



**RS Global**  
Journals

**Scholarly Publisher**  
**RS Global Sp. z O.O.**  
ISNI: 0000 0004 8495 2390

Dolna 17, Warsaw, Poland 00-773  
Tel: +48 226 0 227 03  
Email: editorial\_office@rsglobal.pl

<b>JOURNAL</b>	World Science
<b>p-ISSN</b>	2413-1032
<b>e-ISSN</b>	2414-6404
<b>PUBLISHER</b>	RS Global Sp. z O.O., Poland
<b>ARTICLE TITLE</b>	СИНТЕЗ ЗАКОНУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВЕНТИЛЯТОРА ЗЕРНОКИДАЧА ДЛЯ ФОКУСУВАННЯ ЗЕРНОВОГО ПОТОКУ
<b>AUTHOR(S)</b>	Бурдільна Євгенія, Чорний Олексій, Титюк Валерій, Сергієнко Сергій
<b>ARTICLE INFO</b>	Evgeniya Burdilnaya, Oleksii Chornyi, Valerii Tytiuk, Serhiienko Serhii. (2021) Syntez Zakonu Keruvannia Elektropryvidom Ventyliatora Zernokydacha dlia Fokususvannia Zernovoho Potoku. World Science. 5(66). doi: 10.31435/rsglobal_ws/30052021/7584
<b>DOI</b>	<a href="https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30052021/7584">https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30052021/7584</a>
<b>RECEIVED</b>	03 March 2021
<b>ACCEPTED</b>	16 April 2021
<b>PUBLISHED</b>	20 April 2021
<b>LICENSE</b>	 This work is licensed under a <b>Creative Commons Attribution 4.0 International License</b> .

© The author(s) 2021. This publication is an open access article.

# СИНТЕЗ ЗАКОНУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВЕНТИЛЯТОРА ЗЕРНОКИДАЧА ДЛЯ ФОКУСУВАННЯ ЗЕРНОВОГО ПОТОКУ

**Бурдільна Євгенія**, старший викладач, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4539-9655>

**Чорний Олексій**, доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8270-3284>

**Титюк Валерій**, Доктор технічних наук, професор, ДВНЗ Криворізький технічний університет, Кривий Ріг, Україна, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1077-3288>

**Сергієнко Сергій**, кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3977-5239>

DOI: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_ws/30052021/7584](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30052021/7584)

---

## ARTICLE INFO

**Received:** 03 March 2021

**Accepted:** 16 April 2021

**Published:** 20 April 2021

## KEYWORDS

grain transportation, frequency-regulated electric drive, control law, regression model, experiment planning.

## ABSTRACT

The work considers the solution to the urgent problem of reloading grain into vehicles and reducing its damage. The possibility of throwing grain at a given range by creating an appropriate ballistic flight path by adjusting the speed of the electric drive of the belt when it is powered by a frequency converter is substantiated. The problem of reducing the focus of grain scattering by forming the flow of grain and controlling its movement not only when moving on the belt, but also after the separation of the flow and its movement in the air. Focusing of the lower layer is achieved by giving it an additional initial speed, which is provided by the air flow from the fan installed under the belt. For the frequency converter of the electric drive of the fan, in the form of a regression model, the control law which considers parameters of grain and necessary range of transportation is synthesized. Experiment planning theory was used to synthesize the control law.

---

**Citation:** Evgeniya Burdilnaya, Oleksii Chornyi, Valerii Tytiuk, Serhiienko Serhii. (2021) Syntez Zakonu Keruvannia Elektropryvidom Ventyliatora Zernokydacha dlia Fokususannia Zernovoho Potoku. *World Science*. 5(66). doi: [10.31435/rsglobal\\_ws/30052021/7584](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30052021/7584)

---

**Copyright:** © 2021 Evgeniya Burdilnaya, Oleksii Chornyi, Valerii Tytiuk, Serhiienko Serhii. This is an open-access article distributed under the terms of the **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

---

**Вступ.** Завдання агропромислового комплексу країни – забезпечення потреби населення в продовольстві, а також забезпечення обсягів сировини для експорту, від цього безпосередньо залежить як продовольча, так і економічна безпека і незалежність країни. Основа ж агропромислового комплексу – виробництво зернових культур. Забезпечення високої якості зерна на теперішньому етапі розвитку технологій сільськогосподарського виробництва неможливо без використання комплексу сільськогосподарських машин – як збиральних, так і призначених для обробки зернової купи після збирання. Однак в процесі післязбиральної обробки на зерно багаторазово впливають робочі органи сільськогосподарських машин, таких як тримери, металники, очисники і т. д. Аналізуючи схеми післязбиральної обробки зерна, що застосовується в даний час в більшості господарств, легко помітити, що найбільшу кількість операцій з післязбиральної обробки зернової купи так чи інакше пов'язано з його переміщенням, перелопачуванням або метанням, здійснюваних за допомогою спеціальних

машин – зернометальників. Однак застосовувані машини відрізняються значною кількістю недоліків, головний з яких – пошкодження оброблюваного зерна робочими органами [1].

Аналіз комерційних організацій, що пропонують зернометальну техніку на ринку України [2] показав, що найбільш поширеною пропозицією є саме зернометальники ЗМ-60У, ЗМ-90У, ЗМ-100У. Вони є надійними, максимально оптимізують робочі процеси, скорочують тимчасові, фінансові та трудові ресурси.

Проблема зменшення травмування зерна при перевантаженні й транспортуванні та способи її вирішення розглядалися багатьма вітчизняними та зарубіжними авторами [3,4]. Одним з ефективних способів є формування балістичної траєкторії за рахунок регулювання швидкістю конвейера. Задача вирішується шляхом встановлення частотно-керованого електроприводу. При цьому не використовуються будь які механічні пристрої спрямування потоку зерна (рис.1) [5].

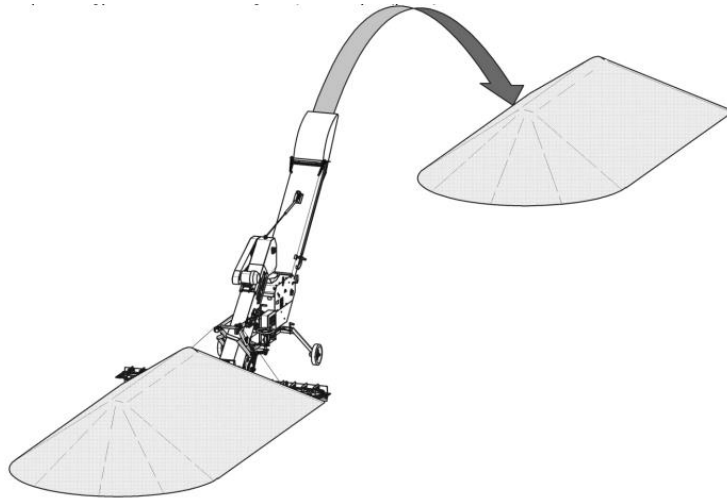


Рис. 1. Перебуртовка зернового матеріалу

Але це не дозволяє вирішити проблему широкого розльоту зерна в точці його приземлення – широкого фокусу розльоту.

Задача вирішення зменшення фокусу розльоту зерна може бути вирішена шляхом формування потоку зерна і управління його рухом не тільки при переміщенні по конвеєрній стрічці, а й після відриву потоку і руху його в повітрі.

Товщина слою зерна на конвеєрній стрічці може становити 5-10 см. Зміна стартової висоти окремих зерен, навіть на 10 см, призводить до зміни дальності їх польоту, і до появи розсіювання зерен в точці приземлення (рис.2). Тому, необхідно так підрегулювати його початкову швидкість, щоб дальність польоту залишилася однаковою:

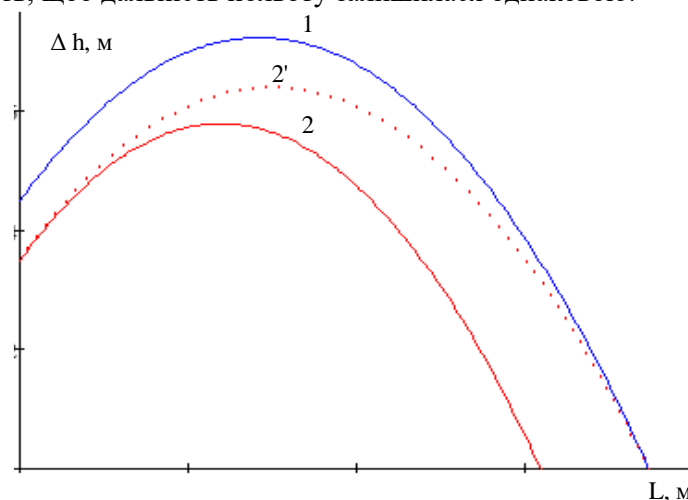


Рис. 2. Траєкторії польоту слоїв зерна:

1 – верхній слой, 2 – нижній слой, 2' – нижній слой з фокусуванням

Фокусування нижнього слою можна досягти шляхом надання йому додаткової початкової швидкості. Однак, початкова швидкість потоку зерна дорівнює швидкості

конвеєрної стрічки. Тож додаткову швидкість можна забезпечити, наприклад струменем повітря від встановленого під конвеєром вентилятора (рис.2, траєкторія 2').

**Мета дослідження** і актуальним завданням є задача синтезу закону керування електроприводом вентилятора, що забезпечує фокусування потоку зерна в точці приземлення.

В даному дослідженні було використано теорію планування експерименту для синтезу закону керування у вигляді регресійної моделі.

**Результати дослідження.** Закон керування може бути отриманий на основі умови падіння зерен в одній точці (рис.2):

$$h_1 + \operatorname{tg}(\alpha) \cdot L - \frac{gL^2}{2v_1^2 \cos^2(\alpha)} = h_2 + \operatorname{tg}(\alpha) \cdot L - \frac{gL^2}{2v_2^2 \cos^2(\alpha)}, \quad (1)$$

де  $L$  - дальність польоту верхнього слою зерна, м,  $h_1, h_2$  - висота верхнього і нижнього слою зерна, м,  $\alpha$  - кут підйому конвеєра, рад,  $v_1, v_2$  - швидкість стрічки конвеєра і струменя повітря вентилятора, відповідно, м/с.

Скорочуючи подібні отримаємо:

$$h_1 - \frac{gL^2}{2v_1^2 \cos^2(\alpha)} = h_2 - \frac{gL^2}{2v_2^2 \cos^2(\alpha)}. \quad (2)$$

Позначимо

$$\beta = \frac{gL^2}{2\cos^2(\alpha)}. \quad (3)$$

Після перетворень остаточно отримаємо:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{\beta}{\beta + v_1^2 (h_2 - h_1)} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Залежність (4) є законом керування швидкістю струменя повітря вентилятора, що забезпечує фокусування дальності польоту потоку зерна. Отриманий вираз завдання на перетворювач частоти електроприводу вентилятора, що забезпечує необхідну швидкість струменя повітря, не враховує тертя зерна об повітря, а також випадковий характер розподілу розміру та маси зернини. Тож числовий опис положення окремих зерен еліпсу розсіювання теж необхідно розглядати як систему випадкових величин. Ця система складається з таких факторів як: маса зернятка  $m$ , геометричні розміри зернятка – його еквівалентний радіус  $r_e$  та товщина слою зерна на стрічці  $\Delta h$ . Якщо перші два параметра є характеристикою зернових, що транспортуються, то товщина слою на стрічці є величиною, яку можна регулювати. Скористаємося методами теорії планування експерименту, і отримаємо рівняння для залежності швидкості струменя повітря вентилятора від параметрів зернових, що транспортуються у вигляді регресійної моделі.

Для встановлення виду плану експерименту і характеру моделі оцінимо вплив зміни варійованих факторів на розмір фокусу розсіювання зерна.

Припустимо, що метання зерна буде проведене для пшениці і кукурудзи, які вибрані з тих міркувань, що є зерновими які суттєво відрізняються за розміром і масою: пшениця розмір зерна  $(5,3 \times 3,15 \times 2,5 \text{ мм}) \pm 40\%$ , маса  $0,085 \text{ мг} \pm 40\%$  і кукурудзи відповідно  $(11,5 \times 8 \times 5,35 \text{ мм}) \pm 40\%$ , маса  $500 \text{ мг} \pm 40\%$  (див додаток) і є як би граничними для різних культур зернових. Надалі будемо оперувати еквівалентним радіусом зернини, представленим у вигляді кулі через реальний об'єм:

$$r_e = \sqrt[3]{\frac{3(h \cdot l \cdot s)}{4\pi}},$$

де  $h, l, s$  - висот, довжина і ширина зернини, мм.

При моделюванні польоту зерна використана вбудована у Matlab функція генерування випадкової послідовності з нормальним законом розподілення. Аналізуючи статистичні дані (див. додаток), прийmemo середнє квадратичне відхилення (СКВ) для радіусу зернини  $\sigma_r = 0.52$  мм, для маси  $\sigma_m = 6.3$  мг.

Перевіримо гіпотезу, що існує такий режим піддуву нижнього слою зерна, при якому розмір фокусу падіння зерна і СКВ буде зменшуватись і для них існує екстремум – деяке мінімальне значення. Для цього виконаємо ряд розрахунків шляхом моделювання, результати яких зведені до табл.1. Товщину слою зерна на стрічці конвеєра приймемо 0,05 м і будемо тримати незмінною. Додатково приймемо, що швидкість руху конвеєрної стрічки підтримується незмінною завдяки роботі системи керування перетворювачем частоти і не залежить від маси зерна на стрічці.

Таблиця 1. Усереднені параметри розльоту зерна кукурудзи з еквівалентними параметрами: радіус 7мм і маса 500мг, при швидкості руху конвеєрної стрічки 13,5 м/с

Швидкість струменя повітря, м/с	Діаметр фокусу розльоту, м	Середнє, м	СКВ	Дисперсія
13,5	5,33	18,1613	0,9046	0.897
13,55	5,8	16,9707	1,1074	1.27
<b>13,6</b>	<b>3,2</b>	<b>19,61</b>	<b>0,5405</b>	<b>0.311</b>
13,65	3,3	19,5067	0,5468	0.342
13,7	3,73	18,9646	0,6884	0.492
13,8	5,37	18,1465	0,8996	0.882

З піддувом дисперсія знижується на 65%

Таблиця 2. Усереднені параметри розльоту зерна пшениці з еквівалентними параметрами радіус 3мм і маса 85мг, при швидкості руху конвеєрної стрічки 9 м/с

Швидкість струменя повітря, м/с	Діаметр фокусу розльоту, м	Середнє, м	СКВ	Дисперсія
9	1,9	10,0725	0,295	0.09
<b>9,025</b>	<b>1,77</b>	<b>10,1215</b>	<b>0,2863</b>	<b>0.08</b>
9,05	2,6	9,5914	0,4294	0.1
9,1	2,33	9,8985	0,3445	0.13
9,2	2,03	9,9036	0,333	0.115

З піддувом дисперсія знижується на 8%

Таблиця 3. Усереднені параметри розльоту зерна кукурудзи з еквівалентними параметрами радіус 7мм і маса 500мг, при швидкості руху конвеєрної стрічки 9 м/с

Швидкість струменя повітря, м/с	Діаметр фокусу розльоту, м	Середнє, м	СКВ	Дисперсія
9	1,5	10,0536	0,258	0,071
<b>9,025</b>	<b>1,17</b>	<b>10,2428</b>	<b>0,2049</b>	<b>0,043</b>
9,05	1,9	9,8421	0,3037	0,098
9,1	1,8	9,9117	0,2931	0,097
9,2	1,43	10,0901	0,2379	0,057

Проведені попередні дослідження дозволяють стверджувати, що додатковий піддув забезпечує зменшення дисперсії, як приклад, на 8% для пшениці і 39% для кукурудзи при швидкості конвеєра 9 м/с і до 65% для кукурудзи при швидкості конвеєра 13,5 м/с. Приклад розподілу зерна у фокусі показані у вигляді гістограми на рис.3.

З рис.3 видно, що з піддувом ширина фокусу зменшується з 3,5 м до 1 м.

З отриманих результатів можна однозначно зробити висновок, що параметри зерна і швидкість струменя повітря впливають на фокус розсіювання зерна і є тими факторами, що необхідно враховувати в регресійній моделі.

Розглянемо вплив товщини слою зерна на ширину фокусу розсіювання. Дослідження проведемо для пшениці з параметрами дослідів, приведеними у табл.4. Розрахунки зведемо до табл. 5.

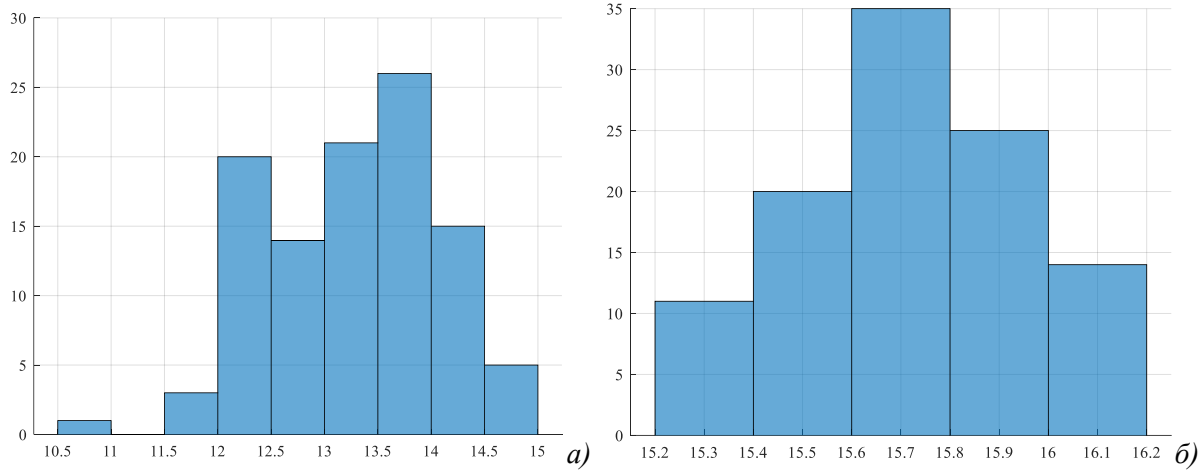


Рис. 3. Гістограми розподілу швидкості пшениці при швидкості конвеєра 11,5 м/с:  
 а) без піддува, Mean = 13.2600; StdDev = 0.8020;  
 б) з піддувом 11.6 м/с, Mean = 15.7207; StdDev = 0.2293

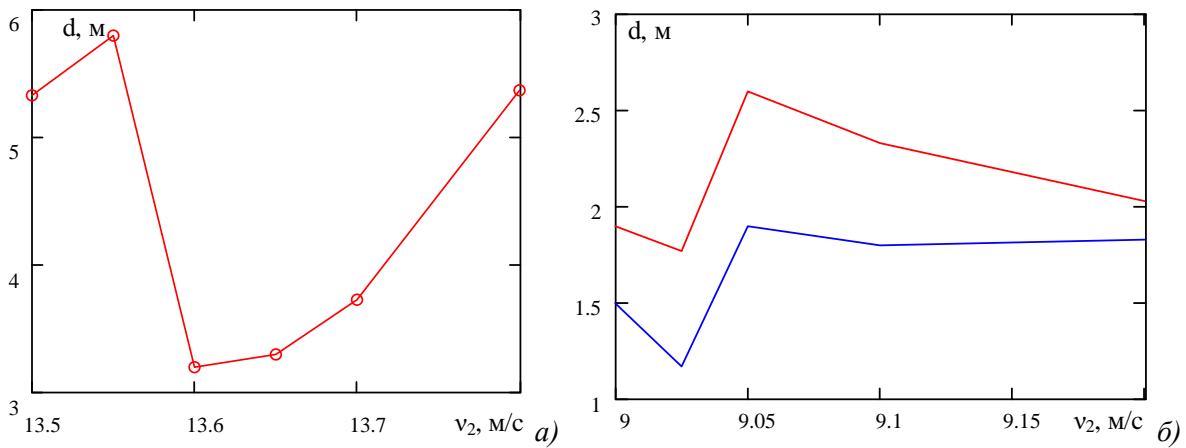


Рис. 4. Усереднені параметри фокусу розльоту зерна:  
 а) кукурудзи з еквівалентними параметрами радіус 7мм і маса 500мг, при швидкості руху конвеєрної стрічки 13,5 м/с; б) пшениці з еквівалентними параметрами радіус 3мм і маса 85мг (крива 1) і кукурудзи з еквівалентними параметрами радіус 7мм і маса 500мг (крива 2) при швидкості руху конвеєрної стрічки 9 м/с

Таблиця 4. Параметри дослідів на вплив товщини слою зерна на стрічці

Швидкість конвеєра $v_1$ , м/с		11,5
Швидкість струменя повітря $v_1$ , м/с		11,6
Параметри зерна	$m$ , кг	0,000085
	$r_e$ , м	0,003

Розрахунки проведемо для товщини слою 2, 5, 10 см. Враховуючи випадковий характер розміру і маси зерна, кожен розрахунок виконаємо 5 разів, і визначимо середнє значення.

Таблиця 5. Розрахунки ширини фокусу розсіювання зерна від товщини слою зерна на стрічці

Товщина слою зерна на стрічці, м					
0.02		0.05		0.1	
Середнє, м	СКВ	Середнє, м	СКВ	Середнє, м	СКВ
15.0335	0.3978	15.6284	0.2371	14.8172	0.4591
14.3510	0.6250	15.3308	0.3077	15.4420	0.2816
14.1707	0.6454	15.1849	0.3366	14.6649	0.4923
15.3322	0.3120	13.7617	0.7563	13.3269	0.7189
14.9945	0.4329	15.0330	0.4192	14.9293	0.4229
Середнє значення					
14.7764	0.4826	14.9878	0.4114	14.7961	0.4750

На основі виконаних розрахунків, прикладі зерна пшениці, можна зробити висновок, що товщина слою зерна, при фіксованій швидкості стрічки конвеєра, не впливає на дальність кидання зерна. Середнє значення приблизно однакове для товщини слою 2, 5, 10 см. Для доказу було проведено по п'ять повторювань підряд і розраховане середнє. При досить великій кількості повторювань різниця між середніми значеннями буде зменшуватись.

Як видно з графіків (рис.4), їх поверхня відгуку має значну кривизну, тож для їх опису використовуються плани другого порядку. У цьому випадку застосовується ортогональне центральне композиційне планування і ротатабельне планування. При цьому ротатабельне планування дозволяє отримати більш точний математичний опис у порівнянні з ортогональним центральним композиційним плануванням. Це досягається завдяки збільшенню дослідів в центрі плану та спеціальному вибору величини зоряного плеча.

Використаємо ротатабельний центральний композиційний план [6, 7]. В якості моделі використаємо поліном другого порядку виду

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i < j}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (5)$$

де  $y$  - функція цілі;  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  - коефіцієнти рівняння регресії;  $x_i, x_j, x_i^2$  - нормовані значення факторів.

Технологія проведення РЦКП дозволяє отримати підвищену точність прогнозування функції відгуку, при цьому значно знижується загальна кількість дослідів, що необхідно провести.

Таким чином, регресійну модель отримаємо шляхом проведення числового трифакторного ОРЦП з варійованими факторами: швидкість стрічки конвеєра, швидкість струменя повітря вентилятора параметри зерна: маса і геометричний розмір.

Побудуємо трифакторний РЦКП експерименту.

Таблиця 6. План трифакторного РЦКП експерименту

№ дослідів	Швидкість конвеєра $v_1$ , м/с	Швидкість струменя повітря $v_1$ , м/с	Параметри зерна	Математичне очікування (Mean), $M$	СКВ (StdDev)
	$c_1$	$c_2$	$c_3$		
1	-1	-1	-1		
2	+1	-1	-1		
3	-1	+1	-1		
4	+1	+1	-1		
5	-1	-1	+1		
6	+1	-1	+1		
7	-1	+1	+1		
8	+1	+1	+1		
9	-a	0	0		
10	+a	0	0		
11	0	-a	0		
12	0	+a	0		
13	0	0	-a		
14	0	0	+a		
15	0	0	0		
16	0	0	0		
17	0	0	0		
18	0	0	0		
19	0	0	0		
20	0	0	0		

Кодування значення параметрів в точках плану відображене в табл.7

Таблиця 7. Параметри кодування в точках плану  $m r_e$ 

Параметр	-a	-1	0	+1	+a	
Швидкість конвеєра $v_1$ , м/с	9	10,014	11,5	12,986	14	
Швидкість струменя повітря $v_1$ , м/с	0	0,041	0,1	0,159	0,2	
Параметри зерна	$m$ , кг	0,000085	0,0001695	0,0002925	0,0004155	0,0005
	$r_e$ , м	0,003	0,0038	0,005	0,0062	0,007

Значення математичного очікування  $M$  і дисперсії  $D$  за результатами експерименту показані в табл.8.

Таблиця 8. Результати виконання плану експерименту

№ досліджу	Математичне очікування, $M$	СКВ $\sigma^2$	№ досліджу	Математичне очікування, $M$	СКВ $\sigma^2$
1	12.2416	0.2511	11	15.5891	0.2825
2	18.8935	0.4156	12	15.3847	0.3663
3	12.2789	0.2469	13	15.0678	0.4108
4	18.5959	0.5333	14	14.8905	0.4444
5	12.4449	0.1749	15	15.0859	0.3958
6	18.5105	0.5210	16	14.7969	0.4928
7	11.7892	0.3528	17	15.1615	0.4009
8	15.8018	1.0644	18	15.5097	0.3004
9	10.1395	0.2420	19	15.0450	0.4391
10	19.8075	0.9820	20	15.1198	0.4058

Регресійна модель для середнього значення  $M$  переміщення зерна знайдена у вигляді поліному:

$$M = 15,122 + 2,8654c_1 - 0,303354c_2 - 0,288213c_3 - 0,0638362c_1^2 + 0,117679c_2^2 - 0,0618386c_3^2 - 0,276688c_1c_2 - 0,339537c_1c_3 - 0,366212c_2c_3 \quad (6)$$

з параметрами:

R-squared = 98,4683 percent;  
R-squared (adjusted for d.f.) = 96,9366 percent;  
Standard Error of Est. = 0,450603;  
Mean absolute error = 0,253202;  
Durbin-Watson statistic = 2,51247 (P=0,7693).

Оцінка значущості коефіцієнтів регресійної моделі виконана за критерієм Фішера і відображена картою Парето (рис.5)

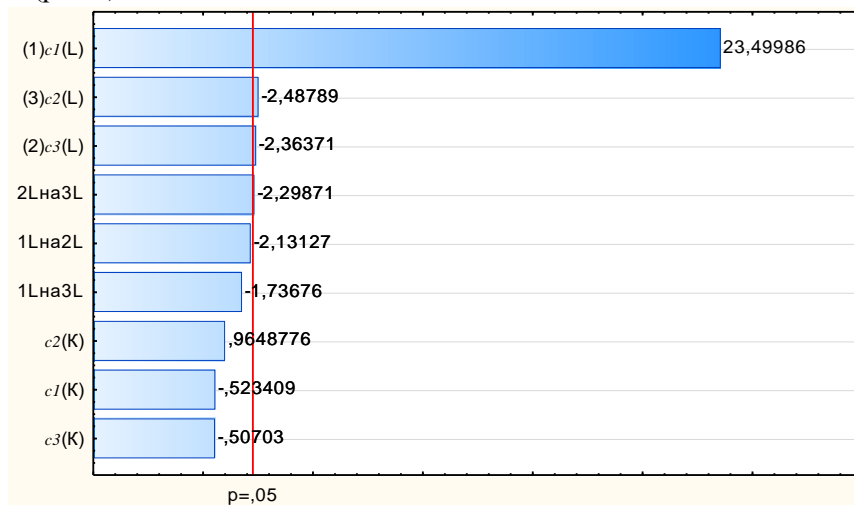


Рис. 5. Карта Парето для регресійної моделі середнього переміщення зерна



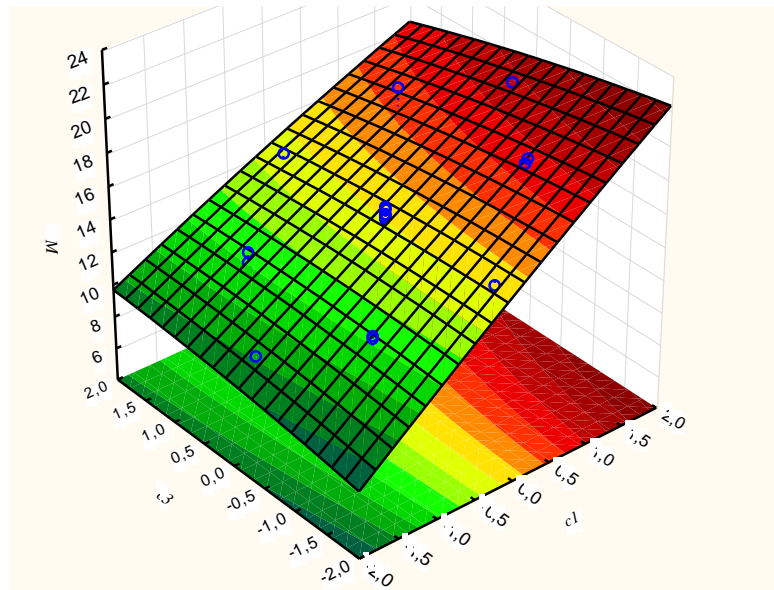


Рис. 6. Залежність середнього переміщення зерна  $M = f(v_1, v_2)$  для параметрів зерна у центрі плану

Остаточно, після вилучення незначущих коефіцієнтів модель набуде вигляду:

$$M = 15,122 + 2,8654c_1 - 0,303354c_2 - 0,288213c_3 - 0,366212c_2c_3. \quad (7)$$

Регресійна модель для СКВ  $\sigma^2$  переміщення зерна знайдена у вигляді поліному:

$$\begin{aligned} \sigma^2 = & 0,406289 + 0,201593c_1 + 0,0714466c_2 + 0,0529192c_3 + \\ & + 0,0702097c_1^2 - 0,0314726c_2^2 + 0,00501422c_3^2 + \\ & + 0,060925c_1c_2 + 0,07585c_1c_3 + 0,075975c_2c_3 \end{aligned} \quad (8)$$

з параметрами:

- R-squared = 92,6222 percent;
- R-squared (adjusted for d.f.) = 85,2444 percent;
- Standard Error of Est. = 0,0880771;
- Mean absolute error = 0,0542546.

Оцінка значущості коефіцієнтів регресійної моделі виконана за критерієм Фішера і відображена картою Парето (рис.7)

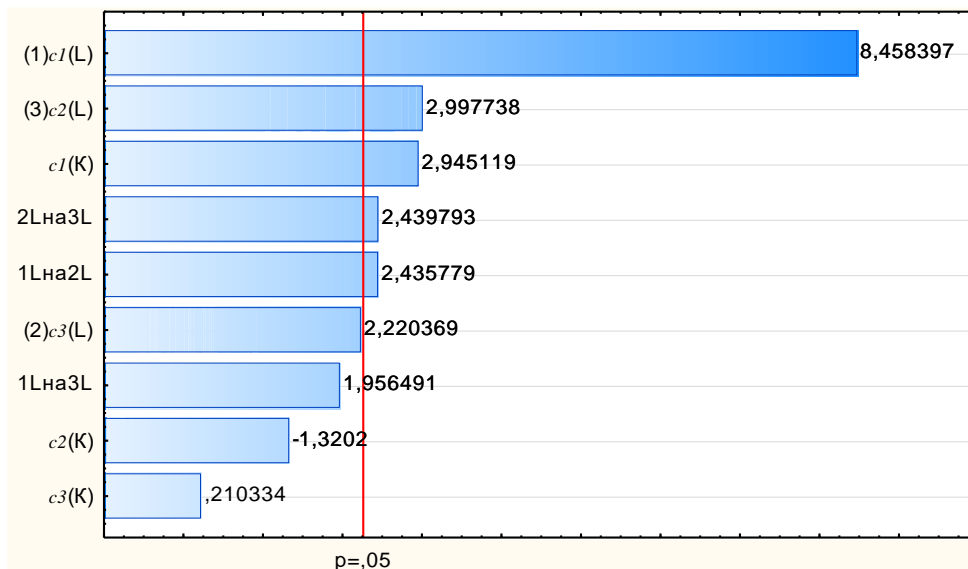


Рис. 7. Карта Парето для регресійної моделі СКВ переміщення зерна

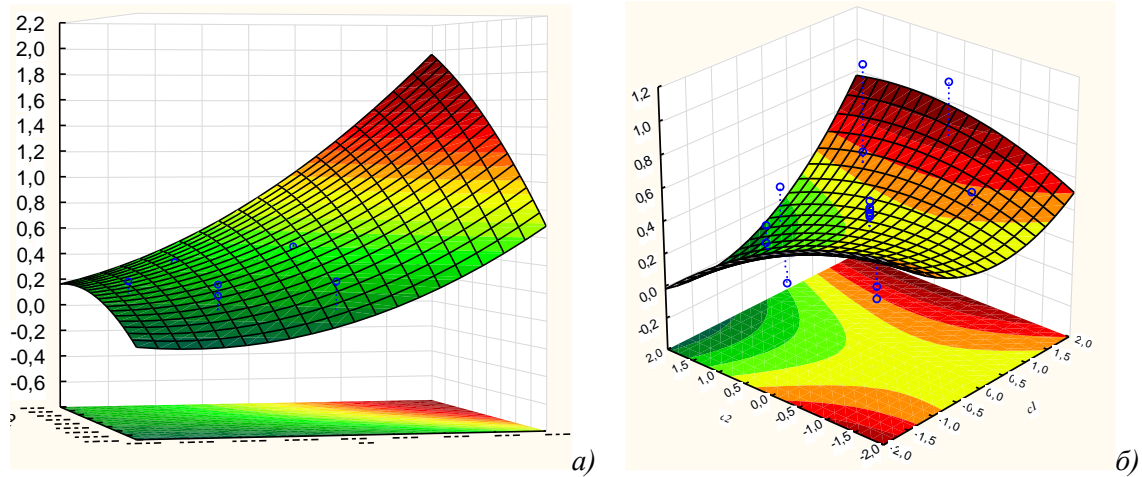


Рис.8. Залежність СКВ при переміщенні зерна:  
а) для пшениці; б) для кукурудзи

Остаточно, після вилучення незначущих коефіцієнтів модель набуде вигляду:

$$\sigma^2 = 0,406289 + 0,201593c_1 + 0,0714466c_2 + 0,0702097c_1^2 - 0,0314726c_2^2 + 0,060925c_1c_2 + 0,075975c_2c_3 \quad (9)$$

З рис. 8 і даних показаних у табл.1-3 видно, що СКВ нелінійно залежить від  $v_2$ . Для знаходження оптимальної траєкторії зміни  $v_{2,opt}$ , яка буде забезпечувати мінімум  $\sigma^2$ , про диференціюємо  $\sigma^2 = f(v_1, v_2, c_3)$  і прирівнюємо до нуля:

$$\frac{d\sigma^2}{dv_2} = 0.$$

У кодованих вхідних параметрів отримаємо

$$v_{2,opt} = 1,1351 + 0,9679v_1 + 1,207c_3, \quad (10)$$

що свідчить про лінійну залежність  $v_{2,opt}$  з швидкістю конвеєра  $v_1$  і параметрами зерна, яка забезпечує мінімум  $\sigma^2$ . Графічне відображення  $v_{2,opt} = f(v_1, c_3)$  показано на рис.9. у іменованих вхідних параметрах:

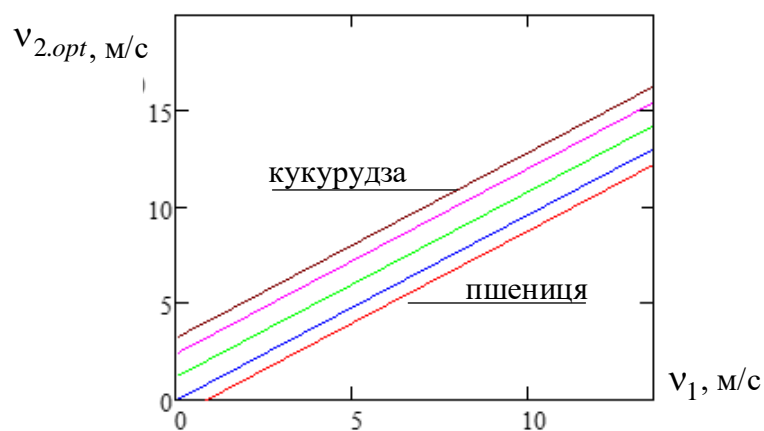


Рис. 9. Залежності  $v_{2,opt} = f(v_1, c_3)$

Таким чином, отриманий закон керування струменем повітря піддуву, в залежності від швидкості конвеєра та параметрів перевантажуваного зерна. Графічні залежності

$v_{2,opt} = f(v_1, c_3)$  дають уявлення про характер процесу, наприклад, при перевантажування пшениці немає сенсу піддувати потік зерна, якщо швидкість конвеєру менша ніж 0.92 м/с, а при перевантажування кукурудзи початкова швидкість струменя повітря повинна складати 3,25 м/с.

Враховуючи, що керуючим завданням від системи управління є не швидкість конвеєра, а дальність транспортування зерна, змінимо рівняння (10) з урахуванням (4). Вирішуючи (4) відносно  $v_1$  отримаємо:

$$v_1 = L \sqrt{\frac{g}{2h \cos^2(\alpha) + L \sin(2\alpha)}}. \quad (11)$$

Тоді рівняння закону керування буде мати вигляд:

$$v_{2,opt} = 1,1351 + 0,9679L \sqrt{\frac{g}{2h \cos^2(\alpha) + L \sin(2\alpha)}} + 1,207c_3,$$

де  $c_3$  - функція, що залежить від еквівалентних параметрів зерна:

$$c_3 = a_0 + a_{11}r_e + a_{21}m_e + a_{12}r_e^2 + a_{22}m_e^2.$$

**Висновки.** Розв'язання актуальної задачі перевантаження зерна у транспортні засоби і зниження його травмування обґрунтоване для способу кидання зерна на задану дальність за рахунок створення відповідної балістичної траєкторії його польоту шляхом регулювання частоти обертання АД електроприводу конвеєра при живленні його від перетворювача частоти. Зменшення фокусу розльоту зерна при його приземленні забезпечується формуванням потоку зерна і управлінням його рухом не тільки при переміщенні по конвеєрній стрічці, а й після відриву потоку і руху його в повітрі. Для фокусування нижнього слою необхідно надати йому додатку початкову швидкість, яка забезпечується струменем повітря від встановленого під конвеєром вентилятора. Для перетворювача частоти електроприводу вентилятора, у вигляді регресійної моделі, синтезований закон керування, який враховує параметри зерна і необхідну дальність транспортування. Для синтезу закону керування було використано теорію планування експерименту.

## REFERENCES

1. Tarasenko, A. P., Orobinskij, V. I., Gievskij, A. M., Baskakov, I. V., Chernyshov, A. V., Haritonov, M. K. (2019). "Snizhenie travmirovaniya zerna pri posleuborochnoy obrabotke" ["Reducing grain damage during post-harvest processing"]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona [Don Agrarian Science Bulletin]*, 1 (45), 63–68.
2. Grain thrower Self-propelled ZM-90 (2021). Operation and maintenance manual. Retrieved from <https://asm31.ru/>
3. Pascoe, R. D., Fitzpatrick, R., Garratt, J. R. (2015). "Prediction of automated sorter performance utilising a Monte Carlo simulation of feed characteristics". *Minerals Engineering*, 72, 101–107.
4. Tarasenko, A. P., Merchalova, M. E., Baskakov, I. V. (2009). "Sovershenstvovanie tekhnologii posleuborochnoy obrabotki zerna" ["Improvement of post-harvest grain processing technology"]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Voronezh State Agrarian University Bulletin]*, 3 (22), 22–25.
5. Burdilna, E., Hrabko, V., Mykhalchenko, H. (2019). "Transporter Control for Grain Handling in Granaries and Loading on Vehicles", *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenichuk, Ukraine. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8896431>
6. Nazar'yan, G.N. (1999). *Prakticheskij kurs planirovaniya eksperimenta [Practical course in experiment planning]*. Melitopol: TGATA.
7. Nazar'yan, G.N., Postnikov, M.V., Karpova, O.P. (2012). *Rishennya zadach optimizatsiyних obektiv doslidzhennya metodom planuvannya matematičnogo eksperimentu [Solving problems of optimization objects of research by the method of planning a mathematical experiment]*. Melitopol: Lux.