

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

КОВАЛЬ АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.316.71

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ДВОДВИГУННИМ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті,
Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кухарчук Василь Васильович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри теоретичної електротехніки та
електричних вимірювань

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мороз Володимир Іванович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри електромехатроніки та
комп'ютеризованих електромеханічних систем;

доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович,
Кременчуцький національний університет імені
Михайла Остроградського, директор Інституту
електромеханіки, енергозбереження і систем
управління, професор кафедри систем автоматичного
управління та електроприводу.

Захист відбудеться “ 23 ” вересня 2021 р. о 14-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “ 20 ” серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Цукрова галузь є важливою складовою харчової промисловості України – і з огляду на історію (понад 160 років), і з огляду на обсяги виробництва та енергоспоживання. Значну частину виробничої потужності на даний момент становлять заводи невеликої потужності з досить зношеним та застарілим обладнанням. Це призводить до низької ефективності виробництва порівняно з європейською цукровою промисловістю, у тому числі до високих питомих енерговитрат. Подібна ситуація веде до банкрутства багатьох цукрових заводів. Так у сезоні 2011 року в Україні працювало 77 заводів, у сезоні 2012 року – 63 заводи, а у сезоні 2013 року – 38 цукрозаводів, що переробили 9,06 млн. тон цукрових буряків, та виробили 1,212 млн. тон цукру.

Це ставить перед галуззю завдання модернізації, збільшення продуктивності та ефективності виробництва. На деяких підприємствах за останні роки було досягнуто підвищення добової переробки на 50 – 100%, завдяки чому собівартість виробленого цукру на таких підприємствах значно знизилась. Вирішення таких завдань відбувається шляхом оптимізації технологічних схем, встановлення нового виробничого обладнання та інтенсифікації використання існуючого. Зокрема, це стосується використання дифузійних апаратів, які призначені для екстракції цукру з бурякової стружки, що є основним обладнанням бурякопереробного відділення, від надійності й ефективності якого залежить робота всього виробництва.

У вітчизняній цукровій промисловості широке застосування знайшли шнекові дифузійні апарати похилого типу або похилі дифузійні апарати (ПДА), що приводяться в рух, найчастіше, дводвигунним приводом постійного струму. Виробники, модернізуючи пов'язане технологічно обладнання, постійно збільшують використання цих апаратів, тоді як транспортна механічна система дифузійних апаратів залишається незмінною. Це разом з постійним збільшенням потужності приводу призводить до зниження надійності роботи, виникненням різних аварійних ситуацій та коливальних режимів, які є характерним на багатьох цукрових заводах. Безпосередньою причиною таких режимів є наявність пружних зв'язків між двигунами приводу та особливості експлуатації ПДА, а також недосконалість існуючих систем автоматизованого керування приводом, пов'язаних з відсутністю у них засобів вимірювання та контролю механічних параметрів.

У таких умовах надзвичайно важливою науково-технічною задачею є оцінка динамічних властивостей системи приводу ПДА. Однак її виконання ускладнюється відсутністю адекватного математичного опису, які враховують наявність пружно-дисипативного зв'язку, нелінійним характером якого не можна знехтувати, та інші особливості роботи механічної частини ПДА. Розробка математичних моделей системи електроприводу ПДА, дослідження її динамічних режимів засобами імітаційного моделювання, оцінка зон стійкості в різних координатах параметрів системи та режиму є актуальним завданням, кінцевою метою якої є розробка таких систем автоматизованого керування, що

відповідатимуть існуючим експлуатаційним вимогам. Особливою відмінністю синтезованих систем автоматизованого керування мають бути наявність засобів вимірювання та контролю механічних параметрів приводу, а також засобів, які б не допускали виникнення коливальних режимів, пов'язаних з наявністю нелінійних пружно-дисипативних зв'язків. Суттєвим аспектом при цьому є перевірка адекватності розроблених моделей. Для цього не можливо обійтись без експериментальних досліджень. Такий підхід дасть змогу застосувати результати досліджень як в традиційних системах приводу постійного струму, так і в системах частотно-регульованого асинхронного.

Окремим завданням є обґрунтування вибору типу приводу (постійного струму чи частотно-регульованого асинхронного), основою якого є не лише техніко-економічні показники, а й показники надійності, що впливають з динамічних властивостей системи.

Тому дана проблематика потребує не лише теоретичних досліджень, а й практичної реалізації спроектованих пристроїв.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.

Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2006-2020 років, відповідно до наукового напрямку кафедри та за держбюджетною темою «Нові методи та засоби вимірювання механічних фізичних величин на основі вдосконаленої теорії електродинамічних аналогій» 23-Д-341 (№ держреєстрації 0112U001370) та «Система автоматизованого контролю параметрів гідроагрегатів в стаціонарних та перехідних режимах роботи» 23-Д-384 (№ держреєстрації 0117U000570).

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення надійності дводвигунного приводу похилого дифузійного апарата з нелінійними пружними зв'язками за рахунок автоматизованого забезпечення його роботи в зоні стійкості, що базується на безперервному контролі основних його електричних та механічних параметрів.

Для виконання поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Зробити огляд відомих систем керування приводом ПДА та методів дослідження їх динамічних властивостей.
2. Вдосконалити математичні моделі системи дводвигунного автоматизованого електропривода постійного струму ПДА шляхом врахування нелінійного характеру пружно-дисипативного зв'язку між двигунами.
3. Дослідити динамічні режими системи приводу ПДА та встановити вплив основних параметрів системи та режиму на зону її стійкості.
4. Здійснити порівняльний аналіз динамічних та техніко-економічних показників системи приводу постійного струму та частотно-регульованого асинхронного приводу.
5. Розробити структурні схеми, математичні моделі та алгоритми роботи системи автоматизованого керування приводом ПДА, а також засобів вимірювання та контролю основних параметрів його роботи.
6. Здійснити апаратну реалізацію системи автоматизованого керування приводом ПДА, довести адекватність розроблених математичних

моделей та визначити вплив застосування пропонованих систем керування на показники надійності та ефективності роботи ПДА.

Об'єкт дослідження – електромагнітні та електромеханічні процеси в дводвигунному електроприводі з пружним зв'язком похилого дифузійного апарата.

Предмет дослідження – методи та засоби автоматизованого керування електроприводом похилого дифузійного апарата.

Методи дослідження. При розв'язанні поставлених задач використано методи математичного та фізичного моделювання, методи теорії автоматичного керування та автоматизованого електроприводу, метод електромагнітних аналогій, методи символічної математики, числові методи розв'язку систем нелінійних диференціальних рівнянь.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вдосконалено математичну модель дводвигунного електропривода похилого дифузійного апарата, яка від відомих відрізняється врахуванням електромеханічних процесів, які пов'язані з наявністю нелінійного пружно-дисипативного зв'язку між двигунами, що дозволяє досліджувати динамічні режими системи в умовах нерівномірного завантаження шнековалів, яке характерне для технологічного процесу в дифузійному апараті.

2. Вперше досліджено динамічні властивості дводвигунного електроприводу похилого дифузійного апарата з нелінійними пружними зв'язками, що дало змогу визначити зони стійкості системи в залежності від основних параметрів його роботи для двох типів приводу: постійного струму та частотно-регульованого асинхронного.

3. Отримав подальший розвиток метод контролю механічних параметрів електропривода, який від відомих відрізняється додатковим вимірюванням відносного кута повороту валів двигунів, контроль за яким дозволяє забезпечити роботу системи електропривода похилого дифузійного в стійкій зоні.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено функціональні і електричні принципові схеми системи автоматизованого керування приводом похилого дифузійного апарата.

2. Розроблено алгоритми роботи та програмне забезпечення мікропроцесорної системи керування приводом дифузійного апарата похилого типу.

3. Розроблено пристрої диференційного захисту дводвигунного приводу похилого дифузійного апарата від аномальних режимів за механічними та електричними параметрами.

4. Проведено експериментальні дослідження запропонованих методів та засобів в умовах виробництва, у ході яких доведено адекватність розроблених математичних моделей, визначено основні показники надійності системи, встановлено позитивний вплив впровадження запропонованих пристроїв на надійність та ефективність роботи приводу похилого дифузійного апарата.

5. Одержані результати впроваджено на підприємствах «Філія ВП «Цукорремналадка» ПРАТ АК «САТЕР» (м. Вінниця), ТОВ «ПК Зоря Поділля» (м. Гайсин). Результати, які стосуються автоматизованого електроприводу, впроваджено в навчальний процес у лабораторії промислової електроніки Вінницького національного технічного університету з дисциплін «Промислова електроніка» та «Силові перетворювачі в автоматизованому електроприводі».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та практичні результати отримані автором самостійно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві такий: [1]-[5] – здійснено оцінювання точності вимірювання несинусоїдних величин в пристроях силової перетворювальної техніки, [6] – розроблено математичний опис процесів, що протікають у системі приводу, [7] – проведено ідентифікацію параметрів механічної частини системи дводвигунного приводу похилого дифузійного апарату, [8] – розроблено математичні моделі дводвигунного електроприводу постійного струму похилого дифузійного апарату, встановлено вплив основних параметрів системи та режиму на динамічні властивості електроприводу та визначено зони стійкої роботи в різних системах координат, [9] – розроблено імітаційну Simulink-модель дводвигунного електроприводу постійного струму та запропоновано метод дослідження динамічних властивостей системи приводу, [10] – отримано часову функцію перехідної величини лінійного електричного кола змінного струму високого порядку. [11] – розроблено математичні моделі асинхронного частотно-регульованого дводвигунного електропривода похилого дифузійного апарату для двох варіантів, виконано порівняльний аналіз динамічних властивостей системи двох варіантів живлення двигунів у порівнянні з традиційним електроприводом постійного струму, [12] – запропоновано метод та розроблено засоби автоматизованого контролю швидкостей обертання та відносного кута повороту валів двигунів електропривода похилого дифузійного апарату, [13] – розроблено систему автоматизованого керування дводвигунним електроприводом постійного струму, як електромеханічним комплексом, проведено експериментальні дослідження запропонованої системи керування в умовах виробництва, [14]-[17] – розроблено структурні схеми пристроїв диференційних захистів та здійснено математичний опис їх роботи, [18] – здійснено оцінювання точності вимірювання несинусоїдних величин стандартної форми приладом магніто-електричної системи, [19] – розроблено математичні моделі дводвигунного електроприводу похилого дифузійного апарату, [20] – досліджено динамічні властивості лінеаризованої системи електроприводу похилого дифузійного апарату, [21] – розроблена узагальнена структурна схема системи автоматизованого керування електроприводом похилого дифузійного апарату.

Апробація матеріалів дисертації.

Результати і основні положення дисертаційної роботи були представлені на:

1. XI Міжнародній науково-технічній конференції «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 17-19 травня 2006 р.)

2. X Міжнародній науково-технічній конференції «КУСС 2008» (м. Вінниця, 21-24 жовтня 2008 р.)

3. 78 науковій конференції молодих учених, аспірантів та студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у 21 столітті» (м. Київ, 2-3 квітня 2012 р.)

4. XIII міжнародній науково-технічній конференції «ABIA-2017» (Київ, 19-21 квітня 2017)

5. Науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ, м. Вінниця 2005-2020 рр.

Публікації.

Результати проведених досліджень опубліковано у 20 публікаціях, з них 1 стаття у періодичному науково-технічному журналі країн Європейського союзу, 12 статей у фахових виданнях України, 4 патенти на корисні моделі, 4 тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (138 найменувань) і 2 додатків. Основний зміст викладено на 143 сторінках друкованого тексту, містить 72 рисунка, 4 таблиці. Загальний обсяг роботи – 177 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі. Наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, а також подано відомості щодо апробації роботи, особистого внеску здобувача та публікацій. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

В **першому розділі** дано огляд технологічних особливостей роботи ПДА, як ланки безперервного цукрового виробництва в сучасних умовах. Встановлено, що в реальних умовах під час експлуатації навантаження вздовж шнековалів розподіляється нерівномірно. Це відбувається внаслідок того, що в похилому корпусі дифузійного апарату густина сокостружкової суміші зростає знизу догори. Тобто, зведений момент інерції та коефіцієнт опору на валу верхнього двигуна за таких умов буде завжди більшим, ніж відповідні величини у нижнього двигуна. Це є дуже важливою особливістю роботи дифузійного апарату, що безперечно впливає на експлуатаційні характеристики цієї системи приводу.

Проведено аналіз існуючих систем автоматичного керування дводвигунними приводами постійного струму, показано важливість врахування наявного пружного зв'язку між двигунами приводу, нелінійним характером якого не можна нехтувати, на динамічні властивості системи електричного приводу, розглянуто існуючі математичні моделі електричного приводу з пружними зв'язками та засоби дослідження їх динамічних режимів роботи.

Також здійснено огляд існуючих систем автоматизованого керування електроприводом ПДА, як електромеханічним комплексом, вказано на їх основні недоліки в умовах інтенсифікації використання дифузійного апарату у

виробництві, пов'язані з неврахуванням наявних у них пружно-дисипативних зв'язків та визначено шляхи вдосконалення існуючих систем шляхом оснащення їх засобами вимірювання основних, як електричних, так і, особливо, механічних, параметрів роботи електропривода.

В другому розділі на основі динамічних аналогій було розроблено математичну модель механічної частини електроприводу ПДА, що дозволяє досліджувати динамічні властивості системи з врахуванням основних технологічних особливостей та наявності нелінійного пружно-дисипативного зв'язку між двигунами.

Механічна частина ПДА, як видно із рис. 1, є системою з двома ступенями вільності $n = 2$, де узагальненими координатами виступають кути повороту θ_1 і θ_2 , які задаються положеннями роторів двох електричних двигунів. Відповідно, узагальненими швидкостями будуть їх похідні за часом – кутові швидкості $\omega_1 = \dot{\theta}_1$ і $\omega_2 = \dot{\theta}_2$, які за умовою експлуатації системи повинні б бути однаковими. Ці швидкості через редуктори з передачею 1250:1 зазнають зменшення до значень $k\omega_1$ та $k\omega_2$, де $k = 8 \cdot 10^{-4}$, і передаються до кінців шнека – масивного пружного тіла циліндричної форми з гвинтоподібною зовнішньою поверхнею, огорнутого сокостружковою сумішшю.

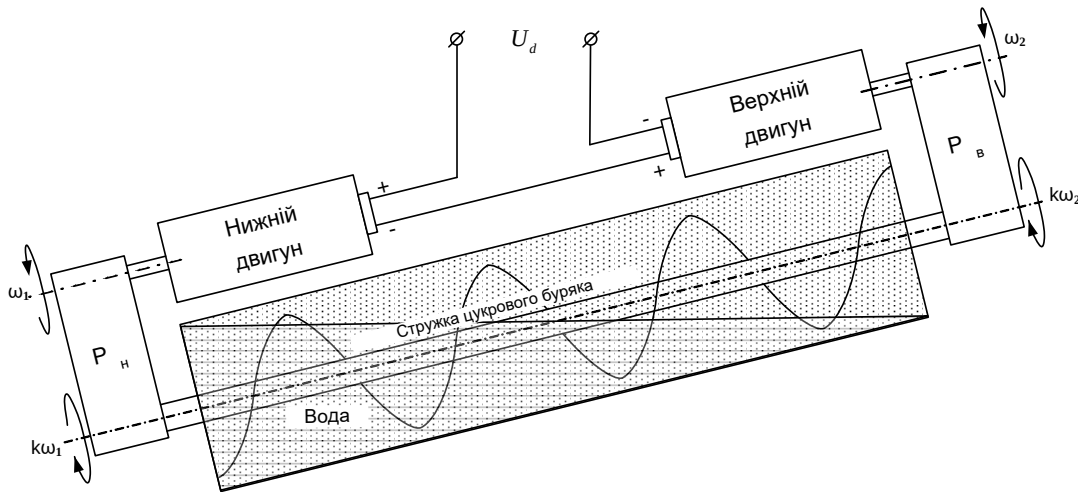


Рисунок 1 – ПДА з електроприводом постійного струму

За допомогою методу динамічних аналогій було отримано математичну модель:

$$\begin{cases} J_1^* \frac{d\omega_1}{dt} + \beta_1^* \omega_1 + \zeta_{12} \varphi_1 - J_{12}^* \frac{d\omega_2}{dt} - \beta_{12}^* \omega_2 - \zeta_{12} \varphi_2 = M_1^*, \\ J_2^* \frac{d\omega_2}{dt} + \beta_2^* \omega_2 + \zeta_{12} \varphi_2 - J_{12}^* \frac{d\omega_1}{dt} - \beta_{12}^* \omega_1 - \zeta_{12} \varphi_1 = M_2^*, \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{де} \begin{cases} J_1^* = J_1 + \alpha \frac{2}{3} J_{12} \cdot k^2, & J_2^* = J_2 + (1-\alpha) \frac{2}{3} J_{12} \cdot k^2, & J_{12}^* = -\frac{1}{6} J_{12} \cdot k^2 \\ \beta_1^* = \beta_1 + \alpha \frac{2}{3} \beta_{12} \cdot k^2, & \beta_2^* = \beta_2 + (1-\alpha) \frac{2}{3} \beta_{12} \cdot k^2, & \beta_{12}^* = -\frac{1}{6} \beta_{12} \cdot k^2 \\ M_1^* = \frac{1}{k^2} M_1, & M_2^* = \frac{1}{k^2} M_2 \end{cases} -$$

еквівалентні моменти інерції, еквівалентні коефіцієнти розсіювання та еквівалентні узагальнені моменти відповідно, а також J_1 і J_2 – відповідно моменти інерції роторів нижнього та верхнього двигунів; β_1 і β_2 – коефіцієнти розсіювання енергії в обох двигунах; ζ_{12} – коефіцієнт жорсткості шнека, α – коефіцієнт, що враховує нерівномірність завантаження шнековалів ПДА й показує, яка частина сукупного моменту інерції шнековалів зі сокостружковою сумішшю J_{12} та коефіцієнту розсіювання енергії β_{12} прикладається до нижнього двигуна.

Аналіз динамічних властивостей приводу ПДА в парадигмі лінійної теорії автоматичного керування не забезпечує необхідної адекватності математичного моделювання. Це пов'язано з тим, що пружна деформація таких складних тіл, якими є шнеки ПДА в пружному й в'язкому середовищі, не може описуватись лінійними співвідношеннями за умови значних деформацій. Детальні дослідження природи нелінійного характеру деформації є досить складною науково-технічною задачею і виходить за межі даного дослідження. Для вирішення покладених задач використано наступне емпіричне співвідношення, яке визначає нелінійний коефіцієнт жорсткості шнековалів, охоплених сокостружковою сумішшю:

$$\zeta_{12} = \zeta_{12L} \cdot + \zeta_{12NL} \Delta \theta^2. \quad (2)$$

Таким чином жорсткість пружного зв'язку буде складатись з двох складових і є функцією відносного кута повороту валів верхнього та нижнього двигунів.

Математична модель механічної частини приводу ПДА разом з математичним описом електромагнітних процесів у двигунах та колах керування дає змогу розробити структурну схему, подану на рис. 2.

Дана структурна схема є лінеаризованою математичною моделлю системи приводу ПДА і може бути використана для режимів з незначною зміною параметрів системи. Врахування нелінійного характеру системи можливе за допомогою числових методів і засобів імітаційного моделювання MATLAB. При дослідженні динамічних режимів в таких моделях значення жорсткості є змінною величиною, яка залежить від параметрів режиму, та визначається на кожному ітераційному кроці за виразом (2) та підставляється у модель на наступному. За умови, якщо часовий проміжок між кроками моделі є значно меншим за період електромеханічних коливань, зміна відносного кута повороту валів двигунів буде незначною і нею можна знехтувати.

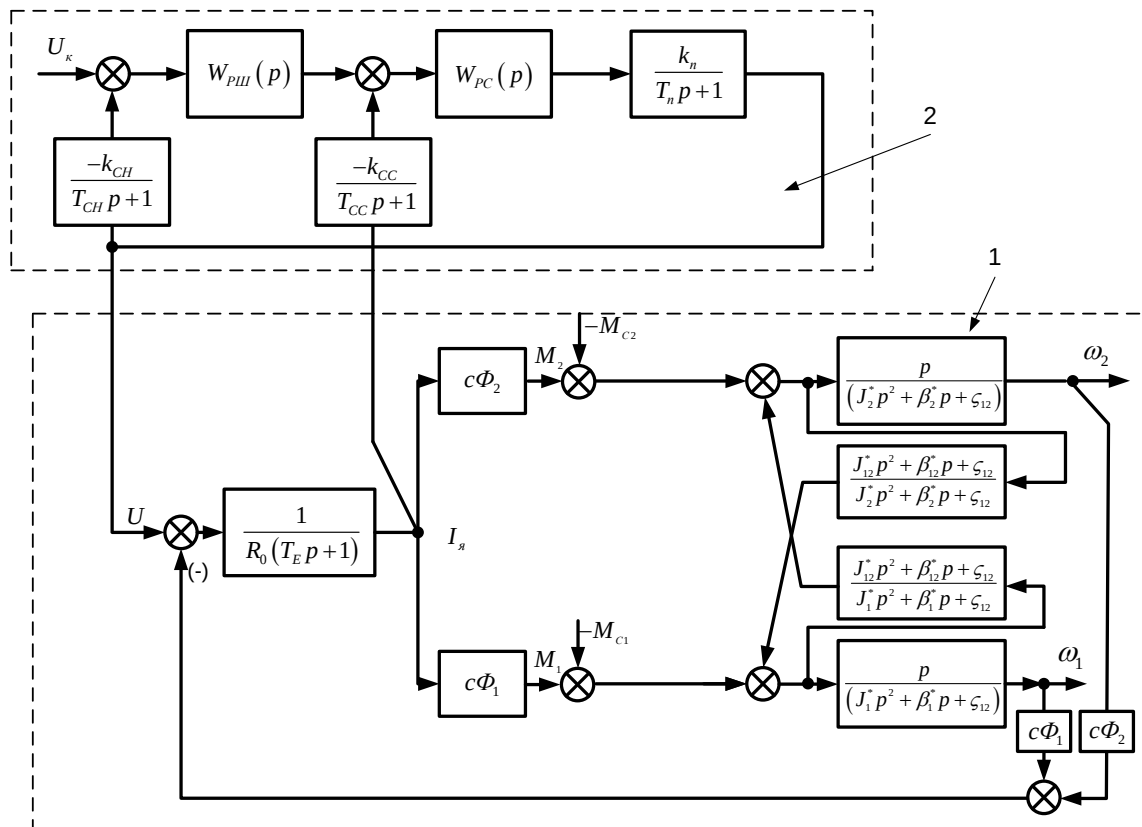


Рисунок 2 – Структурна схема системи приводу дифузійного апарату

Розроблена на основі структурної схеми (рис. 2) імітаційна модель у MATLAB-Simulink дозволяє проводити дослідження характеру перехідних процесів для різних значень параметрів системи та режиму ПДА. Перехідний процес може мати згасаючий та незгасаючий характер. Останній пов'язаний з автоколивальними процесами (границя зони стійкості), що виникають в системі, та втратою нею стійкості. Оцінку якості перехідних процесів будемо проводити за коливальністю, яку оцінюють за відношенням сусідніх максимумів вихідної величини $\frac{x_{\max 2}}{x_{\max 1}}$ (рис. 3). Побудова за допомогою моделі часових залежностей вихідних величин дозволяє отримати вичерпну інформацію про показники якості перехідних процесів та не вимагає додаткових досліджень критеріїв якості.

На рис. 3 показано приклад моделювання системи приводу дифузійного апарата при поступовому збільшенні напруги керування, що відповідає певному заданому значенню випрямленої напруги ТП (загальної напруги приводу), при старті ПДА та незначному збільшенні її в момент часу $t=100\text{с}$ за наступних значень параметрів системи: $J_{12} = 116 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $\beta_{12} = 5,7 \frac{\text{Дж}}{\text{рад}}$, $\alpha = 0,53$ (рисунок ліворуч) та $J_{12} = 116 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $\beta_{12} = 5,7 \frac{\text{Дж}}{\text{рад}}$, $\alpha = 0,57$ (рисунок праворуч).

Результатом моделювання є часові залежності основних величин. На рис. 3 зображені часові діаграми середнього значення випрямленої напруги U , струму якоря двигунів I , кутових швидкостей верхнього та нижнього двигунів відповідно та їх різниці $\Delta\omega$.

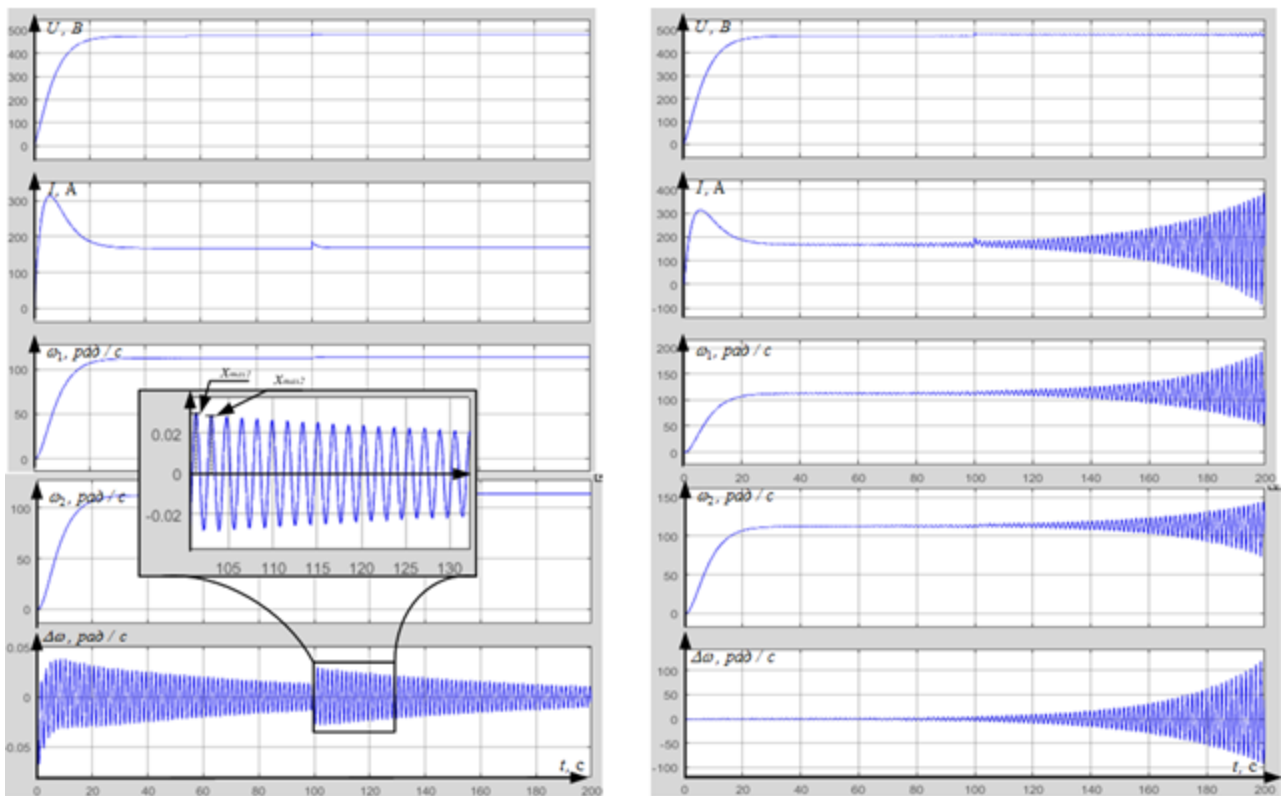


Рисунок 3 – Приклади моделювання пуску системи привода ПДА

Як видно з отриманих залежностей, стабільне значення напруги на двигунах забезпечується системою керування приводом. Струм якірних обмоток, а також кутові швидкості двигунів змінюються коливально з різним характером перехідного процесу. Параметри системи на графіках ліворуч забезпечують збіжний перехідний процес (коливальність $\chi < 1$), а параметри на графіках відповідають нестійкому режиму роботи системи ($\chi > 1$).

Таким чином, розроблені математичні моделі враховують нелінійний характер пружного зв'язку та нерівномірність розподілу навантаження між двигунами привода, що дозволяє досліджувати динамічні режими його роботи.

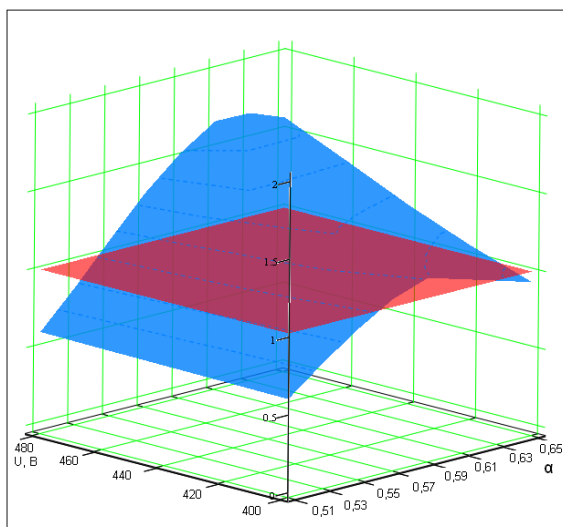


Рисунок 4 – Залежність коливальності $\chi = f(U, \alpha)$ при $I = I_{ном}$

Змінюючи в моделі напругу U_k та, фіксуючи величину напруги на двигунах при фіксованих значеннях коефіцієнту нерівномірності завантаження валу α , визначено значення коливальності χ . Отриманий необхідний масив даних дозволяє побудувати залежність коливальності $\chi = f(U, \alpha)$ у вигляді поверхні (рис. 4) та знайти лінію її перетину з площиною $\chi = 1$, яка є лінією критичного режиму.

При значеннях напруги U та α , для

яких $\chi > 1$ система стає нестійкою з різною швидкістю наростання амплітуди коливань. Взагалі на даному графіку чітко видно, що зі збільшенням напруги U стійкість системи приводу зменшується для будь-яких значень коефіцієнта α . Оцінити запас стійкості можна за величиною коливальності χ , у міру зменшення від одиниці.

Побудувавши проекцію лінії критичного режиму на площину (U, α) , можна визначити зону стійкості приводу ПДА у відповідній системі координат (крива $I_{\text{ном}}$ рис. 5). Штриховкою вказано стійку зону.

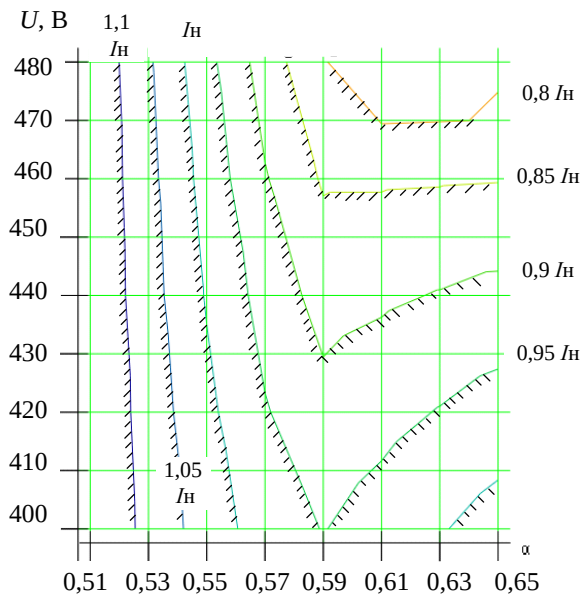


Рисунок 5 – Зміна зони стійкості системи приводу ПДА в системі координат (U, α) при зміні струму двигунів

Аналогічно визначено границі зони стійкості для різних значень струму навантаження, вказаних у відносних до $I_{\text{ном}}$ величинах та позначеними на рис. 5 різними лініями. Правий верхній куток відповідає найнестійкішому стану системи, нижній лівий – навпаки, найстійкішому.

Аналіз отриманих залежностей показав значний вплив на динамічні властивості системи напруги приводу, статичного моменту (або усталеного значення струму) та коефіцієнту нерівномірності завантаження двигунів приводу. При збільшенні цих параметрів зона стійкості системи зменшується, що вказує на гостру необхідність синтезу системи автоматизованого керування (САК), яка б, на відміну від існуючих, мала

вдосконалені засоби контролю електричних величин (напруги, струму) та вперше розроблені засоби контролю механічних величин (швидкостей обертання, відносного кута повороту валів двигунів) приводу ПДА.

В третьому розділі розроблено математичні моделі асинхронного частотно-регульованого приводу ПДА та проведений порівняльний техніко-економічний аналіз доцільності використання приводів різних типів: постійного струму, групового та індивідуального асинхронного.

Результати такого аналізу подані на рис. 6 за номінальної швидкості обертання шнековалів ПДА. На ньому кривою 1 вказано границю стійкості системи приводу постійного струму, 2 – асинхронного приводу зі спільним перетворювачем частоти (ПЧ), 3 – асинхронного приводу з індивідуальними ПЧ в системі координат: відносний до номінального статичний момент, коефіцієнт нерівномірності завантаження двигунів. Штриховкою вказано стійку зону.

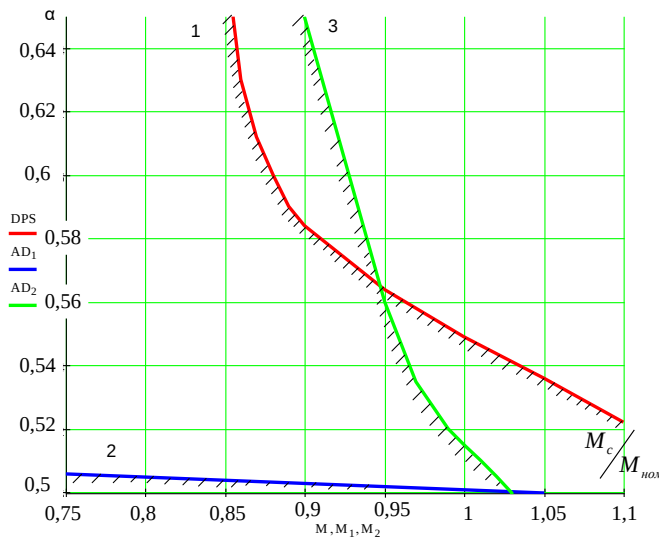


Рисунок 6 – Визначення зони стійкості різних типів привода ПДА

модернізація існуючої системи приводу постійного струму, яка використовується на більшості підприємств цукрової галузі, ніж запровадження індивідуального асинхронного з огляду на капітальні витрати на нове обладнання. Запровадження асинхронного частотно-регульованого приводу може бути економічно доцільним при монтажу нового обладнання.

Проведені дослідження показують, що в системі приводу ПДА можуть виникати коливальні режими, які пов'язані з наявністю пружного кінематичного зв'язку між двигунами. На динамічні властивості, зокрема стійкість системи, в таких режимах значною мірою впливає нерівномірність завантаження шнековалів, яка характеризується відповідним коефіцієнтом. В існуючій САК швидкістю обертання шнековалами ПДА відсутні засоби визначення механічних параметрів, що спричиняють коливальні режими та інформують оператора про них. Крім того, в такій системі відсутні засоби впливу на розвиток передаварійних ситуацій.

Тому запропоновано таку САК приводом ПДА, яка враховує вище сказані аспекти та подана на рис.7. Варто зазначити, що пропонована САК є узагальненою, тобто основні її елементи можуть бути використанні при побудові систем приводу обох типів, хоча в основному орієнтована на привод постійного струму. Різниця полягає лише в джерелі регульованої напруги основного приводу (Керований випрямляч / Перетворювачі частоти) та способі синхронізації обертання двигунів.

Контроль механічних параметрів приводу здійснюється за допомогою сенсорів кутового положення двигунів 1 та 2, встановлених на муфтах з'єднання валів двигунів з первинними валами редукторів Рн та Рв. До контрольованих механічних параметрів приводу належать швидкості обертання нижнього ω_1 та верхнього ω_2 двигунів та відносний кут повороту валів двигунів $\Delta\theta$. Відносний кут повороту валів двигунів приводу ПДА є зведеним до швидкості обертання двигунів кутом радіальної деформації шнековалів ПДА і відрізняється передатним числом редукторів, яке дорівнює 1:1250. Цей

Отримані результати показали неможливість використання групового асинхронного приводу ПДА через незадовільні динамічні властивості (занадто вузька зона стійкості). Використання системи асинхронного приводу з індивідуальними ПЧ продемонстрували необхідність синтезу систем векторного керування з обов'язковим контролем механічних параметрів приводу.

Порівняльний техніко-економічний аналіз показав, що з економічної точки зору на сьогоднішній день є доцільнішим

параметр характеризує нерівномірність завантаження шнековалів та перебуває в залежності з коефіцієнтом α .

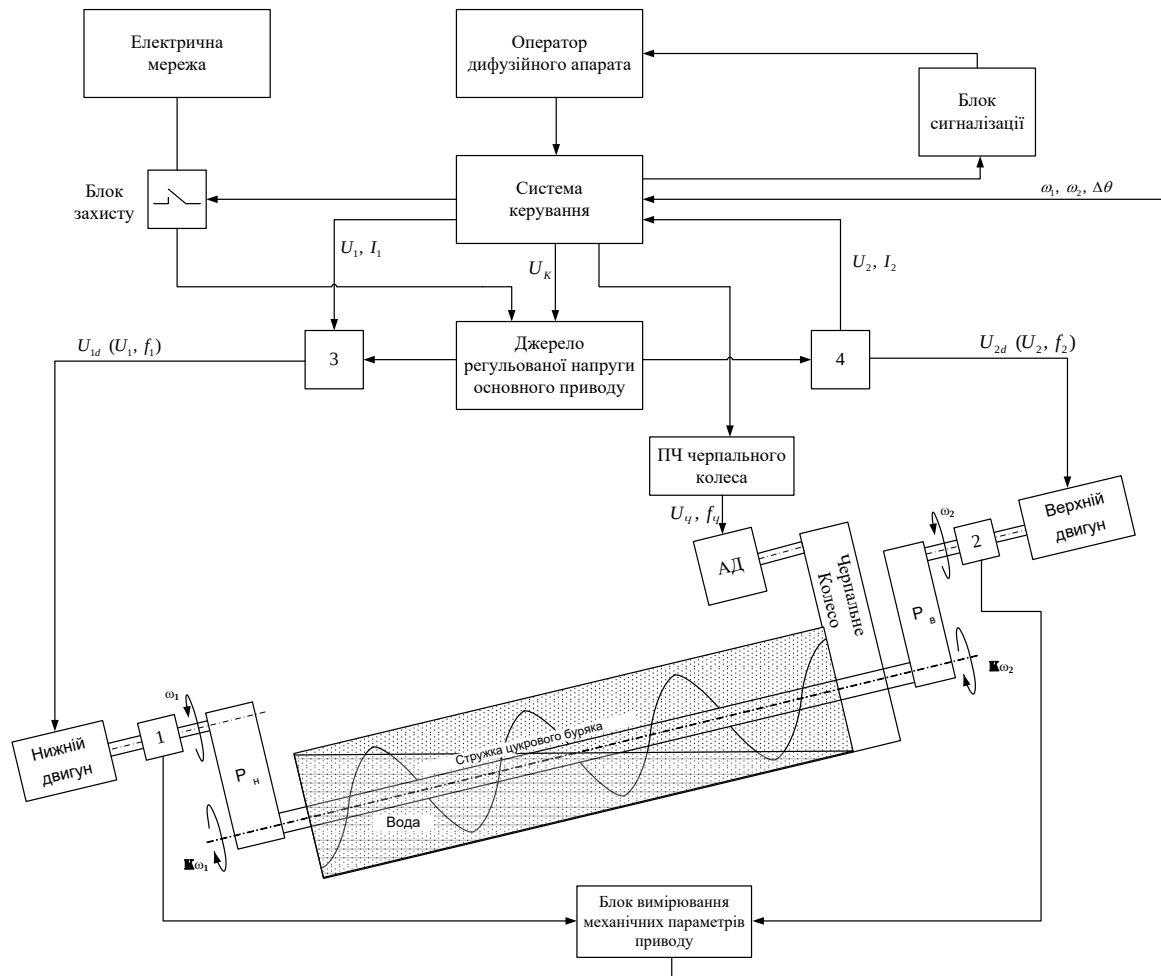


Рисунок 7 – Структурна схема САК приводом ПДА

Також запропонована система має сенсори напруги та струму нижнього – 3 та верхнього – 4 двигунів, яка необхідна для диференціації можливих причин виникаючих відмов: електричних чи механічних. Усі отримані дані про параметри приводу передаються до мікропроцесорної системи керування.

З метою зменшення нерівномірності завантаження шнековалів дифузійного апарата в критичних режимах в пропонуваній системі черпальне колесо приводиться в рух частотно-регульованим приводом. Основною цільовою функцією такого регулювання є:

$$\Delta\theta_- \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $\Delta\theta_{-}$ – середнє значення відносного кута повороту валів.

Швидкість обертання черпального колеса визначає система керування за складною емпіричною залежністю, як функція декількох змінних, зокрема: швидкість обертання основного приводу, середнє значення відносного кута повороту валів двигунів.

Реалізація частотного регулювання приводу черпального колеса дає змогу вирівнювати завантаження двигунів основного приводу і таким чином

покращувати динамічні властивості системи приводу ПДА. Однак вплив швидкості розвантаження на нерівномірність завантаження валів відбувається зі значними сталими часу. Тому за певних умов зі швидким розвитком коливальних процесів постає задача зупинки приводу за перевищення допустимих значень контрольованих величин, яка покладена на блок захисту. Контроль механічних параметрів приводу (швидкості обертання двигунів, кута закручування) дозволяють організувати диференційний захист дифузійного апарату, як за електричними, так і механічними показниками, що позитивно впливає на чутливість захисту та діагностування причин можливих відмов.

З метою оптимізації керування розроблена система має блок сигналізації оператору про наближення певних показників до критичних значень, що за вмілого здійснення регулювання оператором також позитивно впливатиме на динаміку та надійність приводу, зменшуючи кількість його відмов.

Структурна схема та часові діаграми вимірювального каналу відносного кута повороту валів двигунів подана на рис. 8.

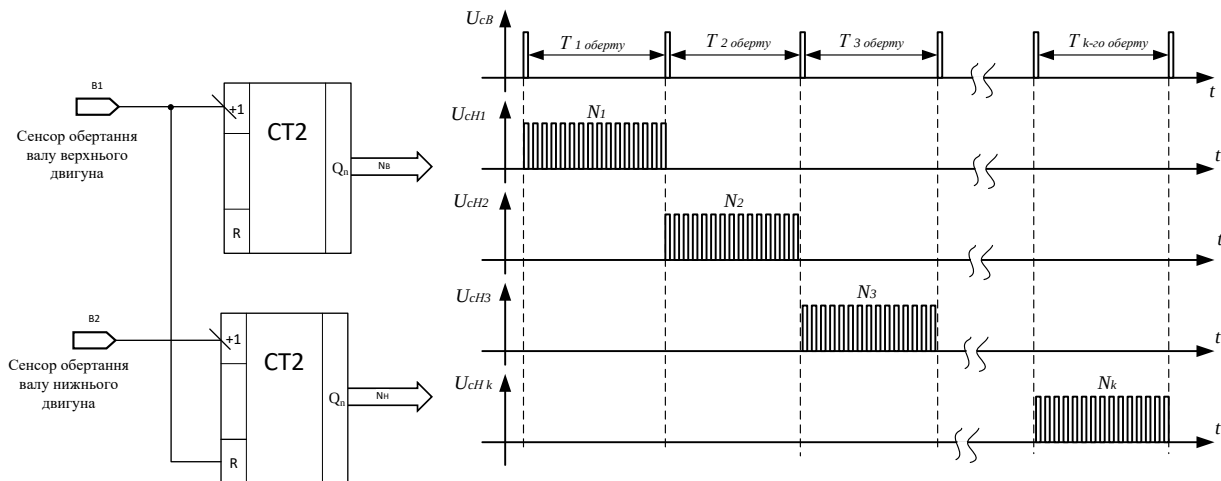


Рисунок 8 – Структурна схема та часові діаграми ВК відносного кута повороту валів двигунів приводу ПДА

Його принцип дії засновано на підрахунку кількості міток біля чутливого елементу сенсора обертання (СО) нижнього двигуна за час повного оберту валу верхнього двигуна, кожен з яких відмічає нульова мітка СО верхнього двигуна. Таким чином, відносний кут повороту валів двигунів за k -й оберт верхнього двигуна можна визначити:

$$\Delta\theta_k = N_k \cdot \theta_0 - 360^\circ, \quad (4)$$

де N_k – кількість підрахованих міток двійковим лічильником, θ_0 – кут між двома сусідніми мітками СО. Відносний кут на момент завершення k -го оберту верхнього двигуна визначиться як їх сума значень за окремі його оберти:

$$\Delta\theta_{\Sigma K} = \theta_0 \sum_{k=1}^K N_k - K \cdot 360^\circ. \quad (5)$$

З виразу (4) отримано рівняння перетворення ВК відносного повороту валів двигунів:

$$N_k = \frac{Z}{360^\circ} \Delta\theta_k + Z \quad (6)$$

де Z - кількість міток СО.

Окрім відносного кута повороту валів двигунів система автоматизованого керування приводом ПДА здійснює вимірювання швидкостей обертання кожного двигуна. Засоби їх вимірювання використовують ту саму сенсорну структуру, що й ВК відносного кута повороту валів двигунів, та виконані на основі цифрових частотомірів миттєвих значень. Його рівняння перетворення:

$$N = \frac{2\pi \cdot f_0}{Z \cdot \omega_x}, \quad (7)$$

де ω_x – вимірювана кутова швидкість, f_0 – частота генератора імпульсів зразкової частоти.

Аналіз рівнянь (6) та (7) дає змогу оцінити похибки квантування розроблених ВК та визначити оптимальну кількість міток в межах $[Z_{\min}, Z_{\max}]$, що задовольняє заданому значенню похибок квантування.

До контрольованих електричних параметрів у системі привода постійного струму належать струм роторних обмоток двигунів I_d та напруги U_{d1} й U_{d2} , що спадають на кожному з них. Запропонована САК має мікропроцесорні засоби вимірювання цих величин.

Вхідним аналоговим перетворювачем струму є сенсор на основі ефекту Холла, на виході якого генерується постійна напруга U_x . Рівняння перетворення такого сенсора є лінійним за умови роботи в межах лінійної області гістерезису.

Для вимірювання напруги як вхідні аналогові перетворювачі використовується вимірювальний підсилювач, який виконаний на ізольованому операційному підсилювачі, що дозволяє, як і сенсор струму Холла, здійснити гальванічну розв'язку інформаційно-вимірювальних кіл від силового. Вони також мають лінійні рівняння перетворення.

Таким чином, САК електроприводом ПДА має засоби вимірювання механічних та електричних параметрів, які дозволяють контролювати стан приводу в коливальних режимах, які пов'язані з наявністю пружно-дисипативного зв'язку.

У четвертому розділі на основі розроблених методів контролю механічних та електричних величин описано апаратну реалізацію мікропроцесорної САК електроприводом ПДА, як електромеханічним

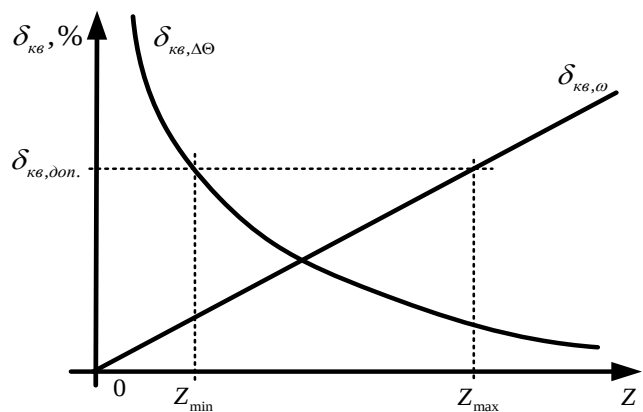


Рисунок 9 – Залежність похибки квантування від числа міток

комплексом, що включає в себе керування основним приводом та приводами допоміжних механізмів (рис. 10).

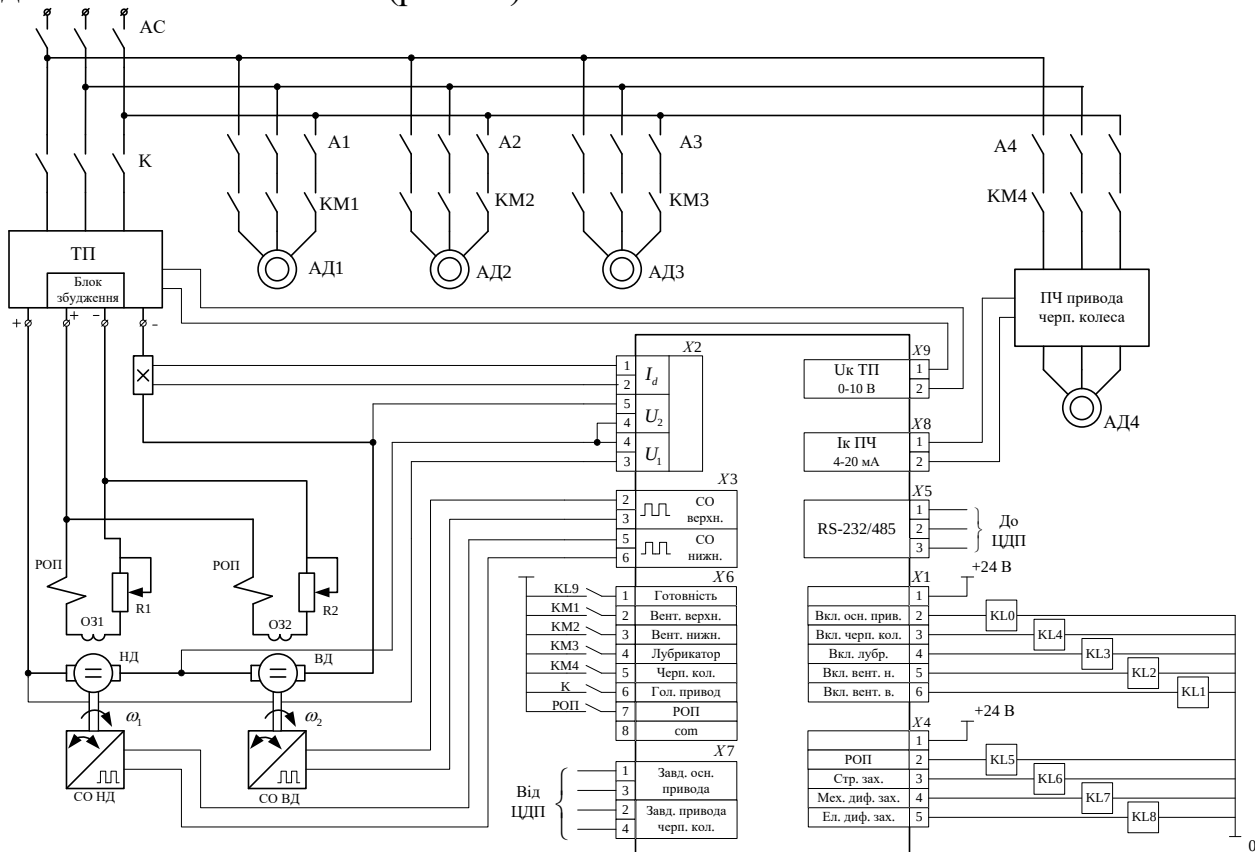


Рисунок 10 – Схема електрична принципова системи приводу ПДА

Система оснащена сенсорами обертання валів нижнього та верхнього двигунів СО НД та СО ВД відповідно, виходи яких зведено на клемну колодку ХЗ. Дані з цих сенсорів у вигляді послідовності імпульсів обробляються мікропроцесорною системою, до якої поступають через узгоджуючі транзисторні ключі. Також мікропроцесорна система здійснює вимірювання електричних параметрів привода.

Система оснащена низкою дискретних входів для контролю за станом допоміжних приводів та захисту від обриву поля силовими двигунами і дискретних виходів для керування ними.

Відмінністю запропонованої САК є запровадження частотно-регульованого приводу черпального колеса, що здійснює вивантаження висолодженого жому з ПДА. Швидкість обертання черпального колеса є функцією двох змінних: швидкості обертання основного приводу та відносного кута повороту валів двигунів

$$n_{_{qK}} = f(\omega_{_{OCH.np.}}; \Delta\theta) \quad (8)$$

та обчислюється системою за одним з двох можливих законів регулювання в реальному часі. Найпростішим випадком регулювання є структурна схема, зображена на рис. 11, а. За нею до заданої оператором уставки U_z додається величина з виходу аперіодичної ланки, на вхід якої подається виміряне значення відносного кута повороту валів двигунів.

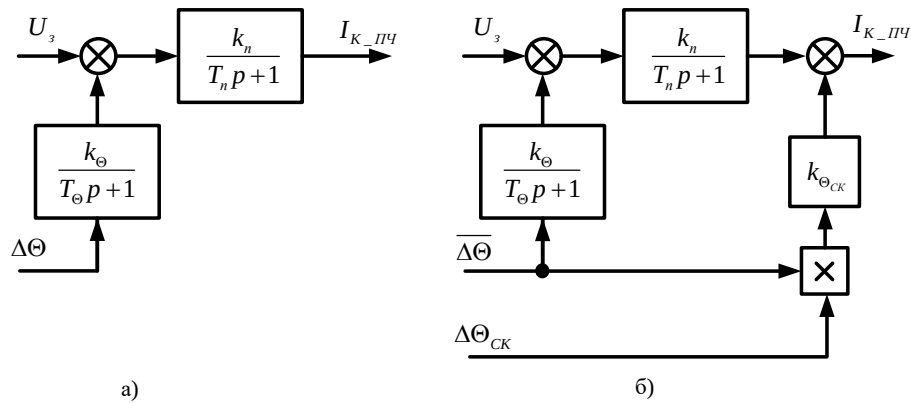


Рисунок 11 – Закони регулювання вхідною дією ПЧ черпального колеса

Дослідження динамічних режимів пропонованого каналу регулювання швидкості обертання черпального колеса, проведене засобами математичного моделювання (рис. 12) показало задовільні динамічні характеристики та точність регулювання. Однак керування за таким законом не дає можливості системі реагувати за інтенсивністю коливань відносного кута повороту валів двигунів.

Нівелювати цей недолік покликаний канал регулювання, що виконаний на основі структурної схеми рис. 11, б. Вона відрізняється тим, що до обчисленого за попередньою схемою вихідного значення додається добуток $k_{\Theta_{CK}} \cdot \overline{\Delta\Theta} \cdot \Delta\Theta_{CK}$, де $\overline{\Delta\Theta}$ – середнє, а $\Delta\Theta_{CK}$ – середньо-квадратичне значення відносного кута повороту валів двигунів, що забезпечує підвищення швидкості обертання при збільшенні амплітуд коливальних процесів з наявною постійною складовою, а при її відсутності швидкість обертання черпального колеса визначається виключно уставкою оператора.

На рис. 12 подано результати моделювання законів регулювання ПЧ

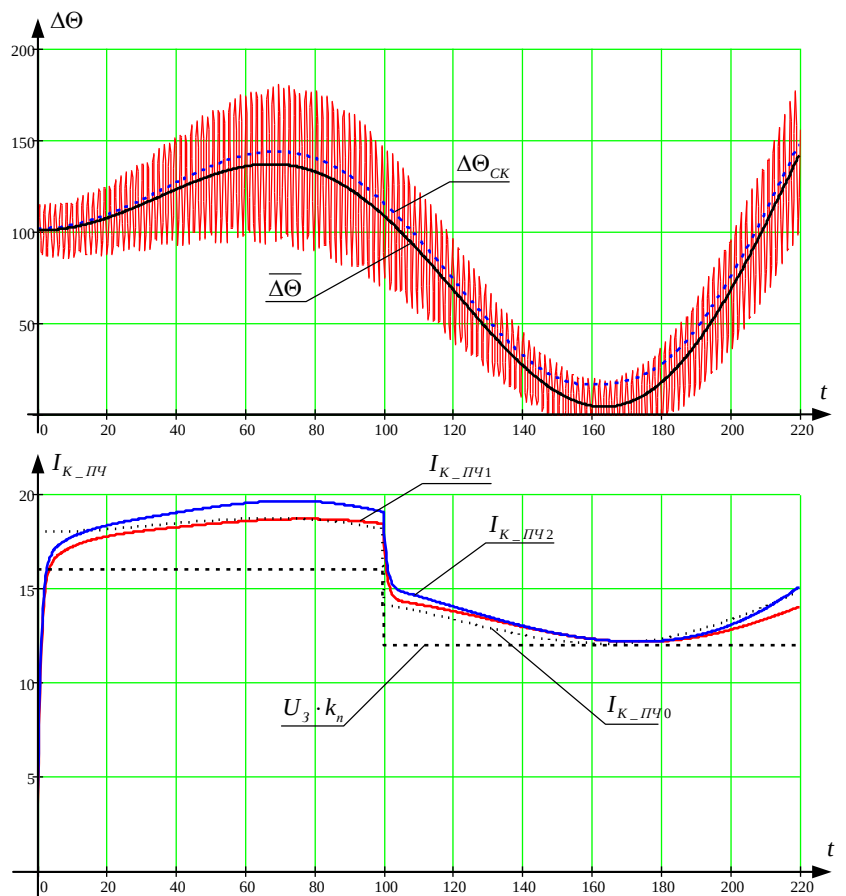


Рисунок 12 – Часові діаграми законів регулювання ПЧ черпального колеса

черпального колеса за наступних параметрів: $k_{\Theta} = 0,01 \frac{B}{\circ}$; $T_{\Theta} = 10c$; $k_n = 2 \frac{A}{B}$; $T_n = 1c$; $k_{\Theta_{CK}} = 5 \cdot 10^{-5} \frac{A}{(\circ)^2}$. Відносний кут повороту валів двигунів $\Delta\Theta$

змінюється в часі, як показано на графіку зверху. Як видно з отриманих залежностей, вихідна дія системи для ПЧ черпального колеса визначається уставкою оператора та середнім значенням відносного кута повороту валів двигунів ($I_{K_ПЧ1}$), а у випадку вдосконаленого закону регулювання ($I_{K_ПЧ2}$) ще й його середньо-квадратичним значенням.

Розроблена система також має засоби захисту від аномальних режимів роботи за усіма контрольованими параметрами з такими умовами спрацювання:

$$\begin{cases} \Delta\Theta_k \succ \Delta\Theta_{\text{дон}}, \overline{\Delta\Theta} \succ \overline{\Delta\Theta}_{\text{дон}}, \Delta\Theta_{CK} \succ \Delta\Theta_{CK\text{дон}} \\ \Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \succ \Delta\omega_{\text{дон}} \\ \Delta U = U_1 - U_2 \succ \Delta U_{\text{дон}} \\ I \succ I_{\text{дон}} \end{cases} \quad (9)$$

Запропонована САК дводвигунним приводом ПДА впроваджена на низці підприємств цукрової галузі України.

За отриманими дослідними даними побудовано експериментальну статичну характеристику ВК відносного повороту валів двигунів, яка подана на рис. 13 у вигляді точок. Суцільною лінією побудована теоретична статична характеристика, яка майже повністю збігається з отриманими дослідними даними, що підтверджує адекватність теоретичних розробок.

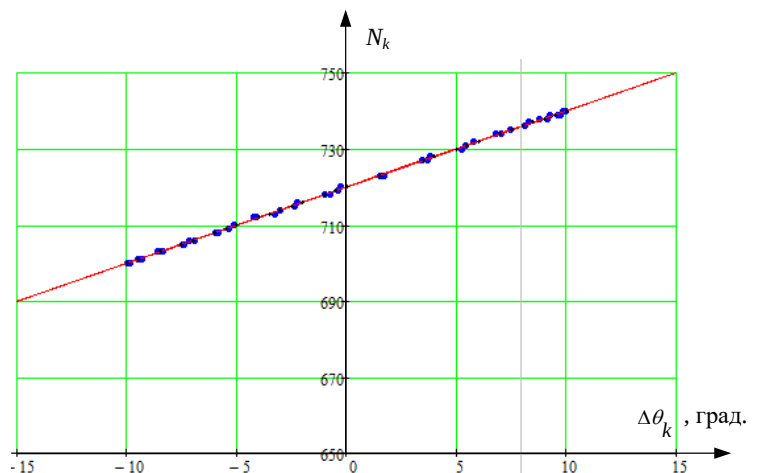


Рисунок 13 – Експериментальна статична характеристика ВК відносного повороту валів двигунів

Впровадження та монтаж розроблених систем за поданими вище структурними та функціональними схемами, а також експериментальні дослідження їх роботи, були проведені на трьох ПДА марки ДС – 12, якими обладнано підприємства ТОВ ПК «Зоря Поділля», м. Гайсин, Вінницька обл. та ТОВ «Новомиргородський цукор», с. Капітанівка, Кіровоградська обл. протягом 2018 маркетингового року. Дифузійні апарати на цих підприємствах приводяться в рух системами приводу постійного струму. У табл. 1 подані деякі технічні характеристики обладнання, яке досліджувалось.

З поданих у таблиці даних чітко видно, що транспортна механічна система дифузійних апаратів, які встановлені на вказаних підприємствах, працює в умовах значного перевантаження, адже планова продуктивність перевищує паспортну на 45-67%. Це досягається збільшенням потужності

встановлених двигунів основного приводу, що призводить до значно більшого впливу пружних зв'язків між двома двигунами на динамічні властивості системи.

Таблиця 1 – Технічні характеристики ПДА

№	Параметр	ТОВ ПК «Зоря Поділля»	ТОВ «Ново- миргородський цукор»
1.	Марка ПДА	ДС-12	ДС-12
2.	Кількість ПДА на підприємстві	2	1
3.	Паспортна продуктивність, т/добу	2400	2400
4.	Планова продуктивність, т/добу	4000	3500
5.	Потужність встановлених двигунів приводу, кВт	80	110
6.	Наявність частотного приводу черпального колеса	так	так
7.	Тип перетворювача основного приводу	ТП4-500	Модернізований ТП4-320

Дослідження, що проводились на підприємствах було здійснено приблизно за один і той же період на трьох приводах ПДА з різними системами керування, вимірювання та захистів. На ПДА в ТОВ «Новомиргородський цукор» та ДА №2 ТОВ ПК «Зоря Поділля» було встановлено систему автоматизованого керування, однак у другому випадку її було встановлено повністю разом з системою керування допоміжним приводом черпального колеса, а в першому – обмежились засобами вимірювання та індикації результатів оперативному персоналу та пристроями захисту на основі них. На ДА №1 ТОВ ПК «Зоря Поділля» діяла традиційна система автоматизованого керування без вимірювання механічних параметрів приводу.

Для наочності на рис. 14 подано результати експериментальних досліджень та визначених на основі них основні показники надійності роботи у вигляді гістограм.

Як видно з отриманих у таблиці та представлених у вигляді гістограм даних, системи обладнання засобами вимірювання механічних параметрів приводу ПДА демонструють кращі показники майже за всіма параметрами. Особливо це видно при порівнянні роботи дифузійних апаратів ТОВ ПК «Зоря Поділля», оскільки тут виключаються усі суб'єктивні фактори, адже вони керувалися тим самим персоналом та використовували однакову сировину, що виключає похибки пов'язані з різною якістю сировини.

Робота ДА №2, на якому було встановлено розроблену систему автоматизованого керування з вимірюванням механічних параметрів та автоматичним регулюванням швидкості обертання черпального колеса за відносним кутом повороту валів двигунів, продемонструвала найкращі показники надійності: час роботи найвищий, а час простоїв найнижчий,

коефіцієнт готовності вищий на 0,04, а коефіцієнт простою, пов'язаний з відмовою ланок системи приводу, менший у двічі, ніж у ДА №1.

Крім того, варто зазначити також, за економічною ефективністю також найкращі показники продемонструвала система, встановлена на ДА №2: 99% планової продуктивності проти 86,75% у ДА №1.

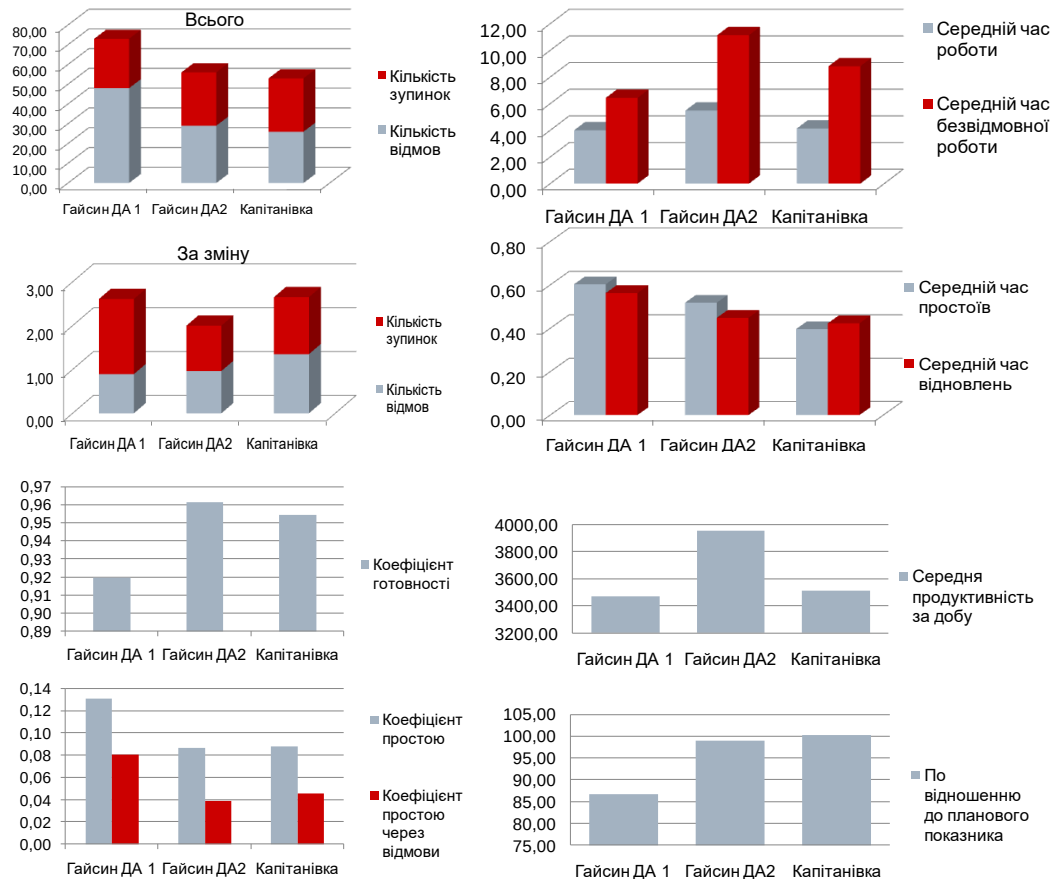


Рисунок 14 – Основні показники надійності та ефективності роботи системи приводу трьох ПДА.

Також цікавим є аналіз причин зупинок ДА, встановлених на Гайсинському цукровому заводі, поданий на рис. 15.

Як видно з гістограм, обидва ДА мають приблизно однакову кількість (25 – 27) технологічних зупинок, які не залежать від справності обладнання приводу і спричинені, в основному, виходом з синхронізму інших ланок безперервного ланцюга цукрового виробництва й оператор змушений зупинити справний апарат. Але якщо порівняти технічні причини, які характеризують власне роботу системи приводу ПДА, то чітко прослідковується менша кількість таких зупинок у ДА, обладнаного вдосконаленою системою керування. Зокрема, можна виділити меншу кількість зупинок привода оператором через незадовільну його роботу (16 проти 24), а також більш, ніж вдвічі меншу кількість спрацювань диференційного захисту (5 проти 12).

Останнє є підтвердженням доцільності встановлення регульованого привода черпального колеса, який змінюючи швидкість розвантаження верхньої більш завантаженої частини ДА в залежності від контрольованого системою відносного кута повороту валів двигунів, призводить до зменшення коливальних процесів пов'язаних з пружними властивостями шнековалів. Таким чином повністю підтверджена доцільність розробки та впровадження системи автоматизованого керування приводом ПДА, основою якої є вимірювання та контроль механічних параметрів приводу, а також розроблених законів керування частотно-регульованим приводом черпального колеса.

Описані та отримані теоретичним шляхом (розділ 2) коливальні режими, пов'язані з наявністю пружної деформації шнековалів ПДА, зафіксовані засобами вимірювання вдосконаленої системи автоматизованого керування. Це підтверджує актуальність отриманих математичних та імітаційних моделей.

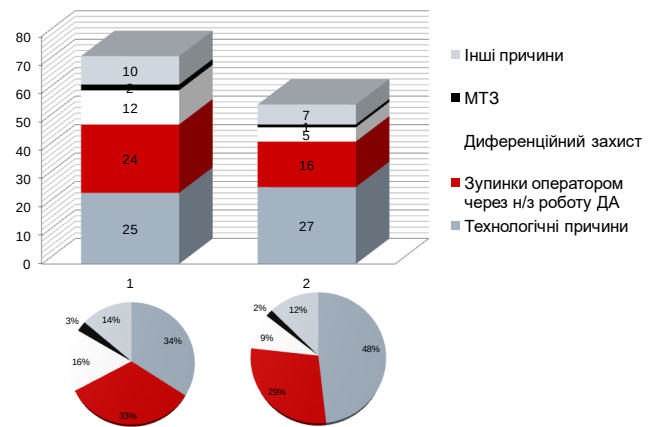


Рисунок 15 – Причини зупинок ДА №1 (ліворуч) та ДА №2 Гайсинського цукрового заводу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна проблема розробки системи керування дводвигунним електричним приводом похилого дифузійного апарата з автоматизованим забезпеченням його роботи у зоні стійкості, яка має важливе науково-технічне значення та дозволить підвищити надійність та ефективність цього електромеханічного комплексу.

У теоретичному аспекті:

- Розроблено математичні моделі дводвигунного електропривода похилого дифузійного апарата двох типів (постійного струму та асинхронного частотно-регульованого), яка враховує електромеханічні процеси, що пов'язані з наявністю нелінійного пружно-дисипативного зв'язку між двигунами. Це дозволяє досліджувати динамічні режими системи в умовах нерівномірного завантаження шнековалів, яке відповідає технологічним особливостям роботи дифузійного апарата.

- Шляхом математичного моделювання проведено дослідження динамічних властивостей дводвигунного приводу ПДА. Встановлено, що пружний зв'язок між двигунами має значний вплив на динамічні властивості системи приводу ПДА і за умови нерівномірного завантаження вздовж його шнековалів може спричинювати незатухаючі електромеханічні коливальні режими.

- Визначено зони стійкості системи приводу в залежності від основних параметрів його роботи. Показано, що зі збільшенням нерівномірності завантаження шнеків та наближенням режимів роботи двигунів до номінального зона стійкості зменшується.

- Здійснено порівняльний аналіз динамічних властивостей системи приводу постійного струму з асинхронним та їх техніко-економічних показників, у результаті чого було встановлено, що в сучасних умовах використання приводу постійного струму залишається більш доцільним, ніж запровадження асинхронного з частотним регулюванням.

- Розроблено структурну схему системи автоматизованого керування приводом похилого дифузійного апарата як електромеханічним комплексом, яка від відомих відрізняється наявністю засобів контролю механічних параметрів, зокрема відносного кута повороту валів двигунів, наявністю частотно-регульованого привода допоміжного механізму черпального колеса.

- Розроблено структурні схеми засобів вимірювання електричних та механічних параметрів приводу ПДА та отримано їх теоретичні метрологічні характеристики.

- Визначено закони регулювання обертів черпального колеса, які дозволяють забезпечити роботу привода ПДА у зоні стійкості та підвищити надійність його роботи.

У методологічному аспекті:

- Розроблено метод вимірювання механічних параметрів привода, який окрім швидкостей обертання двигунів дає можливість вимірювати відносний кут повороту їх валів, що дозволяє безпосередньо контролювати кут радіальної деформації шнековалів, який в умовах нерівномірного їх завантаження має визначальну роль на динамічні властивості системи привода похилого дифузійного апарата.

- Розроблено алгоритми роботи мікропроцесорної системи автоматизованого керування приводом ПДА.

В інженерно-технічному аспекті:

- Розроблено функціональні і електричні принципові схеми системи автоматизованого керування приводом похилого дифузійного апарата.

- Розроблено окремі пристрої диференційного захисту дводвигунного приводу похилого дифузійного апарата від аномальних режимів за механічними та електричними параметрами.

- Проведено експериментальні дослідження запропонованих методів та засобів в умовах виробництва, у ході яких доведено адекватність розроблених математичних моделей, визначено основні показники надійності системи, встановлено доцільність подальшого впровадження запропонованих пристроїв на надійність та ефективність роботи приводу похилого дифузійного апарата.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] В. І. Родінков, та А. М. Коваль, “Оцінка точності вимірювання струмів та напруг складної форми у трифазному однокатному керованому

випрямлячі”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 1, с. 51 – 55, 2005.

[2] В. І. Родінков, та А. М. Коваль, “Вплив параметрів фільтруючих установок на точність вимірювання електричних величин в трифазному мостовому випрямлячі”, *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*, № 3 (1). с. 113 – 115, 2006.

[3] В. І. Родінков, та А. М. Коваль, “Вплив параметрів Г-подібних фільтрів на точність вимірювання електричних величин в трифазному мостовому випрямлячі”, *Вісник Хмельницького національного університету*, № 5, с. 124 – 127, 2006.

[4] В. В. Кухарчук, В. І. Родінков, та А. М. Коваль, “Математична модель приладу магнітоелектричної системи при вимірюванні несинусоїдних сигналів”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №6, с. 7-11, 2009.

[5] В. В. Кухарчук, В. І. Родінков, А. М. Коваль, “Оцінка точності вимірювання несинусоїдних величин приладом магніто-електричної системи”, *Наукові праці ВНТУ*, №2, с. 1-5, 2009.

[6] В. І. Родінков, А. М. Коваль, та В. В. Юр, “Незатухаючі електромагнітні коливання в електроприводах постійного струму”, *Вісник інженерної академії України*, №1, с. 124 – 127, 2010.

[7] Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, та А. М. Коваль, “Математична і електричні моделі механічної частини шнекових дифузійних апаратів”, *Вісник інженерної академії України*, №1, с. 155 – 160, 2010.

[8] В. В. Кухарчук, В. І. Родінков, та А. М. Коваль, “Динамічні властивості системи привода похилого дифузійного апарата”, *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, №2, с. 86 – 93, 2013.

[9] В. В. Кухарчук, В. І. Родінков, та А. М. Коваль, “Дослідження динамічних режимів роботи системи приводу похилого дифузійного апарата методом імітаційного моделювання”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №4, с. 7 – 12, 2013.

[10] О. Є Рубаненко, Є. А. Бондаренко, І. О. Гунько, та А. М. Коваль, “Вплив відновлювальних джерел енергії на технічний стан обладнання розподільних мереж”, *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, №6, с. 204-213, 2018.

[11] В. В. Кухарчук, та А. М. Коваль, “Математичні моделі асинхронного приводу похилого дифузійного апарату з частотним регулюванням”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №3, с. 77 – 83, 2017.

[12] В. В. Кухарчук, та А. М. Коваль, “Автоматизований контроль механічних параметрів дводвигунового електропривода похилого дифузійного апарата”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2, с. 15 – 23, 2021.

[13] A. Koval, and V. Kukharchuk, “The inclined diffusion devices electric drive automated control system with controlled electric drive of the scoop wheel”, *Sciences of Europe, Praha, Czech Republic*, №74, pp. 78-83, 2021.

[14] В. І. Родінков, А. М. Коваль, та М. Ю. Лихогляд, “Електронна система збудження турбогенератора. Патент України на корисну модель ” UA

70760, H02P 9/14 /. – № u201114322; заявл. 05.12.2011, Бюл. № 12/2012, 25.06.2012.

[15] В. І. Родінков, А. М. Коваль, та М. Ю. Лихогляд, “Система диференційного захисту електропривода змінного струму. Патент України на корисну модель”, UA 77061, H02P 9/14 /. – № u201208819, заявл. 17.07.2012; Бюл. № 2/2013, 25.01.2013.

[16] В. В. Кухарчук, А. М. Коваль, та В. С. Голодюк, “Пристрій диференційного захисту послідовно увімкнених електродвигунів постійного струму. Патент України на корисну модель” UA 122663, H02K 7/08, № u201706551; заявл. 26.06.2017, Бюл. № 2/2018, 25.01.2018.

[17] В. В. Кухарчук, А. М. Коваль, та В. С. Голодюк, “ Пристрій для диференційного захисту двохдвигунового приводу постійного струму. Патент України на корисну модель” UA 122663, H02K 7/08 /. – № u201810922; заявл. 05.11.2018о, Бюл. № 2/201925, 07.2019.

[18] В. В. Кухарчук, В. І. Родінков, та А. М. Коваль, “Оцінка точності вимірювання несинусоїдних величин приладом магніто-електричної системи”, на IX конф. *Контроль і управління в складних системах*, Вінниця, 2008, с. 226 – 229.

[19] В. І. Родінков, та А. М. Коваль, “Математичні моделі системи приводу похилого дифузійного апарату” на 78 науковій конференції молодих учених, аспірантів та студентів *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у 21 столітті*, Київ, 02.04.2012, Ч. 1, с. 226 – 227.

[20] В. І. Родінков, та А. М. Коваль, “Дослідження передатніх характеристик системи приводу похилого дифузійного апарата”, на 78 науковій конференції молодих учених, аспірантів та студентів *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у 21 столітті*, Київ, 2012, Ч. 2. с. 228 – 229.

[21] А. М. Коваль, та В. С. Голодюк, “Система автоматизованого керування приводом похилого дифузійного апарата” на XIII міжнародній науково-технічній конференції *Авіа-2017*, Київ, 2017, с. 3.62 – 3.65.

АНОТАЦІЯ

Коваль А.М. Система автоматизованого керування дводвигунним електроприводом похилого дифузійного апарата. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі підвищення надійності дводвигунного приводу похилого дифузійного апарата з нелінійними пружними зв'язками за рахунок автоматизованого забезпечення його роботи в зоні стійкості, що базується на безперервному контролі основних його електричних та механічних параметрів.

З цією метою в роботі було виконано аналіз відомих систем керування дводвигунними електричними приводами та методів дослідження їх динамічних режимів. Розроблено математичні моделі дводвигунного електричного приводу похилого дифузійного апарата, які враховують нелінійний характер пружно-дисипативного зв'язку між двигунами приводу, що дозволило дослідити динамічні властивості системи, враховуючи основні його технологічні особливості.

Розроблено мікропроцесорну систему автоматизованого керування дводвигунним приводом похилого дифузійного апарата, яка від відомих відрізняється наявністю засобів контролю не лише електричних, а й механічних параметрів, серед яких відносний кут повороту валів двигунів.

Експериментальні дослідження запропонованих методів та засобів в умовах виробництва підтвердили адекватність отриманих теоретичних результатів та показали позитивний вплив на підвищення показників надійності та ефективності роботи системи приводу похилого дифузійного апарата.

Ключові слова: похилий дифузійний апарат, система автоматизованого керування, дводвигунний електропривод з пружними зв'язками, математична модель, динамічні властивості, надійність системи.

ABSTRACT

Koval Andriy M. The automated control system of the inclined diffusion device's two-motor electric drive. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a technical sciences candidate, scientific degree on a specialty 05.09.03 - electrotechnical complexes and systems. - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2021.

The dissertation is devoted to solving the current scientific and technical problem of increasing the reliability of an inclined diffusion device's two-motor drive with nonlinear elastic connections due to automated support of its operation in the stability zone based on continuous monitoring of its basic electrical and mechanical parameters.

For this purpose, the analysis of known control systems of two-motor electric drives and methods of research of their dynamic modes was performed in the work.

The mathematical model of the inclined diffusion device's two-motor electric drive which differs from known taking into account electromechanical processes connected with existence of nonlinear elastic-dissipative communication between engines that allows to investigate dynamic modes of system in the conditions of uneven loading of augers which is characteristic for the technological process in the diffusion device.

Due to the developed models for two types of drive the stability zones of the system are determined depending on the main parameters of work, such as: reduced moment of inertia, drive voltage, reduced static moment, coefficient of load unevenness. It is established that the occurrence of oscillating modes is associated with the presence of an elastic connection and uneven loading of the augers of the

diffusion device in the operating modes close to the nominal ones. Thus, the task of developing an automated control system, which, in contrast to the existing ones, would provide control not only of electrical but also mechanical parameters of the drive, including the radial deformation angle of augers and motor shafts rotation speed, is substantiated.

In order to improve the dynamic properties of the system and reduce the negative impact of uneven loading along the augers, a generalized block diagram of the inclined diffusion device automated control system, as an electro-mechanical complex, was represented, including control of both main and auxiliary drives. Such system, compared to the existing ones, firstly, has the ability to take into account the uneven loading of augers, and secondly, has the means to influence on it. System is equipped with measuring means of the electrical and mechanical parameters of the drive, which characterize its operation. Based on the measured values and the operator's set point, the microprocessor control system generates input tasks for the regulated voltage sources of the main and auxiliary drives.

Methods and structural schemes of means of measurement of the controlled parameters are also developed and their metrological characteristics are estimated.

A separate influencing means to the dynamic properties of the automated control system is the use of frequency-controlled drive in the pump wheel, which unloads the chips in the upper part of the diffusion device according to the developed regulation laws, based on measuring the mechanical parameters of the drive.

The system is also equipped with protections for all controlled parameters. A number of independently working means of inclined diffusion device protection against abnormal modes of operation using both analog and digital electronics were developed separately.

Experimental studies were conducted, which included studies conducted in the conditions of production at three enterprises of the sugar industry. They showed the relevance and validity of the theoretical results presented in the dissertation. The positive influence of using the developed inclined diffusion device automated control system as an electromechanical complex inside the continuous production system by the indicators of reliability and efficiency, including number of stops, readiness factor, downtime coefficient, recovery intensity, average per change productivity of the diffusion apparatus. Analysis of the failures also showed the feasibility and relevance of the developed devices.

Keywords: inclined diffusion device, two-mass electromechanical system, automated control system, two-motor electric drive with elastic connections, mathematical model, dynamic properties, system stability, elastic connection, automated control, system reliability.

АННОТАЦИЯ

Коваль А. Н. Система автоматизированного управления двухдвигательным электроприводом наклонного диффузионного аппарата. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы. - Винницкий национальный технический университет, Винница, 2021.

Диссертация посвящена актуальной научно-технической задачи повышения надежности двухдвигательного привода наклонного диффузионного аппарата с нелинейными упругими связями за счет автоматизированного обеспечения его работы в зоне устойчивости, основанного на непрерывном контроле основных его электрических и механических параметров.

С этой целью в работе был выполнен анализ известных систем управления двухдвигательными электрическими приводами и методов исследования их динамических режимов. Разработаны математические модели двухдвигательного электрического привода наклонного диффузионного аппарата, учитывающих нелинейный характер упруго-диссипативной связи между двигателями привода, что позволило исследовать динамические свойства системы, учитывая основные его технологические особенности.

Предложено микропроцессорную систему автоматизированного управления двухдвигательным приводом наклонного диффузионного аппарата, которая от известных отличается наличием средств контроля не только электрических, но и механических параметров, среди которых относительный угол поворота валов двигателей.

Экспериментальные исследования предложенных методов и средств в условиях производства подтвердили адекватность полученных теоретических результатов и показали положительное влияние на повышение показателей надежности и эффективности работы системы привода наклонного диффузионного аппарата.

Ключевые слова: наклонный диффузный аппарат, система автоматизированного управления, двухдвигательный электропривод с упругими связями, математическая модель, динамические свойства, надежность системы.

Підписано до друку 18.08.2021 р.

Формат 29.7 × 42 ¼

Наклад 100 прим.

Зам. № 449

Видавець ФОП Рогальська І. О.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 145.

тел.: (0432) 43-51-39, 65-80-80

E-mail: dilo_vd@ukr.net

Свідоцтво ДК №3909 від 02.11.2010 р.

Віддруковано ФОП Рогальська І. О.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 145.

тел.: (0432) 43-51-39, 65-80-80

E-mail: dilo_vd@ukr.net

Свідоцтво ВОЗ

№ 635744 від 01.03.2010 р.