

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

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота на правах
рукопису

УДК 637.125

МЕДВЕДСЬКИЙ Олександр Васильович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНИМ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВАКУУМНОГО НАСОСА ДОЇЛЬНОЇ
УСТАНОВКИ**

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

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. Соколовський О. Ф.

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Медведський О. В. **Обґрунтування системи керування регульованим електроприводом вакуумного насоса доїльної установки.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Поліський національний університет, Житомир, 2025 р.

Кваліфікаційна робота спрямована на пошук шляхів регулювання рівня вакуумметричного тиску у вакуумній системі доїльної установки. Встановлено, що вирішити питання ефективного підтримання заданого рівня вакууму можна шляхом зміни частоти обертання ротора вакуумного насоса.

Теоретичні дослідження спрямовані на розробку електричної схеми керування частотою обертання ротора електродвигуна приводу вакуумного насоса. Встановлено аналітичні залежності взаємного функціонування елементів електричної схеми керування електроприводом. Виконана оцінка розробленого алгоритму функціонування системи в цілому.

За результатами досліджень встановлено вплив частоти обертання ротора вакуумного насоса на його продуктивність залежно від рівня вакуумметричного тиску. Встановлено, що розроблена система керування дозволяє знизити рівень динамічних втрат тиску який значно менший від допустимого.

Ключові слова: динаміка тиску, електричний опір, частота обертів, давач тиску, витратомір

ANNOTATION

Medvedskyi O. V. **Justification of the control system for the adjustable electric drive of the vacuum pump of the milking machine.** – Qualification work on the rights of the manuscript. Qualification work for a master's degree in specialty 141 – electric power engineering, electrical engineering, and electromechanics. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The qualification work is aimed at finding ways to regulate the vacuum pressure level in the vacuum system of a milking machine. It has been established that the issue of effectively maintaining the specified vacuum level can be solved by changing the rotation speed of the vacuum pump rotor.

Theoretical research is aimed at developing an electrical circuit for controlling the rotation speed of the electric motor rotor of the vacuum pump drive. Analytical dependencies of the mutual functioning of the elements of the electrical circuit for controlling the electric drive have been established. An assessment of the developed algorithm for the functioning of the system as a whole has been carried out.

The results of the research have established the influence of the rotation frequency of the vacuum pump rotor on its performance depending on the level of vacuum pressure. It has been established that the developed control system allows reducing the level of dynamic pressure losses, which is significantly lower than the permissible level.

Key words: pressure dynamics, electrical resistance, rotation speed, pressure sensor, flow meter

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ	
ВАКУУММЕТРИЧНОГО ТИСКУ У ДОЇЛЬНІЙ УСТАНОВЦІ	7
1.1. Структурне функціонування вакуумної системи доїльної установки	7
1.2. Аналіз систем та способів регулювання рівня вакууму у вакуумній системі під час машинного доїння корів	9
Висновки до розділу 1	12
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВАКУУМНОГО НАСОСА	13
2.1. Обґрунтування алгоритму регульованого керування електроприводом вакуумного насоса	13
2.2. Розробка схеми електричного керування частотою обертання ротора електродвигуна приводу вакуумного насоса	16
Висновки до розділу 2	22
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ	
РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВАКУУМНОГО НАСОСА ...	23
3.1. Дослідження параметрів регульованого електроприводу вакуумного насоса	23
3.2. Встановлення оптимальних характеристик роботи вакуумного насоса із регульованим електроприводом	25
Висновки до розділу 3	28
ВИСНОВКИ	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	31

ВСТУП

Актуальність теми. Електропривод вакуумних насосів доїльних установок складається із електродвигуна, клинопасової передачі та вакуумного насоса будь-якого із відомих типів. При цьому безпосередній привод має можливості до зміни продуктивності насосів вакуумних шляхом зміни передаточного відношення клинопасової передачі. Це, зокрема притаманно для вакуумних установок типу УВУ, у яких можна отримати два фіксованих подачі вакуумний насоса (60 та 45 м³/год) залежно від потреб по повітрю вакуумної системи доїльної установки. Тобто, зміна частоти обертів ротора вакуумного насосів забезпечує зміну подачі по повітрю. При цьому подача має бути узгоджена із рівнем робочого вакуумметричного тиску який використовується для конкретної системи доїння.

Особливість роботи доїльної установки під час машинного доїння корів полягає у постійному зміні рівня вакууму у вакуум-проводі та молоко-проводі. Такі зміни викликані зміною простору вільного від молока у молокопроводі та впуском додаткових порцій повітря через генератор пульсів, що також викликає зміни тиску. Проте, за умови стабільної роботи елементів доїльної установки продуктивного потенціалу вакуумного насоса достатньо для компенсації таких незначних динамічних втрат тиску рівень яких відповідає зоотехнічним вимогам до машинного доїння. Рівень тиску вакууму у вакуум-проводі підтримується додатковим пристроєм, який називається регулятором тиску. Як правило використовуються гравітаційні регулятори, які при виникненні зниження тиску вакууму закриваються, що припиняє надходження повітря у систему, і відкриваються коли насос вакуумний стабілізує тиск. такі системи досить інерційні і потребують витрат часу на стабілізацію тиску.

Проблемою стабілізації тиску вакууму у вакуум-проводі доїльної установки є незмінна подача по повітрю вакуумного насоса, оскільки він має постійну частоту обертання. Це викликає потребу у додатковому витраті часу на стабілізацію тиску. За умови значних потреб у стабілізації тиску тривалість

такого процесу збільшується, що негативно впливає на здоров'я корів. Вирішити питання можна шляхом миттєвої зміни подачі вакуумного насоса, що скоротить час стабілізації тиску. Тому, розробка ефективної системи регульованого приводу вакуумного насоса зі зміною його подачі по повітрю є необхідним та актуальним завданням.

Мета і задачі досліджень.

Мета досліджень полягає у підвищенні ефективності системи регулювання вакууму шляхом розробки регульованого електроприводу зміни подачі вакуумного насоса.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішити такі задачі:

- провести оцінку способів та технічних засобів регулювання рівня тиску вакууму у доїльній установці, встановити шляхи вирішення проблеми;
- розробити алгоритм роботи системи керування електроприводом вакуумного насоса;
- розробити функціональну схему регульованого електроприводу вакуумного насоса відповідно до заданих умов роботи;
- встановити основні параметри та характеристики розробленої схеми керування електроприводом вакуумного насоса;
- встановити енергетичну ефективність від застосування розробленої системи керування.

Об'єкт дослідження – процес регулювання електроприводу вакуумного насоса.

Предмет дослідження – встановлення подачі вакуумного насоса залежно від динаміки тиску вакууму у доїльній установці шляхом зміни частоти обертів ротора.

Методи досліджень. Для вирішення задач зазначених у кваліфікаційну роботі широко застосовували відомі положення теорії математичних моделювань при застосуванням положень електротехніки, електроприводу, гідро-газодинаміки, та кінетичної теорії газів. Аналітичні дослідження проводили для встановлення теоретичних рівнянь роботи регульованого

електроприводу, щоб визначити межі регулювань які відповідають необхідному рівню вакуумметричного тиску у вакуумній системі доїльної установки.

Апробація результатів роботи. Основні дані за результатів досліджень відображені у наступних друкованих працях:

1. Медведський О. В. Аналіз шляхів удосконалення електроприводу вакуумного насоса. *Наукові читання – 2025* : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Т. 2. С. 16-18.

2. Медведський О. В. Розробка системи керування вакуумним насосом доїльної установки. *Студентські читання–2025* : матеріали науково-практичної конференції науково педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 57–59.

3. Медведський О. В. Встановлення параметрів системи керування вакуумним насосом доїльної установки. *Біоенергетичні системи* : матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. 19-20 листопада 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 12–14.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота у своєму складі має вступ, 3 розділи основної частини, висновки, список використаних джерел. Машинописний текст роботи виконано державною мовою на 32 сторінках загального обсягу, має 15 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ОЦІНКА ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ ВАКУУММЕТРИЧНОГО ТИСКУ У ДОЇЛЬНІЙ УСТАНОВЦІ

1.1. Структурне функціонування вакуумної системи доїльної установки

Підтримання заданого рівня тиску вакууму у вакуум-системі доїльної установки здійснюється вакуумною системою. Схематично, вакуумна система у складі доїльної установки подано на рис. 1.1. Як видно із рисунка 1.1. до складу вакуумної установки входить вакуумний насос, ресивер, регулятор тиску вакуумний та вимірювач тиску. Система електроприводу насоса вакууму складається із електродвигуна та передачі у вигляді паса клинового на рис. 1.1. не позначена, оскільки вважається класичною для будь-якої вакуумної установки для доїльної установки. [1-2]

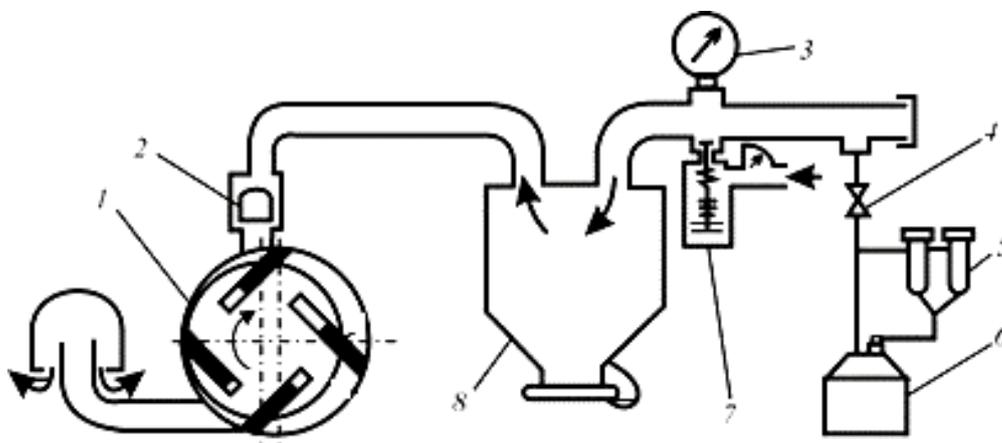


Рис. 1.1. Структурна схема складових доїльної установки: 1 – насос створення вакууму; 2 – запобіжник пробковий; 3 – вимірювач вакууму; 4 – вентиль; 5 – підвіс до апарата доїльного; 6 – молочна місткість; 7 – гравітаційний регулятор; 8 – ресивер.

Функціональним обов'язком насоса вакуумного є створення необхідного тиску рівня у вакуум-проводі та молоко-проводі установки для доїння корів.

Важливим у системі машинного доїння корів є дотримання встановленого рівня тиску вакууму у молоко-проводі та вакуум-проводі установки доїльної.

Так, вченими встановлено негативний вплив на здоров'я тварин відмінної від необхідного рівня вакууму тиску під час машинного доїння. Встановлено суттєве зниження інтенсивності виведення молока (на 0,06...1,5 л/хв) при доїнні корів та зменшення загального кінцевого надою корів на 1,9...2,5 при виникненні у просторі під дійкою тварини динамічного змінного тиску на рівні 9,7...20 кПа. Такі суттєві зміни тиску можуть бути викликані недосконалістю системи регулювання тиску вакууму при появі суттєвих відхилень від нормального режиму функціонування доїльної установки. Якщо доїння відбувається за умови зниженої інтенсивності молоковиведення із вим'я, то тварина буде більше часу піддаватись впливу вакуумметричного тиску та механічних впливів під час такту стиснення дійковою гумою. Такий вплив є негативним і призводить до збільшення у 3 рази кількість випадків травмування дійок вим'я корів, що в кінцевому випадку призводить до захворювання вим'я. [1, 3]

За даними дослідження [1, 3] технічного стану вакуумних систем доїльних установок встановлено суттєві відхилення рівня тиску вакууму на 28 кПа під час машинного доїння корів. Такі значні динамічні коливання тиску вакууму, відмінні від 3 кПа відповідно до зоотехнічних вимог, викликають зниження інтенсивності доїння корів на 13%, при цьому віддача по молоку тваринами скорочується на 4,5%, спостерігається збільшення чисельності тварин із захворюванням вим'я.

Виходячи із проведеного аналізу, одним із основних способів зберегти здоров'я тварин та їх продуктивність на належному рівні полягає у забезпеченні постійності тиску вакуумметричного та швидкого його відновлення. Використання насосів вакуумних із завищеною потужністю та ресиверів великого об'єму не забезпечують усунення вказаних проблем, а тільки вимагають більших грошових витрат. Тому в системі регулювання рівня

тиску вакууму необхідно використовувати ефективні пристрої із високою швидкодією які не потребують збільшених видатків.

1.2. Аналіз систем та способів регулювання рівня вакууму у вакуумній системі під час машинного доїння корів

Під час видалення повітря із вакуум-системи доїльної установки тиск вакууму робочий встановлюється за допомогою тиску регулятора гравітаційного типу, як найбільш поширеного рішення (рис. 1.2). [4]

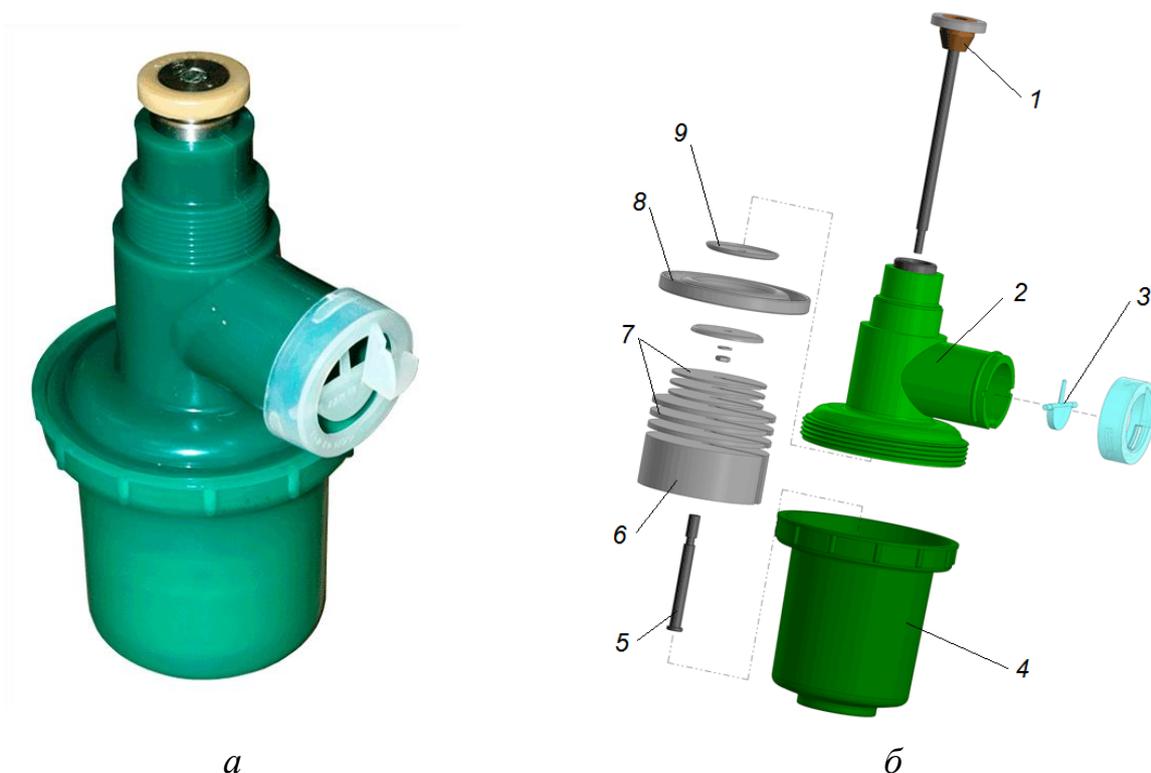


Рис. 1.2. Регулятор тиску вакууму гравітаційного типу: *а* – конструкція; *б* – складові: 1 – клапан; 2 – патрубок-корпус; 3 – показчик потоку; 4 – корпус; 5 – палеці; 6 – вантаж ваговий; 7 – диски вагові додаткові; 8 – гнучка перетинка; 9 – фіксатор перетинки гнучкої.

Як тільки тиск вакууму в вакуум-проводі буде перевищувати задану величину, клапан регулятора гравітаційного відкривається і відбувається

постійне підсмоктування повітря для вирівнювання тиску в системі. Як тільки тиск у системі із-за будь яких причин знизиться, клапан регулятора гравітаційного закривається, регулюючого потоку повітря у систему не буде надходити, а вакуумним насосом забезпечиться видалення зайвої порції повітря із системи до моменту досягнення встановленого рівня тиску вакууму.

При цьому подача вакуумного насоса залишається незмінною що і викликає деякі витрати часу на стабілізацію тиску вакууму в системі доїльної установки. В деяких випадках втрати повітря можуть бути суттєвими, що вимагатиме значно більше часу ніж обумовлено зоотехнічними вимогами. Тому, конструктори спробували вирішити проблему шляхом використання регуляторів тиску вакууму з мембранним механізмом.

Вакуумний регулятор тиску IRV20-C10 (рис. 1.3) виробництва MISUMI Еуропа GmbH (Тайвань) значно ефективніший порівняно із гравітаційною системою.

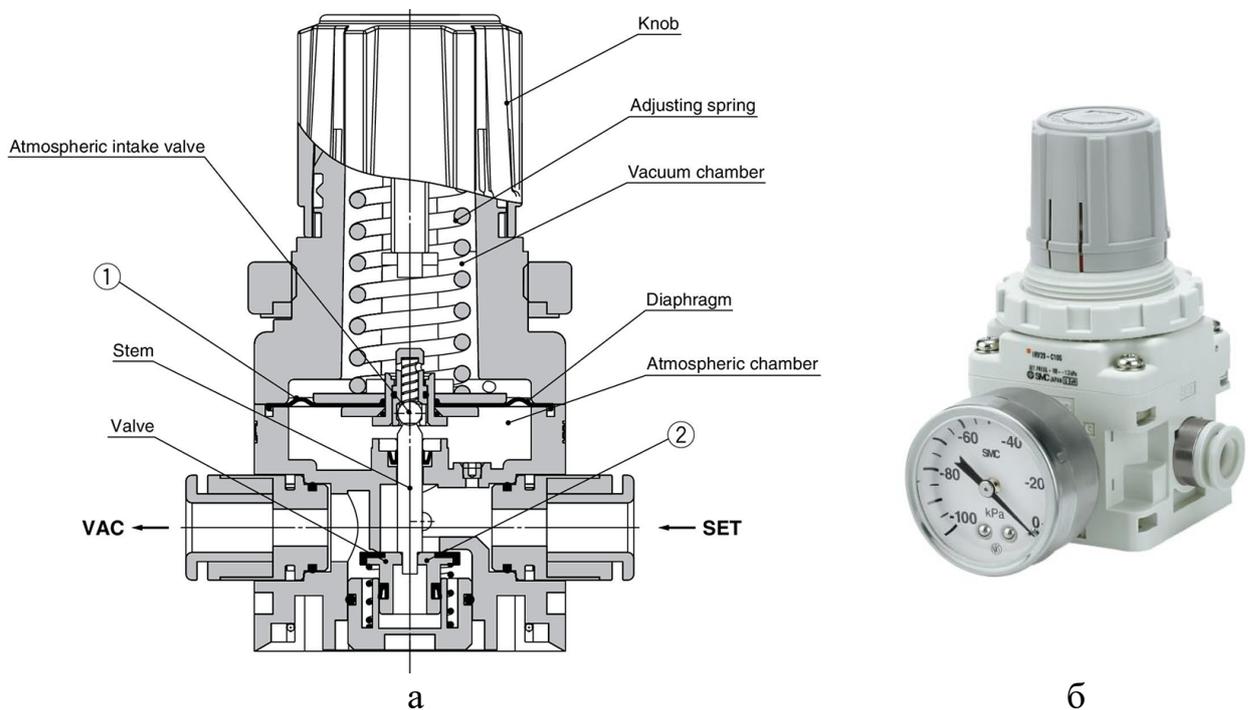


Рис. 1.3. Вакуумний регулятор тиску IRV20-C10: а – структурна схема регулятора; б – вигляд загальний [5]

Принцип роботи полягає в наступному. Коли ручку повертають за годинниковою стрілкою, регулювальна пружина стискається та спрямовує ,

мембрану разом із клапаном донизу. Відбувається поєднання камери VAC та камери SET, при цьому рівень вакууму тиску у камері SET зростає (до бажаного робочого тиску вакууму). Окрім цього, тиск вакуумний зі сторони SET поширюється через канал повітряний до камери вакуумну, та поширюється у просторі над діафрагмою, що спричиняє протидію силі яка стискає пружину регулювальну. Це відповідає регулюванню тиск в просторі SET. Коли рівень тиску вакууму порожнини SET збільшується вище від заданого значення, рівновага у камері вакууму утрачається, тому вона буде рухатись доверху. Це викликає до закритого клапан що відкриває атмосферний впуск клапан, що впускає атмосферний тиск у порожнину SET. Це буде відбуватись до того моменту поки не врівноважиться зусилля тиску над та під мембраною. Коли тиск вакууму в об'ємі SET буде нижчий від заданого, баланс зусиль між пружиною та вакуумною камерою змінюється, тому мембрана буде рухатись в них. Клапан закриється що викличе припинення надходження атмосферного тиску а відкриється клапан які сполучить порожнини VAC із SET. Тиск вакууму в даному випадку відновиться до заданого рівня. За допомогою кількості обертів ковпака встановлюється необхідне значення регульованого рівня вакууму. [5]

Електромагнітний регулятор вакууму SMC ITV 2050 (рис. 1.4, а) компанії Smart Pneumatic Co., Ltd (Китай) є типом лінійного регулятора вакууму, робоча принципова схема приєднання наведена на рис. 1.4, б. Один порт підключено до джерела вакууму, а інший порт підключено вакуумного ресивера або вакуумної системи доїльної установки. Регулятор тиску вакууму працює через електромагніт та регулює максимальний рівень вакуумного тиску рівномірно, залежно від вихідної ситуації та робочого рівня тиску у системі. Рівень вакууму прямо-пропорційний до керуючого сигналу сигналу електромагніта регулятора тиску вакууму. Цей керуючий сигнал в свою чергу залежить від різниці тисків між робочим (заданим відповідно до умов доїння) та фактично діючим рівнем тиску.

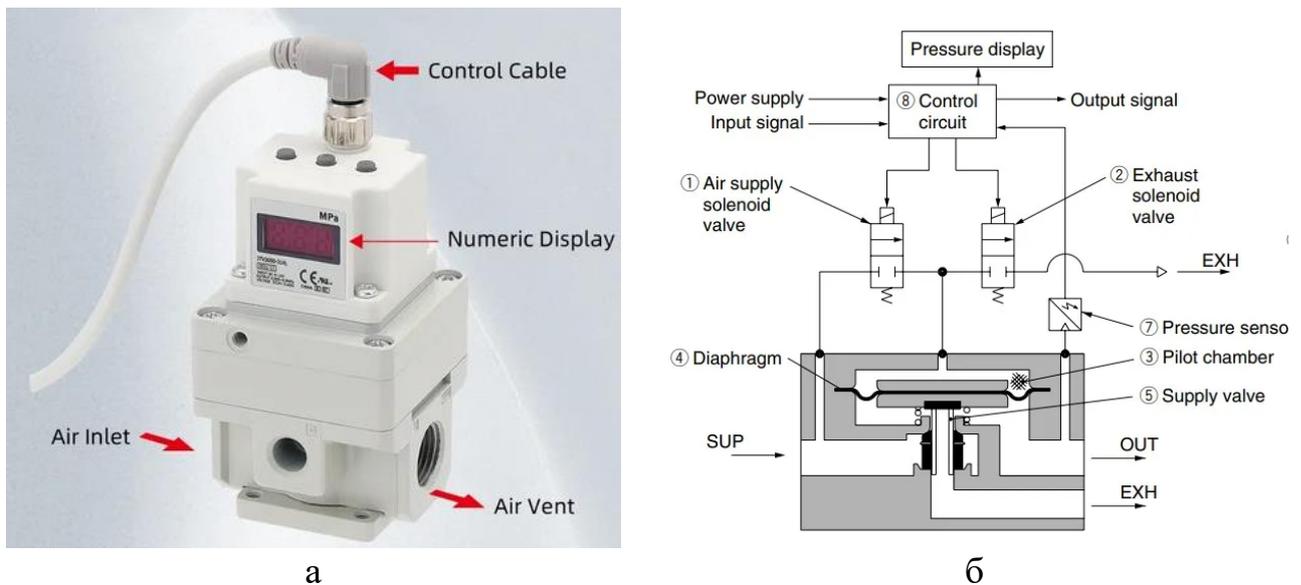


Рис. 1.4. Вакуумний регулятор тиску SMC ITV 2050: а – вигляд загальний; б – схема роботи регулятора. [6]

Цифровий регулятор вакууму SMC ITV 2050 дозволяє регулювати рівень вакууму за допомогою аналогового або цифрового сигналу керування. Вихід монітора доступний або у вигляді аналогового виходу, або у вигляді виходу, що перемикається.

Висновки до розділу 1

1. Підтримання заданого рівня вакуумметричного тиску у вакуумній системі доїльної установки досить важливе та необхідне завдання. Оскільки рівень тиску вакууму та його стабільність суттєво впливають на здоров'я тварин необхідно використовувати якісні системи регулювання.

2. Оцінка технічних засобів регулювання рівня тиску вакууму у вакуум-проводі доїльної установки вказали на широке різноманіття конструкційного виконання. Найбільш прийнятним вважається електромагнітний тип регуляторів. Проте спосіб регулювання тиску повинен забезпечити і зміну подачі вакуумного насоса, чого позбавлені відомі конструкції регуляторів.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВАКУУМНОГО НАСОСА

2.1. Обґрунтування алгоритму регульованого керування електроприводом вакуумного насоса

Особливість вакуумного насоса полягає у об'ємному принципі дії. Тобто габаритні конструкційні розміри складових вакуумного насоса та частота обертів ротора являються визначником подачі по повітрю (рис. 2.1). [7-9]

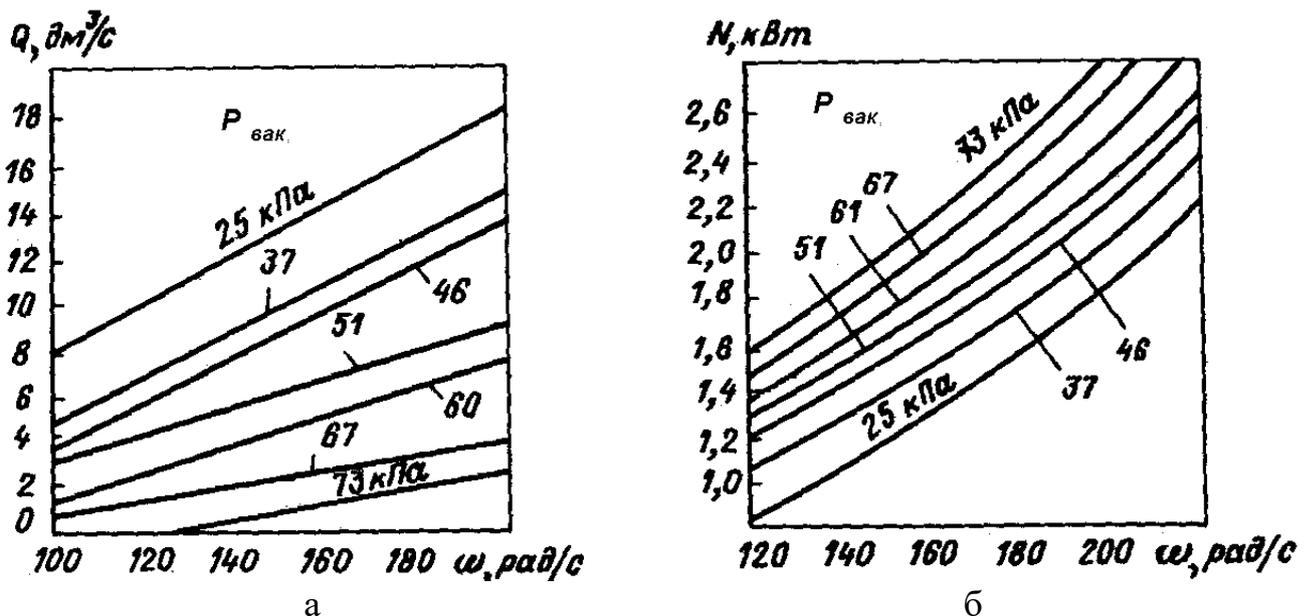


Рис. 2.1. Вплив частоти обертів ротора вакуумного насоса на його продуктивність (а) та витрати потужності на привод (б).

Відповідно до представлених графічних залежностей (рис. 2.1), зі збільшенням частоти обертів ротора вакуумного насоса зростає його продуктивність незалежно від рівня тиску вакууму який він створює у вакуумній системі установки доїльної. Пропорційно зростанню частоти обертів ротора зростає й рівень потужності яку необхідно витратити на створення

вакуумметричного тиску. Проте, зі зростанням рівня тиску вакууму продуктивність насосів вакуумного знижується а витрати потужності зростають за умови використання насоса ідентичного конструкційного параметрів.

Таким чином, досягнути бажаного рівня вакууму можна шляхом зміни продуктивності вакуумного насоса за рахунок зміни його частоти обертів ротора. Так, за умови зниження рівня вакууму під час доїння корів, повернути до бажаного рівня можна за рахунок збільшення частоти обертів ротора насоса вакуумного. Складемо алгоритм функціонування такої системи (рис. 2.2).

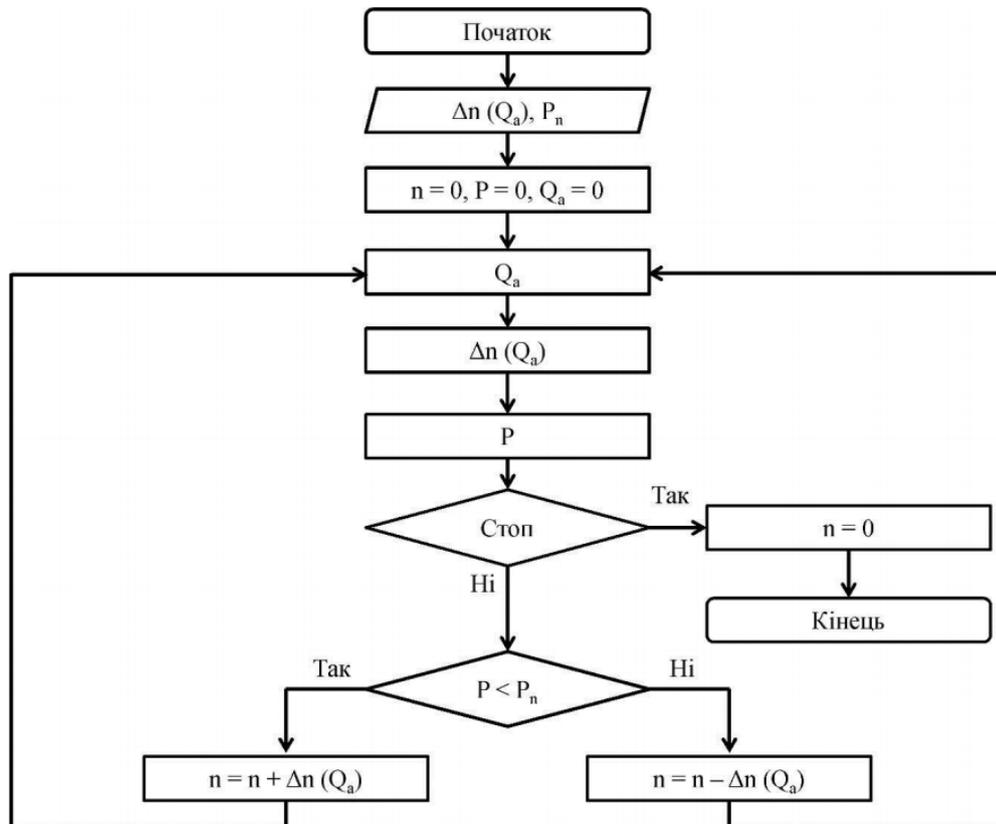


Рис. 2.2. Розроблений алгоритм послідовності функціонування системи керування електроприводу вакуумним насосом

Метою функціонування алгоритму (рис. 2.2) полягає у встановленні необхідного тиску вакууму у вакуумній системі доїльної установки. Так, допускається що тиск вакууму (P_p) залежить від подачі вакуумною системою доїльної установки (Q_p) та змінної частоти обертів валу ротора приводу вакуумного насоса (Δn) при відхиленні від тиску встановленого вимогами.

За початкових умов (рис. 2.2) якщо $Q_p=0$ то і $P_p=0$, тому вакуумний насос не працює і виконується умова $n=0$. Під час роботи доїльної установки відбувається видалення повітря із системи і встановлюється деяке значення тиску (P). Якщо це виміряне значення тиску (P) не відповідає тиску вакууму (P_p) встановленому відповідно до зоотехнічних вимог, то робота системи вважається помилковою і має зупинитись. Проте, за умови продовження роботи системи (позиція «Ні») відбувається порівняння наявного тиску вакууму із бажаним відповідно до вимог.

Якщо фактичний рівень тиску вакууму (P) перевищує задане значення (P_p) необхідно зменшити частоту обертів ротора вакуумного насоса на деяку величину (Δn), що вплине на зменшення інтенсивності видалення повітря із вакуумної системи (Q_p) до моменту стабілізації тиску на рівні P_p .

Якщо фактичний рівень тиску вакууму (P) значно менший від заданого значення (P_p) необхідно збільшити частоту обертів ротора вакуумного насоса на деяку величину (Δn), що вплине на збільшення інтенсивності видалення повітря із вакуумної системи (Q_p) до моменту стабілізації тиску на рівні P_p .

Графічно, робота алгоритму пояснюється на рис. 2.3-2.4. [7]

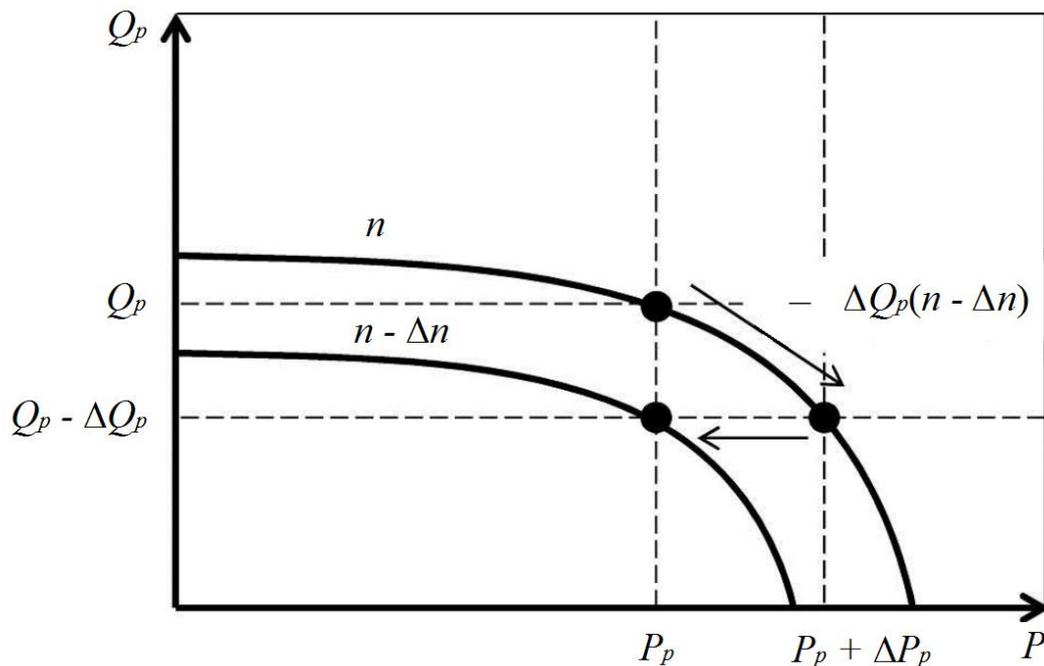


Рис. 2.3. Моделювання процесу зміни обертів вакуумного насоса за умови підвищення фактичного рівня тиску вакууму відносно бажаного

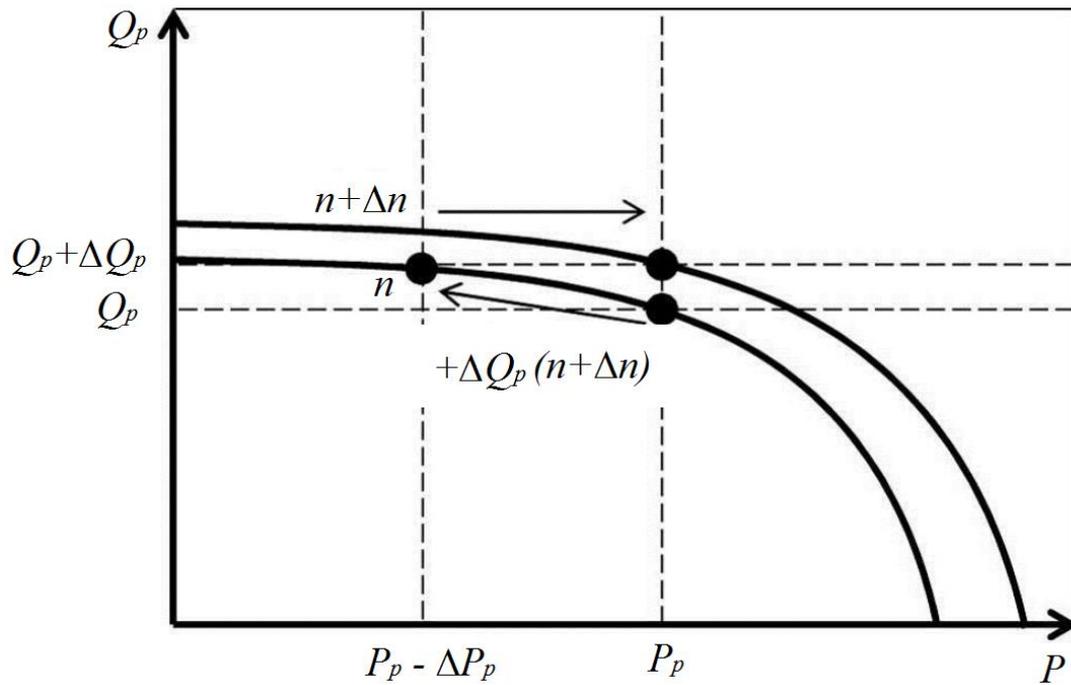


Рис. 2.4. Моделювання процесу зміни обертів вакуумного насоса за умови зниження фактичного рівня тиску вакууму відносно бажаного [7]

Відповідно до запропонованих схем функціонування розробленого алгоритму складемо критеріальну рівність:

$$\frac{\Delta Q_p(P_p, n + \Delta n)}{\Delta P} = \frac{\Delta Q_p(P_p, n - \Delta n)}{\Delta P}, \quad (2.1)$$

За умови виконання рівності забезпечиться адекватне функціонування системи керування електроприводом вакуумного насоса залежно від фактичних умов.

2.2. Розробка схеми електричного керування частотою обертання ротора електродвигуна приводу вакуумного насоса

Відомими вимогами до системи підтримання заданого рівня тиску вакуумметричного та його повернення до заданого рівня у нештатних ситуаціях повинна задовольняти ряд вимог. В першу чергу це не перевищення $\pm 2,5\%$

рівня помилки статистичної, не має бути більше 10% помилка динамічності, система регулювання повинна справитись із проблемою не довше ніж за 5 с, чутливість системи повинна дозволити працювати із діапазоном від 0,1 до 1,1 від продуктивності по повітряю номінальної, частота реакції на зміну позицій у навантаженості до 0,03 Гц, максимально можливе короткочасне збільшення навантаження не повинно перевищувати 30% від номіналу за продуктивністю вакуумного насоса. [8]

Розглянуті конструкції регуляторів вакууму не можуть задовольнити викладені вище вимоги. Присутня інерційність гравітаційним та мембранним типів регуляторам вакууму не дозволяє швидко відреагувати на зміну тиску. Окрім цього будь-який тип, навіть електронний, регуляторів тиску вакууму не здатні компенсувати втрати тиску у вакуумній системі. Це можна зробити лише за допомогою системи адаптування продуктивності вакуумного насоса до потреб повітропродуктивності вакуумної системи доїльної установки при заданому рівні тиску робочого вакууму. Вказаним умовам може задовольняти тільки запропонований алгоритм дій (див. рис. 2.2) відповідно до якого розроблена схема системи керування електроприводу вакуумного насоса (рис. 2.5) доїльної установки.

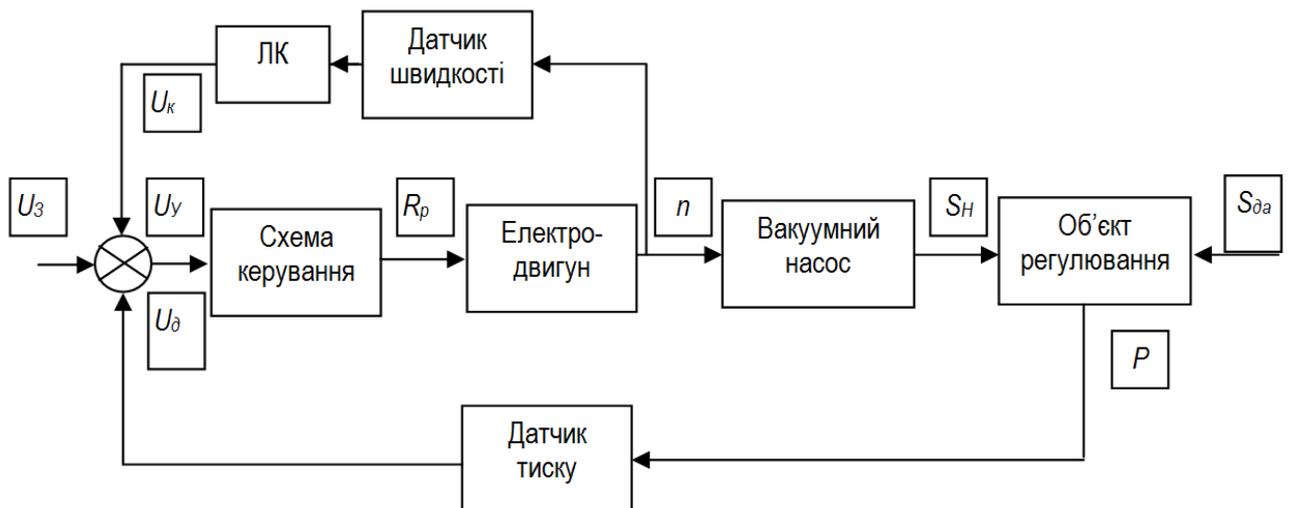


Рис. 2.5. Схема системи автоматичного керування електроприводом вакуумного насоса: $S_{да}$ – кількість повітря яке проходить через доїльні апарати, змінний фактор; S_n – вакуумний насос швидкість дії, керований фактор; n –

частота обертів ротора вакуумний насос; R_p – наявний в колі ротора електродвигуна опір; U_y – керуюча напруга; U_z – сигнал напруга яка відповідає заданому тиску вакууму; U_d – сигнал напруга від давача тиску; U_k – сигнал напруга для коригування; P – діючий фактично тиск середовища у вакуумній системі, значення величини тиску вакууму яке контролюється; LK – коректуючи ланка.

Відповідно до теоретичні дослідження [10-15], частоту обертів ротора вакуумного насоса можна регулювати за допомогою електродвигуна асинхронного типу за рахунок зміни опорів в електричному колі ротора постійного струму.

Для розуміння запропонованого рішення розглянемо вакуумну систему яка має об'єм $0,05 \text{ м}^3$, тиск створюється за допомогою вакуумний насос для доїльної установки який приводиться в дію через клинопасову передачу за допомогою електродвигуна з активним опором у колі постійного струму у роторі з опором рівним 10 Ом . Використаємо електронний давач тиску разом із вимірювачем тиску вакууму.

При виконанні подальшого моделювання введемо деякі припущення, з метою спрощення розуміння принципу регульованого керування:

- об'єктом для регулювання є вакуум-провід, який можна подати у вигляді двох з'єднаних між собою за послідовною схемою ланок (ємнісний із деяким запізненням);

- імпульсну схему керуючої системи будемо замінити на еквівалентну схему з підсилюванням струму постійного, оскільки для забезпечення умови яка є еквівалентна імпульсу у безперервній системі, відповідно до рекомендацій [16-20] запишемо:

$$0 \leq \omega_g \leq \omega_k - \omega_c; \quad \omega_k \geq 2 \cdot \omega_c, \quad (2.2)$$

де ω_k – комутаційна частота для тиристорів у схемі керування електроприводом (приймається $\omega_k \geq 100 \text{ с}^{-1}$);

ω_c – зріз частоти, що відповідає за пропущений сигнал системи (приймається $\omega_c \leq 4\text{с}^{-1}$);

ω_g – частота максимальної зміни впливу збурюючі факторів (приймається $\omega_g \leq 2\text{с}^{-1}$);

Постійні часу для вакуумного датчика, завдяки несутєвості відносно постійних часу для інших складових системи, можна прийняти на нульовому рівні.

При аналізі динаміки запропонованої схеми керування (див. рис. 2.5) можна використати подальші функції передатності: прямого каналу розімкнутого; замкнутої системи для впливів збурюючих; об'єкт регулювання для впливів регулюючих; об'єкта регулювання для впливу збурюючого; вакуумного насоса ротаційного; електродвигуна асинхронного типу із ротором фазовим; схеми системи керування; системи для порівняння; вакуумний давач.

На основі прийнятої концепції, запишемо:

$$W = \frac{K_c}{(T_0 + 1) \cdot (T_e + 1) \cdot (T_m + 1)}, \quad (2.3)$$

де K_c – коефіцієнт передачі прямого розімкнутого каналу запропонованої системи керування;

T_0 – постійна часу об'єкта для регулювання;

T_e – постійна часу електромагнітна для електродвигуна;

T_m – постійна часу електромеханічна для електродвигуна приводу.

Коефіцієнт передачі для прямого розімкнутого каналу розробки можна встановити за формулою:

$$K_c = K_0 \cdot K_n \cdot K_e \cdot K_m \cdot K_y \cdot K_d, \quad (2.4)$$

де K_0 – коефіцієнт для передачі об'єкта регулювання;

K_n – коефіцієнт для передачі вакуумного насоса;

K_e – коефіцієнт електромагнітний для передачі електродвигуна;

K_m – коефіцієнт електромеханічний передачі електродвигуна;

K_y – коефіцієнт передачі керуючої схеми;

K_o – коефіцієнт передачі тиску давача.

Рівняння (2.4) характеризує розроблену систему керування як статичну систему третього порядку. Відомо що для статичних систем [10] мінімальне значення коефіцієнта K_c визначається на основі заданої статичної помилки системи.

За результатами виконаних розрахунків можна сказати, що у даній статичній системі (див. рис. 2.5) величина має чисельне значення на рівні 8-10, тому статичну помилку можна вважати на рівні 10-12%. Відомо, що для досягнення заданих граничних параметрів похибка не повинна перевищувати 2,5%, тобто коефіцієнт має становити $K_c \geq 40$. За результатами аналізу передаточних функцій деяких ланок розробленої системи керування, значення $K_c \geq 40$ у статичній системі може бути отримано тільки якщо у 6-8 разів збільшити продуктивність вакуумного насоса. В нашому випадку доцільно перейти до дестатичної системи керування електроприводом. В такому випадку статична помилка розробленої системи керування буде визначатися тільки обмеженою зоною нечутливості тиску давачів [10].

З метою отримання необхідного запасу стійкості та швидкості відклику системи необхідно в структурну схему розробленої системи керування доповнити коригувальною (стабілізувальною) ланкою. Для досягнення вказаного результату введемо у ланцюг позитивного зворотного зв'язку аперіодичну ланку першого порядку [10].

З врахуванням вищенаведеного, залежність (2.3) отримає вигляд:

$$W = \frac{K_c \cdot (T_{noc} + 1)}{(T_0 + 1) \cdot [(T_e + 1) \cdot (T_m + 1) \cdot (T_{noc} + 1) - 1]}, \quad (2.5)$$

де T_{noc} – значення постійного часу для зворотного зв'язку, для розробленої схеми оптимальне значення становитиме $T_{noc} = 1,5$ с.

Принципова електрична схема розробленої системи керування вакуумним насосом доїльних установках шляхом зміни їх частоти обертів за допомогою електродвигуна асинхронного типу із імпульсним керуванням в колі постійного струму ротора подана на рис. 2.6.

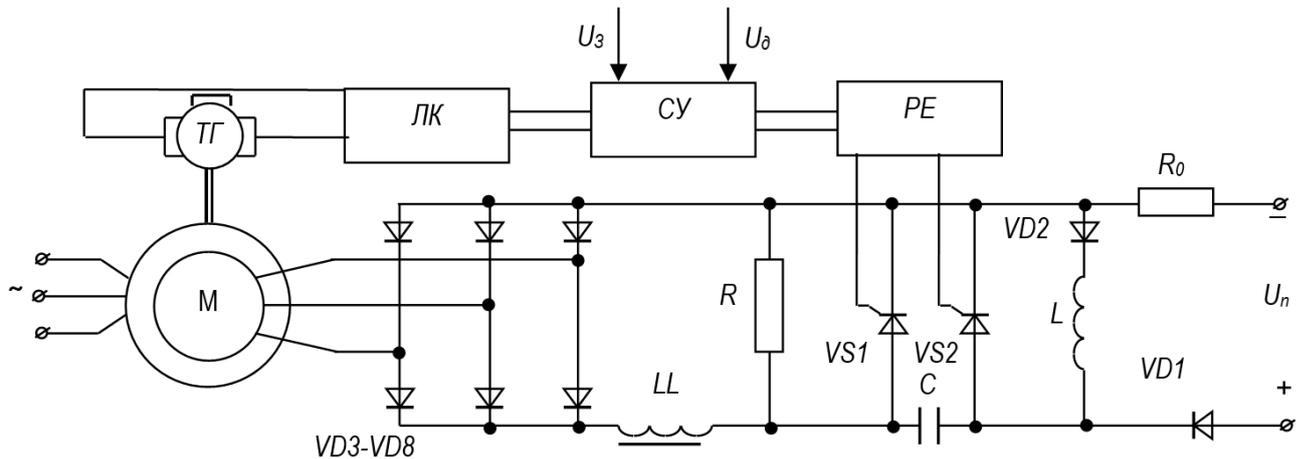


Рис. 2.6. Схема розробленої системи керування принципова електрична: M – електродвигун асинхронного типу з ротором фазним; $TГ$ – вимірювач обертів ротора електродвигуна; PE – релейний пристрій; CY – пристрій для сумування; LK – коректувальна ланка; $U_з$ – сигнал задаючий; $U_δ$ – сигнал давача тиску; U_n – джерело напруги живлення; R – опір активний у колі постійного струму ротора електродвигуна; C – конденсатор; $VS1-VS2$ – тиристор; $VD1-VD8$ – діод; L – котушка індуктивності; LL – дросель для обмеження сили струму; R_0 – обмежувач сили струму.

Зміна частоти обертання ротора вакуумного насоса відбувається завдяки зміні активного опору в колі струму ротора електродвигуна яка є пропорційною до витрати повітря у вакуум-проводі доїльної установки. На вхід CY (рис. 2.6) надходять сигнали ланки коректування, напруга задавального пристрою та давача тиску вакууму в абсолютному вимірі. Вихідна напруга CY буде пропорційна різниці між даними сигналами, подається на вхід PE , керованого за допомогою тиристорів $VS1-VS2$, які комутують активний опір в колі ротора електродвигуна M . Зміна часу опору замкненого стану в колі ротора

електродвигуна буде пропорційна розбалансу додаючих сигналів, тому час залежить від встановлення величини тиску вакууму, забезпечується шляхом регулювання частоти обертів ротора вакуумний насос та виконує основне завдання зі стабілізування рівня вакууму у вакуум-проводі доїльній установці.

Висновки до розділу 2

1. Встановлено, що більш перспективним способом підтримання заданого рівня вакууму у вакуум-проводі доїльної установці є використання системи автоматичної стабілізації вакууму за рахунок зміни продуктивності вакуумного насоса. Розроблена система керування зміною частоти обертання вала ротора вакуумного насоса за рахунок автоматичної зміни частоти обертання ротора електродвигуна залежно від рівня вакууму в системі. Проведені дослідження показали, що запропонована математична модель розробленої системи керування з достатньою точністю описує динаміку поведінки системи.

2. Результати досліджень вказують, що статичні параметри розробленої системи керування мають наступні характеристики: середньоквадратичне відхилення рівня вакуумметричного тиску від заданого робочого тиску знаходяться в діапазоні зміни витрати повітря системою в межах від 0,1 до 1,1 номінальної продуктивності вакуумного насоса і не перевищує 0,8%. Завдяки системі отримали статичну помилку підтримки заданого рівня вакуумметричного тиску не перевищує 2,4%, що цілком відповідає вимогам до керуючих систем. Встановлено динамічні параметри розробленої системи керування: величина регулювання в межах 10%, час регулювання не перевищує 5 с, максимальна частота перевищення навантаження на рівні до 0,033 Гц, необхідна максимальна нетривале збільшення витрат потужності не перевищує 30% від номінальної продуктивності вакуумного насоса.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВАКУУМНОГО НАСОСА

3.1. Дослідження параметрів регульованого електроприводу вакуумного насоса

Для проведення досліджень розробленої системи керування електроприводом вакуумного насоса доїльної установки використовували лабораторну установку (рис. 3.1).

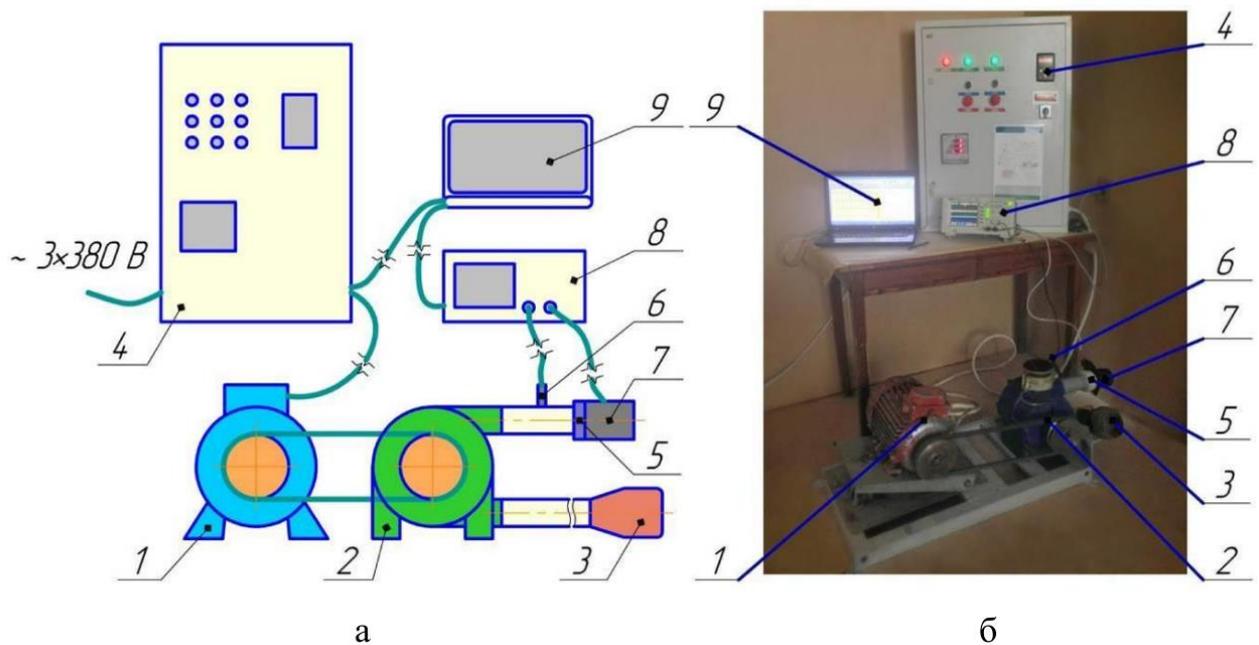


Рис. 3.1. Структурна схема (а) та лабораторний стенд дослідження розробленої системи керування: 1 – електродвигун асинхронного типу; 2 – вакуумний насос; 3 – заглушувач шуму; 4 – зібрана в корпусі принципова електрична схема; 5 – система регулювання по потокові повітря; 6 – датчик тиску вакуумного; 7 – датчик витрати по повітря; 8 – електронний перетворювач сигналів; 9 – ноутбук.

Результати дослідження при використанні лабораторної установки дозволили встановити межі частот обертів вакуумного насоса та рівня вакуумметричного тиску (рис. 3.2).

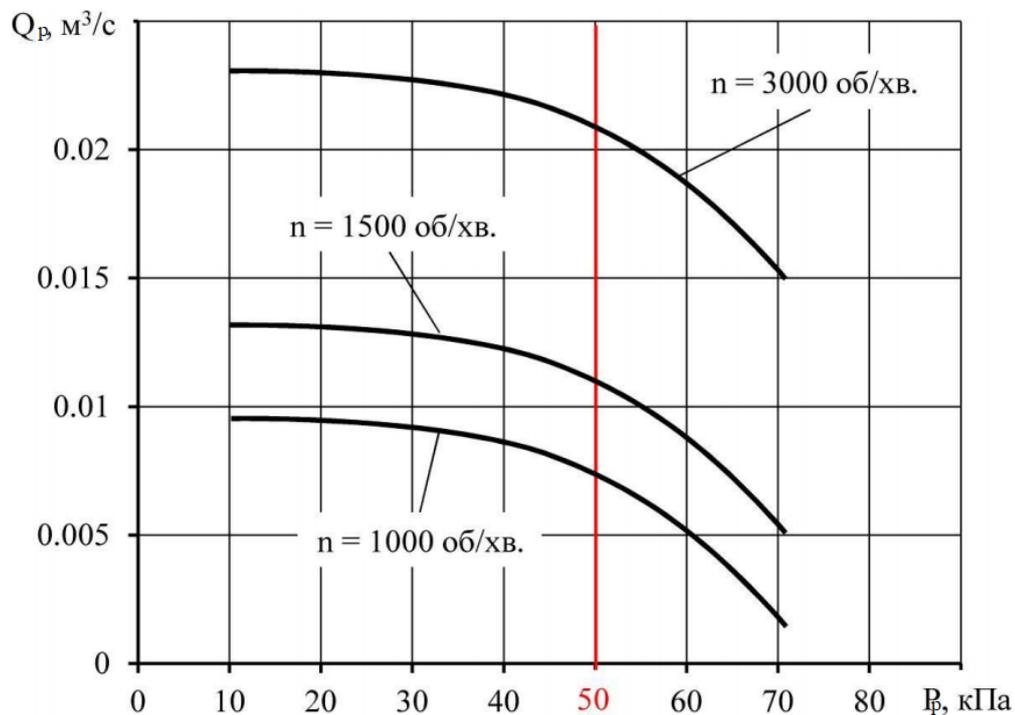


Рис. 3.2. Залежність фактичної подачі по повітрю (Q_p) та частоти обертання (n) валу ротора насоса вакуумного від рівня тиску (P) у системі.

Відповідно до графічних залежностей (рис. 3.2) зі зростанням необхідного рівня тиску вакууму у вакуумній системі доїльної установки продуктивність по повітрю знижується незалежно від регульованої частоти обертання. З графіків видно необхідно яку подолати різницю у подачі по повітрю для підтримання заданого рівня тиску вакууму (50 кПа) то яка частота обертів вала ротора буде прийнятною [16-19], залежно від можливостей технічних засобів машинного доїння.

За результатами лабораторних досліджень отримали математичний залежність встановлення необхідної різниці частоти обертів ротора вакуумний насоса з врахуванням тиску вакуумного за умови потрібної подачі по повітрю:

$$\Delta n = \frac{Q_p - 44,54 + 1,562P_p - 0,169P_p^2 - 0,00266P_p^3}{0,427}, \quad (3.1)$$

де Δn – різниця приросту частот обертів ротора насоса, хв^{-1} ;

P_p – необхідний тиск вакууму, кПа ;

Q_p – подача по повітрю для доїльного агрегату, л/хв .

Отоимана математична залежність дає нам чітке розуміння суттєвого впливу рівня вакуумметричного тиску на забезпечення стабільної роботи вакуумної системи доїльного агрегата.

3.2. Встановлення оптимальних характеристик роботи вакуумного насоса із регульованим електроприводом

Робота системи регулювання рівня вакуум-метричного тиску у вакуум-проводі доїльної установки без корекції вказана на рис. 3.3.

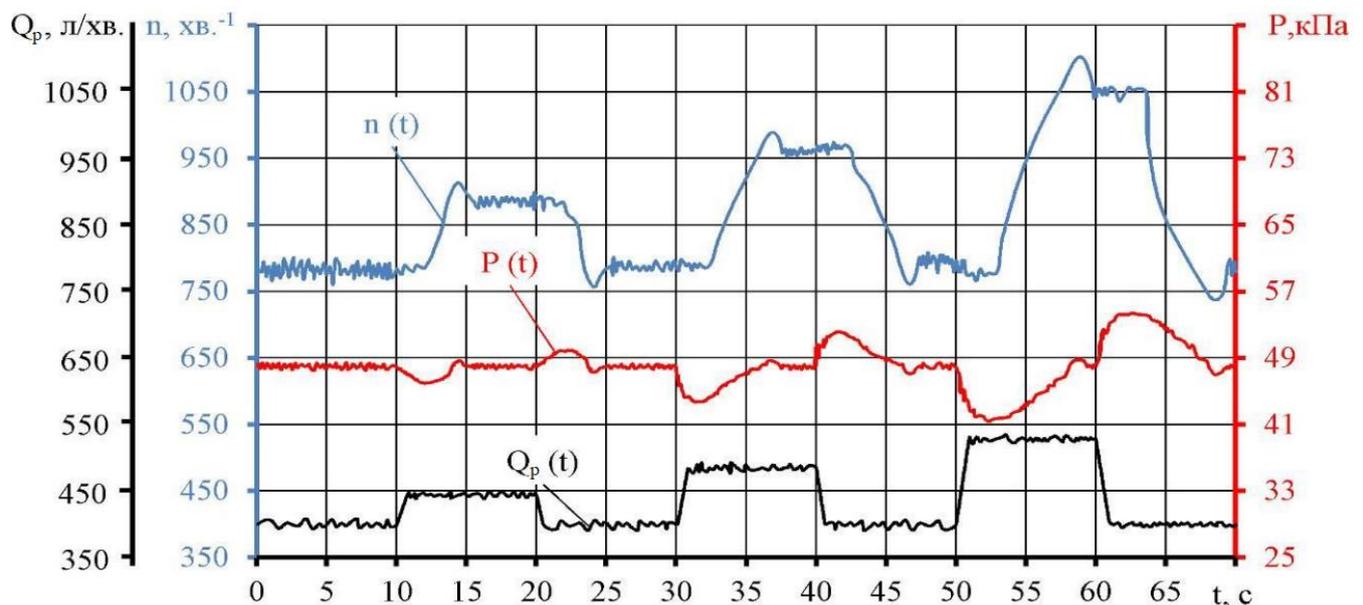


Рис. 3.3. Динамічні характеристики регульованих впливів на зміну частоти обертів вала (n) електродвигуна приводу насоса вакуумного залежно від необхідної рівня компенсації втрати тиску вакууму (P) у вакуум-проводі доїльної установки спричиненого потоком повітря (Q_p).

Робота системи представленого на рис. 3.3 працює досить коректно. Так, при збільшенні потреб у видаленні зайвих порцій надходження повітря до вакуум-проводу що спонукає до зниження рівня тиску вакууму збільшується частота обертів вала електродвигуна на величину необхідну для вирівнювання тиску до заданих меж. Проте досить великі коливання різниці тиску вакууму на рівні 6,5 кПа вважаються неприйнятними відповідно до зоотехнічних вимог.

Діаграми характеристики роботи із доопрацьованою системою керування відповідно до розробленої схеми (див. рис. 2.6) подана на рис. 3.4.

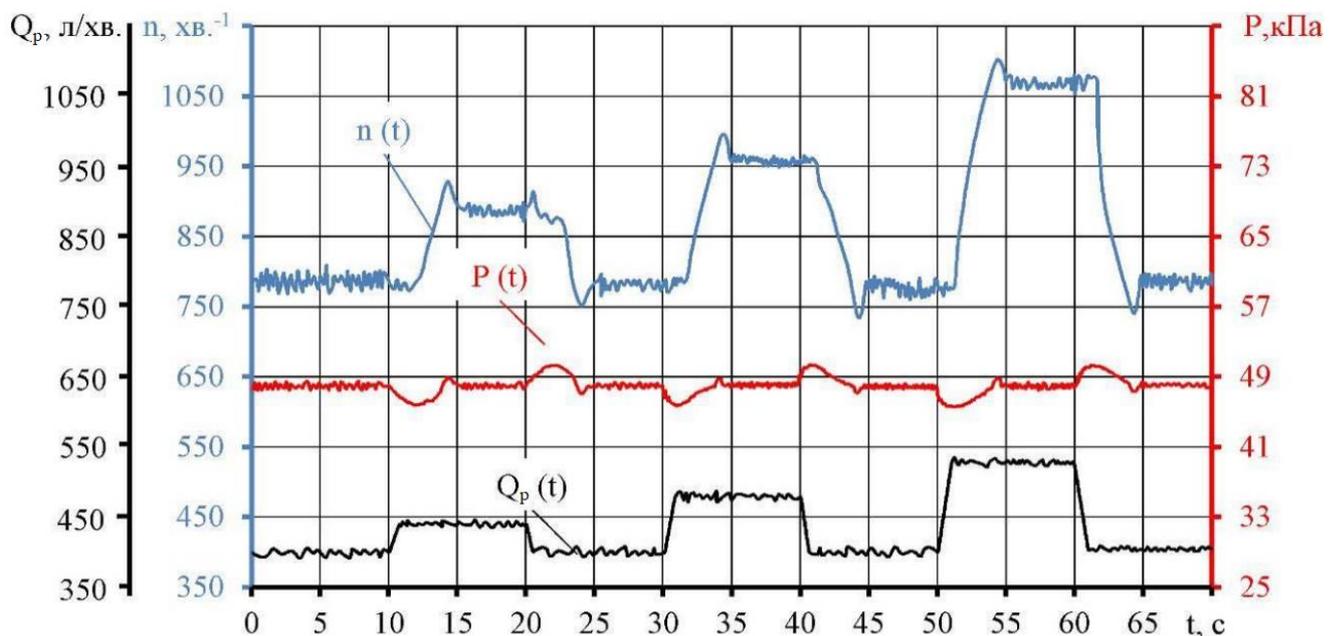


Рис. 3.4. Динамічні характеристики регулювальних впливів на зміну частоти обертів вала (n) електродвигуна приводу насоса вакуумного залежно від необхідної рівня компенсації втрати тиску вакууму (P) у вакуум-проводі доїльної установки спричиненого потоком повітря (Q_p) розробленої системи керування.

Відповідно до отриманих даних (рис. 3.4) при застосуванні розробленої системи керування продуктивним насосом вакуумним втрати тиску знижуються до рівня 2,5 кПа що на 4 кПа менше ніж класичного

регулювального механізму. Таким чином розроблена система виправдовує себе оскільки відповідає вимогам встановленими стандартами.

Оцінка результатів дослідження витрат потужності при використанні розробленої системи керування в порівняльних позиціях подана на рис. 3.5



Рис. 3.5. Характер динамічного процесу зміни потужності електродвигуна (N_e) на привод насоса вакуумного впродовж досліджуваного періоду (t).

Проведені дослідження (рис. 3.5) вказують на незначні переваги запропонованої системи керування електроприводом вакуумного насоса. За результатами вимірів витрати на роботу при використанні розробленої системи становлять несуттєву різницю в 118 Вт, але має кращі регуляторні характеристики.

Чим більша потреба у компенсації потоку повітря (рис. 3.5) тим вищими спостерігаються витрати потужності. На основі аналізу лабораторних даних проведених досліджень отримали рівняння регресії встановлення потужності від рівня тиску вакууму та необхідної частоти обертів ротора:

$$N_e = -1,35 + 0,022P_p + 0,002n - 1,41 \cdot 10^{-5} P_p^2 - 4,28 \cdot 10^{-6} P_p n + 1,157 \cdot 10^{-7} n^2, \quad (3.2)$$

Значення коефіцієнта кореляції на рівні 0,94 вказує на те що отримане рівняння регресії (3.2) має досить високу достовірність (95%).

Висновки до розділу 3

1. Виконаними дослідженнями встановлено, що за вищого рівня тиску вакууму у вакуумній системі доїльної установки продуктивність по витраті повітря знижується незалежно від встановленої частоти обертання ротора. Встановлено, що частота обертання ротора вакуумного насоса визначається рівнем вакууму який, в свою чергу, залежить від потоку повітря у вакуум-проводі доїльної установки.

2. Встановлено, що при збільшенні потреби у вилученні зайвих порцій повітря із вакуум-проводу, яке викликає зниження рівня тиску вакууму, збільшується частота обертів валу електродвигуна на величину необхідну для вирівнювання тиску до заданого рівня. Коливання різниці тиску вакууму при використанні розробленої системи керування регульованим електроприводом дозволяє знизити динамічні втрати тиску до рівні 2,5 кПа, що відповідає зоотехнічним вимогам.

3. Встановлено, що чим більша потреба у компенсації потоку повітря тим вищими спостерігаються витрати потужності. На основі аналізу лабораторних даних проведених досліджень отримали рівняння регресії встановлення залежності потужності електродвигуна від рівня тиску вакууму та необхідної частоти обертів ротора вакуумного насоса.

ВИСНОВКИ

1. Підтримання заданого рівня вакуумметричного тиску у вакуумній системі доїльної установки досить важливе та необхідне завдання. Оскільки рівень тиску вакууму та його стабільність суттєво впливають на здоров'я тварин необхідно використовувати якісні системи регулювання.

2. Оцінка технічних засобів регулювання рівня тиску вакууму у вакуум-проводі доїльної установки вказали на широке різноманіття конструкційного виконання. Найбільш прийнятним вважається електромагнітний тип регуляторів. Проте спосіб регулювання тиску повинен забезпечити і зміну подачі вакуумного насоса, чого позбавлені відомі конструкції регуляторів.

3. Встановлено, що більш перспективним способом підтримання заданого рівня вакууму у вакуум-проводі доїльної установки є використання системи автоматичної стабілізації вакууму за рахунок зміни продуктивності вакуумного насоса. Розроблена система керування зміною частоти обертання вала ротора вакуумного насоса за рахунок автоматичної зміни частоти обертання ротора електродвигуна залежно від рівня вакууму в системі. Проведені дослідження показали, що запропонована математична модель розробленої системи керування з достатньою точністю описує динаміку поведінки системи.

4. Результати досліджень вказують, що статичні параметри розробленої системи керування мають наступні характеристики: середньоквадратичне відхилення рівня вакуумметричного тиску від заданого робочого тиску знаходяться в діапазоні зміни витрати повітря системою в межах від 0,1 до 1,1 номінальної продуктивності вакуумного насоса і не перевищує 0,8%. Завдяки системі отримали статичну помилку підтримки заданого рівня вакуумметричного тиску не перевищує 2,4%, що цілком відповідає вимогам до керуючих систем. Встановлено динамічні параметри розробленої системи керування: величина регулювання в межах 10%, час регулювання не перевищує 5 с, максимальна частота перевищення навантаження на рівні до 0,033 Гц,

необхідна максимальна нетривале збільшення витрат потужності не перевищує 30% від номінальної продуктивності вакуумного насоса.

5. Виконаними дослідями встановлено, що за вищого рівня тиску вакууму у вакуумній системі доїльної установки продуктивність по витраті повітря знижується незалежно від встановленої частоти обертання ротора. Встановлено, що частота обертання ротора вакуумного насоса визначається рівнем вакууму який, в свою чергу, залежить від потоку повітря у вакуум-проводі доїльної установки.

6. Встановлено, що при збільшенні потреби у вилученні зайвих порцій повітря із вакуум-проводу, яке викликає зниження рівня тиску вакууму, збільшується частота обертів валу електродвигуна на величину необхідну для вирівнювання тиску до заданого рівня. Коливання різниці тиску вакууму при використанні розробленої системи керування регульованим електроприводом дозволяє знизити динамічні втрати тиску до рівні 2,5 кПа, що відповідає зоотехнічним вимогам.

7. Встановлено, що чим більша потреба у компенсації потоку повітря тим вищими спостерігаються витрати потужності. На основі аналізу лабораторних даних проведених досліджень отримали рівняння регресії встановлення залежності потужності електродвигуна від рівня тиску вакууму та необхідної частоти обертів ротора вакуумного насоса.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фененко А. І. Механізація доїння корів. Теорія і практика: монографія. К., 2008. 198 с.
2. Медведський О. В. Аналіз шляхів удосконалення електроприводу вакуумного насоса. *Наукові читання – 2025* : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Т.2. 16-18.
3. 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.
4. Вакуумний тиску регулятор: веб-сайт. URL : <https://bratslav.com/katalog-zapasnikh-chastin/adm08200>
5. Вакуумний регулятор (IRV20-C10) : веб-сайт. URL : <https://it.misumi-ec.com/vona2/detail/221006501197/?HissuCode=IRV20-C10>.
6. Пропорційний клапан регулятора вакуумного тиску : веб-сайт. URL : <https://ua.pneumatic-parts.com/directional-valve/directional-solenoid-valve/vacuum-pressure-regulator-proportional-valve.html>.
7. Медведський О. В. Розробка системи керування вакуумним насосом доїльної установки. *Студентські читання–2025* : матеріали науково-практичної конференції науково педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 57–59.
8. ISO 5707. Milking machine installations. Construction and performance. Geneva, Switzerland: The International for Standardization Organization, 2007. 52 p.
9. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування : навч. посібник / Барало О. В., Самойленко П. Г., Гранат С. Є., Ковальов В. О. К.: Аграрна освіта, 2010. 557 с.

10. Технічні засоби автоматизації / М. В. Лукінюк, В. П. Лисенко, В. Є. Лукін, А. М. Гладкий, С. А. Шворов, А. А. Руденський, А. А. Заверткін. Ніжин.: Видавець ПП Лисенко М. М., 2018. 455 с.
11. Титаренко М. В. Електротехніка: навч. посібник. К.: Кондор, 2004. 240 с.
12. Малинівський С. М. Загальний електротехнік. Львів: Львівськ політехніка, 2001. 596 с.
13. Медведський О. В. Встановлення параметрів системи керування вакуумним насосом доїльної установки. *Біоенергетичні системи* : матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. 19-20 листопада 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 12–14.
14. 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.
15. 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.
16. Городжа А. Д. Загальна електротехніка. К.: КНУБА, 2000. 150 с.
17. Лобода В. Б. Фізичні основи вакуумної техніки: навч. посіб. Суми: ВТД «Університетська книга», 2011. Ч. 1. 253 с.
18. Митропольський І. Є., Грицак Р. В. Вакуумна техніка: навч. посіб. Ужгород. Видавництво УжНУ «Говерла», 2018. 138 с.
19. Шимон Л. Л. Техніка фізичного експерименту: навч. посіб. Частина 1. Фізичні основи вакуумної техніки. Ужгород: Вид. УжНУ «Говерла», 2008. 400 с.