Вище наведена залежність при математичному моделюванні отримана при частоті коливань робочого органа рівного 10 Гц, для спрощених моделей руху зернової суміші, тобто для насіннєвого зерна розглянута одношарова модель, для зернового кагату двошарова, для зернового кагату тришарова [10].

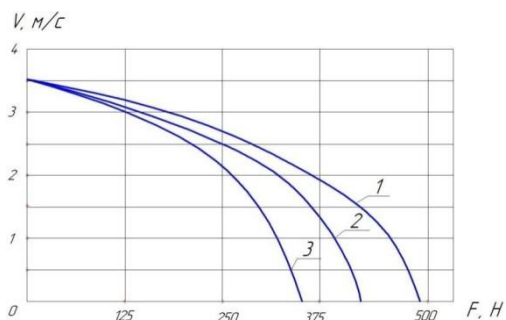


Рис. 6. Механічна характеристика плоского ЛАД при різних значеннях фазної напруги:  
1 -  $U_\phi = 220 \text{ В}$ , 2 -  $U_\phi = 210 \text{ В}$ , 3 -  $U_\phi = 190 \text{ В}$

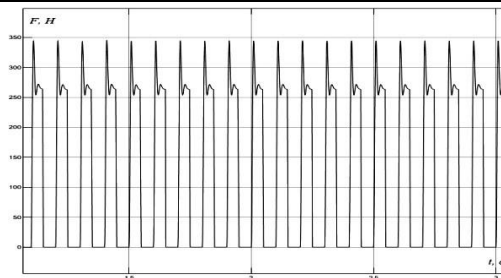


Рис. 7. Залежність сили розвивається плоским ЛАД від часу при обробці насіннєвого зерна

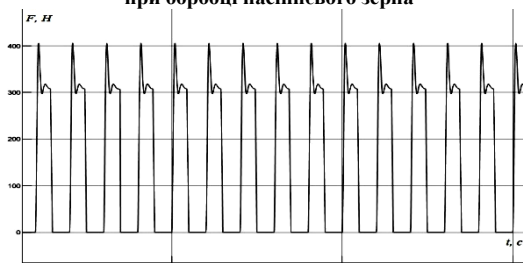


Рис. 8. Залежність сили розвивається плоским ЛАД від часу при обробці продовольчого зерна

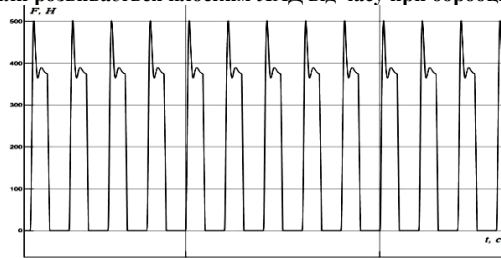


Рис. 9. Залежність сили розвивається плоским ЛАД від часу при обробці зернової крупи

На підставі отриманих характеристик робимо висновок, що плоский ЛАД у коливальному приводі працює в режимі S1, зі змінним навантаженням.

*Аналіз впливу конструктивних і режимних параметрів коливального приводу на амплітудно-частотні характеристики.* Оптимальний кінематичний режим сепарації насіння конкретної зернової культури має своє певне поєднання узгоджених один з одним значень частоти і амплітуди коливань робочого органа [3]. Визначення амплітудно-частотних характеристик залежно від конструктивних і режимних параметрів приводу є важливим дослідницьким завданням, так як отримані залежності можуть бути використані при проектуванні конкретних конструкцій.

Дослідження амплітудно-частотних характеристик та математичної моделі [6] отримано при наступних параметрах: жорсткість пружних елементів  $z = 4000 \dots 6000$  Н/м; маса робочого органа  $m_1 = 15$  кг; маса зернової суміші  $m_2 = 1,5 \dots 8,0$  кг.

Для якісного поділу насіння при зміні виду сільськогосподарської культури і її параметрів потрібно регулювати амплітуду коливань  $\omega_{\text{кол}}$  робочого органа ВЦС. Ефективним способом регулювання цих параметрів є зміна жорсткості пружних елементів, частоти і тривалості включення плоского ЛАД до джерела живлення [6].

Частота коливань робочого органа  $\omega_{\text{кол}}$  дорівнює частоті включення індукторів плоского ЛАД  $\omega_{\text{вкл}}$ , а амплітуда визначається частотою і тривалістю включення плоского ЛАД, з урахуванням жорсткості з пружних елементів і маси коливальної системи  $M = m_1 + m_2$ .

На рисунку 10 а представлена залежність амплітуди коливань робочого органа від тривалості увімкнення плоского ЛАД до мережі. Як видно з рис. 10 а в проміжку тривалості увімкнення плоского ЛАД від 10 до 50% амплітуда коливань робочого органа зростає, та досягає свого максимального значення, потім починає спадати. Робота ВЦС в режимі вимушених коливань дозволяє залежно від параметрів оброблюваної зернової суміші, регулювання параметрів коливань робочого органа в потрібних межах.

Однак варто враховувати, що енергоефективний режим роботи коливального приводу при імпульсному управлінні буде здійснюватися при тривалості увімкнення ЛАД не більше 50% від періоду коливань (рисунк 10 б). Це пов'язано з тим, що при збільшенні тривалості увімкнення понад 50%, робочий орган не буде повертатися в початковий стан, і електродвигун в приводі буде працювати в режимі противмикання.

На рисунку 11 представлені розрахункові амплітудно-частотні характеристики ВЦС з плоским ЛАД при різній жорсткості пружних елементів. Тривалість увімкнення плоского ЛАД становить 50% від часу коливань, частота увімкнення 10 Гц.



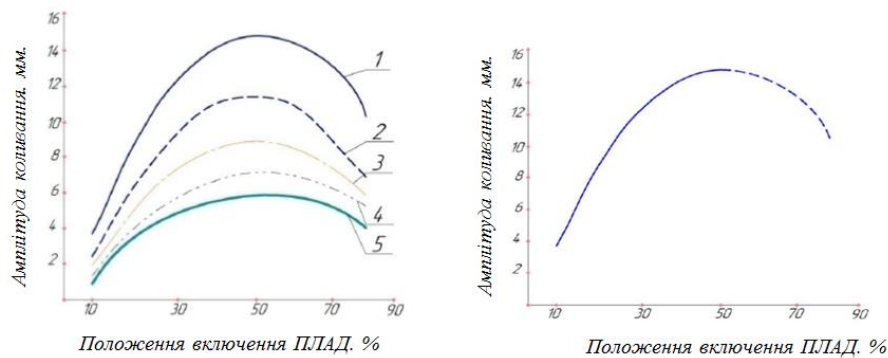


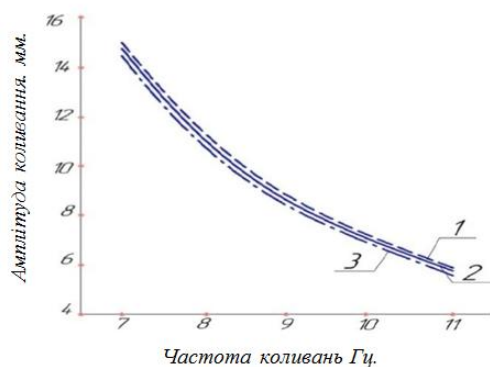
Рис. 10. Залежність амплітуди коливань

Робочі органи від тривалості увімкнення плоского ЛАД:

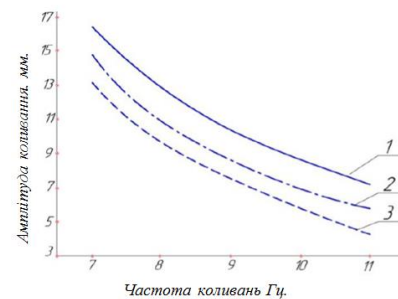
1 – при  $\omega_{\text{кол}} = 7$  Гц, 2 – при  $\omega_{\text{кол}} = 8$  Гц, 3 – при  $\omega_{\text{кол}} = 9$  Гц, 4 – при  $\omega_{\text{кол}} = 10$  Гц, 5 – при  $\omega_{\text{кол}} = 11$  Гц

Як видно з рисунків 10 і 11 зміна жорсткості пружних елементів спільно з імпульсним керуванням плоским ЛАД дають можливість за рахунок частоти і тривалості включення ЛАД регулювати параметри коливання робочого органа в потрібних межах для забезпечення якості сепарації зерна [9].

Параметри коливань робочого органа а, отже, електроприводу, в свою чергу залежать від маси коливальної системи [10]. На рисунку 12 представлені графіки амплітудно-частотних характеристик ВЦС при зміні маси зернової суміші на решетах. Маса робочого органа складає  $m_1 = 15$  кг, маса зернової суміші  $m_2$  коливається від 4 до 6 кг.

Рис. 12. Амплітудно-частотні характеристики ВЦС залежно від маси коливальної системи: 1 -  $m = 19$  кг, 2 -  $m = 20$  кг, 3 -  $m = 21$  кг

Як видно з рисунку 12, збільшення або зменшення маси коливальної системи на 10% не має значного впливу на амплітудно-частотну характеристику ВЦС. Це дає можливість зробити висновок про те, що змінюється навантаження при роботі приводу в режимі вимушених коливань, що не призводить до порушення закону коливань робочого органа і забезпечить якість технологічного процесу.

Рис. 11. Амплітудно-частотні характеристики ВЦС залежно від жорсткості пружного елемента: 1 - при  $c = 6000$  Н/м, 2 - при  $c = 5000$  Н/м, 3 - при  $c = 4000$  Н/м

Так як коливальний привід працює в режимі вимушених коливань, тобто частота коливань задається за допомогою блоку управління [3], особливий інтерес викликає тривалість перехідних процесів, тобто час від пуску установки до усталеного режиму роботи. За допомогою математичної моделі, задавшись наступними параметрами:  $c = 5000$  Н/м, частота коливань робочого органа – 10 Гц, тривалість увімкнення плоского ЛАД – 50%, маса коливальної системи 20 кг, вийшла наступна залежність, що дозволяє оцінити час перехідних процесів (рисунок 13).

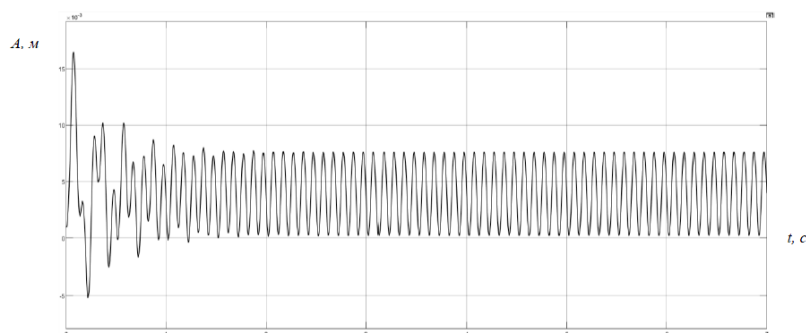


Рис. 13. Залежність амплітудно-частотної характеристики від часу

Як видно з даного рисунка, час перехідного процесу складає 2 секунди. З огляду на той факт, що при експериментальному дослідженні режим роботи установки вважали сталим через 20 секунд після початку її роботи, можна вважати, що перехідні процеси не будуть впливати на якість

сепарування.

Одним з вирішальних впливів на рух зернового матеріалу по поверхні решіт є максимальне прискорення коливального руху робочого органа [4], яке визначає швидкість, режими і характер руху зернового матеріалу. Якщо шар зернової суміші на решітці невеликий, незначна товщина відокремлюваних часток, то для їх надійного просіювання досить змусити решето пришвидшитися до  $25 \text{ м/с}^2$ . Однак при значній товщині шару необхідно змусити решето пришвидшуватися до  $30 \text{ м/с}^2$ , щоб дрібні частинки проникли через шар і досягли отворів решета. При перевищенні значення прискорення понад  $30 \text{ м/с}^2$  відбувається процес «віброкипіння» зернової суміші, що призводить до порушення виробничого процесу, зниження ймовірності западання частинок зернової суміші в отвори решіт і значного зниження ефективності поділу.

На рисунку 14 представлена залежність прискорення робочого органа ВЦС від амплітуди коливань робочого органа при його русі робочого органу вниз і вгору. Маса коливань системи при моделюванні становила  $M = 20 \text{ кг}$ , жорсткість пружного елемента  $z = 6000 \text{ Н/м}$ , тривалість увімкнення плоского ЛАД – 50% від періоду коливань.

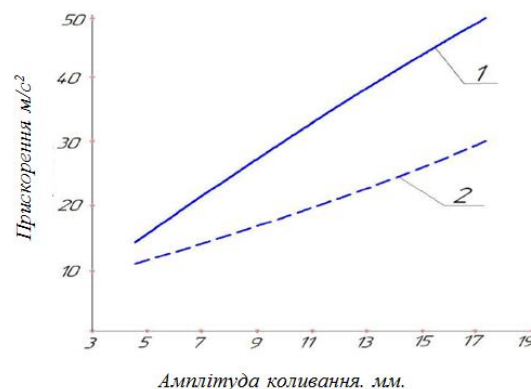


Рис. 14. Залежність прискорення робочого органа ВЦС від амплітуди коливань при русі робочого органа: 1 - вниз, 2 – вгору

Як видно з графіка, при збільшенні амплітуди коливань робочого органа збільшується його прискорення. Причому, значення прискорення робочого органа при русі вгору значно вище, ніж при русі вниз. Це обумовлено застосуванням у підвісці вібраційного приводу пружних елементів, які, у свою чергу, забезпечують плавний рух зернової суміші вниз по обертанні робочого органа.

*Енергетичні характеристики і продуктивність.* Аналіз енергетичної характеристики дає можливість оцінки загальної та питомої витрати електричної енергії, споживаної коливальним приводом для забезпечення технологічного процесу [8].

Частота увімкнення ЛАД у коливальному приводі ВЦС знаходиться в інтервалі 5-11 Гц, тому з'являється можливість проаналізувати один з енергетичних параметрів, наприклад, струм індуктора ЛАД і простежити його взаємозв'язок з технологічними параметрами машини. В якості технологічного параметра можна розглянути амплітудно-частотну характеристику. У сталому режимі, при змодельованому імпульсному управлінні плоским ЛАД із середнім значенням немагнітного зазору, що дорівнює 3 міліметрам, струм індуктора представлений на рисунку 15.

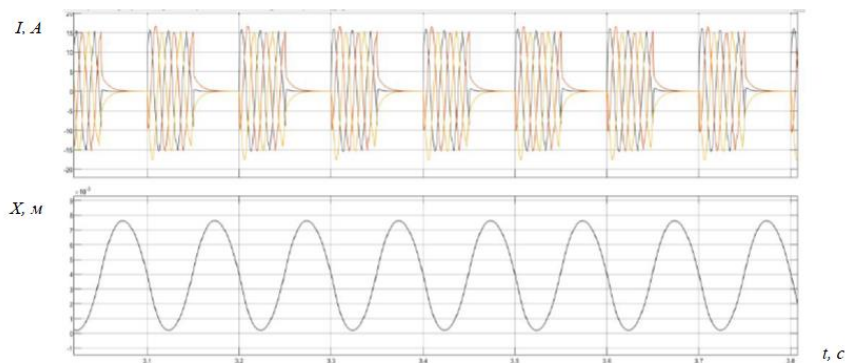


Рис. 15. Тимчасові залежності фазного струму індуктора ЛАД і траєкторії переміщення робочого органа в процесі роботи

Як видно з рисунка, зміна фазного струму в імпульсному режимі в момент пуску не перевищує 12% від сталого значення, при цьому тривалість протікання струму становить 0,1 с.

Важливим в сепарації зерна є якість поділу зернової суміші, для забезпечення якого необхідно

обґрунтувати параметри електроприводу, і визначити продуктивність установки. На рисунку 14 представлено розподілення зернової суміші на решеті.

Зернова суміш подається розкидачами на внутрішню поверхню приймальної ділянки решета у верхній його частині, утворюючи кільцевий шар (рис. 16, а), і під дією сили тяжіння  $F_m$  і коливань суміш рухається зверху вниз. Вільна поверхня шару суміші утворює циліндричну поверхню радіусом  $R_0$  [9].

Для визначення продуктивності  $Q$  ВЦС зерна [11] був використаний спрощений варіант моделі, в якій кільцевий шар змінної в'язкості розділяється на два однорідних кільцевих шари (рисунок 16, б) з різними коефіцієнтами динамічної в'язкості  $\mu$ .

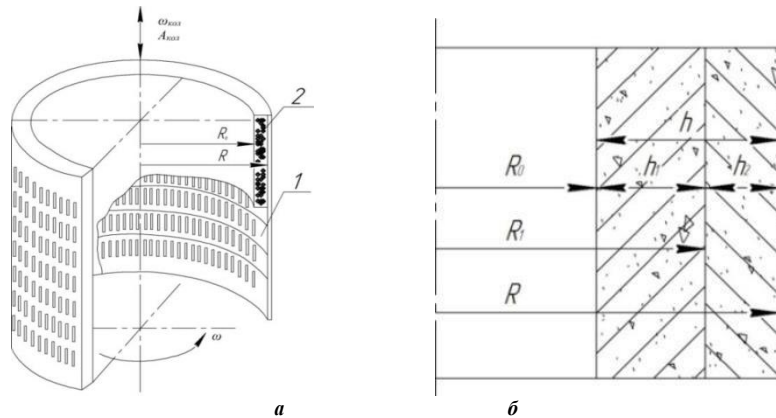


Рис. 16. Розподіл зернової суміші на решеті:  
а - схема циліндричного решета; б - розподіл зернової суміші на поверхні циліндричного решета:  
1 – решето, 2 – шар зерна

На рисунку 17 представлена залежність сили, яка розвивається плоским ЛАД від продуктивності ВЦС при різній товщині зернового шару на решетах. Товщина зернового шару визначається видом зернової суміші. При отриманні розрахункової залежності прийняті за базові величини: щільність зернової суміші –  $730 \text{ кг/м}^3$  (параметри зерна пшениці з вологістю 16%); номінальна кутова швидкість робочого органа складає  $\omega = 11,5 \text{ рад/с}$  (110 об/хв); жорсткість пружних елементів  $c = 5000 \text{ Н/м}$ ; тривалість увімкнення ЛАД становить 50%, частота коливань робочого органа – 10 Гц, модель руху зернової суміші спрощена, тобто для насінневого зерна розглянута одношарова модель, для продовольчого двошарова, для зернового порошку тришарова [12].

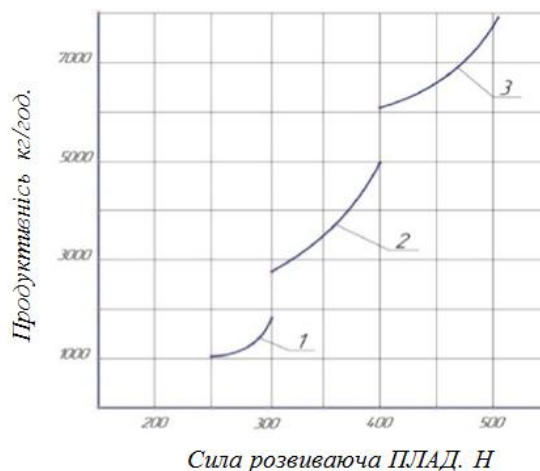


Рис. 16. Залежність продуктивності ВЦС від сили ЛАД:  
1 - насіннєве зерно, 2 - продовольче зерно, 3 - попереднє очищення (зернового кагату)

Для оцінки енергетичних показників коливального електроприводу ВЦС отримана розрахункова залежність продуктивності ВЦС від потужності плоского ЛАД (рисунок 17).

Залежність отримана при тривалості увімкнення плоского ЛАД – 50% від часу коливань. Як видно з графіка, потужність ЛАД для продуктивності 6000 кг/год становить 2,8 кВт/год, що на 28% менше, ніж по споживанню існуючої установки ВЦС при тій же продуктивності, додаткові 22% витрачаються на здійснення стиснення пружних елементів.

Таким чином, аналіз математичної моделі дозволяє на етапі проектування ВЦС плоским ЛАД вибрати найбільш раціональні конструктивні і режимні параметри роботи коливального приводу.



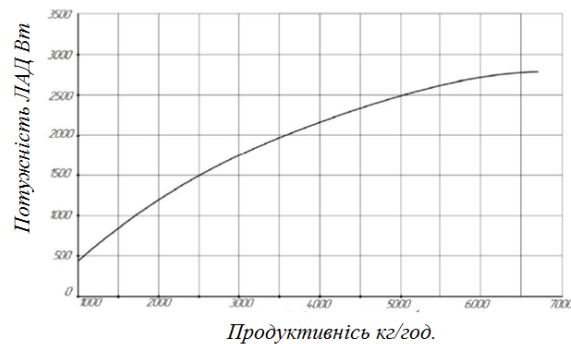


Рис. 17. Розрахункова залежність продуктивності ВЦС від потужності ЛАД

### Висновки та пропозиції

1. Проведено аналіз основних зерноочисних машин, які застосовуються на підприємствах, здійснюють переробку зернових сумішей (плоскорешетні, відцентрові і віброцентробіжні зерноочисні сепаратори). Виявлено, що віброцентробіжні сепаратори за своїми технологічними показниками є найбільш ефективними для очищення зернових сумішей.

2. Зроблено аналіз можливих приводів коливального руху для зерноочисних установок, з якого видно, що перспективним напрямом розвитку електроприводу коливального руху є створення електротромеханічних систем на базі лінійних асинхронних двигунів, відмінними особливостями яких є використання в якості ротора робочого органу машини. В даному випадку ККД електродвигуна приводу, є таким, що не виконується в інших приводах.

Разом з тим коливальний рух робочого органу у вертикальній площині на базі ЛАД з визначенням приводних характеристик і технологічних параметрів приводу недостатньо досліджені, що стримує подальший розвиток даного напрямку. У зв'язку з цим, дослідження основних характеристик з визначенням параметрів приводу робочого органу у вертикальній площині на базі плоского ЛАД є актуальним для підвищення ефективності ВЦС.

3. Проведено аналіз приводних характеристик ВЦС з лінійним електроприводом за допомогою математичної моделі середовищі об'єктно-візуального моделювання Matlab (Simulink).

### Література

1. Калетнік Г. М., Олійнічук С. Т., Скорук О. П. Альтернативна енергетика України. Особливості функціонування і перспективи розвиток. Вінниця : "Едельвейс", 2012. 256 с.
2. Возняк О.М., Штуць А.А., Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика частина 1 : навч. посіб. Вінниця : ТОВ "ТВОРИ", 2021. 280 с.
3. Семенов В.А. Процесс сепарирования в центробежном сепараторе с пульсирующим изменением скорости : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.18.12. Краснодар, 2012. 24 с.
4. Халилов Б.Р. Виброцентробежная зерноочистительная машина с линейным электроприводом. Инновации в агрохимии, ветеринарии, сельском хозяйстве и экологии : сборник материалов Международного конкурса научных работ студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 74.
5. Видмиш А.А., Ярошенко Л.В. Основы электропривода. Теорія та практика. Частина 1 : навч. посіб. Вінниця : ТОВ "ТВОРИ", 2020, 390 с.
6. Матвійчук В.А., Стаднік М.І., Рубаненко О.О. Электропривод виробничих машин і механізмів : навчальний посібник з виконання курсової роботи для спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Вінниця : ВНАУ, 2016. 92 с.
7. Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А., Колісник М.А. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика : навч. посіб. Вінниця : ТОВ "ТВОРИ", 2020. 332 с.
8. Возняк О.М., Штуць А.А., Замрій М.А. Розробка мікропроцесорного контролера для вимірювання лінійного переміщення рухомих органів виконавчих механізмів вібраційних машин. Вібрації в техніці та технологіях. 2020. № 2(101). С. 71–84.
9. Возняк О.М., Штуць А.А. Дослідження системи контролю температури природного газу. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № 3 (110). С. 34–50.
10. пат. 123617 Україна Вибросито для очищення бурового розчину з регульованими параметрами коливань : МПК E21B 21/06, B65G 27/02, B65G 27/32, B06B 1/16, B01D 21/28. № а 2019 11373 / Ярошенко Л.В., Штуць А.А., Колісник М.А. – заяв. 22.19.2019 ; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 17.
11. Возняк О.М., Штуць А.А., Замрій М.А. Система управління колекторним двигуном Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2021. № 1(112). С. 100 –112.
12. Видмиш А.А., Штуць А.А. Поліпшення характеристик перетворювача електропривода в перехідних режимах. Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження. 2019. № 23. С. 61–69.

13. Солоня О.В. Статика взаємодії абсолютно твердих тіл із сипучим середовищем. Вібрації у техніці та технологіях. 2018. № 3 (90). С. 105–116.
14. Спірін А.В., Цуркан О.В. Оцінка на конкурентоздатність вібраційного змішувача. Вібрації у техніці та технологіях. 2004. № 2(34). С. 70–72.
15. Цуркан О.В. Розробка та дослідження енергоощадного вібраційного змішувача для внесення преміксів в комбікорми. Харків. 2004. С. 192–205.
16. Видмиш А.А. Синхронізовані асинхронні двигуни з фазним ротором для енергозберігаючих технологій в агропромисловому комплексі. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2019. № 1 (104). С. 84–88.
17. Видмиш А.А., Штутц А.А., Колісник М.А. Багатофункціональне використання асинхронних двигунів з фазним ротором. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2021. № 1 (293). С. 104–113.
18. Видмиш А.А., Штутц А.А. Дослідження динамічних характеристик замкненої системи електропривода гравітаційного бетонозмішувача шляхом комп'ютерного моделювання. Вісник ХНУ. Серія: Технічні науки. 2021. № 1 (293). С. 113–125.

#### References

1. Kaletnik H. M., Oliinichuk S. T., Skoruk O. P. Alternatyvna enerhetyka Ukrainy. Osoblyvosti funktsionuvannya i perspektyvy rozvytok. Vinnytsia : "Edelveis", 2012. 256 s.
2. Vozniak O.M., Shtuts A.A., Kolisnyk M.A. Suchasni systemy elektropyvodiv. Teoriia ta praktyka chastyna 1 : navch. posib. Vinnytsia : TOV "TVORY", 2021. 280 s.
3. Semenov V.A. Process separirovaniya v centrobeznom separatore s pulsiruyushim izmeneniyem skorosti : avtoref. dis. kand. tehn. nauk : 05.18.12. Krasnodar, 2012. 24 s.
4. Halilov B.R. Vibrocentrobezhnaya zernoochistitelnaya mashina s lineynym elektropyvodom. Innovatsii v agrohimii, veterinarii, sel'skomu khozyaystvu i ekologii : sbornik materialov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh rabot studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. 2016. S. 74.
5. Vydmysh A.A., Yaroshenko L.V. Osnovy elektropyvoda. Teoriia ta praktyka. Chastyna 1 : navch. posib. Vinnytsia : TOV "TVORY", 2020. 390 s.
6. Matviichuk V.A., Stadnik M.I., Rubanenko O. O. Elektropyvod vyrobnychkh mashyn i mekhanizmiv : navchalnyi posibnyk z vykonannya kursovoi roboty dlia spetsialnistiv 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika». Vinnytsia : VNAU, 2016. 92 s.
7. Stadnik M.I., Vydmysh A.A., Shtuts A.A., Kolisnyk M.A. Intelktualni systemy v elektroenerhetytsi. Teoriia ta praktyka : navch. posib. Vinnytsia : TOV "TVORY", 2020. 332 s.
8. Vozniak O.M., Shtuts A.A., Zamrii M.A. Rozrobka mikroprotsesorного контролера dlia vymiriuvannya liniinogo peremishchennia rukhomykh orhaniv vykonavchykh mekhanizmiv vibratsiinykh mashyn. Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. 2020. № 2(101). S. 71–84.
9. Vozniak O.M., Shtuts A.A. Doslidzhennia systemy kontroliu temperatury pryrodnoho hazu. Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2020. № 3 (110). S. 34–50.
10. pat. 123617 Ukraina Vibrosyto dlia ochyshchennia burovoho rozchynu z reholovanykh parametramy kolyvan : MPK E21B 21/06, B65G 27/02, B65G 27/32, B06B 1/16, B01D 21/28. № a 2019 11373 / Yaroshenko L.V., Shtuts A.A., Kolisnyk M.A. – zaiv. 22.19.2019 ; opubl. 25.05.2020, Biul. № 17.
11. Vozniak O.M., Shtuts A.A., Zamrii M.A. Systema upravlinnia kolektornym dvyhunom Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2021. № 1(112). S. 100–112.
12. Vydmysh A.A., Shtuts A.A. Polipshchennia kharakterystyk peretvoriuvacha elektropyvoda v perekhidnykh rezhymakh. Visnyk Lvivskoho natsionalnogo ahroimnogo universytetu. Ahroinzhenerni doslidzhennia. 2019. № 23. S. 61–69.
13. Solon O.V. Statyka vzaiemodii absoliutno tverdikh til iz sypuchym seredovyschem. Vibratsii u tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. 2018. № 3 (90). S. 105–116.
14. Spirin A.V., Tsurkan O.V. Otsinka na konkurentozdatnist vibratsiynogo zmishuvacha. Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. 2004. № 2(34). S. 70–72.
15. Tsurkan O.V. Rozrobka ta doslidzhennia enerhooschadnoho vibratsiynogo zmishuvacha dlia vnesennia premiksiv v kombikormy. Kharkiv. 2004. S. 192–205.
16. Vydmysh A.A. Synkhronizovani asynkhronni dvyhuny z faznym rotorom dlia enerhozberihaiuchykh tekhnolohii v ahropromyslovomu kompleksi. Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2019. № 1 (104). С. 84–88.
17. Vydmysh A.A., Shtuts A.A., Kolisnyk M.A. (30%)Bahatofunktsionalne vykorystannia asynkhronnykh dvyhuniv z faznym rotorom Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. 2021. № 1 (293). S. 104–113.
18. Vydmysh A.A., Shtuts A.A. Doslidzhennia dynamichnykh kharakterystyk zamkненоi systemy elektropyvoda hravitatsiynogo betonozmishuvacha shliakhom kompiuternoho modeliuвання. Visnyk KhNU. Serii: Tekhnichni nauky. 2021. № 1 (293). S. 113–125.

Рецензія/Peer review : 18.09.2021 р.

Надрукована/Printed : 10.10.2021 р.