

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

УДК 637.125

Кваліфікаційна робота на правах  
рукопису

**БИСТРИЦЬКИЙ Ігор Олегович**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОТАЦІЙНОГО ВАКУУМНОГО  
НАСОСА ДОЇЛЬНОЇ УСТАНОВКИ**

208 «Агроінженерія»

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело

---

(підпис)

(ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи  
к.т.н., доц. Медведський О.В.

Житомир – 2023

## АНОТАЦІЯ

Бистрицький І. О. **Підвищення ефективності ротаційного вакуумного насоса доїльної установки.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023 р.

У кваліфікаційній роботі проаналізовано відомі шляхи удосконалення ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса. Встановлено, що одним із напрямків підвищення ефективності функціонування ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса в структурі доїльної установки полягає в узгодженні параметрів та режимів роботи.

За результатами досліджень у кваліфікаційній роботі розроблена система управління продуктивністю вакуумного насоса, яка в автоматичному режимі компенсує витрати повітря доїльною установкою. Розроблений алгоритм роботи системи управління.

Виконані дослідження залежності продуктивності ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса від рівня вакуумметричного тиску та частоти обертання ротора вакуумного насоса. Встановлені показники ефективної роботи з найменшими енерговитратами. Доведено, що функціонування системи забезпечує мінімальні коливання тиску 2,4 кПа.

**Ключові слова:** подача повітря, втрати тиску, частота обертання ротора, перетворювач частоти, продуктивність

## ANNOTATION

Bystrytskyi I. O. **Increasing the efficiency of the rotary vacuum pump of the milking plant.** – Qualification work on manuscript rights.

Qualification work for a master's degree in specialty 208 – agroengineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2023

The qualification work analyzed the known ways of improving the rotary-plate vacuum pump. It was established that one of the ways to increase the efficiency of the operation of the rotary-plate vacuum pump in the structure of the milking plant is to coordinate the parameters and modes of operation.

Based on the results of the research in the qualification work, a vacuum pump performance control system was developed, which automatically compensates for the air consumption of the milking unit. The algorithm of the control system was developed.

Studies of the dependence of the performance of the rotary-plate vacuum pump on the level of vacuum pressure and the frequency of rotation of the vacuum pump rotor have been carried out. The indicators of effective work with the lowest energy consumption have been established. It has been proven that the functioning of the system ensures minimal pressure fluctuations of 2.4 kPa.

**Key words:** air supply, pressure loss, rotor speed, frequency converter, productivity

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ РОБОЧОГО ВАКУУММЕТРИЧНОГО ТИСКУ ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК .....	7
1.1. Конструкційно-технологічні параметри джерел розрідження для доїльних установок .....	7
1.2. Аналіз відомих рішень удосконалення конструкції ротаційного вакуумного насоса .....	10
1.3. Висновки до розділу 1 .....	13
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВАКУУМНОГО НАСОСА .....	14
2.1. Встановлення впливу геометричних параметрів ротаційно- пластинчастого вакуумного насоса на його продуктивність .....	14
2.2. Вплив частоти обертання ротора вакуумного насоса на технологічні показники функціонування доїльної установки .....	16
2.3. Висновки до розділу 2 .....	19
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНОГО НАСОСА З АДАПТОВАНОЮ СИСТЕМОЮ УПРАВЛІННЯ .....	20
3.1. Дослідження параметрів системи керування продуктивністю вакуумного насоса .....	20
3.2. Встановлення оптимальних режимів управління вакуумним насосом .....	25
3.3. Висновки до розділу 3 .....	27
ВИСНОВКИ .....	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	30

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Вакуумний насос виконує головну технологічну та енергетичну функцію у доїльній установці – створює вакуумметричний тиск. Від ефективності вакуумного насоса залежить ефективність реалізації основного призначення доїльної установки – машинного доїння корів. Відповідно до зоотехнічних та ветеринарних вимог для закріплення у тварини стереотипу доїння у вакуум-проводі та молокопроводі доїльної установки має підтримуватись не тільки вакуумметричний тиск заданого рівня, а й забезпечуватись його стабільність.

Як найбільш поширеними джерелами вакууму для доїльних установок використовуються ротаційно-пластинчасті вакуумні насоси. Це зумовлено простотою конструкції, відсутністю елементів у вигляді клапанів та високою швидкістю при відносно невеликих витратах потужності на привод. Але при використанні роторно-пластинчастого вакуумного насоса вакуумну установку необхідно обладнати вакуумним балоном для вирівнювання коливань тиску, які виникають під час роботи, що викликано його фізичним принципом дії. Для компенсації коливань тиску доїльні установки використовують вакуумні насоси підвищеної продуктивності та обладнують вакуум-проводами збільшеного діаметра. Таке рішення потребує додаткових матеріальних витрат, що знижує загальну ефективність машинного доїння. Окрім цього, постійна продуктивність вакуумного насоса не дозволяє швидко відновити рівень вакуумметричного тиску при виникненні нештатних ситуацій із-за високої інерційності гравітаційних вакуумних регуляторів.

Таким чином, покращення вакуумного режиму доїльної установки за рахунок підвищення ефективності вакуумного насоса ротаційно-пластинчастого типу є актуальним та сучасним завданням.

**Мета і задачі досліджень.** Метою досліджень є підвищення ефективності ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки шляхом

стабілізації вакуумметричного режиму за допомогою системи управління продуктивністю.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних задач:

- провести оцінку ротаційно-пластинчастих вакуумних насосів доїльних установок провідних виробників з метою встановлення шляхів удосконалення;
- розробити схему системи управління продуктивністю ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса відповідно до технологічних режимів функціонування доїльної установки;
- дослідити вплив конструкційно-технологічних параметрів ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса на забезпечення стабільного вакуумметричного тиску у вакуум-проводі доїльної установки;
- встановити ефективність використання системи управління ротаційно-пластинчастим вакуумним насосом доїльної установки.

**Об'єкт дослідження** – технологічний процес ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса та рівень вакуумметричного тиску у вакуум-проводі доїльної установки.

**Предмет дослідження** – режимні характеристики функціонування системи управління продуктивністю ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса доїльної установки.

**Методи досліджень.** Теоретичні дослідження виконано із використанням методів чисельного моделювання із залученням теорії математичного моделювання, базових положень гідравліки, газової динаміки, деяких положень вакуумної техніки та законів термодинаміки. При цьому застосовувались методи диференційного та інтегрального числення.

Обробка результатів досліджень виконувались за допомогою теорії ймовірності, кореляційного та регресійного аналізу з використанням програмного продукту Excel.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення та результати досліджень кваліфікаційної роботи доповідались і отримали позитивну оцінку на міжнародній конференції та відображені у наступних роботах:

1. Бистрицький І. О. Дослідження керуючих впливів ротаційного вакуумного насоса доїльної установки. *Студентські читання–2023* : матеріали науково-практичної конференції. 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 7–9.

2. Медведський О. В., Бистрицький І. О. Система керування ротаційного вакуумного насоса доїльної установки. *Інженерні процеси та системи* : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених. 14-15 червня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 7–10.

3. Медведський О. В., Бистрицький І. О. Характерні конструкційні ознаки вакуумних насосів доїльних установок. *Біоенергетичні системи* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. 15-17 листопада 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 10–13.

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота складається зі вступу, 3 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел (20 найменувань). Текст кваліфікаційної роботи виконано українською мовою на 31 сторінці загального обсягу машинописного тексту, проілюстровано 1 таблицею та 12 рисунками.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ РОБОЧОГО ВАКУУММЕТРИЧНОГО ТИСКУ ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВОК

#### 1.1. Конструкційно-технологічні параметри джерел розрідження для доїльних установок

Для доїння молочного стада корів використовують доїльні установки, тип яких залежить від способу та системи утримання тварин [1-3]. Незважаючи на це, кожна доїльна установка у своїй конструкції має спільний елемент – вакуумний насос (рис. 1.1).

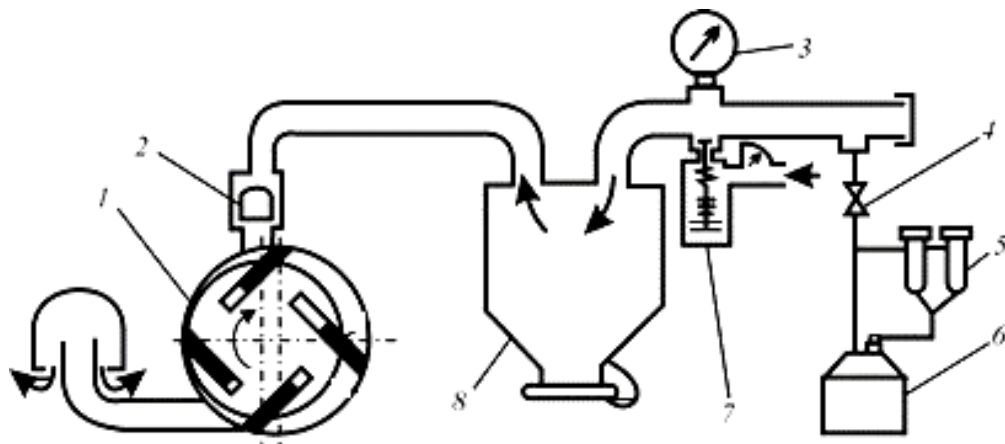


Рис. 1.1. Схематичне зображення компонування доїльної установки: 1 – насос вакуумний; 2 – клапан запобіжний; 3 – показчик тиску; 4 – кран доїльний; 5 – стакани доїльного апарата; 6 – молокоприймач; 7 – регулятор розрідження; 8 – балон для врівноваження тиску.

Вакуумний насос доїльної установки виконує головну енергетичну функцію її технологічного функціонування, а саме, створення вакуумметричного тиску. Від ефективності функціонування даної технічної системи залежить ефективність технологічного процесу машинного доїння корів.

Найбільшого поширення серед вакуумних насосів для доїльних установок різних типів набули ротаційно-пластинчасті вакуумні насоси. Незважаючи на

спільну конструкційну подібність, вакуумні насоси різних виробників відрізняються за абсолютними та питомими показниками що визначають ефективність їх функціонування (табл. 1.1) [4-6].

Таблиця 1.1

## Техніко-технологічні характеристики вакуумних насосів

Показник	Модель насоса											
	РВН-200	РВН-0,65	РВН-40/350	СУ	ДПР-3Г	РВН-25	УВ-45	РВН-40С	УВД-10	DeLaval-VP 76	DeLaval-VP 14	SACCO-350
Продуктивність теоретична $Q_t$ , м <sup>3</sup> /год	104	127	112	112	82	63	116	122	146	100	27	-
Продуктивність, за даними виробника $Q$ , м <sup>3</sup> /год	37	40	40	40	28	25	45	40	60	42	12	13,5
Потужність на привод $N$ , кВт	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	1,7	2,8	2,8	4,0	2,2	0,6	0,75
Маса $G$ , кг	120	36	68	68	30	25	38	37	42	28	13	9,3
Коефіцієнт подачі $\lambda$	0,36	0,31	0,36	0,36	0,34	0,40	0,39	0,33	0,41	0,42	0,42	-
Енергоємність $E$ , кВт×год/м <sup>3</sup>	0,08	0,07	0,07	0,07	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07	0,05	0,05	0,06
Матеріалоємність $G_N$ , кг/кВт×год	42,9	12,9	24,3	24,3	10,7	14,7	13,6	13,2	10,5	12,7	22,7	12,4
Питома вага $G_Q$ , кг/(м <sup>3</sup> /год)	3,24	0,90	1,70	1,70	1,07	1,00	0,84	0,93	0,70	0,67	1,01	0,69

Відповідно до табл. 1.1, вакуумні насоси різних фірм-виробників доїльного обладнання відрізняються за показниками функціонування (рис. 1.2).



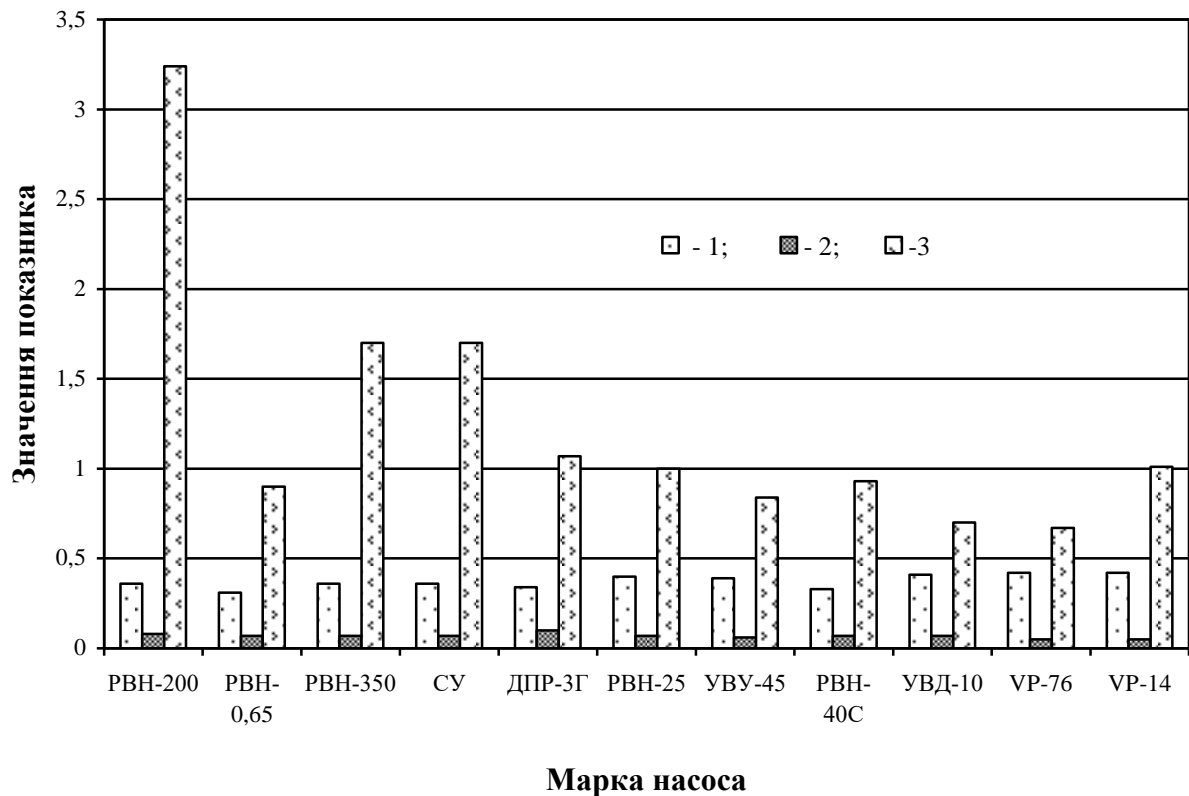


Рис. 1.2. Порівняльна оцінка вакуумних насосів для доїльних установок: 1 – коефіцієнт подачі ( $\lambda$ ); 2 – енергоємність ( $E$ ), кВт $\times$ год/ $m^3$ ; 3 – питома вага ( $G_Q$ ), кг $\times$ год/ $m^3$ .

Ефективнішою вважається та технічна система, котра має найвище значення показника коефіцієнта подачі одночасно із найменшими значеннями показників питомої ваги та енергоємності.

Перший показник визначає наскільки ефективною є геометрична конструкція вакуумного насоса, тобто, це відношення ефективної продуктивності (відповідно до технічної характеристики) до теоретичної (геометричної) продуктивності. Більше значення показника вказує максимальне наближення розрахункових параметрів геометрії насоса до фактичного результату роботи.

Енергоємність визначає енергетичну ефективність технічної системи, визначається як відношення потужності на привід до ефективної

продуктивності. Менше значення показника притаманне більш досконалим конструкціям вакуумного насоса, для приводу яких використовується менше енергії.

Питома вага визначає ефективність використання матеріалів при виготовленні технічної системи, визначається відношенням маси вакуумного насоса до його ефективної продуктивності. Аналогічно до попереднього визначення, менше значення показника питомої ваги вказує на більш ефективне інженерне рішення при виготовленні вакуумного насоса.

Відповідно до гістограми, поданої на рис. 1.2, найбільше значення коефіцієнта подачі мають вакуумні насоси фірми DeLaval – VP 76 та VP 14. Максимально до даних показників наближаються насоси вітчизняного виробництва УВД-10 ( $\lambda=0,41$ ) та РВН-25 ( $\lambda=0,40$ ) та УВ-45 ( $\lambda=0,39$ ). Але за показником енергоємності вітчизняні насоси суттєво поступаються вакуумним насосам фірми DeLaval. Так, вакуумний насос УВ-45 має на 20 % вищу енергоємність, а вакуумні насоси УВД-10 та РВН-25 – на 40 %.

Аналогічно і за показником питомої ваги. Максимальне наближення має лише вакуумний насос УВД-10, який тільки на 4,5 % поступається іноземному вакуумному насосу VP 76. Вакуумні насоси РВН-25 та УВ-45 поступаються насосам фірми DeLaval на 25-49 %.

Виконана оцінка вказує на можливість покращити показники вакуумного насоса вітчизняного виробництва для доїльних установок.

## **1.2. Аналіз відомих рішень удосконалення конструкції ротаційного вакуумного насоса**

Відповідно до досліджень, сучасний вакуумний насос повинен не тільки характеризуватись найбільш прийнятними питомими показниками, розглянути у п. 1.1, а забезпечувати ефективну роботу доїльної установки. До основних технологічних показників роботи доїльної установки належить рівень

вакуумметричного тиску. Величина робочого вакуумметричного тиску його забезпечується вакуумним насосом та підтримується вакуумним регулятором. При цьому важливим є забезпечення стабільного за величиною вакуумметричного тиску без значних його коливань [7-9].

Одним із напрямків підвищення ефективності вакуумного ротаційного насоса, відповідно до попередніх досліджень, є збільшення його ефективної продуктивності, зниження маси та зменшення потужності на привод.

Дослідники [10, 11] пропонують своє рішення проблеми збільшення продуктивності вакуумного насоса із одночасним підвищенням рівномірності відкачування повітря (рис. 1.3).

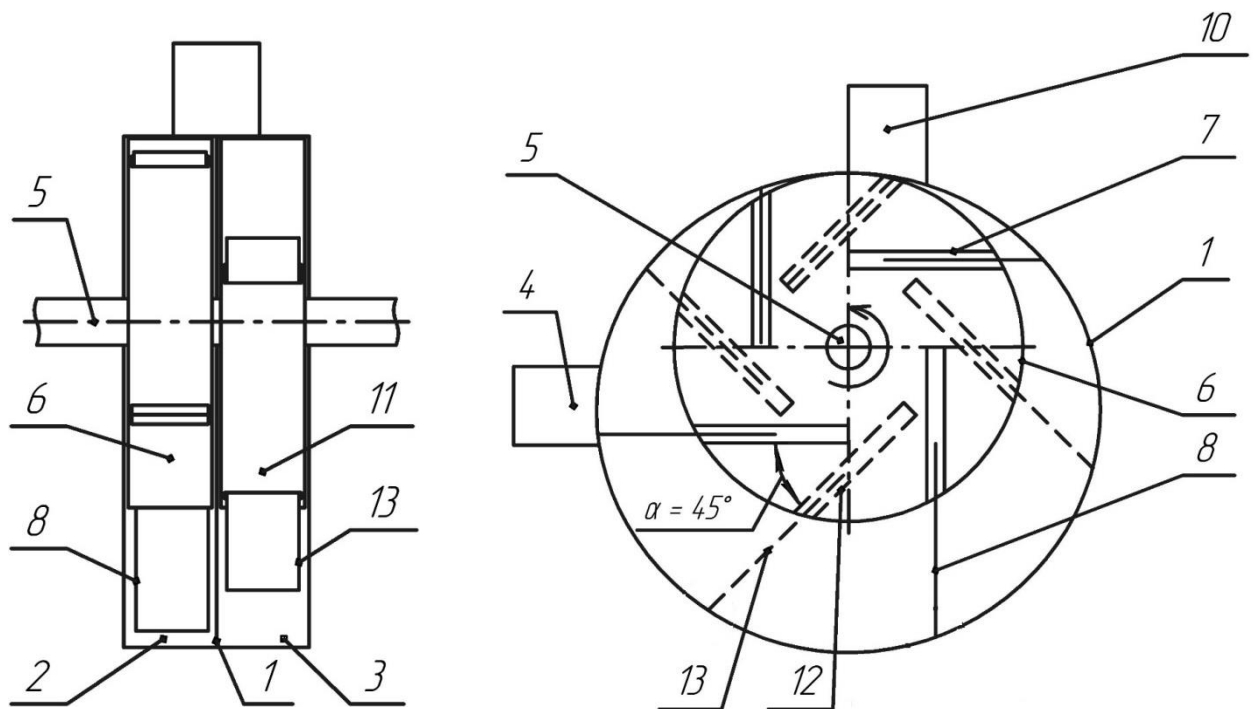


Рис. 1.3. Схематичне зображення вакуумного насоса двосторонньої дії: 1 – герметизуюча перетинка між двома напівроторами; 2, 3 – порожнини напівроторів у корпусі; 4 – всмоктувальний патрубок; 5 – загальний вал ротора; 6, 11 – напівротори; 7, 12 – пази для пластин; 8, 13 – пластини; 10 – нагнітальний патрубок.

Принцип роботи вакуумного насоса з подвійним ротором аналогічний до однороторних насосів. Особливість полягає лише в тому, що пластини напівроторів зміщені один відносно одного на  $45^\circ$ . Таке рішення дозволить, на думку винахідників, підвищити рівномірність відкачування повітря, тобто знизити коливання тиску у всмоктувальному патрубку (рис. 1.4). [10, 11]

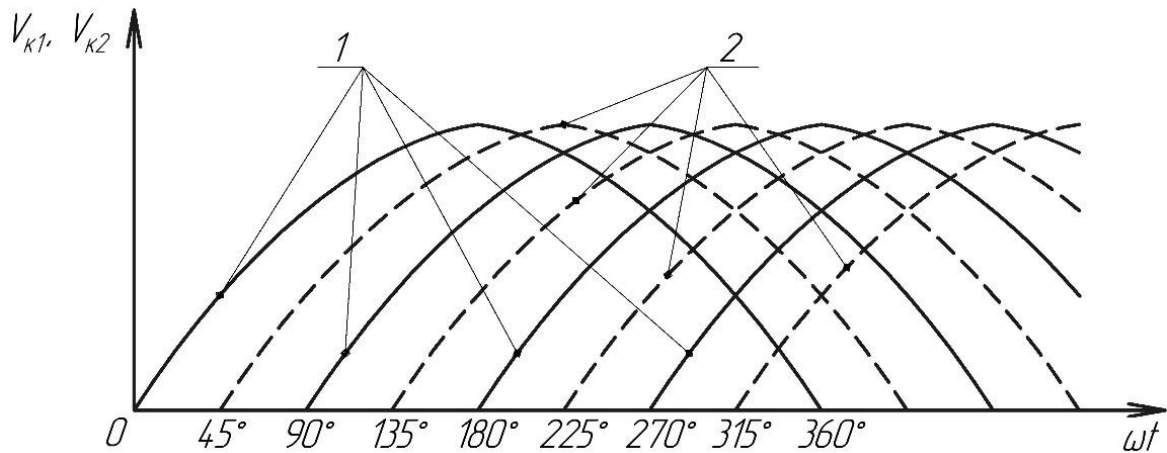


Рис. 1.4. Графічне моделювання динаміки об'ємів робочих камер напівроторів ( $V_{K1}$ ,  $V_{K2}$ ) відповідно до кутової фази на всмоктуванні: 1 – перший напівротор; 2 – другий напівротор. [10, 11]

Завдяки запропонованому конструкційному рішенню (рис. 1.3) у всмоктувальній порожнині вакуумного насоса кожен наступний цикл буде відбуватись не через  $90^\circ$ , а через  $45^\circ$  (рис. 1.4). Це сприятиме зниженню пульсацій тиску у вакуумній системі, що позитивно впливатиме на ефективність реалізації технологічного процесу машинного доїння корів. Зменшення коливань вакуумметричного тиску, які створюються під час роботи вакуумного насоса та є особливістю його принципу дії, може вплинути на конструкційні параметри елементів вакуумної системи, зокрема об'єму вакуумного балона. Окрім цього, стабільніший тиск у вакуумній магістралі доїльної установки забезпечить збереження стереотипу доїння та здоров'я корів під час машинного доїння. [12]

Вакуумний насос має забезпечити належну швидкодію компенсації втрати вакуумметричного тиску під час машинного доїння [8]. Дослідники пропонують ряд технічних рішень [13], впровадження яких потребує додаткових досліджень та встановлення бажаного алгоритму дій.

### **1.3. Висновки до розділу 1**

1. Вакуумний насос ротаційно-пластинчастого типу набув найбільшого поширення як джерело вакууму у доїльних установках для машинного доїння корів. Це викликано простотою його конструкції, високим механічним коефіцієнтом корисної дії, можливістю працювати при великих обертах із-за гарного балансування. Незважаючи на зазначені переваги, ротаційно-пластинчастий вакуумний насос потребує подальшого удосконалення у напрямку забезпечення оптимальних режимних характеристик відповідно до діючих умов експлуатації.

2. Резервом підвищення ефективності вакуумного насоса ротаційно-пластинчастого типу є зниження металомісткості та енергоємності з одночасним збільшенням коефіцієнта подачі за умови забезпечення стабільного вакуумметричного режиму. Досягнути цього можливо за рахунок підвищення ефективної продуктивності вакуумного насоса, а, також, за рахунок розроблення системи керування його роботою. Вирішення цих питань потребує додаткових досліджень.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВАКУУМНОГО НАСОСА

#### 2.1. Встановлення впливу геометричних параметрів ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса на його продуктивність

Продуктивність вакуумного насоса ротаційно-пластинчастого типу визначається його теоретичною (геометричною) продуктивністю та коефіцієнтом подачі [14]:

$$Q = \lambda \cdot Q_t, \quad (2.1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт подачі вакуумного насоса;

$Q_t$  – теоретична продуктивність вакуумного насоса, м<sup>3</sup>/с.

При виборі значення коефіцієнта подачі варто керуватись кращими зразками вакуумних насосів, зокрема іноземного виробництва. Відповідно до рекомендацій [14, 15], теоретична продуктивність залежить від конструкційних параметрів вакуумного насоса (рис. 2.1) та визначається за формулою:

$$Q_t = z \cdot F_h \cdot L \cdot n, \quad (2.2)$$

де  $z$  – число робочих ротора, шт.;

$F_h$  – геометрична максимальна площа між двома пластинами, м<sup>2</sup>;

$L$  – довжина ротора, м;

$n$  – частота обертання ротора, с<sup>-1</sup>.

Теоретичними передумовами збільшення продуктивності вакуумного насоса, відповідно до залежності (2.2), можуть бути наступні: збільшення

кількості пластин у роторі; збільшення площі порожнини між двома пластинами ротора; збільшення геометричної довжини ротора; збільшення частоти обертання ротора.

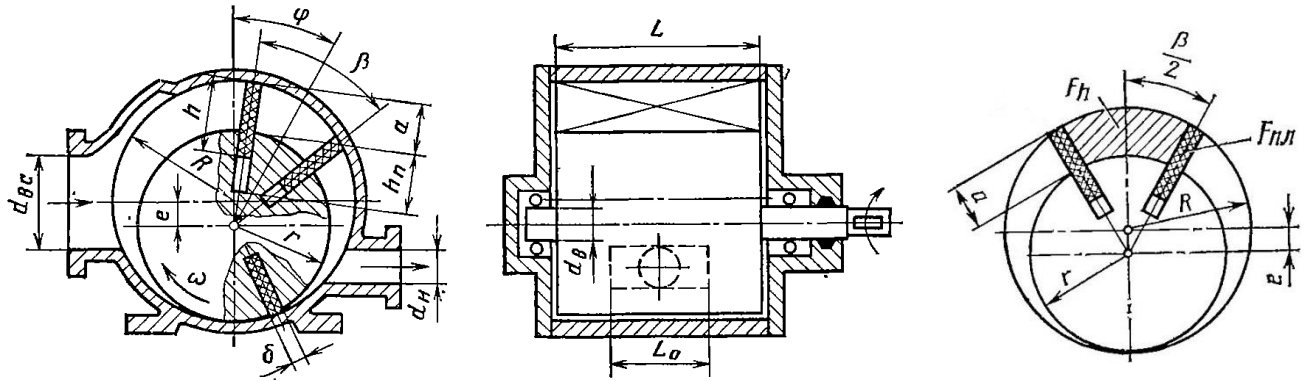


Рис. 2.1. Схема до встановлення конструкційно-геометричних параметрів вакуумного насоса. [14, 15]

Варіювати геометричними параметрами вакуумного насоса недоцільно, оскільки для збільшення продуктивності необхідно збільшувати масо-габаритні характеристики насоса. Відповідно буде зростати потужність на привод та зростатиме показник енергоємності. Значна довжина ротора ускладнить його балансування та показники міцності. [16]

Зростання кількості пластин, відповідно до досліджень [14, 15], впливає на збільшення втрат на тертя та знижується ефективна площа порожнин між двома лопатками за рахунок їх товщини, що в кінцевому результаті знизить показники ефективності вакуумного насоса. Тому, в більшості випадків, виробники вакуумних насосів обмежились трьома або чотирма пластинами у роторі. Звичайно, на ринку представлені вакуумні насоси із більшою кількістю пластин у роторі, але такі насоси не використовуються для доїльних установок. Пропонується, також, збільшити ширину пластин для збільшення ефективного об'єму, але таке рішення обмежене міцністю матеріалу пластин та діаметром ротора. Зміна ексцентриситету у напрямку збільшення, також, не дає

позитивного ефекту, оскільки доведено [14] більш прийнятне рішення використовувати оптимальні значення ексцентриситету.

Наступною складовою залежності (2.2) є частота обертання ротора вакуумного насоса. Пропонуються рішення зміни частоти обертання ротора вакуумного насоса у вакуумних установках УВУ-60/45 за рахунок зміни передаточного відношення клинопасової передачі. Отримують дві фіксовані частоти обертання залежно від бажаного рівня вакуумметричного тиску у вакуум-проводі доїльної установки. Це рішення не дає змоги вирішити питання адаптованої продуктивності вакуумного насоса залежно від умов функціонування доїльної установки.

## **2.2. Вплив частоти обертання ротора вакуумного насоса на технологічні показники функціонування доїльної установки**

Невирішеним залишається питання контролю рівня та забезпечення стабільності вакуумметричного тиску у вакуумній магістралі доїльної установки. Використання систем регулювання у вигляді вакуумних регуляторів не дозволяє швидко компенсувати втрати тиску у випадку нештатних ситуацій. Потрібен деякий час для відкачування вакуумним насосом «додаткової» порції повітря, що потрапила до вакуумної системи доїльної установки, наприклад, у випадку спадання доїльних стаканів [16]. Відповідно до вимог стандартів, вакуумметричний тиск у магістральному вакуум-проводі протягом 3 с має повернутись до робочого рівня [14, 17]. Використання вакуумних насосів із значним запасом продуктивності для таких випадків є недоцільним економічно.

У кваліфікаційній роботі пропонується система зміни продуктивності вакуумного насоса залежно від режимів роботи доїльної установки (рис. 2.2). Принцип роботи запропонованої схеми управління продуктивністю вакуумного насоса полягає в наступному. За умови відповідності фактичного вакуумметричного тиску ( $P$ ), який визначається давачем тиску, робочому



вакуумметричному тиску ( $P_B$ ) насос працює із незмінною продуктивністю.

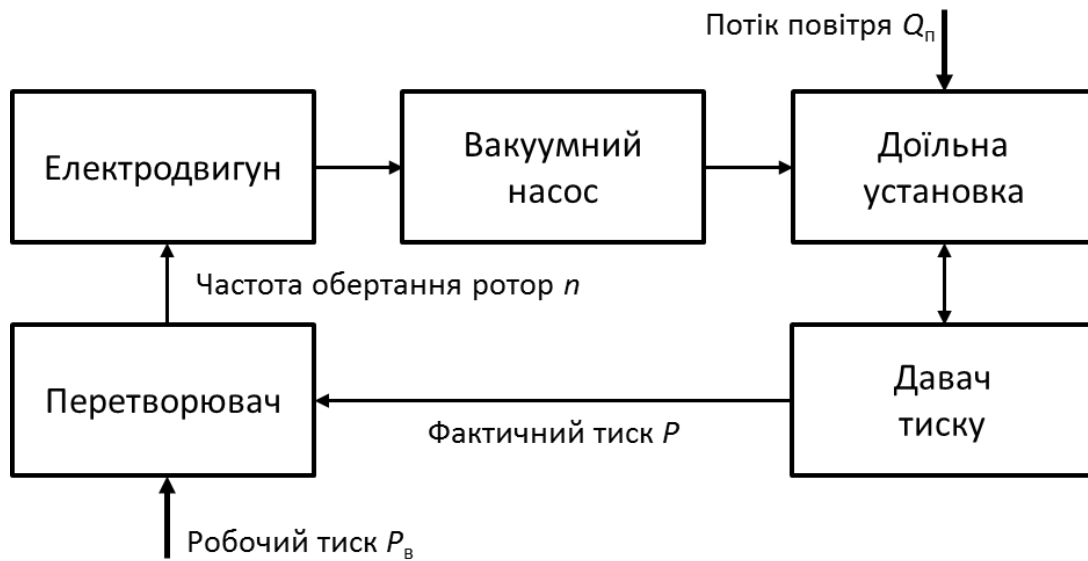


Рис. 2.2. Схема системи управління адаптивним режимом роботи вакуумного насоса

У випадку нештатної ситуації під час машинного доїння корів, режим роботи вакуумного насоса має змінитися відповідно до рис. 2.3-2.4.

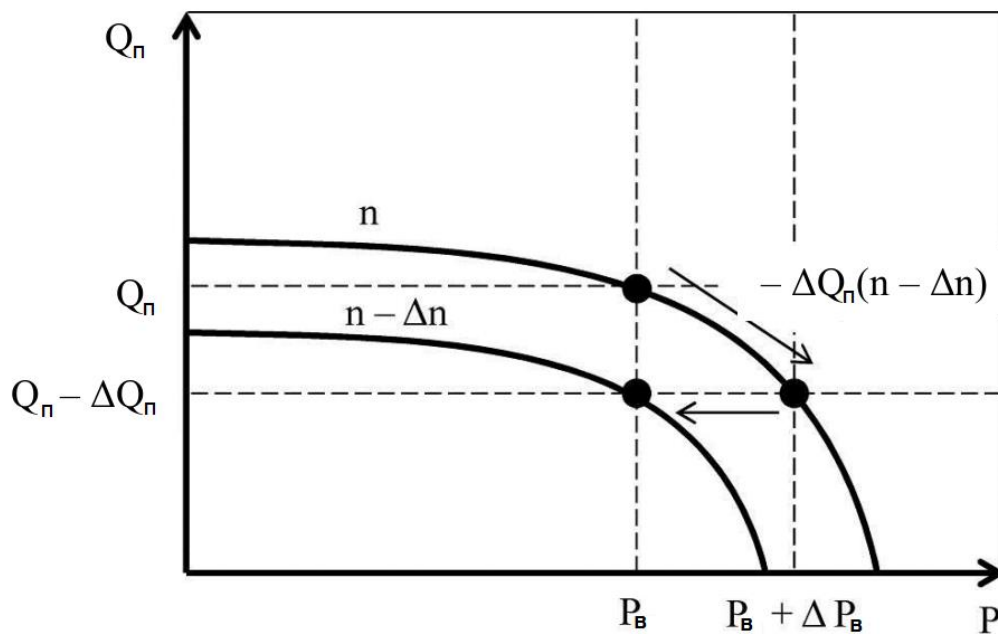


Рис. 2.3. Графік узгодження вакуумметричного тиску та продуктивності вакуумного насоса у випадку  $P > P_B$

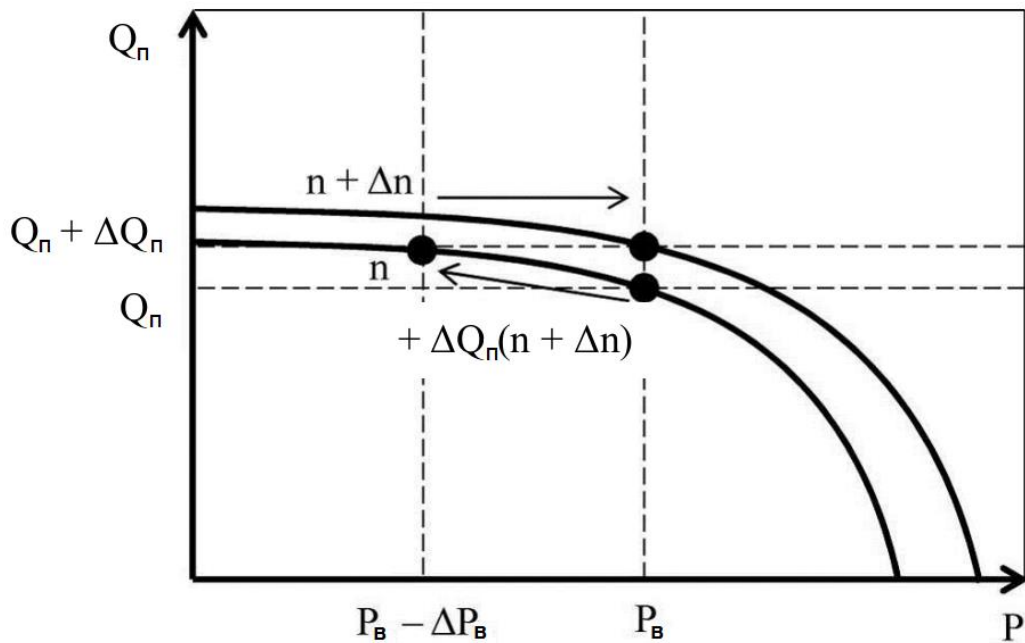


Рис. 2.4. Графік узгодження вакуумметричного тиску та продуктивності вакуумного насоса у випадку  $P < P_{\text{в}}$

Відповідно до графіку на рис. 2.3, продуктивність вакуумного насоса знижується на  $\Delta Q_{\text{п}}$  за рахунок зменшення частоти електричного струму шляхом зниження частоти обертання ротора електродвигуна і відповідно ротора вакуумного насоса на  $\Delta n$ . Це відбувається у випадку перевищення рівня фактичного вакуумметричного тиску ( $P$ ) над робочим вакуумметричним тиском ( $P_{\text{в}}$ ). При цьому частота обертання ротора вакуумного насоса стабілізується на рівні достатньому для підтримання функціонування доїльної установки із робочим вакуумметричним тиском ( $P = P_{\text{в}}$ ).

Під час виникнення нештатної ситуації, до вакуум-проводу доїльної установки потрапляє додатковий обсяг повітря ( $Q_{\text{п}} + \Delta Q_{\text{п}}$ ), що викликає зниження рівня вакуумметричного тиску ( $P = P_{\text{в}} - \Delta P_{\text{в}}$ ). В такому випадку фактичний рівень вакууму буде нижчий від регламентного вакуумметричного тиску ( $P < P_{\text{в}}$ ). Для компенсації втрати тиску необхідно збільшити продуктивність вакуумного насоса за рахунок збільшення частоти обертання ротора ( $n + \Delta n$ ). Триватиме процес до стабілізації тиску у вакуум-проводі доїльної установки. Як тільки у вакуум-проводі доїльної установки виконається умова  $P = P_{\text{в}}$ , при

діючій частоті обертання ротора вакуумного насоса буде зростати рівень вакуумметричного тиску, що небажано. В такому випадку давач тиску надсилатиме сигнал до перетворювача і частота обертання ротора вакуумного насоса зменшиться знижуючи продуктивність і, відповідно, тиск (див. рис. 2.3).

Запропонована система підтримання робочого рівня вакуумметричного тиску у вакуум-проводі доїльної установки дозволяє ефективно та швидко усунути втрати тиску під час нештатних ситуацій. Таке рішення значно ефективніше порівняно із застосуванням вакуумного регулятора гравітаційного типу та потребує подальших досліджень для встановлення раціональних режимних характеристик управління вакуумним насосом.

### **2.3. Висновки до розділу 2**

1. Продуктивність ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса визначається його конструкційно-геометричними параметрами та режимом функціонування. Доведено неможливість покращити показники вакуумного насоса для доїльних установок за рахунок збільшення числа пластин ротора та зміни його розмірів. Встановлено, що резервом збільшення ефективності вакуумного насоса ротаційно-пластинчастого типу є створення адаптивної системи керування його продуктивністю.

2. Розроблена система управління роботою вакуумного насоса ротаційно-пластинчастого типу дозволяє змінювати його продуктивність залежно від рівня вакуумметричного тиску у вакуум-проводі доїльної установки. Так, за умови зниження рівня вакуумметричного тиску автоматична система управління збільшує частоту обертання ротора вакуумного насоса. В наслідок цього збільшується продуктивність вакуумного насоса з одночасним зростанням рівня вакуумметричного тиску до робочого значення.

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНОГО НАСОСА З АДАПТОВАНОЮ СИСТЕМОЮ УПРАВЛІННЯ

#### 3.1. Дослідження параметрів системи керування продуктивністю вакуумного насоса

Продуктивність вакуумного насоса ( $Q$ ) повинна компенсувати повітропродуктивність доїльної установки ( $Q_p$ ), тобто має виконуватись умова  $Q \geq Q_p$ . Зрозуміло, що отримання вищого значення витрат повітря доїльною установкою потребує вищої продуктивності вакуумного насоса для підтримання заданого рівня робочого вакуумметричного тиску. Відповідно, змінюються й енергетичні показники вакуумного насоса, що в цілому впливає на ефективність машинного доїння корів [18].

Відповідно до попередніх досліджень встановлено, що для підтримання робочого рівня вакуумметричного тиску необхідно мати відповідну кількість обертів ротора вакуумного насоса за одиницю часу [19, 20]. Частота обертів ротора вакуумного насоса визначає його продуктивність. Отже, для утримання даного вакуумметричного тиску для доїльної установки потрібно добитися узгодження продуктивності та частоти приводу ротора вакуумної помпи. У запропонованій системі управління продуктивністю вакуумного насосу цю функцію виконує перетворювач електричного струму мережі, який змінює частоту обертання ротора приводного електродвигуна.

За результатами досліджень отримано графіки залежності (рис. 3.1) та рівняння регресії у яких визначається взаємозв'язок продуктивності вакуумної помпи із частотою обертів ротор та рівень вакуумметричного тиску у вакуум-проводі для доїльної установки:

$$Q_{nP} = -88,23 + 6,624P + 0,535n - 0,159P^2 - 0,0008Pn - 0,0000206n^2, \quad (3.1)$$

де  $Q_{nP}$  – подача повітря вакуумним насосом, л/хв;

$P$  – величина вакуумметричного тиску, кПа;

$n$  – частота обертів ротора вакуумної помпи, об/хв.

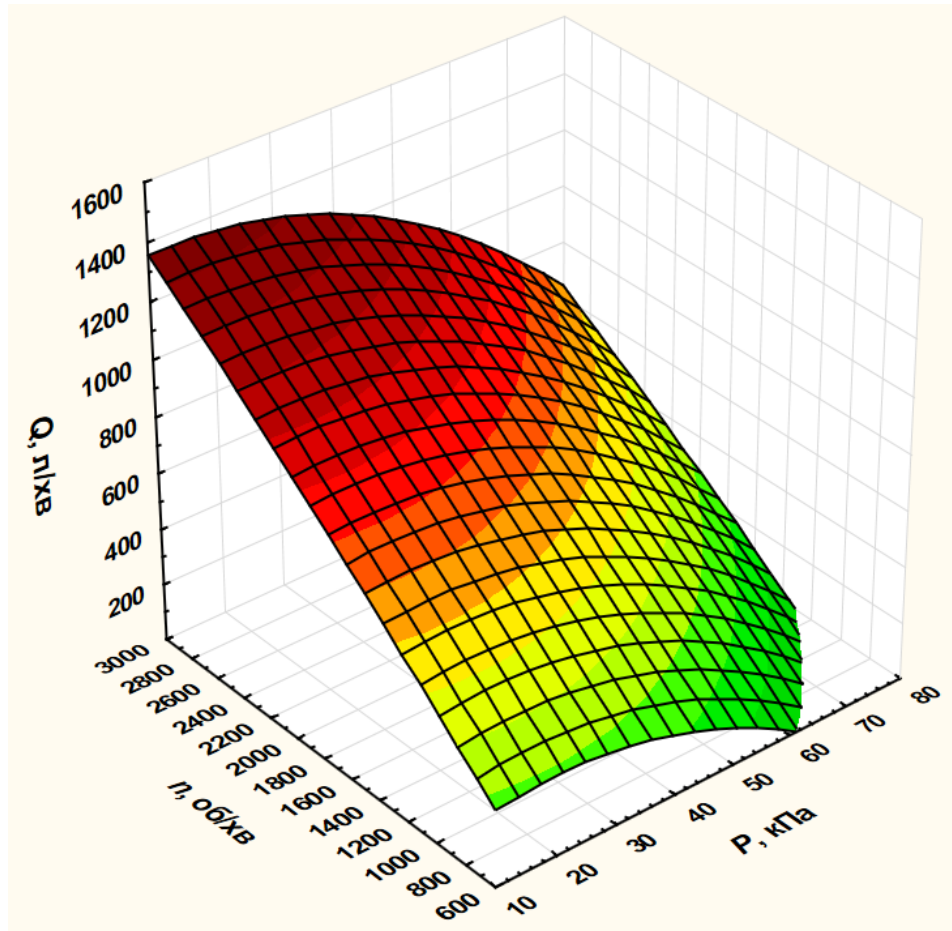


Рис. 3.1. Поверхня залежності подачі вакуумного насоса ( $Q$ ) та рівень вакуумметричного тиску ( $P=P_v$ ) від частоти обертів ротора ( $n$ ):  
■  $> 1200$ ; ■  $< 1100$ ; ■  $< 900$ ; ■  $< 700$ ; ■  $< 500$ ; ■  $< 300$ ; ■  $< 100$

Аналіз поверхні зображеної на рис. 3.1, вказує лінійне збільшення подачі вакуумного насоса за умови зростання збільшенні частоти обертів ротора в діапазоні 600-3000 об/хв. При цьому величина вакуумметричного тиску не має суттєвого впливу. При зростанні подачі вакуумного насоса при постійних обертах ротора відбувається пониження рівня тиску вакуумметричного. Так, при збільшенні подачі від 154 до 289 л/хв. вакуумметричний тиск знижується від 48 до 6 кПа за умови дотримання частоти обертів ротора на рівні  $n=600$  об/хв. За умови постійної частоти обертів ротора вакуумного насоса на рівні  $n=2400$  об/хв. з одночасною зміною величини вакуумметричного тиску від

76 до 21 кПа подача розробленого насоса зростає від 499 до 1095 л/хв., тобто, більш ніж у два рази. Подача вакуумного насоса знижується при збільшенні величини вакуумметричного тиску при кожному дискретному значенні частоти обертів ротора вакуумної помпи. На основі отриманих даних можна налаштувати систему управління роботою вакуумного насоса залежно від умов функціонування конкретного типу доїльної установки.

Важливим при машинному доїнні корів є підтримання стабільної величини вакуумметричного тиску у вакуумному проводі доїльного агрегату (рис. 3.2).

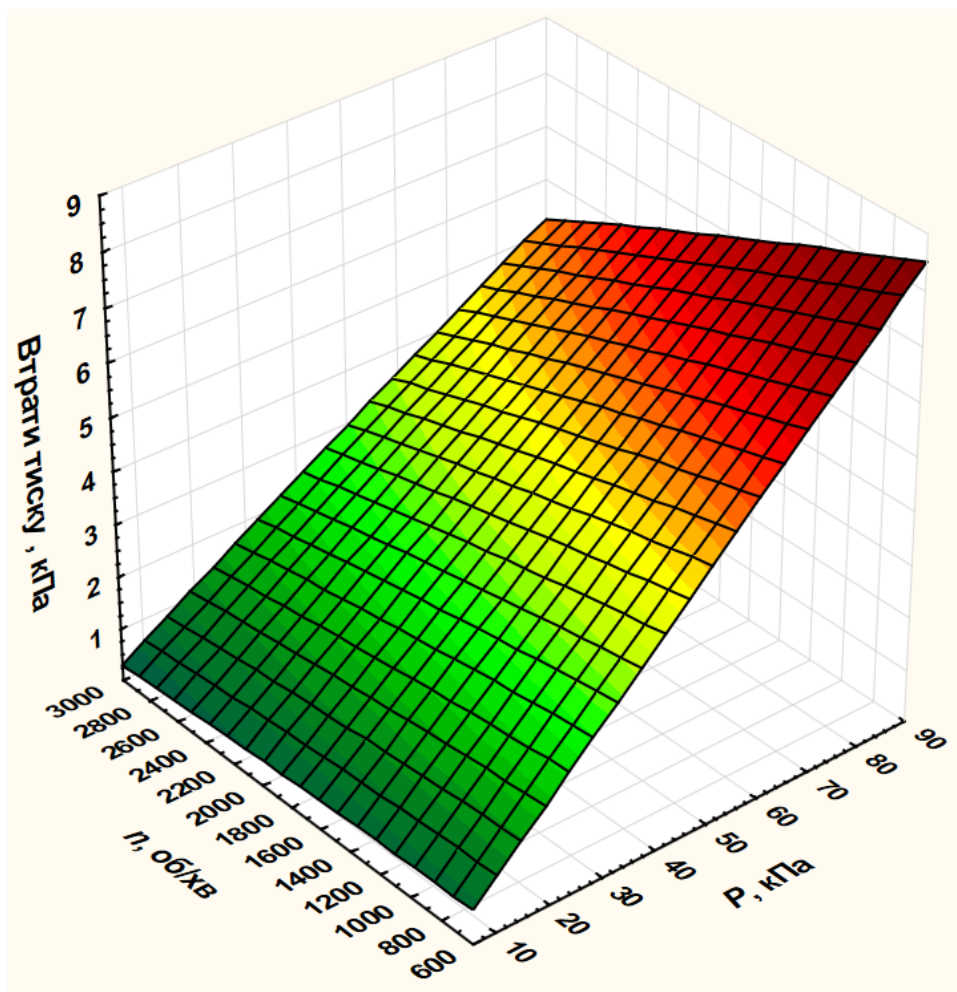


Рис. 3.2. Поверхня відгуку частоти обертів ротора ( $n$ ) вакуумного насоса та величини вакуумметричного тиску ( $P$ ) на рівень втрат вакууму ( $\Delta P$ ) у доїльній установці:  $\blacksquare > 8$ ;  $\blacksquare < 7,5$ ;  $\blacksquare < 6,5$ ;  $\blacksquare < 5,5$ ;  $\blacksquare < 4,5$ ;  $\blacksquare < 3,5$ ;  $\blacksquare < 2,5$ ;  $\blacksquare < 1,5$ ;  $\blacksquare < 0,5$

Аналіз графічних залежностей на рис. 3.2 вказує на суттєвий вплив величини вакуумного тиску на величину його зміни ( $\Delta P$ ) у вакуумному трубопроводі доїльної установки. За умови зростання рівня вакуумметричного тиску з 12 по 62 кПа на 4,5 кПа збільшуються коливання тиску ( $\Delta P$ ) якщо частота обертів ротора становитиме  $n=600$  об/хв., якщо  $n=3000$  об/хв. коливання тиску ( $\Delta P$ ) збільшуються тільки на 2,6 кПа. Пояснюється таке явище зростанням швидкості чергування об'ємних просторів між сусідніми пластинами ротора при збільшеній частоті обертів. Маємо, що більша частота обертів сприяє зниженню втрат тиску у доїльній установці.

Оцінка масиву даних досліджень дозволила встановити рівняння регресії, що узгоджує вплив зміни обертів ротора вакуумного насоса та величину вакуумметричного тиску з коливаннями тиску у вакуумному трубопроводі доїльної установки:

$$\Delta P_{nP} = 0,015 + 0,105P + 8,3 \cdot 10^{-5}n - 2,87 \cdot 10^{-5}P^2 - 1,44 \cdot 10^{-5}Pn - 3,6 \cdot 10^{-8}n^2, \quad (3.2)$$

де  $\Delta P_{nP}$  – коливання тиску, кПа;

$P$  – величина вакуумметричного тиску за паспортом, кПа;

$n$  – частота обертів ротора вакуумної помпи, об/хв.

Наявність високого коефіцієнта кореляції 0,93 та високого рівня довірчих ймовірностей – 95 % вказує на достовірність рівняння регресії (3.2) щодо розглянутих факторів. Значно суттєвим є вплив величини вакуумного тиску у вакуумній мережі порівняно із частотою обертів ротора вакуумної помпи.

Зміна частоти обертання ротора вакуумного насоса викликає й зміну витрат енергії на його привод. Відповідно за результатами досліджень отримали рівняння регресії та графічні залежності (рис. 3.3):

$$N_{nP} = -1,55 + 0,023P + 0,003n - 1,63 \cdot 10^{-5}P^2 - 4,45 \cdot 10^{-6}Pn + 1,17 \cdot 10^{-7}n^2, \quad (3.3)$$

де  $N_{nP}$  – потужність на привод вакуумного насоса, кВт;

$P$  – робочий вакуумметричний тиск, кПа;

$n$  – частота обертання ротора вакуумного насоса, об/хв.

Високий коефіцієнт кореляції (0,94) рівняння регресії (3.3) вказує на адекватність застосованих змінних факторів за високого рівня довірчої ймовірності – 95%.

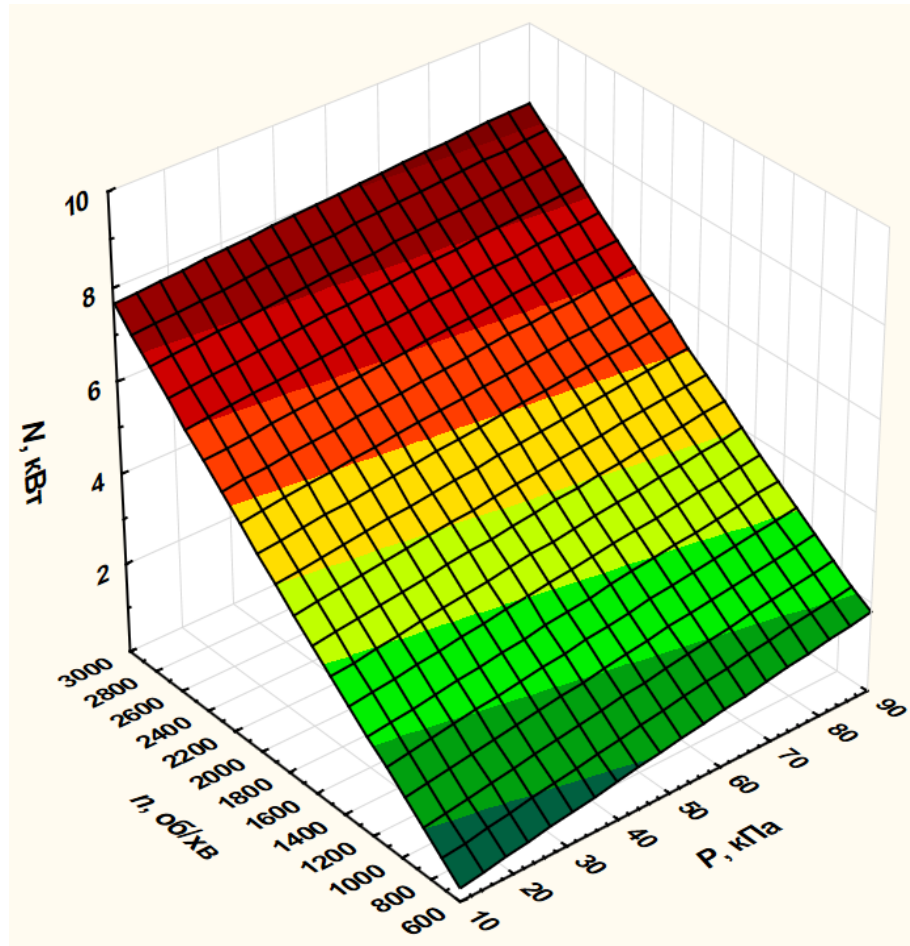


Рис. 3.3. Вплив частоти обертання ротора ( $n$ ) вакуумного насоса та рівня вакуумметричного тиску ( $P$ ) на споживану потужність електродвигуна приводу насоса ( $N$ ): ■  $> 8$ ; ■  $< 7$ ; ■  $< 5$ ; ■  $< 3$ ; ■  $< 1$

Потужність на привод ротора вакуумного насоса суттєво зростає при збільшенні його частоти обертання. Це можна пояснити збільшенням втрат на тертя та особливостями функціонування ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса. Зі збільшенням рівня вакуумметричного тиску від 30 до 60 кПа потужність приводу зростає на 1,02 кВт (майже у три рази) при частоті



обертання ротора  $n=600$  об/хв., а при частоті обертання ротора  $n=3000$  об/хв. потужність приводу зростає лише на 0,25 кВт (на 31 %).

### **3.2. Встановлення оптимальних режимів управління вакуумним насосом**

Розроблена система керування продуктивністю вакуумного насоса має працювати за встановленим алгоритмом. З цією метою необхідно встановити крок зміни частоти обертання ротора вакуумного насоса залежно від вхідних параметрів – діючого рівня вакуумметричного тиску та робочого рівня вакуумметричного тиску відповідно до зоотехнічних вимог машинного доїння корів. При цьому частота обертання ротора вакуумного насоса має бути достатньою для підтримання стабільного вакуумметричного тиску без значних коливань.

На основі рівняння регресії (3.1) та дослідних даних отримали математичну модель зміни частоти обертання ротора вакуумного насоса ротаційно-пластинчастого типу залежно від робочого вакуумметричного тиску при заданій продуктивності:

$$\Delta n = \frac{Q_n - 44,54 + 1,562P - 0,169P^2 - 0,00266P^3}{0,427}, \quad (3.4)$$

де  $\Delta n$  – крок частоти обертання ротора вакуумного насоса, об/хв;

$P$  – робочий вакуумметричний тиск, кПа;

$Q_n$  – повітропродуктивність доїльної установки, л/хв.

Дослідження вказують на суттєвий вплив рівня вакуумметричного тиску на показники функціонування ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса. Зокрема це стосується продуктивності вакуумного насоса та частоти обертання його ротора. Частота обертання ротора вакуумного насоса задається

елементами системи приводу електродвигуна за допомогою частотного перетворювача.

Характеристика роботи запропонованого механізму адаптування продуктивності вакуумного насоса до необхідного рівня вакуумметричного тиску подана на рис. 3.4.

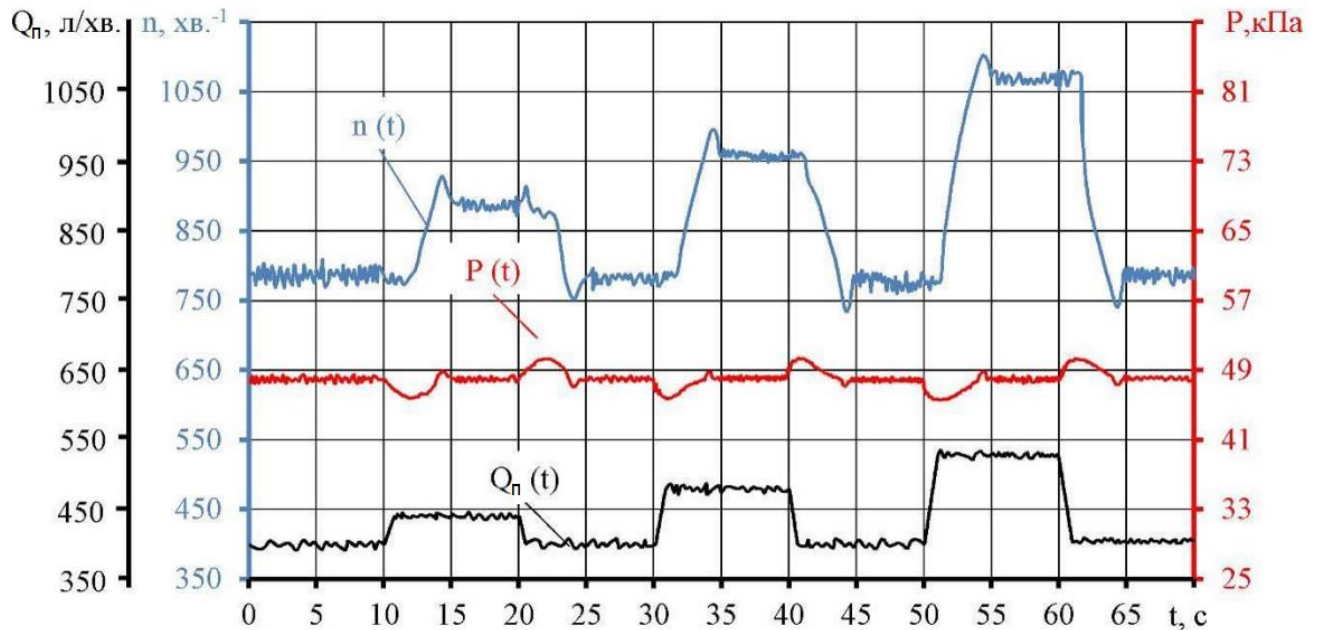


Рис. 3.4. Характер регульованого значення рівня вакуумметричного тиску ( $P$ ) залежно від витрат повітря доїльною установкою ( $Q_{п}$ ) та адаптивної частоти обертання ротора вакуумного насоса ( $n$ ).

Відповідно до отриманої характеристики (рис. 3.4) можна стверджувати про ефективність запропонованої системи управління роботою вакуумного насоса залежно від витрат повітря доїльною установкою та виникнення нештатних ситуацій. Так, за умови тимчасового збільшення витрат повітря доїльною установкою зростає частота обертання ротора вакуумного насоса. Причому, чим більші витрати повітря доїльною установкою тим більша частота обертання ротора. Незалежно від кількості надлишкового повітря, що надходить до вакуум-проводу доїльної установки під час нештатних ситуацій,

правильно підібрана частота обертання ротора вакуумного насоса забезпечує незначні втрати вакуумметричного тиску на рівні 2,4 кПа, що майже вдвічі менші ніж рекомендовані відповідно до вимог машинного доїння корів.

### 3.3. Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що продуктивність вакуумного насоса зростає за умови збільшення частоти обертання ротора, незалежно від рівня вакуумметричного тиску. При збільшенні продуктивності вакуумного насоса та незмінній частоті обертання знижується рівень вакуумметричного тиску. Незалежно від фіксованої частоти обертання ротора вакуумного насоса, його продуктивність знижується зі збільшенням рівня вакуумметричного тиску. На основі отриманих даних можна налаштувати розроблену систему управління роботою вакуумного насоса залежно від умов функціонування доїльної установки.

2. Доведено, що при збільшенні рівня вакууму від 12 до 62 кПа втрати тиску зростають на 4,5 кПа при частоті обертання ротора  $n=600$  об/хв., а при  $n=3000$  об/хв. втрати тиску зростають лише на 2,6 кПа. Це можна пояснити збільшенням швидкодії зміни об'ємів порожнин між двома пластинами ротора при високій частоті його обертання.

3. Встановлено крок зміни частоти обертання ротора вакуумного насоса залежно від вхідних параметрів. При цьому частота обертання ротора вакуумного насоса забезпечує стабільний вакуумметричний тиск за рахунок адаптованої продуктивності.

## ВИСНОВКИ

1. Ротаційно-пластинчастий вакуумний насос набув найбільшого поширення як джерело вакууму у доїльних установках для машинного доїння корів. Зважаючи на суттєві переваги, ротаційно-пластинчастий вакуумний насос потребує подальшого удосконалення. Резервом підвищення ефективності вакуумного насоса ротаційно-пластинчастого типу є зниження металомісткості та енергоємності з одночасним збільшенням коефіцієнта подачі за умови забезпечення стабільного вакуумметричного режиму. Досягнути цього можливо за рахунок відповідності ефективної продуктивності вакуумного насоса потребам повітропродуктивності доїльної установки.

2. Встановлено неможливість покращити показники роботи вакуумного насоса за рахунок збільшення числа пластин ротора та зміни його габаритних розмірів. Доведено, що резервом збільшення ефективності вакуумного насоса ротаційно-пластинчастого типу є створення адаптивної системи керування його продуктивністю. Розроблена система управління роботою ротаційно-пластинчастого вакуумного насоса забезпечує зміну продуктивності залежно від рівня вакуумметричного тиску у вакуум-проводі доїльної установки. Якщо рівень вакуумметричного тиску у вакуум-проводі нижчий за робочий, автоматична система управління збільшує частоту обертання ротора вакуумного насоса, якщо вищий – зменшує. Це відбувається за рахунок зміни продуктивності вакуумного насоса.

3. Встановлено, що при збільшенні частоти обертів ротора 600-3000 об/хв. продуктивність вакуумного насоса зростає лінійно, незалежно від рівня вакуумметричного тиску. Збільшення подачі від 154 до 289 л/хв. призводить до зниження вакуумметричного тиску від 48 до 6 кПа при постійній частоті обертання ротора 600 об/хв. При постійній частоті обертання ротора 2400 об/хв. продуктивність вакуумного насоса зростає від 499 до 1095 л/хв. при зменшенні рівня вакуумметричного тиску від 76 до 21 кПа.

4. Доведено, що при збільшенні рівня вакуумметричного тиску від 12 до 62 кПа втрати тиску у вакуум-проводі доїльної установки зростають на 4,5 кПа при частоті обертанні ротора 600 об/хв. За умови частоти обертання ротора 3000 об/хв. втрати тиску зростають лише на 2,6 кПа. Це відбувається за рахунок збільшенням швидкодії зміни об'ємів порожнин між двома пластинами ротора тобто, більшій частоті обертання відповідають менші втрати тиску. Встановлено вплив частоти обертання ротора вакуумного насоса на потужність приводу. Так, при зростанні рівня вакуумметричного тиску від 30 до 60 кПа потужність приводу зростає на 1,02 кВт (майже у три рази) за умови постійної частоти обертання ротора 600 об/хв. При частоті обертання ротора 3000 об/хв. потужність приводу зростає лише на 31 %, що є більш прийнятним.

5. Отримано характеристичні графіки узгодження частоти обертання ротора вакуумного насоса, продуктивності вакуумного насоса та регульованого рівня вакуумметричного тиску залежно від витрат повітря доїльною установкою. Встановлено, що чим більші витрати повітря доїльною установкою тим більша частота обертання ротора. Незалежно від кількості надлишкового повітря, що надходить до вакуум-проводу доїльної установки під час нештатних ситуацій, втрати вакуумметричного тиску не будуть перевищувати 2,4 кПа, що майже вдвічі менше ніж вказано у вимогах до машинного доїння корів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Машинне доїння корів та первинна обробка молока. / за ред. А. І. Фененко. 2-е вид. перероб. і доп. К.: Урожай, 1990. 216 с.
2. Механізація і автоматизація молочних ферм. / В. А. Ясенецький та ін. К.: Урожай, 1992. 392 с.
3. Посібник-практикум: машини та обладнання для тваринництва / І. І. Ревенко та ін. К.:Кондор, 2011. 396 с.
4. Машини для тваринництва та птахівництва. / за ред. В. І. Кравчука та Ю. Ф. Мельника. Дослідницьке: УкрНДПВТ ім. Л.Погорілого, 2009. 207 с.
5. Москаленко С., Ліщинський С. Методика комплексної оцінки ефективної експлуатації доїльних установок. *Техніка і технологія АПК*. УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого, 2010. № 8(11) С. 29–31.
6. Медведський О. В., Бистрицький І. О. Характерні конструкційні ознаки вакуумних насосів доїльних установок. *Біоенергетичні системи : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції*. 15-17 листопада 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 10–13.
7. Фененко А. І. Механізація доїння корів. Теорія і практика: монографія. К., 2008. 198 с.
8. Дмитрів В. Т., Дмитрів І. В. Методологія діагностування параметрів і режимів роботи елементів доїльної установки. *Вісник Харківського нац. техн. університету с.-г. ім. Петра Василенка. Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві*. Харків : ХНТУСГ, 2011. Вип. 108. С. 210–221.
9. Алієв Е. Б. Оптимізація техніко-технологічних параметрів вакуумної системи доїльної установки. *Зб. наук. праць Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип. 12. С. 138–147.
10. Вакуумний пластинчасто-роторний насос : пат. 106313 Україна : F04C 2/344, F04C 11/00. / О. В. Медведський, О. В. Коновалов, С. В. Бушма, О. Д. Муляр. № 201306021 ; заявл. 15.05.2013; опубл.11.08.2014, Бюл. № 15.

11. Медведський О. В., Коновалов О. В. Резерви підвищення ефективності пластинчасто-роторного вакуумного насоса. *Зб. доп. 3-ї наук.-техн. конф. наук.-пед. працівників інж.-техн. ф-ту ЖНАЕУ*, 13 берез. 2014 р. Житомир : ЖНАЕУ, 2014. С. 40–44.

12. Медведський О. В. Динаміка зміни тиску в об'ємах конструктивних елементів вакуумної системи мобільної доїльної установки. *Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Техніка та енергетика АПК*. 2015. Вип. 212, ч. 2. С. 161–167.

13. Коновалов О. В., Медведський О. В., Шапіренко В. В. Дослідження автоматичної системи регулювання вакуумметричного тиску доїльних установок. *Вісник ЖНАЕУ*. 2010. Вип. 2 (27). С. 172–177.

14. Фролов Е. С., Автономова И. В., Васильев В. И. Механические вакуумные насосы. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.

15. Хамеев В. М. Термодинамические процессы и параметрические характеристики вакуумных насосов. Новосибирск: Наука, 1986. 78 с.

16. Медведський О. В., Бистрицький І. О. Система керування ротаційного вакуумного насоса доїльної установки. *Інженерні процеси та системи : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених. 14-15 червня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 7–10.*

17. ISO 5707. Milking machine installations. Construction and performance. Geneva, Switzerland: The International for Standardization Organization, 2007. 52 p.

18. Бистрицький І. О. Дослідження керуючих впливів ротаційного вакуумного насоса доїльної установки. *Студентські читання–2023 : матеріали науково-практичної конференції. 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 7–9.*

19. Вакуумная техника : справочник. / Фролов Е. С., и др. ; под общ. ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. М. : Машиностроение, 1992. 480 с.

20. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Теоретические основы вакуумной техники. М. : Энергоиздат, 1988. 340 с.