

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОВАЛЬ АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.316.71

ДИСЕРТАЦІЯ
СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ДВОДВИГУННИМ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ А.М. Коваль

Науковий керівник:

Кухарчук Василь Васильович,
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2021

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.

Наукова новизна отриманих результатів і положень, що виноситься на захист, полягає у поглибленні існуючих, розвитку та обґрунтуванню нових підходів до аналізу динамічних властивостей дводвигунних приводів похилого дифузійного апарата та вдосконаленні методів автоматизованого керування, що забезпечують його надійну та ефективну роботу.

В роботі отримано такі наукові результати:

1. Вдосконалено математичну модель дводвигунного електропривода похилого дифузійного апарата, яка від відомих відрізняється врахуванням електромеханічних процесів пов'язаних 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 дозволило 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 полягає у практичній реалізації методів та засобів автоматизованого керування дводвигунним електроприводом похилого дифузійного апарата та пристроїв захисту від аномальних режимів для підвищення надійності та ефективності його роботи.

Основна частина дисертаційної роботи складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

В першому розділі дано огляд технологічних особливостей роботи похилого дифузійного апарата, як ланки безперервного цукрового виробництва, розглянуто основні характеристики роботи системи дводвигунного електроприводу постійного струму та засоби вирівнювання навантажень між двигунами привода.

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

В другому розділі було розроблено математичні моделі системи електроприводу похилого дифузійного апарата, які враховують основні експлуатаційні характеристики роботи даного типу привода та нелінійний характер пружних зв'язків між двигунами. Також створено імітаційну модель, яка дає змогу досліджувати динамічні режими роботи та вплив на її властивості основних параметрів роботи даної системи автоматичного керування.

В результаті аналізу розроблених математичних моделей системи дводвигунного привода похилого дифузійного апарата було встановлено, що

пружний зв'язок між двигунами, який має нелінійний характер суттєво впливає на динамічні властивості системи, серед яких основною є стійкість. Наявність нелінійного пружного зв'язку в даній системі привода є однією з основних умов для виникнення незатухаючих коливальних режимів, що по своїй сутті є аварійним режимом.

Встановлено, що визначальну роль на динамічні властивості привода має коефіцієнт нерівномірності завантаження двигунів привода. Це пояснюється тим, що за умови нерівномірного завантаження дифузійного апарата вздовж шнеків виникає різниця швидкостей обертання двох двигунів, наслідком чого є пружна деформація (закручення) валу між двигунами. Таким чином відбувається перерозподіл кінетичної енергії між двигунами, а також накопиченою в деформованому тілі потенційної енергії. При зростанні нерівномірності завантаження зона стійкості системи привода значно зменшується.

Таким чином обґрунтовано задачу розробки системи автоматизованого керування, яка б на відміну від існуючих забезпечувала контроль не лише електричних, але й механічних параметрів привода, серед яких кут радіальної деформації шнековалів та швидкостей обертання валів двигунів.

Також було визначено характер впливу інших параметрів системи. Показано значний вплив напруги на двигунах та струму їх роторних обмоток на стійкість системи привода, що є надзвичайно важливим, оскільки в виробничих умовах дані величини є основними при визначенні оператором режиму роботи привода.

В третьому розділі розроблено математичні моделі системи асинхронного привода похилого дифузійного апарата з частотним регулюванням для двох варіантів живлення асинхронних двигунів: від спільного та індивідуальних перетворювачів частоти. На їх основі було проведено дослідження динамічних властивостей системи засобами імітаційного моделювання та дано порівняльну характеристику їх відносно системи привода постійного струму.

В результаті було встановлено, що система асинхронного приводу похилого дифузійного апарата зі спільним перетворювачем частоти має низькі показники якості перехідних процесів, особливо в режимах близьких до номінального, а тому може бути використана лише в умовах завантаження значно нижчих паспортних даних асинхронних двигунів. Система приводу з індивідуальними перетворювачами частоти при використанні скалярної системи синхронізації обертання двигунів володіє динамічними властивостями, які поступаються системі постійного струму лише при навантаженні близько та більше номінального, та може працювати зі значними значеннями коефіцієнту нерівномірності завантаження шнековалів. При порівнянні техніко-економічних показників різних типів приводів зроблено висновок, що в сучасних умовах використання системи приводу постійного струму залишається більш доцільним за впровадження асинхронного з частотним регулюванням.

З метою покращення динамічних властивостей системи та зменшення негативного впливу на них нерівномірності завантаження вздовж шнековалів було запропоновано узагальнену структурну схему системи автоматизованого керування приводом похилого дифузійного апарата, як електро-технічного комплексу, що включає в себе керування, як основним, так і допоміжними приводами. Така система, на відміну від існуючих, по перше, має здатність враховувати нерівномірність завантаження шнековалів, а по друге має засоби впливати на неї. Для цього систему оснащено засобами вимірювання електричних та механічних параметрів приводу, що характеризують його роботу. На основі виміряних значень та заданої оператором уставки мікропроцесорна система керування формує вхідні завдання для джерел регульованої напруги основного та допоміжного приводів.

Також розроблено методи й структурні схеми засобів вимірювання контрольованих параметрів та проведено оцінку їх метрологічних характеристик.

У четвертому розділі було розроблено функціональні та електричні принципові схеми запропонованої системи автоматизованого керування приводом похилого дифузійного апарата з використанням мікропроцесорної техніки та алгоритми їх роботи, що стали основою апаратної реалізації отриманих результатів та застосуванням її в у мовах виробництва. Система інтегрована до SCADA- системи керування технологічним процесом дифузійного відділення цукрового заводу, що дозволяє оператору здійснювати керування ДА, враховуючи в тому числі швидкості обертання та відносний кут повороту валів двигунів, а також значення струмів та напруг на двигунах на моніторі комп'ютера.

Крім цього пропонована система здійснює керування включенням допоміжних приводів та контролю їх станів. Окремим засобом впливу на динамічні властивості системи є використання частотно-регульованого привода черпального колеса, який здійснює розвантаження стружки у верхній частині ДА за розробленими законами регулювання на основі вимірювання механічних параметрів привода.

Також система оснащена захистами за усіма контрольованими параметрами. Окремо було розроблено ряд самостійно працюючих засобів захисту похилого дифузійного апарата від аномальних режимів роботи з використанням як аналогової, так і цифрової схемотехніки.

Проведено експериментальні дослідження, які включали в себе дослідження проведені в умовах виробництва на трьох підприємствах цукрової галузі. Вони показали актуальність та справедливність отриманих теоретичних результатів, представлених в дисертаційній роботі. Встановлено позитивний вплив використання розробленої системи автоматизованого керування дифузійного апарата, як електромеханічного комплексу в системі безперервного виробництва, на показники надійності та ефективності, серед яких кількість зупинок, коефіцієнт готовності, коефіцієнт простою, інтенсивність відновлення, середня за зміну продуктивність дифузійного

апарата. Аналіз причин відмов також показав доцільність та актуальність розроблених пристроїв.

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

ABSTRACT

Koval A. 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.

The scientific novelty of the obtained results and the provisions submitted for defense is the deepening of existing, development and substantiation of the new approaches to the dynamic properties analysis of the inclined diffusion device's two-motor drives and improvement of automated control methods that ensure its reliable and efficient operation.

The following scientific results were obtained in the work:

1. 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.

2. For the first time the dynamic properties of the inclined diffusion device's two-motor electric drive with nonlinear elastic connections were investigated, which allowed to determine the zones of system stability depending on the main parameters of its operation for two types of drive: direct current drive and frequency-regulated asynchronous motor drive.

3. The method of control of mechanical parameters of the electric drive which differs from known by additional measurement of engines shafts relative rotation angle which control allows to provide work of the whole system in a steady zone has received the further development.

The practical significance of the obtained results lies in the practical implementation of the inclined diffusion device's two-motor electric drive automated control methods and means and devices for protection against abnormal modes to increase the reliability and efficiency of its operation.

The main part of the dissertation consists of an introduction, four sections, conclusions and a list of used sources.

The first section provides an overview of the technological features of IDD, as a link of continuous sugar production, considers the main characteristics of the system and means of load balancing between drive motors.

The analysis of existing two-motor direct current drives automatic control systems is carried out, importance of the account of available elastic connection in the kinematic scheme which nonlinear character cannot be neglected, on dynamic properties of system is shown, existing mathematical models of the electric drive with elastic connection and means are considered study of their dynamic modes of operation.

In the second section, mathematical models of the inclined diffusion device's two-motor electric drive were developed, which take into account the main operational characteristics of this type of drive and the nonlinear nature of the elastic connections between the motors. A simulation model has also been created, which

makes it possible to study the dynamic modes of operation and the influence of this automatic control system main parameters on its properties.

As a result of the developed mathematical models analysis of the two-engine IDD drive system, it was found that the elastic connection between the motors, which has a nonlinear character, significantly affects the dynamic properties of the system, the main one being stability. The presence of a non-linear elastic connection in this drive system is one of the main conditions for the occurrence of undamped oscillation modes, which is essentially an emergency mode.

It is established that the coefficient of drive motors uneven loading has a decisive role on the dynamic properties of the drive. This is explained by the fact that under the condition of uneven loading of the diffusion device along the screws there is a difference in the two motors rotation speed, resulting in elastic deformation (twisting) of the shaft between the motors. Thus there is a redistribution of kinetic energy between the engines, as well as the potential energy accumulated in the deformed body. As the load unevenness increases, the stability zone of the drive system decreases significantly.

Thus, the task of developing an automated control system is substantiated, which, unlike the existing ones, would provide control not only of electrical but also mechanical parameters of the drive, including the auger radial deformation angle and speeds of motor shafts.

The nature of the influence of other system parameters was also determined. The significant influence of motors voltage and current of their rotor windings on the stability of the drive system is shown, which is extremely important, because in production conditions these values are the main when determining the operator mode of operation of the drive.

In the third section, mathematical models of the asynchronous IDD drive system with frequency control for two variants of AD power supply are developed: from common and individual inverters. Based on them, a study of the dynamic properties of the system by means of simulation and gave a comparative description of them relative to the DC drive system.

As a result, it was found that the system of asynchronous IDD drive with a common FC has low quality indicators of transients, especially in modes close to the nominal, and therefore can be used only in conditions of loading much lower passport data AD. The drive system with individual inverters when using a scalar system of motor rotation synchronization has dynamic properties that are inferior to the DC system only at loads close to or greater than the nominal, and can work with significant values of the coefficient of uneven loading of augers. When comparing the technical and economic indicators of different types of drives, it is concluded that in modern conditions the use of the DC drive system remains more appropriate for the introduction of asynchronous with frequency control.

In order to improve the dynamic properties of the system and reduce the negative impact on them of uneven loading along the augers, a generalized block diagram of the automated control system of the IDD drive was proposed as an electro-technical complex that includes control of both main and auxiliary drives. Such a system, from the existing ones, firstly, has the ability to take into account the uneven loading of augers, and secondly, has the means to influence it. To do this, the system is equipped with means of measuring the electrical and mechanical parameters of the drive, which characterize its operation. Based on the measured values and the setpoint set by the operator, the microprocessor control system generates input tasks for the regulated voltage sources of the main and auxiliary drives.

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

In the fourth section, functional and electrical schematics of the proposed automated control system of the IDD drive using microprocessor technology and algorithms for their operation were developed, which became the basis for hardware implementation of the results and its application in production conditions. The system is integrated into the sugar plant's diffusion department SCADA system of the, which allows the operator to control the DA, taking into account the speed and relative angle of the motor shafts rotation, as well as the values of currents and voltages on the computer monitor.

In addition, the proposed system controls the inclusion of auxiliary drives and monitors their condition. A separate means of influencing the dynamic properties of the system is the use of frequency-controlled drive of the pump wheel, which unloads the chips in the upper part of the IDD according to the developed laws of regulation 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 IDD 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 IDD 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, automated control system, two-motor electric drive with elastic connections, mathematical model, dynamic properties, system reliability.

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 дводвигунного 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 конференції. *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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ВІДОМИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ.....	26
1.1 Загальна характеристика технологічних процесів цукрової галузі.....	26
1.2 Особливості роботи системи приводу похилого дифузійного апарата.....	31
1.3 Аналіз існуючих систем автоматичного керування дводвигунних електроприводів та їх математичний опис.....	35
1.4 Аналіз існуючих систем керування електроприводом похилого дифузійного апарата як електромеханічним технологічним комплексом.....	46
1.5. Висновки.....	51
РОЗДІЛ 2 ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДВОДВИГУННОЇ СИСТЕМИ ПРИВОДА ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА.....	53
2.1 Математичні моделі системи електроприводу дифузійного апарату похилого типу з нелінійним пружно-дисипативних зв'язків	53
2.2 Дослідження системи електроприводу похилого дифузійного апарата в динамічному режимі роботи з врахуванням нелінійного характеру пружних зв'язків	65
2.3 Вплив параметрів системи та режиму на динамічні властивості нелінійної системи електропривода похилого дифузійного апарата.....	76
2.4 Висновки.....	84
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА	86
3.1 Математичні моделі асинхронного електропривода похилого дифузійного апарата з частотним регулюванням, які враховують нелінійний характер пружно-дисипативних зв'язків	86

3.1.1 Математичні моделі асинхронного двигуна як електромеханічного перетворювача	87
3.1.2 Математичні моделі групового асинхронного приводу похилого дифузійного апарата при живленні двигунів від спільного перетворювача частоти	91
3.1.3 Математичні моделі асинхронного приводу похилого дифузійного апарата при живленні двигунів від індивідуальних перетворювачів частоти	96
3.2 Порівняльна характеристика приводів різних типів	97
3.3 Узагальнена структурна схема системи автоматизованого керування приводом похилого дифузійного апарата	102
3.4 Вимірювання механічних параметрів приводу похилого дифузійного апарата	106
3.5 Вимірювання електричних параметрів електропривода похилого дифузійного апарата	115
3.6 Висновки	119
РОЗДІЛ 4 АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА	121
4.1 Функціональні схеми системи автоматизованого керування електроприводом похилого дифузійного апарату.....	121
4.2 Розробка законів регулювання та алгоритмів системи автоматизованого керування електроприводом похилого дифузійного апарата.....	126
4.2.1 Обробка даних та розробка законів регулювання основним приводом та приводом черпального колеса.....	126
4.2.2 Алгоритми функціонування мікропроцесорної системи автоматизованого керування.....	134
4.3 Пристрої захисту похилого дифузійного апарата в аномальних режимах роботи.....	139
4.4 Експериментальні дослідження розробленої системи автоматизованого керування електроприводом похилого дифузійного апарата.....	146

4.5 Висновки.....	160
ВИСНОВКИ.....	162
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	164
ДОДАТКИ.....	178
Додаток А Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	179
Додаток Б Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	181

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПДА – похилий дифузійний апарат

САК – система автоматизованого керування

ТП – тиристорний перетворювач

ПЧ – перетворювач частоти

АД – асинхронний двигун

ВК – вимірювальний канал

СО – сенсор обертання

РОП – реле обрив поля

МК – мікроконтролер

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

БД – база даних

ВСТУП

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 із 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 %, за рахунок чого собівартість виробленого цукру на таких підприємствах значно знизилась. Вирішення таких завдань відбувається за рахунок 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.

В 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 привода та особливості експлуатації ПДА, а також недосконалість існуючих систем автоматизованого керування приводом, пов'язаних з відсутністю у них засобів вимірювання та контролю механічних параметрів.

В 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 привода постійного струму та частотно-регульованого асинхронного привода.
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 символної математики, чисельні 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 пов'язаних 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 дозволило 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 анормальних 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 таких: [1] – [5] – здійснено оцінювання точності вимірювання несинусоїдних величин в пристроях силової перетворювальної техніки [6] – розроблено математичний опис, який описує процеси, що протікають у такому режимі 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 апарата, встановлено вплив основних параметрів системи та режиму на динамічні властивості електроприводу та визначено зони стійкої роботи в різних системах координат, [9] – розроблено імітаційну *symulink*-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 апарата 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 апарата, здійснено оцінювання метрологічних характеристик розроблених засобів та визначено оптимальні параметри сенсорної системи, [13] – розроблено систему автоматизованого керування дводвигунним електроприводом постійного струму, як електро-механічним комплексом, що включає в себе керування основним та допоміжними електроприводами, запропоновано закони регулювання частотно-регульованим електроприводом допоміжного механізму черпального колеса в залежності від швидкості обертання шнеків похилого дифузійного апарату та відносного кута повороту валів двигунів основного приводу, 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 апарата, [20] – досліджено динамічні властивості лінеаризованої системи електроприводу похилого дифузійного апарату [21] – розроблена узагальнена

структурна схема системи автоматизованого керування електроприводом похилого дифузійного апарата.

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 із 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 стор.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ВІДОМИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

1.1 Загальна характеристика технологічних процесів цукрової галузі.

Цукрове виробництво має ряд особливостей:

1. сезонність роботи (сезон цукроваріння триває 30...100 діб);
2. постійність роботи, причому впродовж сезону можливі зупинки, пов'язані у відмові однієї чи декількох ланок безперервного технологічного ланцюга, які призводять до величезних втрат, оскільки потребують повторного пуску з непродуктивними витратами сировини та енергії;
3. висока потреба у тепловій та електричній енергії, що порівняно мало коливається впродовж доби та сезону цукроваріння;
4. різноманітність теплоносіїв та їх параметрів у схемі теплопостачання заводу: водяна пара різних тисків, конденсати, гаряча вода, гаряче повітря, димові гази та ін.;
5. велика кількість вторинних енергоресурсів (випарена пара, конденсати, гаряча вода, димові гази тощо), які можуть бути використані і значною мірою використовуються.
6. розвинена та ефективна теплотехнологічна схема (порівняно з іншими галузями), що пояснюється великим теплоспоживанням, довгою історією галузі та сезонністю роботи, що залишає час для щорічних модернізацій під час ремонту;
7. наявність власних ТЕЦ, що одночасно генерують пару та електроенергію для виробничих потреб, а також для опалення, вентиляції та гарячого водопостачання. [22]

На рис. 1.1 подано узагальнену технологічну схему усього цукрового виробництва, особливостями якої є складність, безперервність, наявність

повернень та зворотних зв'язків тощо. Технологічні процеси та обладнання цукрового виробництва більш детально описані у [22] – [28].

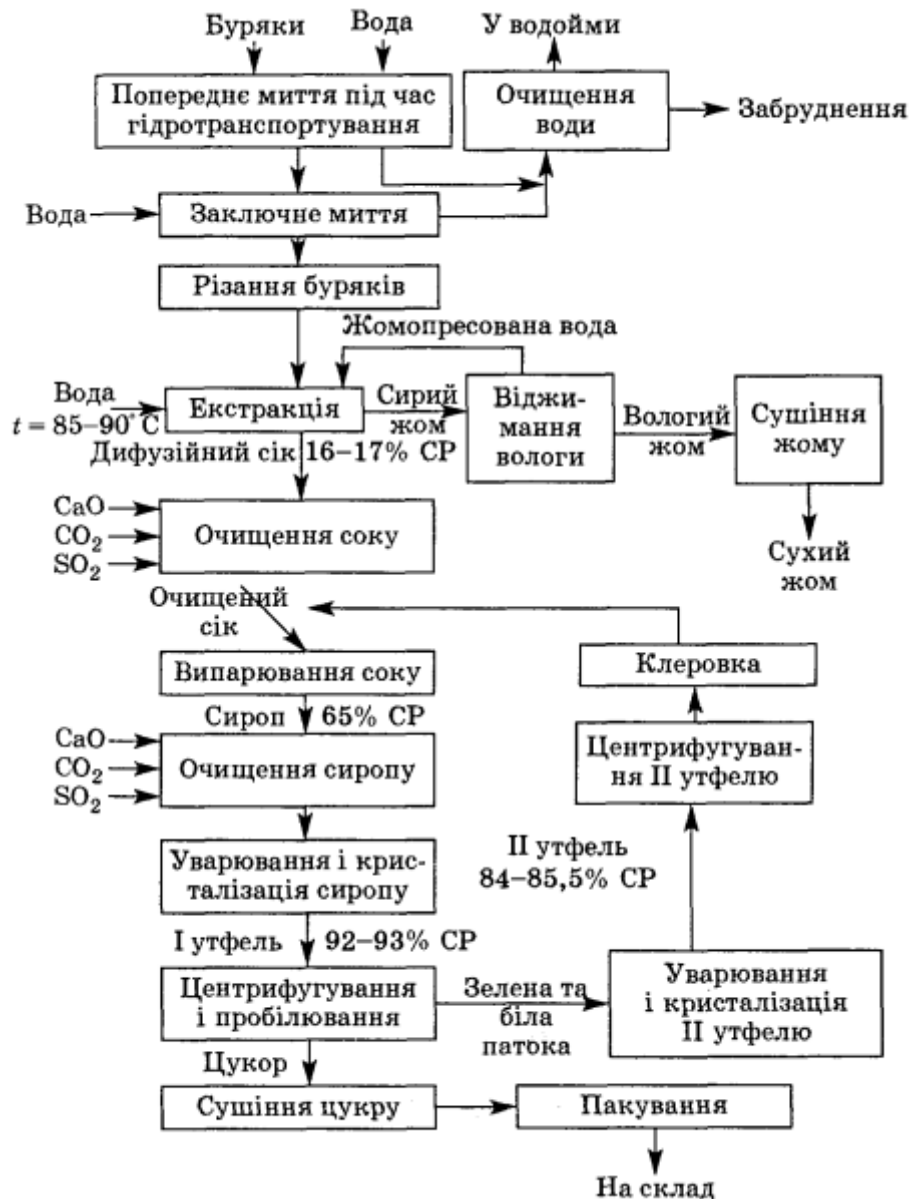


Рисунок 1.1 – Технологічна схема цукрового виробництва

Зупинимось більш детально на технологічних процесах бурякопереробного відділення.

Основною сировиною для цукрового виробництва у світі є цукрова тростина, а в Україні – цукровий буряк. В середньому в коренеплоді цукрового буряку міститься близько 75% води і 25% сухих речовин. Вміст сахарози в буряку (цукристість) може коливатися від 15 до 22% (в середньому 17,5%). З 75

кг води, що містяться в 100 кг буряку, близько 2 кг міцно утримується колоїдами, а близько 73 кг є розчинником для 17,5 кг сахарози і 2,5 кг розчинних нецукрів соку. Важливим показником є чистота, або доброякісність соку, $Ч$ – відношення вмісту (у %) сахарози (C_x) до сухої речовини буряку (CP).

Буряк, що надходить на переробку, містить 5...15% домішок у вигляді гички, піску, каміння, землі, які, потрапляючи до обладнання, погіршують роботу бурякорізок, зменшують якість дифузійного соку і призводять до різкого збільшення втрат цукру. Гідротранспортери, за допомогою яких буряк подається з кагатів на переробку, обладнані вловлювачами різної конструкції для видалення піску, каміння і гички. Після надходження на переробку буряк відмивають на бурякомийках різного типу від налиплих часток землі. Митий буряк вертикальними елеваторами піднімають у верхнє відділення заводу на висоту до 20 м, щоб забезпечити його гравітаційний спуск на автоматичні ваги і бурякорізки. Для зважування буряку використовують автоматичні ковшові ваги.

Цукор з цукрового буряку виділяють дифузійним методом. Для цього буряк подрібнюють на стружку жолобчатої чи пластинчатої форми. Товщина бурякової стружки становить 0,5...1 мм, ширина – 3...6 мм. Якість стружки має вирішальний вплив на роботу дифузійної установки і оцінюється показниками:

- число Сіліна – довжина 100 г стружки (норма 9...15 м)
- шведський фактор – відношення маси стружки довжиною більше 5 см до маси стружки довжиною менше 1 см (норма не нижче 8)
- вміст браку у стружці (до 3%).

Найпоширеніші відцентрові бурякорізки з нерухомими 12 або 16 рамами з ножами. Буряк надходить до ротора бурякорізки, що обертається, відцентровою силою притискається до ножів і ріжеться. Бурякорізки продувають паром від часток стружки. Отримана бурякова стружка стрічковим конвеєром подається у дифузійне відділення для одержання соку.

Одержання дифузійного соку є визначальною ланкою роботи усього технологічного процесу виробництва цукру. Під час дифузії з бурякової

стружки потрібно виділити максимально можливу кількість сахарози. Для цього сахарозу вимивають зі стружки гарячою водою у дифузійних установках безперервної дії.

В цукровому виробництві дифузійний процес є складним комплексом трьох видів дифузії.

На початку відбувається дифузія цукру з розірваних при розрізуванні буряку в стружку клітин (вільна дифузія), потім починається проникнення води у клітковий сік (осмос) і після нагрівання стружки до 60°C і денатурації протоплазми починається основний процес виділення цукру з вакуолей клітин буряку до дифузійного соку (діаліз).

Процес одержання дифузійного соку має ряд обмежень. Відбір соку (відношення витрати соку до витрати стружки) становить 110...125 % залежно від якості буряків та типу дифузійної установки. За більшого відбору значно збільшується витрата води на знецукрювання стружки, збільшуються витрати палива та електроенергії на випарювання надлишкової води під час згущення соку.

Тривалості перебування стружки у апараті також обмежений, оскільки збільшення часу екстрагування призводить до більш повного переходу зі стружки до розчину не тільки сахарози, а й нецукрів, зокрема пектинів. Тому час екстракції обмежують. Час дифузії в апаратах неперервної дії складає 70...80 хвилин.

Стосовно температури дифузії також є обмеження. З одного боку, підвищення температури сприяє збільшенню коефіцієнта дифузії сахарози, тому більше сахарози перейде зі стружки до розчину. З іншого боку, при температурі вище 75°C відбувається швидке набухання пектинових речовин стружки і зменшується її пружність, отже стружка у апараті злипнеться і більша її частина не омиватиметься водою. Крім того такі утворення негативно впливають на механіку транспортування стружки. А при температурі нижче 70°C інтенсивно розвиваються мікроорганізми, наслідком чого є псування

стружки. Тому в активній частині дифузійних апаратів підтримують температуру 70...75°C.

Процес екстрагування цукру відбуваються в дифузійних апаратах, які в залежності від розташування корпусу поділяються на наступні групи: колоні (вертикальні) – КДА-10, КДА-15, КДА-20, БМА (Німеччина), J-4, J-8 (Угорщина); ротаційні (горизонтальні) – РДА, Берже, РТ-Смет; похилі шнекові типу ПДС, С-17, Брюніха-Ольсена тощо. В вітчизняній промисловості найбільше застосування знайшли колоні апарати КДА та похилі дифузійні апарати (ПДА) типу ПДС різної потужності.

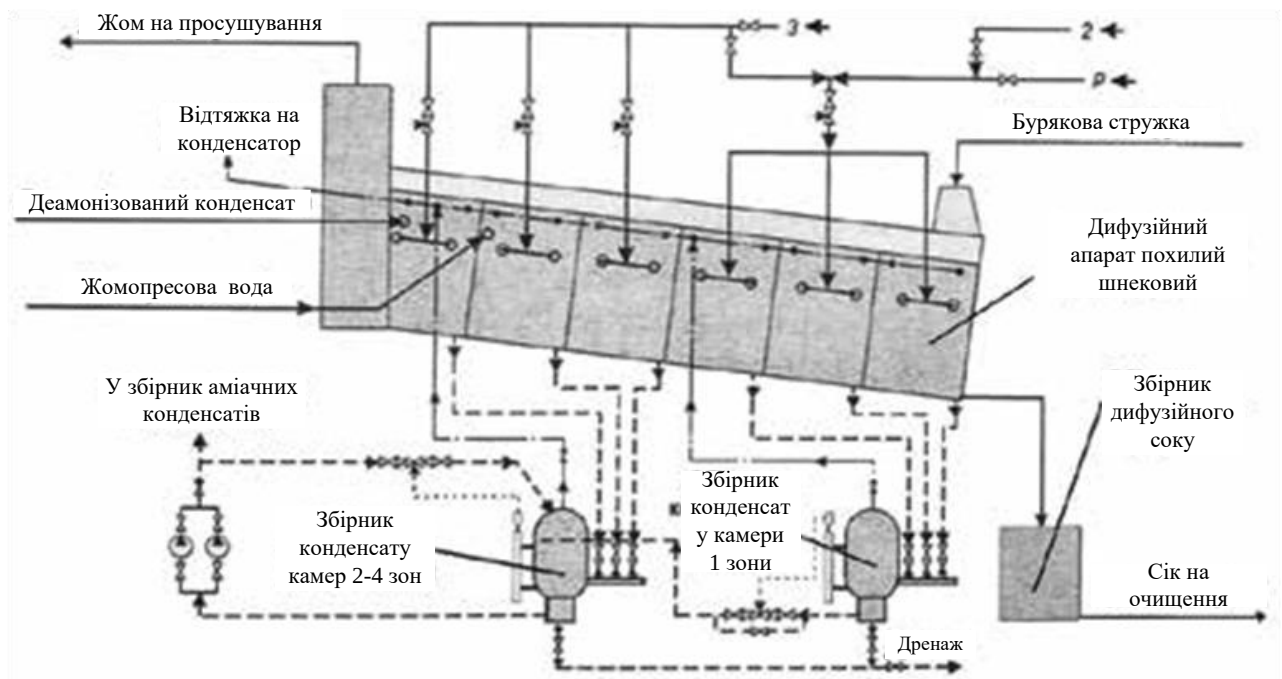


Рисунок 1.2 – Технологічна схема ПДА

ПДА (рис. 1.2) має похилий коритоподібний корпус, всередині якого розташовані два гвинтові шнеки, що обертаються і переміщують стружку знизу догори. Живильну воду подають згори, у протитоці зі стружкою. Дифузійний сік відбирають з нижньої частини апарата і подають на подальше очищення від розчинних та нерозчинних домішок, випаровування у випарних установках та кристалізацію у вакуумних апаратах.

Корпус апарата обладнаний паровими обігрівними камерами, що дає змогу підтримувати всередині оптимальну температуру. Для відведення конденсату з камер передбачені збірники. Неконденсовані гази відводяться на конденсатор. Перевагами похилої дифузійної установки є: стабільність роботи; низький відбір дифузійного соку (110...115%); низька температура дифузійного соку (25...35°C), що дає змогу утилізувати низькотемпературні вторинні енергоресурси; менші втрати сахарози від термічного розкладення тощо.

Останнім часом спостерігається збільшення продуктивності роботи більшості цукроварень України [29], [30]. Виробники, модернізуючи пов'язане технологічно з ПДА обладнання, постійно збільшують використання цих апаратів, тоді як транспортна механічна система дифузійних апаратів залишається незміною.

Як видно з опису технології екстракція цукру є складним процесом, керування яким відбувається системою автоматизованого керування з багатьма контрольованими параметрами різної природи.

1.2 Особливості роботи системи приводу ПДА

Традиційною системою приводу ПДА є груповий регульований дводвигунний електропривод постійного струму [25].

Система його автоматичного керування зображена на рис. 1.3.

Шнеки ПДА приводяться в рух через редуктори РН та РВ двома двигунами постійного струму незалежного збудження. З теорії електроприводу [31] – [35] відомо про застосування дводвигунних приводів в різних галузях промисловості, зокрема для приводу різних механізмів прокатних станів та підйомно-транспортних механізмів. В багатьох теоретичних працях [32], [35], [37] поставлено ряд задач пов'язаних з виникненням нерівномірного розподілу навантаження між двигунами привода. Основними причинами виникнення таких явищ визначаються відмінності в параметрах двигунів (опори роторних

та якірних обмоток, зазори в магнітних колах збудження, зміщення щіток з нейтралі тощо), що мають однакові паспортні дані.

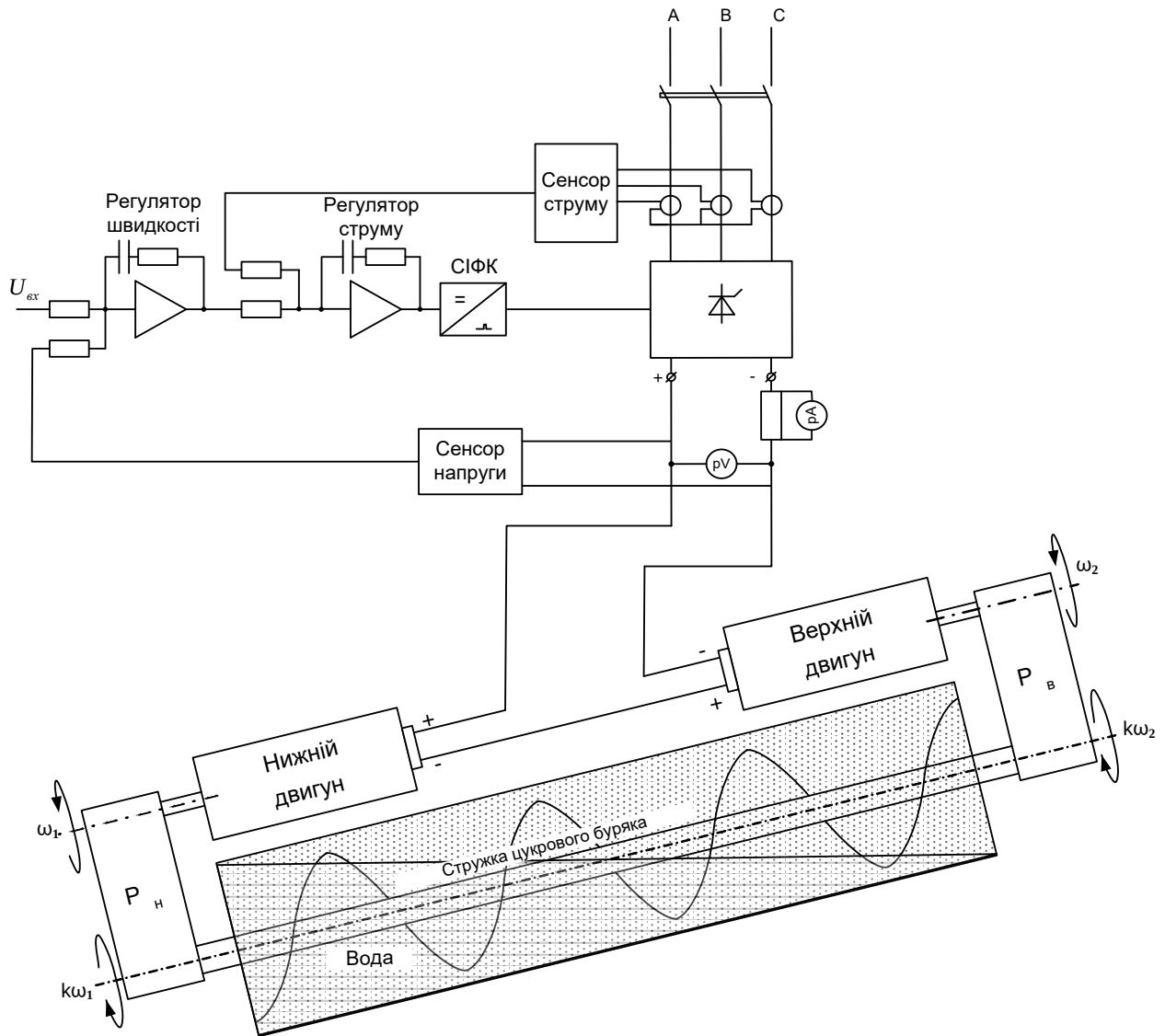


Рисунок 1.3 – Структурна схема традиційної системи приводу ПДА постійного струму

Будь-які зміни і невідповідності в резистивних опорах якоря $R_{я}$ та полях двох електричних машин призводять до змін у жорсткості їх механічних характеристиках, що описуються рівнянням:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_{я}}{(c\Phi)^2} M, \quad (1.1)$$

де ω – кутова швидкість двигуна, U – напруга на явірній обмотці двигуна, c – конструкційна стала, Φ – магнітний потік, M – момент на валу двигуна. Наслідком цього є нерівномірність розподілу навантаження між двигунами приводу. Проілюструвати цю нерівномірність можна за допомогою побудови сумісної механічної характеристики двох електричних машин, зв'язаних спільним валом (рис. 1.4)

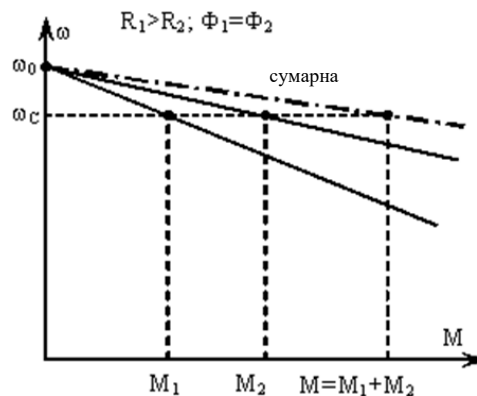


Рисунок 1.4 – Сумісна механічна характеристика двох двигунів

Внаслідок цього при розрахунку усталених режимів роботи дводвигунного електропривода необхідно визначати нерівномірність навантаження та на стадії розробки систем керування приймати міри для запобігання негативним наслідкам цього явища.

З метою забезпечення на валах двигунів приводу однакових механічних моментів їх роторні обмотки з'єднані послідовно й підключені до керованого випрямляча, який є джерелом регульованої напруги (рис. 1.3). Аналіз усталених режимів роботи такого приводу приведений у [32], [35]. При такому підключенні двигунів приводу струм якоря $I_{я}$ спільний, а кутова швидкість ω_c однакова для двох якорів за умови нехтуванням пружних властивостей механічного зв'язку. На рис. 1.5 розглянуто випадок, коли параметри двигуна відповідають співвідношенням: $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$, $R_{я1} \succ R_{я2}$.

В такому випадку механічні характеристики двигунів 1 та 2 мають різну жорсткість, а моменти на валах обох двигунів рівні: $M_1 = c\Phi_1 I_a = c\Phi_2 I_a = M_2$. Тоді перерозподіл навантаження відбувається внаслідок перерозподілу напруг на якорах машин у відповідності до величин $R_{я1}$ та $R_{я2}$:

$$U_1 = E + I_a R_{я1}, U_2 = E + I_a R_{я2}, E = c\Phi_1 \omega_c.$$

Так як $R_{я1} > R_{я2}$, то $U_1 > U_2$, і виникає зміщення механічних характеристик 1 і 2 з врахуванням перерозподілу напруг якірних обмоток так, як показано на рис. 1.5 (1' і 2'). Це приводить до автоматичного вирівнювання навантажень, оскільки в точці перетину зміщених характеристик 1' та 2' $M_1 = M_2 = M$, а швидкості ідеального холостого ходу в такому разі теж змінюються.

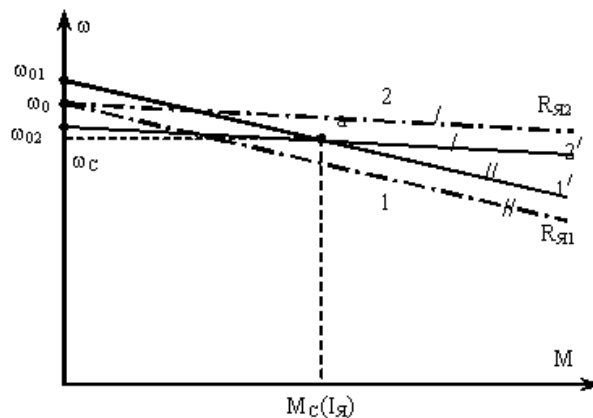


Рисунок 1.5 – Перерозподіл навантажень дводвигунного привода постійного струму

Такий підхід до аналізу явищ в дводвигунних приводах має ряд обмежень щодо застосування і може бути використаний лише при виборі електричних машин привода та засобів вирівнювання їх механічних навантажень. Однак він зовсім не враховує динамічних режимів, адже процес екстрагування цукру є ланкою безперервного технологічного ланцюга інтенсивність його роботи залежить від багатьох факторів. Крім того особливістю роботи ПДА є нерівномірність завантаження верхнього й нижнього двигунів привода: сокоотружкова суміш в верхній частині є сухішою й більш в'язкою, що

призводить до збільшення завантаження верхнього двигуна. Завантаження ПДА та нерівномірність його розподілу між двигунами весь час змінюється у часі, тобто ми маємо справу з динамічним об'єктом керування, а це робить актуальними дослідження динамічних властивостей системи приводу ПДА.

Аналіз таких властивостей неможливий без врахування наявності пружного зв'язку між двигунами приводу та є обов'язковою умовою для синтезу систем керування приводом ПДА.

1.3 Аналіз існуючих систем автоматичного керування дводвигунних приводів та їх математичний опис.

Керування в сучасних системах автоматичного керування часто проводиться не за однією керованою й контрольованою величиною (координатою), а декількома, з можливістю обмеження кожної з них у відповідних межах. Такі системи виконуються за принципом підпорядкованого керування за допомогою каскадного включення регуляторів таким чином, щоб вихідна напруга попереднього регулятора була вхідним завданням для наступного. Під координатами розуміють вихідні величини ланок системи регулювання, які змінюються у часі, наприклад швидкість обертання, струм двигуна, вихідні напруги (струму) регуляторів тощо.

Обмеження або формування по визначеному закону вихідної величини попереднього регулятора призводить до обмеження або зміни за певним законом координати, регульованої наступним регулятором. Таким чином, необхідне обмеження декількох координат досягається за допомогою багатоконтурної системи керування, а число послідовних регуляторів при підпорядкованому керуванні рівне числу регульованих координат руху.

Відомо, що системи автоматичного керування швидкістю обертання приводів постійного струму можна умовно поділити на два типи за характером зворотних зв'язків. Одні виконані на основі регулятора швидкості та обладнанні сенсором швидкості обертання двигуна (тахогенератором), інші на

основі зворотного зв'язку за напругою. Регулятори швидкості (рис. 1.6) володіють досить непоганими характеристиками швидкодії та за умови використання точних тахогенераторів досягають високих показників щодо точності регулювання. Недоліком їх є зниження надійності внаслідок застосування тахогенераторів (окремих пристроїв встановлених на роторі двигуна), що в умовах виробничого процесу піддаються впливу високих вологості та температури, забруднених середовищ тощо. Крім того регулятор швидкості погано зарекомендував себе при застосуванні у груповому електроприводі, коли від одного перетворювача живляться два і більше двигунів з пружним механічним зв'язком між собою, коли можливі відмінності в їх швидкостях обертання.

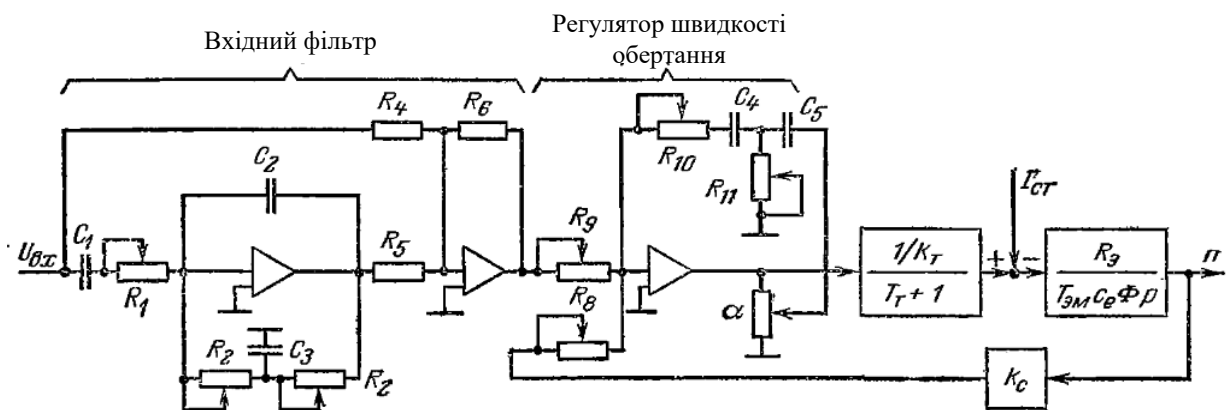


Рисунок 1.6 – Приклад САК з регулятором швидкості і вхідним фільтром

Широке застосування в промисловості знайшли різні системи керування швидкістю обертання приводу постійного струму зі зворотнім зв'язком за напругою. Приклад такої системи поданий на рис. 1.7

Внаслідок того, що в сигналі зворотного зв'язку за напругою присутня складова, пропорційна струму і його похідної, система зі зворотним зв'язком за напругою структурно дещо складніша за систему зі зворотним зв'язком за швидкістю обертання. Така система через наявність індуктивної складової в сигналі зворотного зв'язку при інших рівних умовах має меншу швидкодію, чим система зі зворотним зв'язком за швидкістю. Однак в ряді практичних

випадків при недостатньо якісних тахогенераторах система зі зворотним зв'язком за напругою може бути рівнозначною за швидкодією системі за швидкістю.

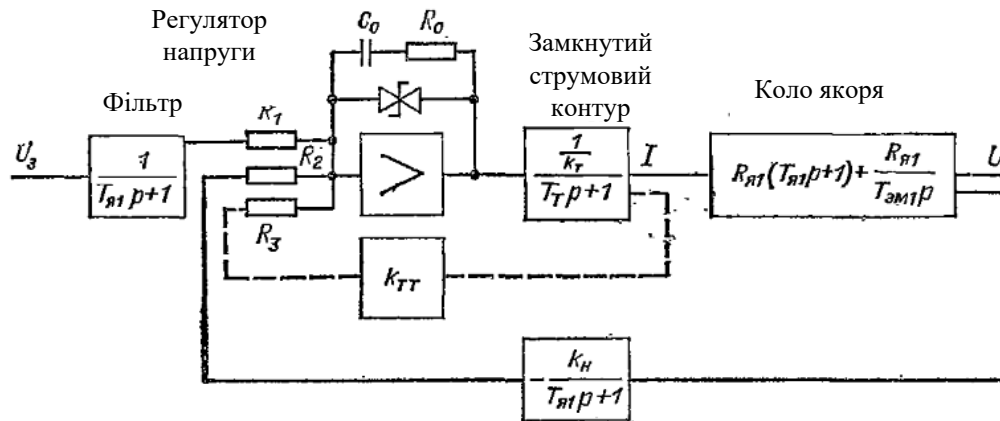


Рисунок 1.7 – Приклад структурної схеми системи керування швидкістю електропривода зі зворотнім зв'язком за напругою

Відомо декілька структур, де використовується зворотний зв'язок за напругою. Розглянемо основні з них.

Найпростішим варіантом є випадок, коли необхідно стабілізувати лише напругу, струмовий контур представлений у згорнутому вигляді і представляє собою лише струмообмеження. Навантаженням стабілізованої напруги є коло якоря двигуна, а сама напруга складається з трьох складових: активна і індуктивна напруга, а також проти е.р.с двигуна, яка пропорційна його швидкості обертання. Регулятор напруги виконаний пропорційно-інтегральним, що дозволяє реалізувати великий коефіцієнт підсилення. Вибору оптимальних параметрів регуляторів присвячено [45] – [46]. Така система при досить простій реалізації забезпечує стабілізацію випрямленої напруги, однак при різкому збільшенні моменту опору усталене значення просадки обертів двигуна Δn буде досить великим:

$$\Delta n = \frac{IR_{\text{я}}}{c_e \Phi} \quad (1.2)$$

Для підвищення жорсткості механічної характеристики електропривода в системах зі зворотним зв'язком за напругою використовують компенсацію спад напруги в колі якоря. Для цього на вхід регулятора напруги окрім від'ємного зворотного зв'язку за напругою подається додатний зворотний зв'язок, пропорційний якірному струму I . Цей зв'язок на рис. 1.7 показана пунктирною лінією. Умовою повної компенсації активної складової спаду напруги є наступне співвідношення:

$$\frac{k_H R_{\text{я}} I}{R_2} = \frac{k_T I}{R_3},$$

де k_H , k_T – коефіцієнти передачі ланок зворотних зв'язків напруги та струму відповідно.

В результаті виконання при налаштуванні такої умови подана структура стає двохкратноінтегруючою зі зворотним зв'язком за е.р.с. двигуна і фільтром, постійна часу якої $T_{\text{я}}$. В такому випадку сигнал зворотного зв'язку за напругою буде пропорційний виключно проти е.р.с., а, отже, і швидкості обертання двигуна.

Можливі різні варіанти реалізації системи керування з П-регулятором і зворотним зв'язком за напругою [44] – [47]. Один з найпоширеніших варіантів представлений зі зворотним зв'язком за е.р.с. двигуна. Для його реалізації в канал зворотного зв'язку за напругою включають фільтр з постійною часу ділянки кола якоря, з якого знімається сигнал зворотного зв'язку. Сигнал якірного кола повністю компенсує струмову складову зворотного зв'язку за напругою. В такому випадку в статичному режимі є зворотний зв'язок за е.р.с., а в динамічному режимі – зворотний зв'язок за е.р.с. з запізненням, спричиненим фільтром.

Перевагами систем зі зворотним зв'язком за е.р.с. у порівнянні з іншими варіантами реалізації зворотного зв'язку за напругою є принципова можливість налаштування системи регулювання з коефіцієнтом підсилення більшим, ніж розраховане по модульному оптимумі. Хоча в цьому випадку зростає

коливальність системи, статичні просадки обертів при збільшенні навантаження зменшуються.

Статична просадка обертів електропривода при збільшенні навантаження двигуна в цій структурі буде меншою, ніж у системі зі зворотним зв'язком за напругою без компенсації струмової складової (формула (1.2)):

$$\Delta n = I_{cm} \frac{R_{\gamma} B}{c_e \Phi T_{\gamma}}, \quad (1.3)$$

де B – стала часу інтегруючого контуру е.р.с., за умови $B/T_{\gamma} \ll 1$.

В сучасних умовах в цукровому виробництві нашої країни найбільш широке застосування знайшли системи автоматичного керування швидкістю електропривода ПДА, виконані на основі тиристорних перетворювачів серій ТЕ та ТП виробництва ВАТ «Электровыпрямитель» (м. Саранськ, Росія) [95].

Вказані пристрої, в цілому, дозволяють реалізувати описані вище системи автоматичного регулювання зі зворотним зв'язком за проти е.р.с. двигунів з обмеженням струму, а також захистом від перевантажень та коротких замикань в системі приводу, та задовольняють щодо вимог надійності роботи, точності регулювання та невисокої вартості.

Сигнали зворотних зв'язків у пристрої формуються аналоговими сенсорами напруги та струму, точність та швидкодія яких є достатньою для виконання поставлених задач у налаштуванні більшості систем автоматичного регулювання. Тому заміна їх не є обов'язковою, але бажаною для покращення точності та зручності керування технологічним процесом.

При розрахунку, проектуванні та налаштуванні дводвигунних приводів динамічні параметри кожного двигуна приймаються однаковими. Однак на практиці ці параметри різні внаслідок описаних вище обставин. Так як в системах автоматичного регулювання зі зворотним зв'язком за проти е.р.с. здійснюється стабілізація загальної напруги двох двигунів з струмовою компенсацією зі спільним струмом, то це може призвести, за умови нерівномірного перерозподілу навантажень між двигунами, до виникнення коливальних процесів в системі дводвигунного приводу.

Дослідження динамічних властивостей системи в таких режимах є надзвичайно важливою задачею з огляду на її значний вплив на надійність роботи. Оскільки механічний взаємозв'язок між двигунами двох- або багатодвигунових електроприводів у багатьох випадках не можна вважати абсолютно жорстким, то значний вплив на протікання перехідних процесів в дводвигунних системах чинить наявний пружний характер взаємозв'язку. Швидкості обертання окремих двигунів взаємозв'язаного електроприводу можуть різнитись, а, отже, в такому разі має місце пружна деформація елементів кінематичної схеми, за рахунок чого в них може накопичуватись потенційна енергія [48], [49]. Це явище має надзвичайно великий вплив на динамічні властивості усієї системи автоматичного керування та може призводити за деяких умов та співвідношень параметрів, навіть, до втрати стійкості.

Дослідження динамічних режимів роботи взаємозв'язаних приводів з пружним характером зв'язку вимагає адекватного математичного опису, оскільки основного рівняння механіки для обертального руху:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (1.4)$$

де J – сукупний момент інерції, приведений до швидкості обертання двигуна, ω – кутова швидкість, M та M_c – механічний момент на валу двигуна та момент опору механізму, в таких системах явно недостатньо.

Дослідженню динаміки електроприводів з пружними зв'язками у різних галузях присвячено багато праць [48] – [78]. Механічна система представляється у вигляді двомасової [48], [51] – [53], [59] – [64], [66], тримасової [68] – [70] або ж багатомасової [57], [58], [65].

Найпростішим випадком системи з пружним зв'язком є лінійна двомасова система, приклад якої подано на рис. 1.8 [48].

Це досить поширений випадок, коли ротор двигуна, що живиться від тиристорного перетворювача, та виконавчий орган, з'єднаний з ним пружно-в'язким зв'язком, утворюють двомасову електромеханічну систему. Під

першою масою розуміється момент інерції двигуна та редуктора J_1 з швидкістю обертання ω_1 , під другою – приведений до швидкості обертання двигуна момент інерції виконавчого органа J_2' , а ω_2' – приведена до швидкості двигуна його швидкість. Вважається, що коефіцієнт пружності c та коефіцієнт внутрішнього демпфування коливань b зосереджені в довгому валу, що з'єднує редуктор з виконавчим органом.

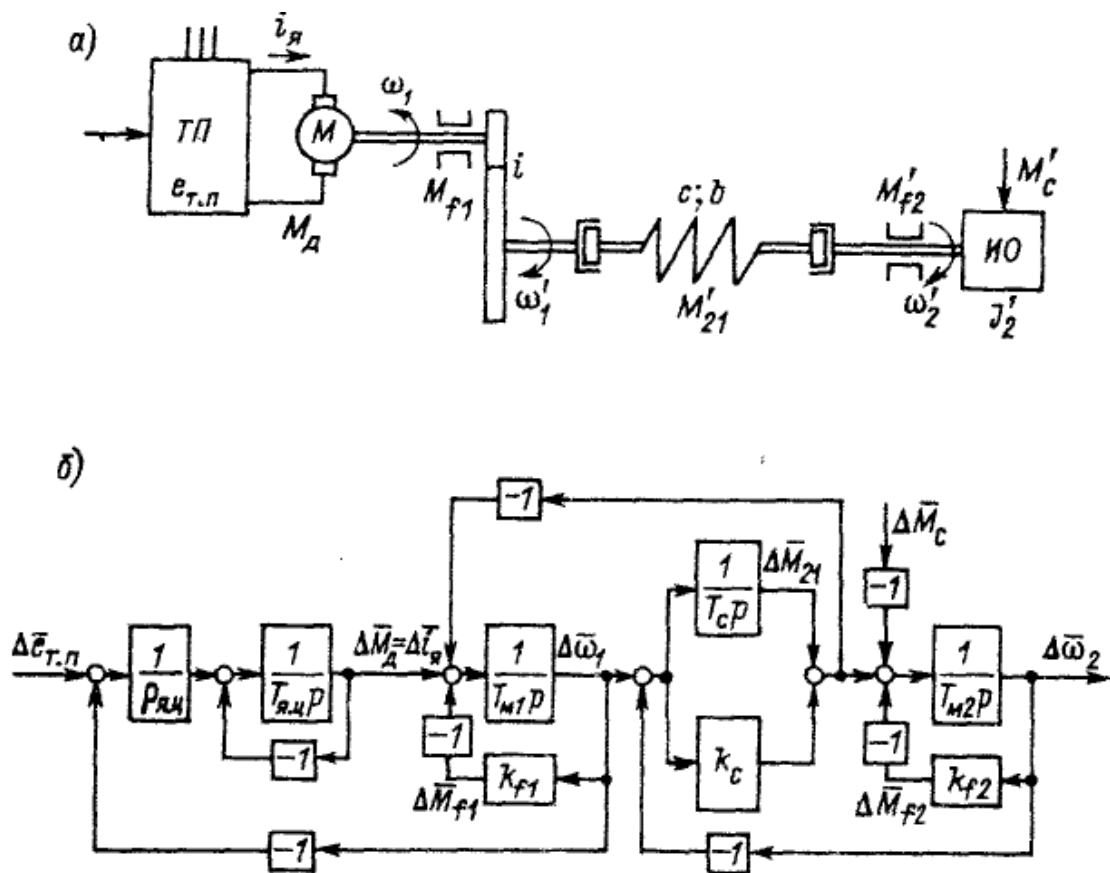


Рисунок 1.8 – Двомасова електромеханічна система з пружним зв'язком першого роду а) функціональна схема, б) лінеаризована нормована структурна схема.

Механічні процеси в такій системі описуються системою диференціальних рівнянь, поданої у багатьох працях, зокрема [52], [53], [64].

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_D - \Delta M_{12} - b(\omega_1 - \omega_2'); \\ J_2 \frac{d\omega_2'}{dt} = \Delta M_{12} - M_C - b(\omega_2' - \omega_1); \\ \Delta M_{12} = c(\theta_1 - \theta_2'); \\ \omega_1 = \frac{d\theta_1}{dt}; \omega_2' = \frac{d\theta_2'}{dt}, \end{cases} \quad (1.5)$$

де θ_1, θ_2' – кути повороту двигуна та виконавчого органу відповідно, ΔM_{12} – момент деформації кручення валу.

Математичний опис такої системи за умов незначної деформації відносно простих геометричних форм можна вважати лінійним [48], [54] і він поданий разом з математичним описом електромагнітних процесів у двигуні постійного струму на рис. 1.8 у вигляді прийнятої в теорії автоматичного керування структурної схеми. Такий математичний апарат дозволяє проводити дослідження динамічних режимів роботи системи приводу.

Однак для ряду механізмів лінійної системи рівнянь недостатньо для адекватного математичного моделювання електромеханічних процесів. Прикладом такої системи є приведений у [48] дводвигунний привод, в якому пружним елементом є транспортований або оброблюваний матеріал (рис. 1.9)

Дана система описується нелінійними рівняннями, а, отже, вплив пружних явищ на динаміку системи буде складнішим, ніж у попередньому випадку.

Важливим моментом у дослідженнях динамічних режимів роботи взаємозв'язаних приводів та синтезі їх систем автоматичного керування є врахування наявності зазорів в кінематичних передачах, яким присвячені роботи [55], [56], [68], [70]. Зокрема це стосується приводів з багатоступінчастими редукторними передачами, яким є електропривод ПДА.

Також механічні системи можуть містити нелінійні ланки, що характеризують нелінійний характер пружно-дисипативного зв'язку. Наприклад, у роботі [41] наведено можливі графічні залежності моменту тертя

від швидкості обертання (рис.1.10) в певних приводах постійного струму, які мають пружні зв'язки.

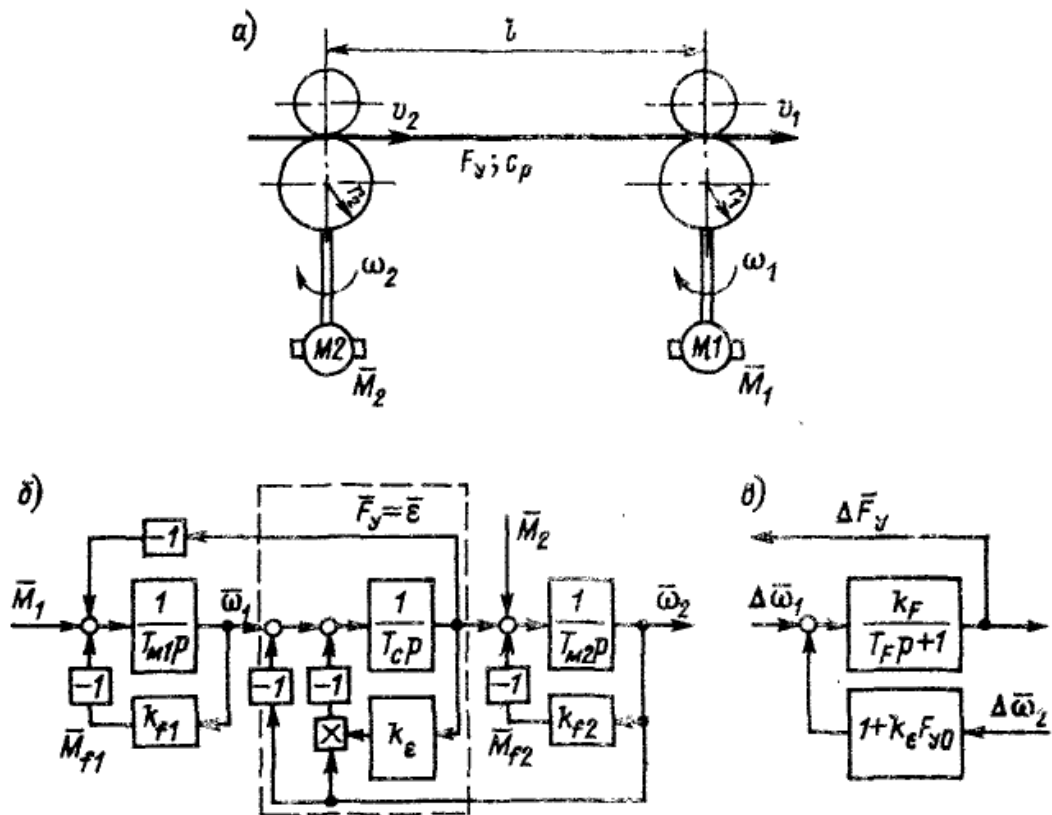


Рисунок 1.9 – Пружні ланки другого роду: а – кінематична схема, б – структурна схема, в – лінеаризована структурна схема.

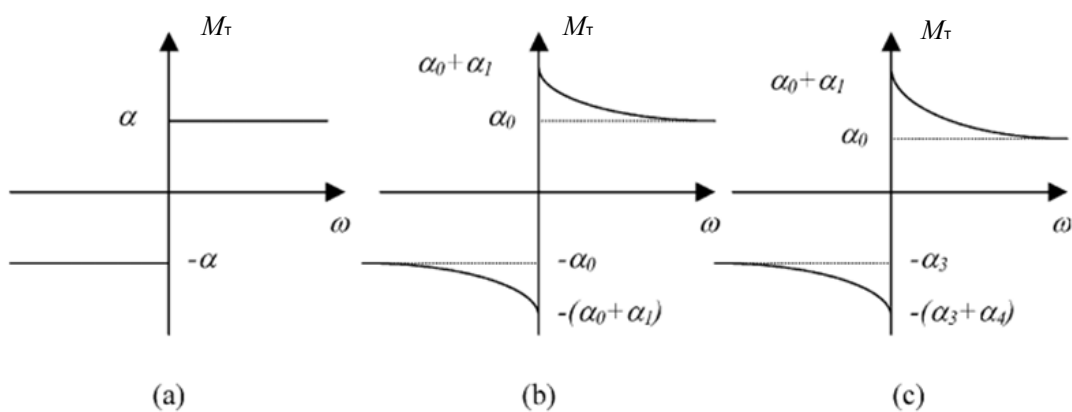


Рисунок 1.10 – Нелінійні моделі моменту тертя

У роботах [59] – [62] представлення нелінійного характеру пружних зв'язків пропонується аналітично для двомасової системи прямолінійного руху (рис 1.11).

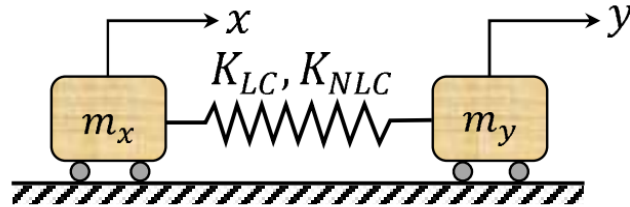


Рисунок 1.11 – Двомасова система прямолінійного руху

Дві маси m_x та m_y зв'язані нелінійним пружним зв'язком. Рух системи за умови відсутності демпфування описує нелінійна система диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + k_{LC} (x - y) + k_{LCN} (x - y)^3 = 0 \\ m_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + k_{LC} (y - x) + k_{LCN} (y - x)^3 = 0 \end{cases} \quad (1.6)$$

де k_{LC} – лінійна, а k_{LCN} – нелінійна складова коефіцієнту жорсткості пружного зв'язку. Таким чином, момент пружної деформації складається з двох складових, одна з яких пропорційна деформації, а друга – її кубу.

Отримані у [60] – [62] результати аналітичного розв'язання подібних систем рівнянь дають змогу зрозуміти загальний характер розвитку коливальних режимів дуже спрощених систем (відсутність тертя, прикладених сил, зворотних зв'язків тощо). Зокрема, отримано залежність частоти коливань від співвідношення мас. Однак дослідження динаміки реальних систем електроприводу конкретних механізмів з пружними зв'язками вимагають побудови більш досконалих математичних моделей, які б враховували особливості їх роботи (зокрема й ПДА). Для розв'язання таких досить складних моделей у більшості випадків доцільно використовувати чисельні методи та засоби імітаційного моделювання [36], [109] – [112], [116] – [120].

При побудові моделей таких механічних систем цікавим є метод динамічних аналогій, висвітлений ще у [101], [92] та використаний у [93] – [106] для вимірювального контролю моменту інерції. На підставі формальної аналогії механічних процесів у довгому валу з лінією електропередач у [57] отримано та досліджено математичну модель з розподіленими параметрами системи приводу з пружними зв'язками.

Дослідженню динамічних режимів в приводах різних механізмів з пружними зв'язками та розробці систем керування ними, які б демпфували електромеханічні коливання, присвячено велику кількість праць [51] – [53], [55] – [56], [59] – [78]. Демпфування коливань в однодвигунній системі приводу з лінійними та нелінійними пружньо-дисипативними зв'язками між двигуном та виконавчим органом у [51] – [53], [59], [64] – [67], [70] – [71] здійснюється системою автоматичного керування за рахунок налаштування різного роду зворотних зв'язків.

У роботі [68] досліджено динаміку приводу повороту кар'єрних екскаваторів та показано неможливість демпфування коливань системою автоматичного керування у нелінійній тримасовій системі групового дводвигунного приводу постійного струму. Рішенням проблеми виникнення коливальних режимів може бути запровадження індивідуального приводу, у якому можна керувати кожним двигуном окремо.

Відомі [41], [42] способи керування дводвигунними приводами з пружними зв'язками та зазорами в кінематичних передачах за принципом торсіона і підпорядкованого регулювання координат, засновані на роздільному формуванні дій на кожний двигун в залежності від різниці заданого і дійсного значення загальної швидкості обертання двигунів. В таких системах застосовуються кореговані дії на окремі двигуни по сумі їх швидкостей таким чином, що в певному діапазоні швидкостей і моментів навантаження електродвигуни розвивають моменти різних знаків (напрямку), виключаючи тим самим вплив зазорів на динаміку системи, а за межами цього діапазону

працюють спільно, розвиваючи однакові за величиною і напрямком моменти та забезпечуючи максимальну перевантажувальну здатність.

Однак при виході значень швидкості та моменту за межі встановлених системі значень виникає закриття зазорів передач, виникають коливальні процеси, що разом з пружним зв'язком призводять до значних погіршень показників якості і надійності роботи САК.

В роботах [55], [56] задача керування дводвигунними системами вирішуються за рахунок окремих каналів регулювання обох двигунів. В цьому випадку ми маємо справу не з груповим приводом, де тиристорний перетворювач є спільним для обох двигунів, а індивідуальним. Такий підхід у приводі постійного струму здебільшого є недоцільним з економічної точки зору.

В дводвигунних приводах частотно-регульованого асинхронного приводу такі системи можуть бути виправданими, якщо системи індивідуального приводу дозволять отримати кращі динамічні властивості за груповий. Синтезу та дослідженню динамічних режимів систем автоматичного керування взаємозв'язаних приводів змінного струму певних типів технологічних механізмів присвячено [76] – [78].

Дослідження способів реалізації електроприводу змінного струму дводвигунних приводах з пружними зв'язками з обов'язковим врахуванням не лише показників точності та якості САК в динамічних режимах роботи, а й техніко-економічних показників. Доцільність застосування частотно-регульованого електроприводу при побудові нової системи приводу ПДА або заміні існуючої системи постійного струму є надзвичайно актуальна задача, яка ще потребує вирішення.

1.4 Аналіз існуючих систем керування електроприводом ПДА як електромеханічним технологічним комплексом.

Система керування швидкістю обертання приводу ПДА є частиною складної системи автоматизованого керування технологічними процесами усього дифузійного відділення. Система автоматизації дифузійного відділення окрім засобів регулювання обертів привода включає в себе сенсори рівня, щільності, температури, струмового навантаження, прилади для визначення концентрації іонів водню (рН-метри), рефрактометр, витратоміри, запірну і регулюючу арматуру, перетворювачі сигналів, контролер і модулі розширення та засоби візуалізації усіх контрольованих параметрів [82].

Система автоматизованого керування технологічним процесом дифузійного відділення повинна забезпечувати:

- стабілізацію витрати бурякової стружки при автоматичному управлінні бурякорізками і контролі рівнів в бункері бурякорізок;
- оптимізацію процесів вимивання (екстракції) водою соку з рослинних клітин бурякової стружки;
- оптимальне керування гідродинамічним і температурним режимом дифузійної установки;
- підготовку живильної води;
- номінальну продуктивність дифузійного відділення з певним вмістом цукру в дифузійному соку [22] – [28].

Розподіл всіх режимних параметрів ПДА, як об'єкта регулювання, на параметри збурення, регульовані та регулюючі параметри здійснено у роботах [79], [80] (рис. 1.12).

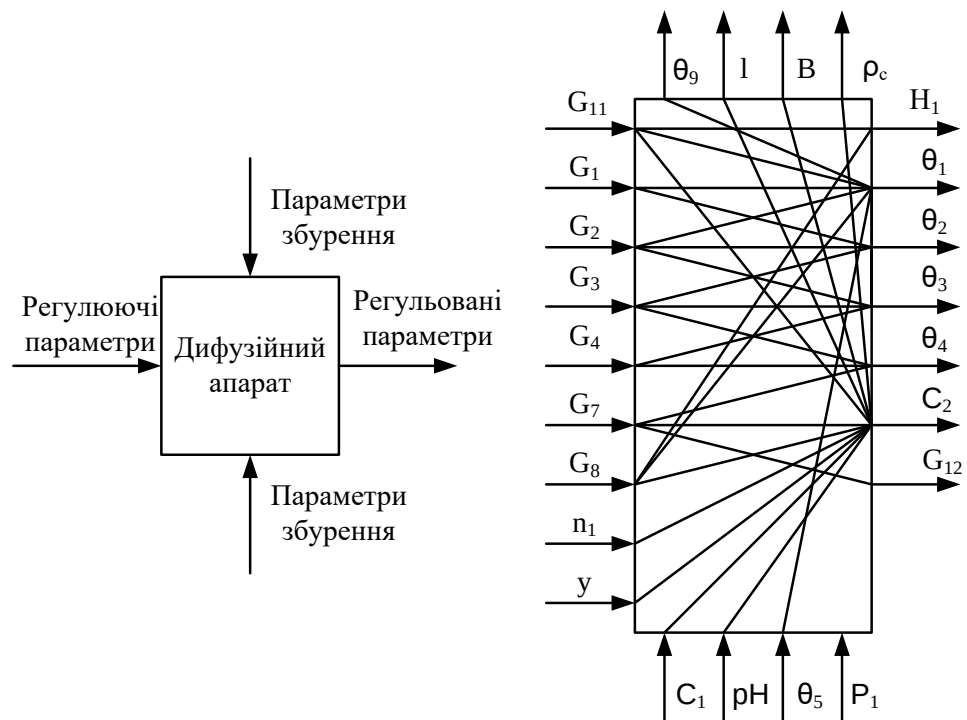


Рисунок 1.12 – Параметрична схема ПДА

На схемі (рис.1.10): H_1 – рівень сокостружкової суміші; $\theta_1 - \theta_4$ – температура суміші по зонах; θ_5 – температура води; θ_9 – температура стружки; C_1 – цукристість буряку; C_1 – втрати цукру в жомі; G_{12} – витрати барометричної і жомопресової води; l – довжина бурякової стружки; B – якість стружки; y – співвідношення між стружкою і водою; ρ_c – кількість сухих речовин у дифузійному соку; p_1 – тиск пари в паровому колекторі; $G_1 - G_4$ – витрати пари в парові камери; G_7 – витрати барометричної води; G_8 – витрати стружки; G_{11} – витрати дифузійного соку; n_1 – частота обертання шнеків ПДА.

Завданням системи керування приводом ПДА, як частини системи автоматизації технологічного процесу дифузійного відділення, є надійне забезпечення стабільного рівня заданої оператором швидкості обертання шнековалів.

Традиційною системою керування швидкістю обертання ПДА є дводвигунний привод постійного струму з послідовним ввімкненням електродвигунів на основі тиристорного керованого випрямляча зі зворотним зв'язком за проти е.р.с. та підлеглим струмовим контуром [96].

З метою недопущення режимів несинхронного обертання двигунів привода, що призводить до деформації шнековалів та може бути причиною незворотних пошкоджень елементів механічної частини ПДА, система додатково оснащується диференційним захистом, який реагує на різницю напруг на двигунах. При виникненні режимів з різною швидкістю обертання двигунів приводу, напруги на них теж будуть відрізнятись, оскільки їх роторні обмотки з'єднанні послідовно. При збільшенні різниці напруг на двигунах до встановленої вставки ПДА має зупинитись. Пристрої диференційного захисту, що використовуються в сучасних умовах промислового виробництва, не завжди відповідають вимогам надійності та часто за своїми схемотехнічними рішеннями є морально застарілими [138]. Тому розробка нових пристроїв захисту ПДА є актуальною науково-інженерною задачею.

Контроль і оцінка експлуатаційних характеристик приводу, виходячи з яких оператор здійснює керування приводам, як електромеханічним технологічним комплексом, відбувається, здебільшого, за допомогою приладів магніто-електричної системи, які вимірюють напругу та струм двигунів [96]. В керованих випрямлячах випрямлена напруга та струм навантаження приводу є несинусоїдними величинами, гармонічний склад яких залежить від багатьох факторів: напруги живлення ТП, кута регулювання відкриття тиристорів, статичного моменту опору двигунів тощо. Вимірювання середнього значення несинусоїдних величин приладом магніто-електричної системи супроводжуються значними похибками, які залежать від форми вимірювального сигналу. Дослідження точності вимірювання величин несинусоїдної форми проводилось у [1] – [5].

В умовах, коли ПДА експлуатується на межі номінальних показників основних елементів приводу, точність вимірювання та контролю таких важливих параметрів, як напруга та струм, набуває надзвичайної актуальності. Тому при побудові нових чи модернізації систем керування електроприводом ПДА постає завдання передбачити оснащення такої системи більш точними

засобами вимірювання електричних параметрів, які характеризують швидкість обертання електроприводу (напруга) та завантаження ПДА (струм).

Ще одним значним недоліком традиційної системи приводу є відсутність у ній засобів вимірювання, контролю та оцінки явищ пружної деформації у кінематичній схемі електроприводу, що є надзвичайно важливим при експлуатації ПДА зі збільшенням його пропускної здатності. Розробка вимірювальної системи механічних параметрів приводу, таких як швидкості обертання двигунів та відносного кута закручування шнековалів, з достатньою точністю та високою швидкодією є актуальною задачею, не розв'язаною в науковій літературі. Її розв'язання може дати змогу здійснення більш точного регулювання ПДА в номінальних режимах та попередити виникнення коливальних режимів, пов'язаних з наявністю пружного зв'язка між двигунами приводу та обміну енергією між ними.

Крім того, вимірювання швидкостей обертання двигунів ПДА є обов'язковою умовою при побудові систем асинхронного частотно-регульованого дводвигунного приводу з індивідуальними перетворювачами частоти. Останнім часом досить часто зустрічаються намагання запровадити асинхронний привод з частотним регулюванням, що ґрунтується на відомих перевагах даного типу приводу та застарілості основного обладнання існуючих систем приводу постійного струму [84]. На практиці ці намагання зустрічаються зі значними труднощами, пов'язаних із необхідністю забезпечення синхронного обертання двох двигунів при виникненні режиму їх нерівномірного завантаження внаслідок технологічних особливостей роботи ПДА.

Розробці індивідуального частотно-регульованого асинхронного приводу ПДА присвячено роботи [84] – [88]. Автори цих робіт розробили систему автоматизованого електропривода похилого дифузійного апарата ПДС-20 та здійснили аналіз її динамічних властивостей в пускових та гальмівних режимах роботи. Однак при дослідженні таких режимів в даних роботах не враховувались пружні властивості кінематичного зв'язку між двигунами

приводу, що має значний вплив на динаміку усієї системи. Тому застосовані підходи та отриманні результати не можуть задовольнити усіх існуючих вимог при розробці та синтезу систем автоматизованих дводвигунних електроприводів, особливо це стосується режимів інтенсивного використання ПДА та технологічно можливої нерівномірності завантаження вздовж шнековалів. За таких умов врахування пружних зв'язків є обов'язковим.

До позитивних моментів при синтезі системи автоматизованого керування ПДА у [84] – [88] можна віднести запровадження частотно-регульованого приводу допоміжного механізму черпального колеса, що здійснює розвантаження ви солодженого жому у верхній частині дифузійного апарата. Таким чином у системи керування технологічним електромеханічним комплексом за умови використання адекватних законів регулювання швидкістю обертання черпального колеса з'являється можливість розвантаження більш завантаженої верхньої частини ПДА. Розробка таких законів регулювання та експериментальні дослідження їх ефективності в промислових умовах є важливою задачею.

Дослідження режимів, в яких пружні властивості кінематичного зв'язку мають значний вплив на динаміку системи приводу, ускладнюється відсутністю адекватного математичного опису механічної частини приводу, яка б враховувала основні експлуатаційні характеристики роботи ПДА. Це призводить до помилок на стадії проектування, які виливаються в ненадійну роботу приводу або надмірні витрати коштів на основні елементи приводу.

У зв'язку з цим значної актуальності набуває математичне моделювання, як традиційної системи електропривода постійного струму, так і частотно-регульованого приводу ПДА, що дасть змогу адекватно синтезувати та проектувати системи автоматичного керування цим приводом, а також дослідження динамічних властивостей таких систем.

Окремою задачею є порівняння системи тиристорного приводу постійного струму ПДА з системами асинхронного частотно-регульованого, розв'язання якої має обов'язково містити дослідження динамічних властивостей

синтезованих систем з врахуванням основних експлуатаційних особливостей роботи ПДА та актуальних техніко-економічних показників.

1.5. Висновки

В даному розділі дано огляд технологічних особливостей роботи ПДА, як ланки безперервного цукрового виробництва, розглянуто основні характеристики роботи системи дводвигунного електроприводу постійного струму та засоби вирівнювання навантажень між двигунами привода.

Проведено аналіз існуючих систем автоматичного керування дводвигунними приводами постійного струму, показано важливість врахування наявного пружного зв'язку в кінематичній схемі, нелінійним характером якого не можна нехтувати, на динамічні властивості системи електричного привода, розглянуто існуючі математичні моделі електричного привода 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 апарата у виробництві, пов'язані з неврахуванням наявних у них пружно-дисипативних зв'язків при дослідженнях їх динамічних режимів та визначено шляхи вдосконалення існуючих систем шляхом оснащення їх засобами вимірювання основних, як електричних, так і, особливо, механічних, параметрів роботи електропривода.

Результати, отримані у розділі 1, висвітлено у [1] – [5].

Поставлена мета 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, що реалізуються при виконанні наступних задач:

Зробити огляд відомих систем керування приводом ПДА та методів дослідження їх динамічних властивостей.

Розробити математичні моделі системи дводвигунного автоматизованого електропривода постійного струму ПДА з пружним зв'язком між двигунами.

Дослідити динамічні режими системи приводу ПДА та встановити вплив основних параметрів системи та режиму на зону її стійкості.

Здійснити порівняльний аналіз динамічних та техніко-економічних показників системи приводу постійного струму та частотно-регульованого асинхронного приводу.

Розробити структурні схеми, математичні моделі та алгоритми роботи системи автоматизованого керування приводом ПДА, а також засобів вимірювання та контролю основних показників його роботи.

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.

РОЗДІЛ 2

ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДВОДВИГУННОЇ СИСТЕМИ ПРИВОДА ПОХИЛОГО ДИFUЗІЙНОГО АПАРАТА

При дослідженнях динамічних режимів роботи електричного привода ПДА необхідно враховувати ряд його особливостей, що висвітлені у розділі 1. Це пояснюється тим, що наявність пружного механічного зв'язка між двигунами має значний вплив на динамічні властивості системи за умов інтенсивного використання основного обладнання дифузійного відділення, що спостерігається останнім часом на вітчизняних підприємствах цукрової галузі [29] – [30]. Ще однією важливою особливістю є нерівномірний розподіл навантаження вздовж шнековалів, який пояснюється тим, що у верхній частині дифузійного апарату сокостружкова суміш сухіша і має більшу в'язкість [25] – [27].

При дослідженні динаміки приводу ці особливості мають бути враховані при розробці математичних моделей приводу ПДА, зокрема її механічної частини. Дослідженням динамічних режимів роботи систем взаємозв'язаного приводу різних виробничих механізмів присвячено ряд праць [51] – [53], [55], [56], [59] – [78], що підтверджує актуальність таких досліджень щодо дводвигунного приводу ПДА.

2.1 Математичні моделі системи електроприводу дифузійного апарату похилого типу з нелінійними пружними зв'язками

Механічна частина ПДА, як видно із рис. 1.3 являє собою систему з двома ступенями вільності $n=2$, де узагальненими координатами виступають кути повороту φ_1 і φ_2 , які задаються положеннями роторів двох електричних двигунів. Відповідно, узагальненими швидкостями будуть їх похідні по часу – кутові швидкості $\omega_1 = \dot{\varphi}_1$ і $\omega_2 = \dot{\varphi}_2$, які за умовою експлуатації системи повинні

б бути однаковими. Ці швидкості через редуктори із передачею 1250:1 зазнають зменшення до значень $k\omega_1$ та $k\omega_2$, де $k=8\cdot 10^{-4}$, і передаються до торців шнека – довгого, а отже і дещо пружного, масивного тіла циліндричної форми з гвинтоподібною зовнішньою поверхнею.

Для розробки математичної і електричної моделей скористаємося теорією Лагранжа [100], теорією динамічних аналогій (методом електромеханічних аналогій) [101] – [103], а також роботами [104] – [106], в яких наведено основні підходи в розробці математичних та електричних моделей систем з обертальною формою руху.

Так, відповідно до теорії Лагранжа, рівняннями руху механічної частини дифузійного апарата як системи з двома ступенями вільності $n=2$ будуть рівняння Лагранжа II роду:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \omega_s} \right] = M_s - \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_s} - \frac{\partial \Phi}{\partial \omega_s}, \quad s=1, 2, \quad (2.1)$$

де Π є потенціальною енергією системи, Φ – її дисипативною функцією Релея, M_s – обертальними моментами нижнього та верхнього двигунів відповідно, які для власне механічної частини дифузійного апарата є зовнішніми узагальненими силами.

В рівняннях (2.1) враховано ту обставину, що кінетична енергія T даної системи залежить від узагальнених швидкостей ω_1 , ω_2 роторів обох двигунів і не залежить від їхніх узагальнених координат φ_1 і φ_2 , тобто

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi_s} = 0, \quad s=1, 2.$$

Це дозволяє безпосередньо скористатися першою системою динамічних аналогій (аналогій типу «сила-напруга») [101] – [103] і поставити у відповідність системі диференціальних рівнянь (2.1) як аналогію рівняння Лагранжа-Максвелла

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial W_m}{\partial i_s} \right] = e_s - \frac{\partial W_e}{\partial q_s} - \frac{\partial \Phi_e}{\partial i_s}, \quad s=1, 2, \quad (2.2)$$

де W_m – енергія магнітного поля *електричної моделі* досліджуваної системи, W_e – енергія її електричного поля, Φ_e – електрична дисипативна функція Релея, e_s – електрорушійні сили, $i_s = \dot{q}_s$ – контурні струми електричної моделі.

Електричну схему моделі (2.2) побудуємо на основі загальних схем з довільним числом ступенів вільності n , які на підставі аналогії між системами рівнянь (2.1) і (2.2) були представлені в роботах [104] - [106]. Однак, при цьому врахуємо деякі специфічні особливості системи дифузійного апарата, які дозволяють дещо модифікувати означені схеми для випадку $n = 2$.

а) Оскільки явище накопичення *потенціальної енергії* в пружному деформованому валові шнека в означених схемах враховано досить точно як якісно, так і кількісно, з метою уточнення задля побудови електричного аналога розглянемо більш докладно явище накопичення *кінетичної енергії* T_{12} шнеком під час його обертання з різними кутовими швидкостями $k\omega_1$ та $k\omega_2$ на торцях.

Цю частину кінетичної енергії системи можна визначити як інтеграл

$$T_{12} = \frac{1}{2} \int_0^{J_{12}} \omega^2 dJ, \quad (2.3)$$

де $\omega = \omega(x) = k\omega_2 + \frac{k\omega_1 - k\omega_2}{l}x$ – поточна кутова частота як функція від просторової координати x , спрямованої вздовж шнека довжиною l , яка на одному з його торців набуває значення $k\omega_1$, а на іншому – $k\omega_2$; dJ – момент інерції елементарної ділянки шнека, що має довжину dx .

На цьому етапі математичного аналізу внесемо в майбутню математичну модель деяке спрощення і будемо вважати швидкість зміни моменту інерції ділянки валу шнека за зміни координати x постійною величиною і такою, що дорівнює $\frac{dJ}{dx} = \frac{J_{12}}{l}$, де $J_{12} = J'_{12} + J''_{12}$ – повний момент інерції, який враховує як момент інерції власне тіла шнека J'_{12} , так і приведений момент інерції J''_{12} за рахунок прямолінійного руху маси стружки цукрового буряка, яка безпосередньо взаємодіє із гвинтовою поверхнею шнека.

Звісно, через неоднорідність густини маси останньої, коли ступінь зволоженості цієї стружки під час руху змінюється (і змінюється суттєво), залежність $J = J(x)$, звичайно ж, не буде лінійною. Однак, це є питанням окремого дослідження і дана нелінійність може бути врахована у спосіб корекції математичної та електричної моделей, які будуть отримано наразі, через внесення в ці моделі штучної асиметрії.

Отже, для кінетичної енергії шнека за його обертального руху на підставі (2.3) маємо:

$$T_{12} = \frac{J_{12}}{2l} \int_0^l \left(k\omega_2 + \frac{k\omega_1 - k\omega_2}{l} x \right)^2 dx$$

або після нескладних математичних перетворень –

$$T_{12} = \frac{1}{2} \frac{J_{12}}{2} (k\omega_1)^2 + \frac{1}{2} \frac{J_{12}}{2} (k\omega_2)^2 - \frac{1}{2} \frac{J_{12}}{6} (k\omega_1 - k\omega_2)^2. \quad (2.4)$$

б) Механічну дисипативну функцію Релея Φ_{12} для пружного валу шнека отримаємо подібним чином. Тому, опустивши детальні математичні викладки, запишемо тільки результат дослідження:

$$\Phi_{12} = \frac{1}{2} \frac{\beta_{12}}{2} (k\omega_1)^2 + \frac{1}{2} \frac{\beta_{12}}{2} (k\omega_2)^2 - \frac{1}{2} \frac{\beta_{12}}{6} (k\omega_1 - k\omega_2)^2, \quad (2.5)$$

де $\beta_{12} = \beta'_{12} + \beta''_{12}$ – коефіцієнт розсіювання енергії, що спостерігається за рахунок явища тертя як у випадку обертання власне тіла шнека, так і у випадку руху бурякової стружки вздовж зовнішньої циліндричної ємності під тиском гвинтової поверхні.

Відповідно до першої системи динамічних аналогій індуктивність електричної системи є аналогом моменту інерції обертових тіл механічної системи, резистивний опір – аналогом коефіцієнту розсіювання енергії через тертя, ємність – аналогом коефіцієнту жорсткості пружної деформації

Таким чином, на підставі першої системи динамічних аналогій, систем рівнянь (2.1) і (2.2) та вищезначених електричних схем (роботи [104] – [106]) з урахуванням співвідношень (2.4) та (2.5), а також наявності в системі двох

редукторних механізмів електричною моделлю механічної частини дифузійного апарата буде електрична схема, наведена на рис. 2.1.

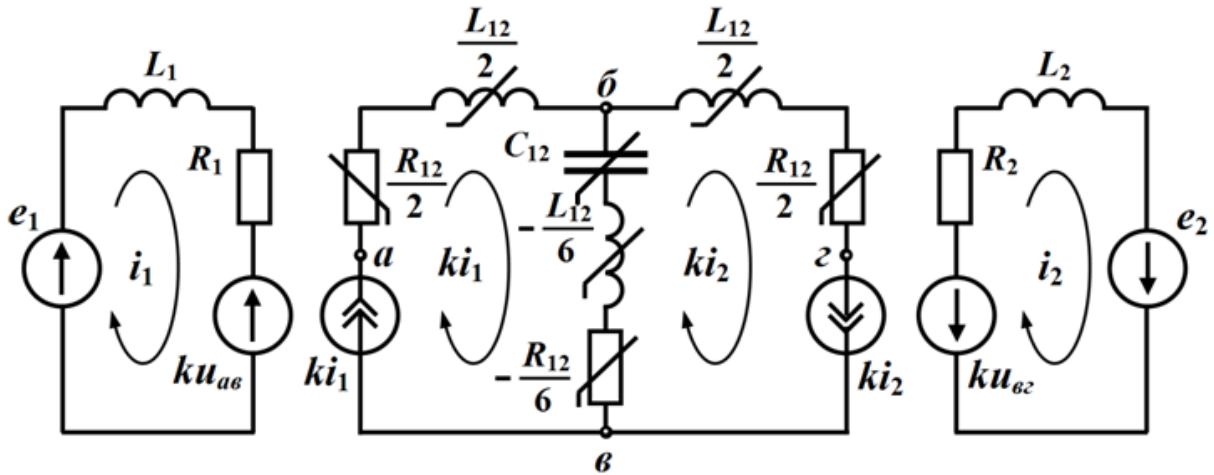


Рисунок 2.1 – Схема електричної моделі механічної частини дифузійного апарата

Для цієї схеми складемо за допомогою законів Кірхгофа систему рівнянь:

$$\begin{cases} R_1 i_1 + L_1 \frac{d i_1}{d t} = e_1 - k u_{a\delta}, & u_{a\delta} = \frac{R_{12}}{2} k i_1 + \frac{L_{12}}{2} \frac{d k i_1}{d t} + u_{\delta\delta}, \\ R_2 i_2 + L_2 \frac{d i_2}{d t} = e_2 - k u_{\delta\delta}, & u_{\delta\delta} = \frac{R_{12}}{2} k i_2 + \frac{L_{12}}{2} \frac{d k i_2}{d t} - u_{\delta\delta}, \\ u_{\delta\delta} = \frac{k q_1 - k q_2}{C_{12}} - \frac{L_{12}}{6} \frac{d}{d t} (k i_1 - k i_2) - \frac{R_{12}}{6} (k i_1 - k i_2). \end{cases} \quad (2.6)$$

яку після нескладних математичних перетворень приведемо до вигляду:

$$\begin{cases} L_1^* \frac{d i_1}{d t} + R_1^* i_1 + \frac{q_1}{C_{12}} - L_{12}^* \frac{d i_2}{d t} - R_{12}^* i_2 - \frac{q_2}{C_{12}} = e_1^*, \\ L_2^* \frac{d i_2}{d t} + R_2^* i_2 + \frac{q_2}{C_{12}} - L_{12}^* \frac{d i_1}{d t} - R_{12}^* i_1 - \frac{q_1}{C_{12}} = e_2^*, \end{cases} \quad (2.7)$$

де $L_1^* = \frac{1}{k^2} L_1 + \frac{1}{3} L_{12}$, $L_2^* = \frac{1}{k^2} L_2 + \frac{1}{3} L_{12}$, $L_{12}^* = -\frac{1}{6} L_{12}$ – еквівалентні

індуктивності;

$R_1^* = \frac{1}{k^2} R_1 + \frac{1}{3} R_{12}$, $R_2^* = \frac{1}{k^2} R_2 + \frac{1}{3} R_{12}$, $R_{12}^* = -\frac{1}{6} R_{12}$ – еквівалентні активні опори;

$e_1^* = \frac{1}{k^2} e_1$, $e_2^* = \frac{1}{k^2} e_2$ – еквівалентні джерела е.р.с.

Електричну схему, стан якої описується системою диференціальних рівнянь (2.7), показано на рис. 2.3.

Отже, електричною моделлю механічної частини дифузійного апарата, яка враховує і нелінійні явища, буде система диференціальних рівнянь (2.2) в сукупності із електричною схемою, показаною на рис. 2.2, окремі параметри якої залежатимуть, як це видно з рисунка, від узагальнених електричних швидкостей (контурних струмів) $i_1 = \dot{q}_1$ і $i_2 = \dot{q}_2$, а вираженням цієї електричної моделі з лінеаризацією індуктивних та резистивних елементів (тобто моменту інерції та коефіцієнту розсіювання енергії через тертя) – система рівнянь (2.7) з електричною схемою, наведеною на рис. 2.2.

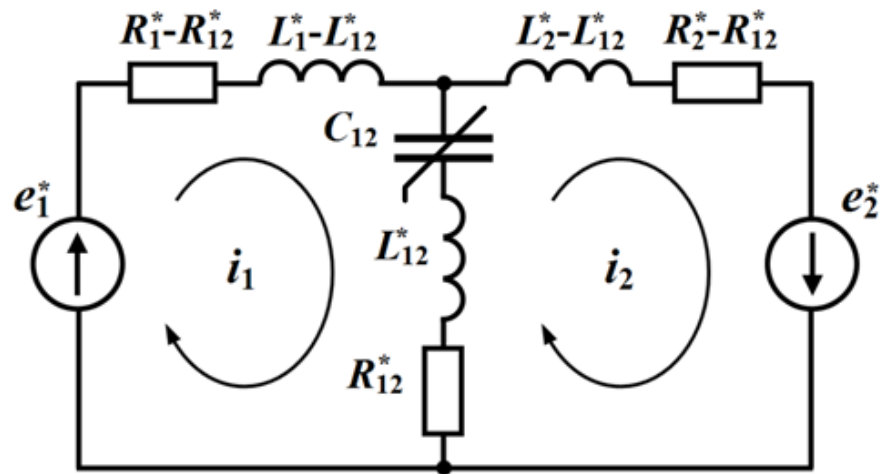


Рисунок 2.2 – Схема електричної моделі з лінеаризованими індуктивними та ємнісними елементами.

Загальною математичною моделлю механічної частини дифузійного апарата, як було встановлено вище, є система рівнянь Лагранжа II роду (2.1)

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \omega_s} \right] = M_s - \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_s} - \frac{\partial \Phi}{\partial \omega_s}, \quad s=1, 2.$$

Лінеаризовану математичну модель отримаємо на підставі теорії динамічних аналогій, скориставшись її першою системою аналогій –

аналогіями типу «сила-напруга» [101] – [103] і диференціальними рівняннями (2.7), звідки

$$\begin{cases} J_1^* \frac{d\omega_1}{dt} + \beta_1^* \omega_1 + \zeta_{12} \varphi_1 - J_{12}^* \frac{d\omega_2}{dt} - \beta_{12}^* \omega_2 - \zeta_{12} \varphi_2 = M_1^*, \\ J_2^* \frac{d\omega_2}{dt} + \beta_2^* \omega_2 + \zeta_{12} \varphi_2 - J_{12}^* \frac{d\omega_1}{dt} - \beta_{12}^* \omega_1 - \zeta_{12} \varphi_1 = M_2^*, \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\text{де } \begin{cases} J_1^* = \frac{1}{k^2} J_1 + \frac{1}{3} J_{12}, \quad J_2^* = \frac{1}{k^2} J_2 + \frac{1}{3} J_{12}, \quad J_{12}^* = -\frac{1}{6} J_{12} \\ \beta_1^* = \frac{1}{k^2} \beta_1 + \frac{1}{3} \beta_{12}, \quad \beta_2^* = \frac{1}{k^2} \beta_2 + \frac{1}{3} \beta_{12}, \quad \beta_{12}^* = -\frac{1}{6} \beta_{12} \\ M_1^* = \frac{1}{k^2} M_1, \quad M_2^* = \frac{1}{k^2} M_2 \end{cases} \quad (2.9)$$

еквівалентні моменти інерції, еквівалентні коефіцієнти розсіювання та еквівалентні узагальнені сили 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.

Таким чином на підставі теорії динамічних аналогій отримано математичну модель механічної частини електроприводу похилого дифузійного апарата, якою є система рівнянь (2.8) з умовами (2.9), яка може бути використана для дослідження динамічних режимів роботи.

Аналіз динамічних властивостей приводу похилого дифузійного апарату 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.

За аналогією до математичних моделей двомасової системи, викладених у [60] – [62] та поданих у вигляді системи (1.6), момент пружної деформації шнековалів:

$$\Delta M = \varsigma_{12L} \cdot \Delta \theta + \varsigma_{12NL} \Delta \theta^3,$$

де ς_{12L} , ς_{12NL} – коефіцієнти, що характеризують лінійну та нелінійну деформацію, $\Delta \theta$ – миттєве значення відносного кута повороту валів верхнього та нижнього двигуна.

Або після нескладних перетворень:

$$\Delta M = \varsigma_{12L} \cdot \Delta \theta + \varsigma_{12NL} \Delta \theta^3 = (\varsigma_{12L} + \varsigma_{12NL} \Delta \theta^2) \Delta \theta = \varsigma_{12} \Delta \theta,$$

де

$$\varsigma_{12} = \varsigma_{12L} + \varsigma_{12NL} \Delta \theta^2 \quad (2.10)$$

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

Рівняння (2.8) з умовами (2.9) являють собою математичну модель механічної частини електричного приводу ПДА при рівномірному розподілу механічного навантаження вздовж усієї довжини шнековалів. В реальних умовах, в ході експлуатації, навантаження вздовж шнековалів розподіляється нерівномірно. Це відбувається внаслідок того, що в похилому корпусі дифузійного апарату густина сокостружкової суміші зростає знизу доверху. Тобто, приведений 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.

Тому, з метою врахування в подальших дослідженнях такої нерівномірності введемо в умови (2.9) додаткові відносні коефіцієнти α та γ , що визначає, яка частина моменту інерції шнековалів разом з сокостружковою сумішшю J_{12} та яка частина коефіцієнту опору β_{12} припадають на нижній двигун. Очевидно, що

на верхній двигун припадатиме $(1-\alpha)$ та $(1-\gamma)$ відповідних величин. Таким чином, враховуючи це та співвідношення (2.10), умови (2.9) з приведенням параметрів до швидкості обертання двигунів перепишемо:

$$\begin{cases} J_1^* = J_1 + \alpha \frac{2}{3} J_{12} \cdot k^2, & J_2^* = J_2 + (1-\alpha) \frac{2}{3} J_{12} \cdot k^2, & J_{12}^* = -\frac{1}{6} J_{12} \cdot k^2 \\ \beta_1^* = \beta_1 + \gamma \frac{2}{3} \beta_{12} \cdot k^2, & \beta_2^* = \beta_2 + (1-\gamma) \frac{2}{3} \beta_{12} \cdot k^2, & \beta_{12}^* = -\frac{1}{6} \beta_{12} \cdot k^2. \\ \zeta_{12} = \zeta_{12} = \zeta_{12L} \cdot + \zeta_{12NL} \Delta\theta^2 \end{cases} \quad (2.11)$$

За умови рівномірного розподілу навантаження вздовж шнеку, на нижній та верхній двигуни припадатимуть однакові моменти інерції та коефіцієнти розсіювання енергії, тобто $\alpha=0,5$, $\gamma=0,5$, а умови (2.11) перетворюються на (2.9).

Для побудови математичних моделей системи автоматичного керування приводу дифузійного апарату в цілому перепишемо систему (2.8), попередньо продиференціювавши її, в прийнятій в теорії автоматичного керування операторній формі запису та приведемо параметри системи до швидкості обертання двигунів:

$$\begin{cases} (J_1^* p^2 + \beta_1^* p + \zeta_{12}) \omega_1(p) - (J_{12}^* p^2 + \beta_{12}^* p + \zeta_{12}) \omega_2(p) = p \cdot M_1(p), \\ (J_2^* p^2 + \beta_2^* p + \zeta_{12}) \omega_2(p) - (J_{12}^* p^2 + \beta_{12}^* p + \zeta_{12}) \omega_1(p) = p \cdot M_2(p). \end{cases} \quad (2.12)$$

де моменти $M_1(p)$, $M_2(p)$ є операторними зображеннями реальних моментів, що розвивають двигуни постійного струму, а $\omega_1(p)$, $\omega_2(p)$ – операторними зображеннями кутових швидкостей нижнього й верхнього двигунів відповідно.

На основі рівнянь (2.12) можна скласти таку структурну схему механічної частини приводу ПДА:

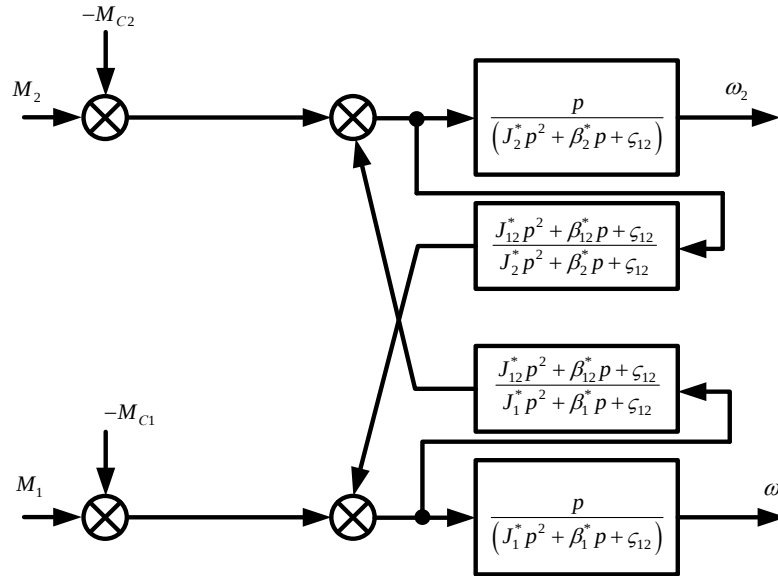


Рисунок 2.3 – Структурна схема механічної частини приводу ПДА

Для математичного опису електромеханічних процесів, що протікають в двигунах постійного струму скористаємось відомою [32] системою рівнянь:

$$\begin{cases} M = c\Phi \cdot I_{\text{я}} \\ U_{\text{я}} = E + i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} , \\ E = c\Phi \cdot \omega \end{cases}$$

де $U_{\text{я}}$ - напруга прикладена до якірної обмотки двигуна, E - протие. р. с., $R_{\text{я}}$, $L_{\text{я}}$ - активний опір та індуктивність роторної обмотки, $i_{\text{я}}$ - струм якоря двигуна, M - момент, який розвиває двигун, ω - кількість обертів двигуна, $c\Phi$ - конструкційна стала двигуна. Або в операторній формі для однієї машини будемо мати:

$$\begin{cases} M_1(p) = c\Phi \cdot I_{\text{я}}(p) \\ U_1(p) = c\Phi \cdot \omega_1(p) + I_{\text{я}}(p) \cdot R_{\text{я1}}(T_{\text{E1}}p + 1) \end{cases}$$

де $T_{\text{E1}} = \frac{L_{\text{я1}}}{R_{\text{я1}}}$ - електрична стала першого двигуна. Для двох двигунів:

$$\begin{cases} M_1(p) = c\Phi_1 \cdot I_\alpha(p), \\ M_2(p) = c\Phi_2 \cdot I_\alpha(p), \\ U(p) = U_1(p) + U_2(p) = c\Phi_1 \cdot \omega_1(p) + c\Phi_2 \cdot \omega_2(p) + I_\alpha(p) \cdot R_0(T_E p + 1) \end{cases}, \quad (2.13)$$

де $R_0 = R_{\alpha 1} + R_{\alpha 2}$, $T_0 = T_{E1} + T_{E2}$.

Джерелом керованої напруги для двигунів є тиристорний перетворювач (ТП), що являє собою трифазний керований випрямляч (КВ), найбільш часто виконаний за схемою Ларіонова. В зв'язку з неповною керованістю ТП в динамічному режимі роботи є складним нелінійним елементом, який описується передаточною такою функцією:

$$W_{TP} = \frac{k_n}{T_n p + 1}, \quad (2.14)$$

де $T_i = \frac{1}{N_i \cdot f}$ - стала часу ТП, N_i - число пульсацій за період, f - частота мережі живлення, k_i - статичний коефіцієнт передачі ТП, який в залежності від виду опорної напруги може бути постійною або змінною величиною. При гармонічній опорній напрузі статична характеристика ТП лінійна, тобто $k_n = \text{const}$, при лінійно-наростаючій – нелінійна й має вигляд зображений на рис 2.4 б.

Регулятори швидкості та струму в системі каскадного керування будуються на основі операційних підсилювачів та виконуються зазвичай пропорційно-інтегруючими [45] – [47]. Їхні передаточні характеристики будуть мати вигляд:

$$W_{pi} = k_{ni} + \frac{1}{T_{ui} p}; \quad W_{pc} = k_{nc} + \frac{1}{T_{uc} p}, \quad (2.15)$$

де k_{ni}, k_{nc} – коефіцієнти передачі відповідних елементів, а T_{ui}, T_{uc} – їх сталі часу.

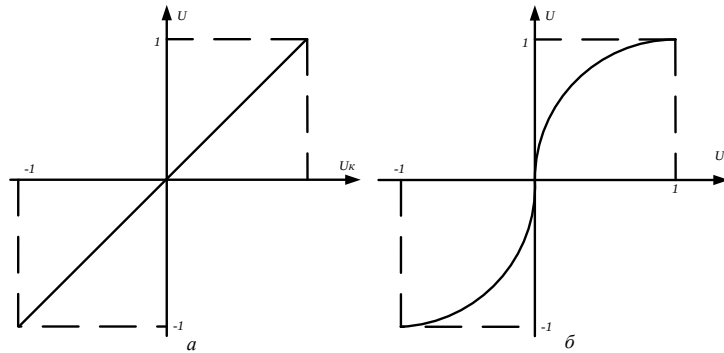


Рисунок 2.4 – Статичні характеристики ТП а) з гармонічною та б) з лінійно-наростаючою опорною напругою.

Сенсори струму та напруги в системі каскадного керування повинні забезпечити гальванічну розв'язку сигналу зворотного зв'язку від силового кола. В досліджуваному типі привода сенсором струму виступають вимірювальні трансформатори струму, ввімкнені на вході ТП. Сигнал з їх вторинних обмоток випрямляється й заводиться в систему керування приводом. На виході сенсора напруги отримують напругу пропорційну проти е.р.с. двигуна. Сенсори струму й напруги є аперіодичними елементами САК та описуються такими передаточними функціями:

$$W_{CH} = \frac{-k_{CH}}{T_{CH}p + 1}, \quad W_{CC} = \frac{-k_{CC}}{T_{CC}p + 1}, \quad (2.16)$$

де k_{CH} та k_{CC} – коефіцієнти передачі відповідних елементів, а T_{CH} та T_{CC} – їх сталі часу.

Використовуючи рівняння (2.13) – (2.16), а також структурну схему механічної частини привода, отриману на рис. 2.3, можна запропонувати структурну схему систему привода ПДА, на якій вказано всі зв'язки змінних, які присутні в даній системі автоматичного керування.

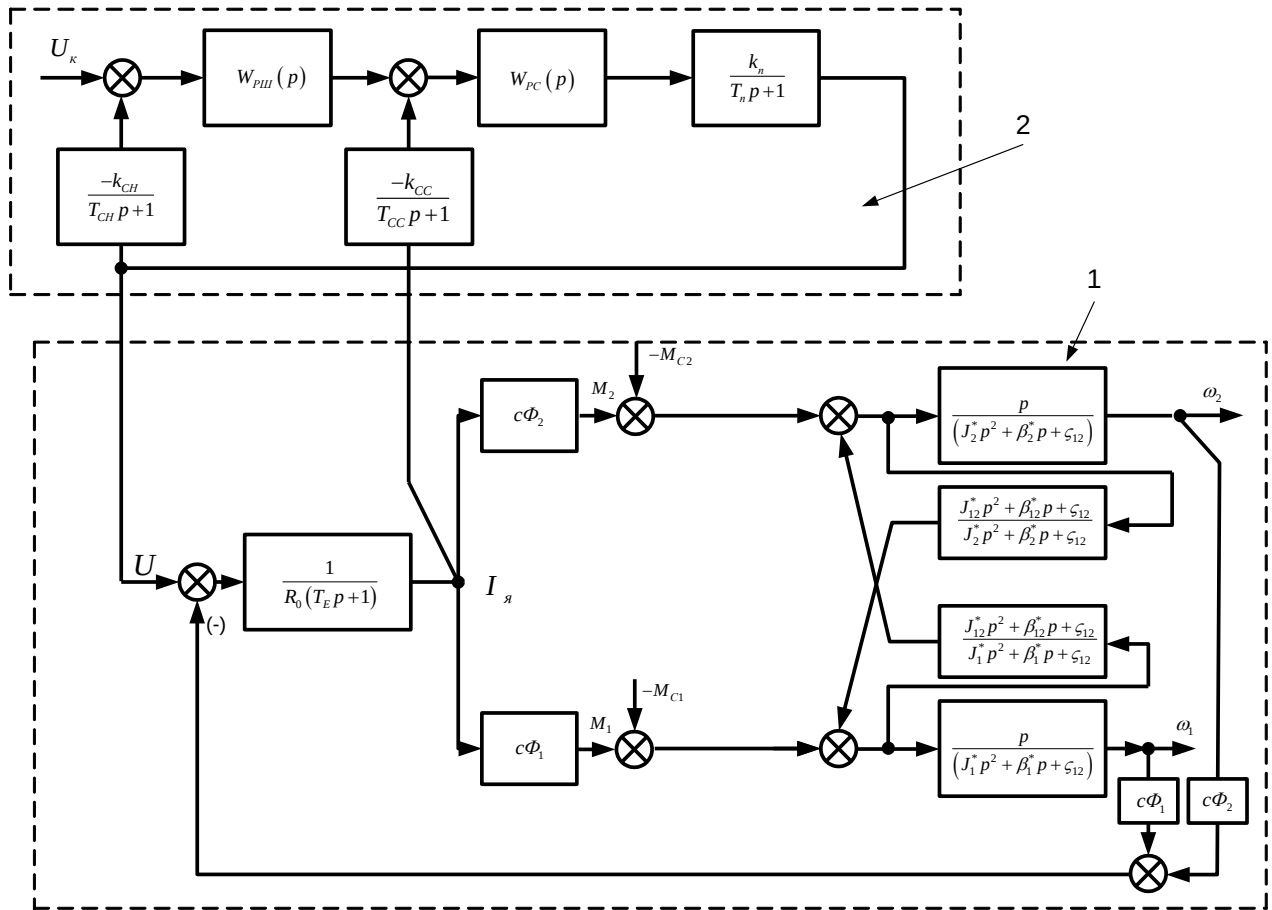


Рисунок 2.5 – Структурна схема системи приводу дифузійного апарату

Як видно з отриманих структурних схем дана система має складно-замкнутий характер, тобто є системою високого порядку, який можна умовно розділити на силову частину 1 та систему керування 2. Отриманий математичний опис приводу дифузійного апарату в цілому як електротехнічного комплексу може бути використаний для дослідження системи в динамічному режимі роботи. Також з його допомогою можна вказати на причини виникнення коливальних режимів системи та втрати нею стійкості.

2.2 Дослідження системи електроприводу ПДА в динамічному режимі роботи з врахуванням нелінійного характеру пружних зв'язків

Дослідження стійкості складних систем автоматичного керування та характеру перехідних процесів, що відбуваються в них при дії різних збурень є

досить складним завданням. Знаходження передаточних характеристик таких систем аналітичним способом та їх аналіз за допомогою класичних методів ускладнюються через те, що такі системи мають високий порядок та велику кількість коефіцієнтів передачі, сталих часу та інших параметрів системи, що призводить до дуже складних розрахунків та громіздких виразів [10].

Також дослідження динамічних режимів вказаними методами неможливі в системах з ланками, нелінійним характером яких не можна знехтувати. Оскільки, як було прийнято вище у (2.10) жорсткість пружного зв'язку є величиною нелінійною, яка залежить від відносного кута повороту валів двигунів, то виконання поставленої задачі аналітичними методами є вкрай важким.

Більш зручними для розв'язання поставлених задач виглядають чисельні методи, за допомогою яких можна розв'язати отриману вище математичну модель системи та отримати реакції відповідних величин на різні збурення. Такі методи можна зреалізувати, використовуючи ПК та математичні застосунки, зокрема MATLAB. Даний застосунок містить засіб імітаційного моделювання динамічних систем Simulink, який дозволяє досліджувати складні системи автоматичного керування [108] – [112].

Структурна схема, подана на рис. 2.5 є лінеаризованою математичною моделлю і може бути використана для режимів із незначною зміною параметрів системи. Врахування нелінійного характеру системи можливе за допомогою чисельних методів, у яких розрахунок режиму проводиться ітераційно. 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 (2.10) 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. Тому зміною величини жорсткості пружного зв'язку за цей інтервал часу можна знехтувати. Таким чином ми матимемо

імітаційну модель дводвигунного приводу, яка буде враховувати нелінійний характер пружності зв'язку та зміну.

Для спрощення досліджень системи в динамічному режимі введемо такі припущення:

1. Електричні та механічні параметри двигунів однакові, тобто $c\Phi_1 = c\Phi_2$, $R_{я1} = R_{я2}$, $T_{E1} = T_{E2}$, $J_1 = J_2$.
2. Найбільший інтерес викликає робота системи на межі номінального режиму. Враховуючи, що при роботі в таких режимах, момент інерції двигуна та коефіцієнт розсіювання енергії в двигуні значно менший ніж приведений момент інерції завантажених шнеків та приведений коефіцієнт розсіювання енергії в ПДА, тобто $J_1 \approx J_2 \ll J_{12} \cdot k^2$, $\beta_1 \approx \beta_2 \ll \beta_{12} \cdot k^2$, тому величинами $J_1 \approx J_2$ та $\beta_1 \approx \beta_2$ в умовах (2.10) можна знехтувати.
3. Оскільки величини і моменту інерції J_{12} , і коефіцієнт тертя шнеків β_{12} можна вважати пропорційними масі завантаженої сокостружкової суміші, то коефіцієнти нерівномірності завантаження α та γ будемо вважати рівними: $\alpha = \gamma$.
4. При аналізі пружних явищ, що виникають в шнековалах будемо враховувати нелінійний характер деформації складних тіл, якими є шнеки разом з сокостружковою сумішшю, відповідно до (2.10).

Основними завданнями в теорії автоматичного керування є дослідження властивостей динамічних систем в перехідних режимах роботи. Найважливішою з них є стійкість – властивість системи повертатися в вихідний чи близький до нього усталений режим після буд-якого виходу з нього в результаті певної дії. Ознакою стійкості є збіжні перехідні процеси, тобто

$$\Delta X(t) = X_{zo}(t) - X(t) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty \quad (2.17)$$

де $X_{zo}(t), X(t)$ - відповідно задане та поточне значення регульованої координати.

Приведене поняття стійкості визначає стійкість усталеного режиму системи. Однак досліджувана система може працювати в умовах дій, які

безперервно змінюються, коли усталений режим взагалі відсутній. З врахуванням таких умов роботи більш загальне визначення стійкості: система стійка, якщо її вихідна величина залишається обмеженою в умовах дії на неї обмежених за величиною дій.

Властивості лінійної системи в перехідних режимах визначаються виключно від параметрів системи і не залежать від величини зовнішніх дій. Зміна величини зовнішніх дій викликає в системі лише пропорційну зміну вихідної величини, не впливаючи на характер перехідного процесу.

Досліджувана система має декілька нелінійних ланок, нелінійностями яких не можна знехтувати внаслідок значного впливу їх на характер перехідних процесів. В такому випадку властивості системи в динамічному режимі залежать не лише від параметрів системи, а й від величини зовнішніх дій.

Надзвичайно важливим є дослідження впливу як параметрів системи, так і величини зовнішніх дій на систему (параметрів режиму) на властивості системи в перехідних режимах та визначення зони стійкості системи за цими параметрами.

Визначимо параметри режиму досліджуваної системи відносно яких найбільшим чином залежить характер перехідних процесів в умовах роботи дифузійного апарату, приймаючи за вихідні величини кутові швидкості обох двигунів та їх різницю:

1) Напруга керування приводу U_k . В промислових умовах регулювання швидкості обертання шнеків дифузійного апарату здійснюється оператором вручну за допомогою зміни напруги керування приводу на основі вимог технологічного процесу та показів щитових приладів;

2) Статичний момент на валу двигуна M_{cm} . В усталеному режимі статичний момент дорівнює моменту, що розвивають двигуни $M = c\Phi I$. Оператор оцінює його за показом щитового приладу, що вимірює середнє значення якірного струму I , тому ці два параметри об'єднаємо;

3) Випрямлена напруга U_d - напруга на якірних обмотках двигунів. Величину даної напруги оператор визначає за допомогою щитового приладу. В усталеному режимі дана напруга пропорційна величині U_k .

На основі показів вказаних приладів оператор здійснює оцінку експлуатаційних характеристик приводу. Тому дані величини можна визначити, як основні величини, за якими здійснюється контроль стійкості системи та якості перехідних процесів.

Визначимо також параметри системи, від яких найбільшим чином залежить поведінка системи в перехідних режимах роботи. До них необхідно віднести параметри, що залежать від величини та нервномірності завантаження дифузійного апарату:

- 1) момент інерції J_{12} ;
- 2) коефіцієнт тертя шнеків β_{12} ;
- 3) коефіцієнт нерівномірності завантаження валу α .

Слід зауважити, що параметри зворотних зв'язків системи також значно впливають на її властивості, але їх сталі часу значно менші, ніж сталі часу механічної частини приводу і вони не викликають тих процесів, що досліджуються в роботі.

Для побудови імітаційної моделі, яка б враховувала нелінійний характер пружного зв'язку зазначений у (2.11), та забезпечувала зручність зміни параметрів системи при дослідженнях динамічних режимів введемо певні позначення передатнім функціям структурної схеми (рис. 2.5):

$$W_4 = \frac{p}{\alpha \frac{2}{3} J_{12} p^2 + \alpha \frac{2}{3} \beta_{12} p + \zeta_{12}}, \quad W_5 = \frac{p}{\frac{2}{3} (1-\alpha) J_{12} p^2 + \frac{2}{3} (1-\alpha) \beta_{12} p + \zeta_{12}},$$

$$W_6' = \frac{-\frac{1}{6} J_{12} p^2 - \frac{1}{6} \beta_{12} p + \zeta_{12}}{\alpha \frac{2}{3} J_{12} p^2 + \alpha \frac{2}{3} \beta_{12} p + \zeta_{12}}, \quad W_6'' = \frac{-\frac{1}{6} J_{12} p^2 - \frac{1}{6} \beta_{12} p + \zeta_{12}}{\frac{2}{3} (1-\alpha) J_{12} p^2 + \frac{2}{3} (1-\alpha) \beta_{12} p + \zeta_{12}},$$

Здійснимо ряд перетворень з передатною функцією W_4 :

$$\begin{aligned}
W_4 &= \frac{p}{\alpha \frac{2}{3} J_{12} p^2 + \alpha \frac{2}{3} \beta_{12} p + \zeta_{12}} = \frac{p}{\alpha \frac{2}{3} p (J_{12} p + \beta_{12}) + \zeta_{12}} = \\
&= \left| \frac{\frac{1}{\frac{J_{12}}{\beta_{12}} p + 1} \cdot \frac{1}{\alpha \frac{2}{3} \beta_{12} p}}{\frac{1}{\frac{J_{12}}{\beta_{12}} p + 1} \cdot \frac{1}{\alpha \frac{2}{3} \beta_{12} p}} \right| = \frac{\frac{1}{\frac{J_{12}}{\beta_{12}} p + 1} \cdot \frac{1}{\alpha \frac{2}{3} \beta_{12}}}{\frac{\alpha \frac{2}{3} p (J_{12} p + \beta_{12}) + \zeta_{12}}{p} \cdot \frac{1}{\frac{J_{12}}{\beta_{12}} p + 1} \cdot \frac{1}{\alpha \frac{2}{3} \beta_{12}}} = \\
&= \frac{\frac{1}{\frac{J_{12}}{\beta_{12}} p + 1} \cdot \frac{1}{\alpha \frac{2}{3} \beta_{12}}}{\left(\alpha \frac{2}{3} \beta_{12} \left(\frac{J_{12}}{\beta_{12}} p + 1 \right) + \frac{\zeta_{12}}{p} \right) \cdot \frac{1}{\frac{J_{12}}{\beta_{12}} p + 1} \cdot \frac{1}{\alpha \frac{2}{3} \beta_{12}}} = \frac{\frac{1}{\frac{J_{12}}{\beta_{12}} p + 1} \cdot \frac{1}{\alpha \frac{2}{3} \beta_{12}}}{1 + \zeta_{12} \cdot \frac{1}{\frac{J_{12}}{\beta_{12}} p + 1} \cdot \frac{1}{\alpha \frac{2}{3} \beta_{12} p}}.
\end{aligned}$$

Або ж, внісши певні позначення, отримаємо:

$$W_4 = \frac{W_{41} \cdot W_{43}}{1 + \zeta_{12} \cdot W_{41} \cdot W_{42}}, \quad (2.18)$$

$$\text{де } W_{41} = \frac{1}{\frac{J_{12}}{\beta_{12}} p + 1}, \quad W_{42} = \frac{1}{\alpha \frac{2}{3} \beta_{12} p}, \quad W_{43} = \frac{1}{\alpha \frac{2}{3} \beta_{12} p}.$$

Співвідношення (2.18) у відповідності до правил, прийнятих у теорії автоматичного керування [42], [43], дозволяють синтезувати структурну схему, еквівалентну передатній функції W_4 та подану на рис. 2.6.

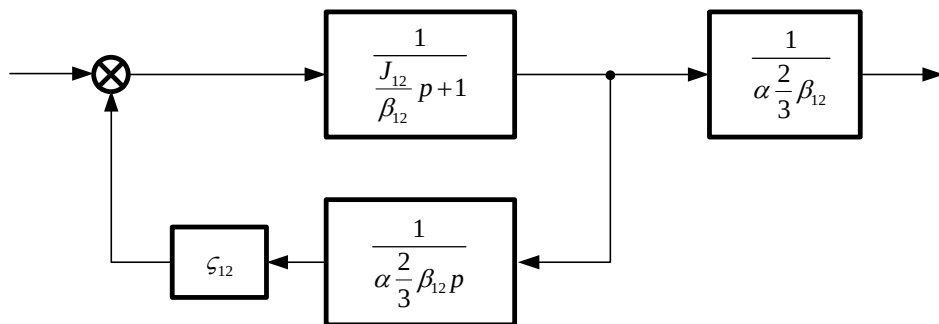


Рисунок 2.6 – Еквівалентна передатній функції W_4 структурна схема

MATLAB Simulink дозволяє створювати підсистеми з декількома елементами, зокрема було об'єднано в одну підсистему структуру W_4 , зображена на рис. 2.7.

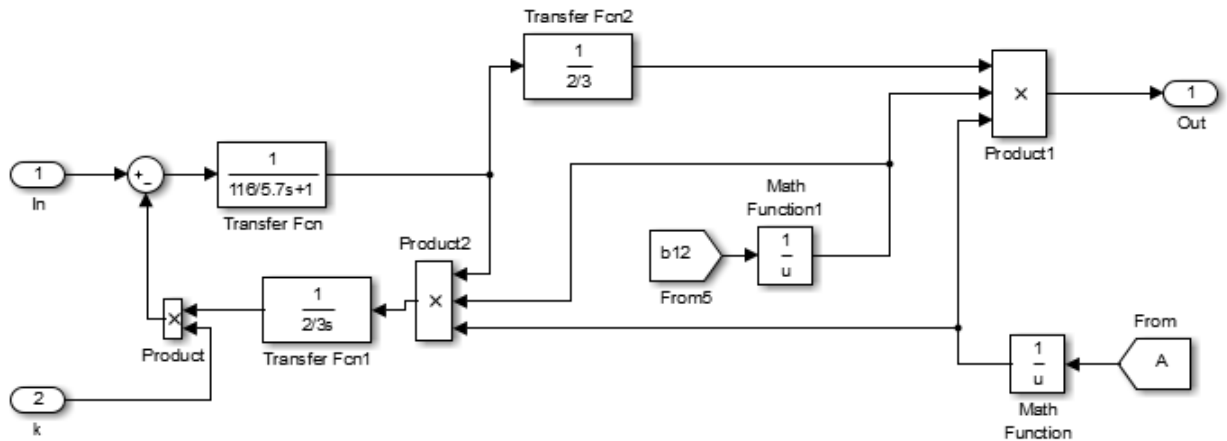


Рисунок 2.7 – Підсистема W_4 в MATLAB

Аналогічним чином отримано співвідношення:

$$W_5 = \frac{W_{51} \cdot W_{53}}{1 + \zeta_{12} \cdot W_{51} \cdot W_{52}}, \quad (2.19)$$

$$\text{де } W_{51} = \frac{1}{\frac{J_{12}}{\beta_{12}} p + 1}, \quad W_{52} = \frac{1}{(1-\alpha) \frac{2}{3} \beta_{12} p}, \quad W_{53} = \frac{1}{(1-\alpha) \frac{2}{3} \beta_{12} p}, \text{ яке по суті}$$

відрізняється лише коефіцієнтом $(1-\alpha)$ на відміну від α у (2.18). тому підсистема W_5 матиме той же вигляд (рис. 2.7).

Для того щоб розробити підсистему W'_6 здійснимо ряд перетворень:

$$\begin{aligned}
W_6' &= \frac{-\frac{1}{6}J_{12}p^2 - \frac{1}{6}\beta_{12}p + \varsigma_{12}}{\alpha\frac{2}{3}J_{12}p^2 + \alpha\frac{2}{3}\beta_{12}p + \varsigma_{12}} = \frac{-\frac{1}{6}J_{12}p^2}{\alpha\frac{2}{3}J_{12}p^2 + \alpha\frac{2}{3}\beta_{12}p + \varsigma_{12}} \\
&+ \frac{-\frac{1}{6}\beta_{12}p}{\alpha\frac{2}{3}J_{12}p^2 + \alpha\frac{2}{3}\beta_{12}p + \varsigma_{12}} + \frac{\varsigma_{12}}{\alpha\frac{2}{3}J_{12}p^2 + \alpha\frac{2}{3}\beta_{12}p + \varsigma_{12}} = . \quad (2.20) \\
&= -\frac{1}{6}J_{12}p \cdot W_4 + -\frac{1}{6}\beta_{12} \cdot W_4 + \frac{\varsigma_{12}}{p}W_4 = W_4' + W_4'' + W_4'''
\end{aligned}$$

Аналогічно:

$$W_6'' = \frac{1}{6}J_{12}p \cdot W_5 + -\frac{1}{6}\beta_{12} \cdot W_5 + \frac{\varsigma_{12}}{p}W_5 = W_5' + W_5'' + W_5''' \quad (2.21)$$

Отримані співвідношення дозволяють синтезувати підсистеми Simulink. На рис. 2.8 подана для прикладу підсистема W_6' .

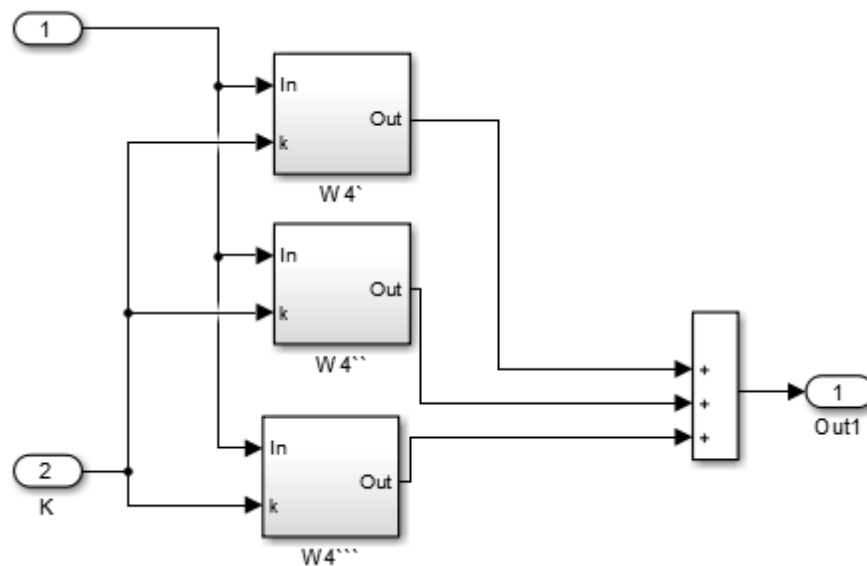


Рисунок 2.8 – Підсистема W_6' в MATLAB

Дана структура складається з трьох підсистем $W_4' = -\frac{1}{6}J_{12}p \cdot W_4$, $W_4'' = -\frac{1}{6}\beta_{12} \cdot W_4$, $W_4''' = \frac{\varsigma_{12}}{p}W_4$, які здійснюють відповідні математичні операції і сигнали, на виході яких сумуються.

На основі структурної схеми (рис. 2.5) та враховуючи синтезовані підсистеми (рис. 2.7, 2.8) розроблено імітаційну модель дводвигунного приводу похилого дифузійного апарату, виконаний на основі тиристорного перетворювача TE4-200-460-H2-2УХЛ4 та приводиться в рух двома двигунами постійного струму 4ПФМ250М, потужністю 55 кВт. Електромеханічні процеси, що протікають в даному приводі описуються математичними рівняннями приведеними в попередніх підрозділах.

Розроблена імітаційна модель дозволяє здійснювати дослідження впливу динамічних режимів роботи системи саме відносно цих параметрів системи та режиму. На рис. 2.9 зображено імітаційну модель в пакеті прикладних програм Simulink.

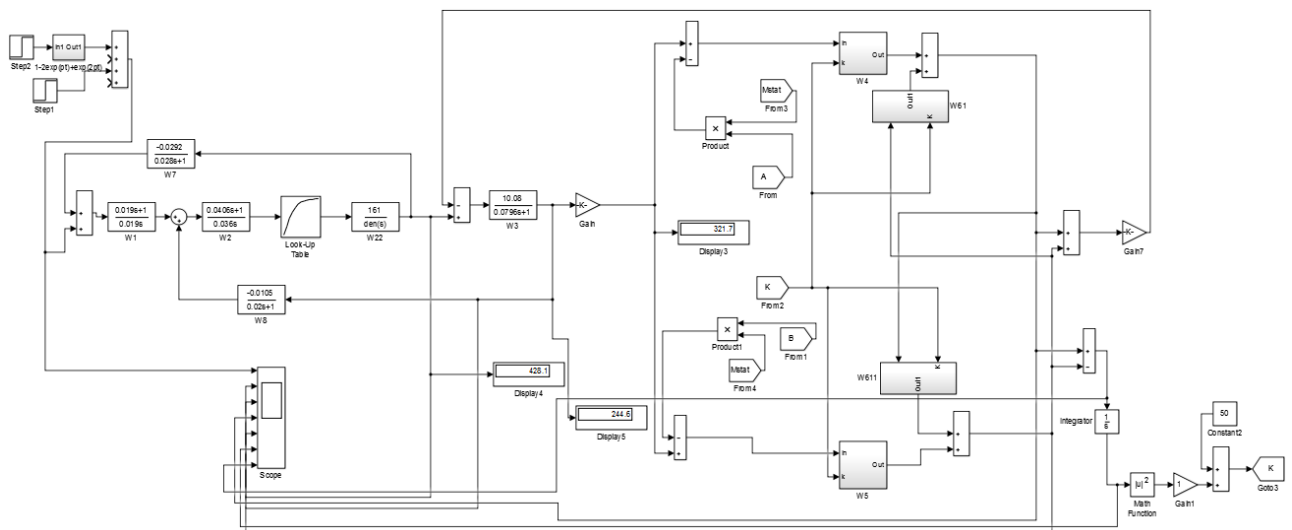


Рисунок 2.9 – Імітаційна модель системи приводу ПДА в MATLAB

Дана модель містить усі передаточні ланки структурної схеми системи приводу дифузійного апарату зображеної на рис. 2.5, змодельовані за допомогою внутрішніх функцій MATLAB Simulink та спеціально розроблених підсистем, що дозволяють отримати реакцію будь-якої змінної від дії певного збурення. Візуалізація отриманих результатів виконується за допомогою спеціального блоку осцилографа, який дозволяє часові залежності. Для прикладу представимо довільну часову залежність змінної x :

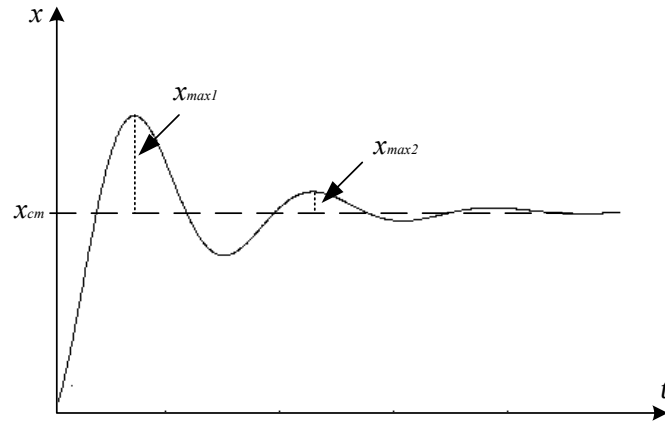


Рисунок 2.10 – Часова залежність вихідної змінної

З теорії автоматичного керування відомо наступні показники якості перехідних процесів:

1) час перехідного процесу t_n , під яким розуміють інтервал часу від початку перехідного процесу до моменту часу, коли відхилення вихідної величини від нового усталеного значення менше 5%;

2) максимальне відхилення в перехідний період, яке визначають за виразом $\sigma = \frac{x_{\max} - x_{уст}}{x_{уст}}$, де $x_{\max}$, $x_{уст}$ - максимальне та нове усталене значення вихідної величини;

3) коливальність перехідного процесу χ , яку оцінюють за відношенням сусідніх максимумів вихідної величини $\frac{x_{\max 2}}{x_{\max 1}}$ та іноді виражають у відсотках; також коливальність характеризують числом коливань за час перехідного процесу.

За умови втрати системою стійкості час перехідного процесу та максимальне відхилення нескінченно великі $t_n = \infty$, $\sigma = \infty$, а коливальність $\chi > 1$.

Проведемо дослідження процесів, які протікають в системі при поступовому збільшенні напруги керування та дослідимо характер перехідних процесів при різних значеннях напруги та фіксованому значенні струму та

коефіцієнта нерівномірності завантаження 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. Побудова за допомогою моделі часових залежностей вихідних величин дозволяють отримати вичерпну інформацію про показники якості перехідних процесів та не вимагають додаткових досліджень критеріїв якості.

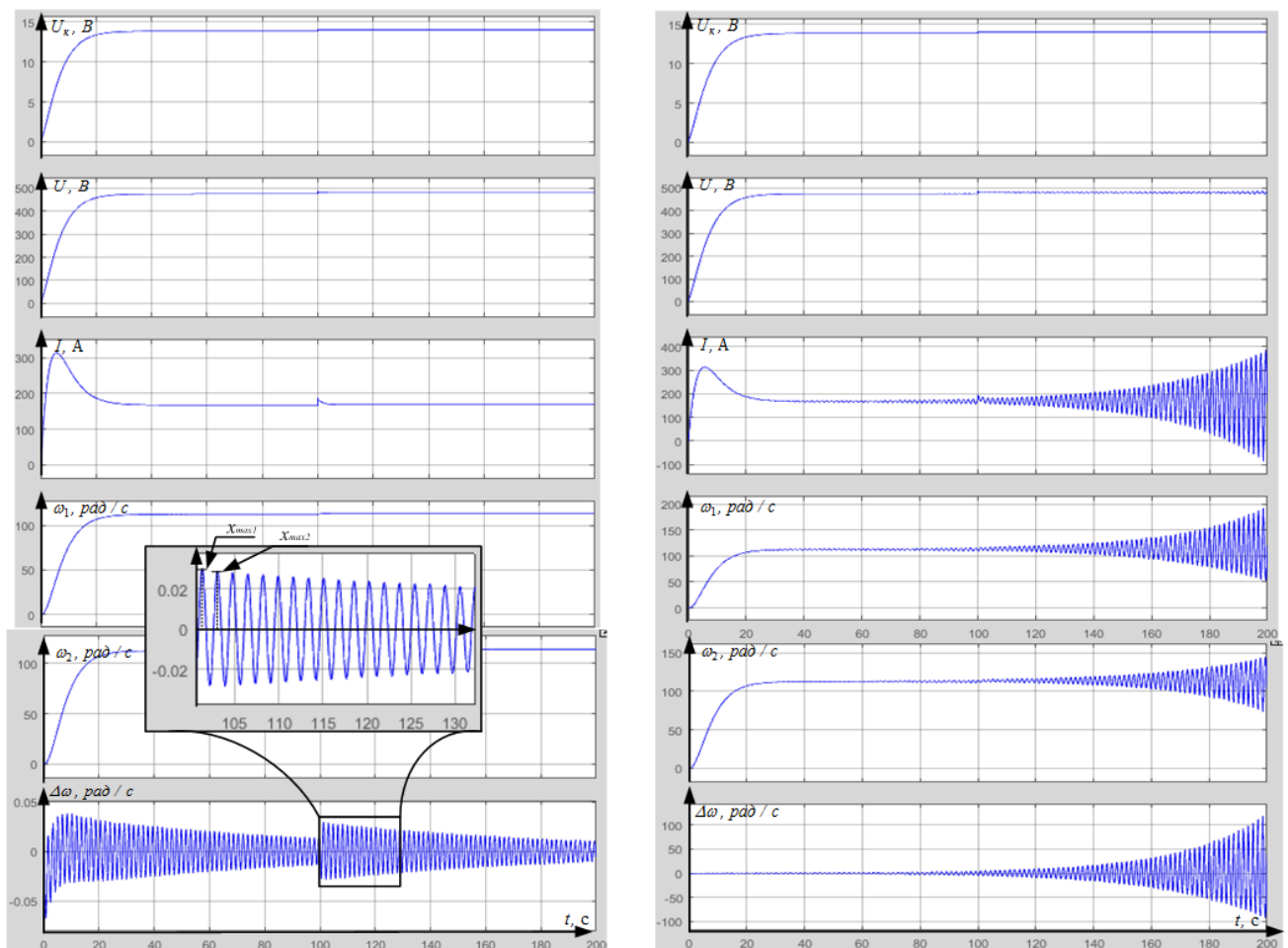


Рисунок 2.11 – Приклади моделювання системи привода ДА

На рис. 2.11 показано приклад моделювання системи привоу дифузійного апарата при поступовому збільшенні напруги керування, що відповідає певному заданому значенню випрямленої напруги ТП (загальної напруги привоу), при старті ПДА та незначному збільшені її в момент часу $t=100\text{с}$ за

наступних значень параметрів системи: $J_{12} = 116 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $\beta_{12} = 5,7 \text{ Дж} / \text{рад}$, $\alpha = 0,53$ (рисунок ліворуч) та $J_{12} = 116 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $\beta_{12} = 5,7 \text{ Дж} / \text{рад}$, $\alpha = 0,57$ (рисунок праворуч).

Результатом моделювання є часові залежності основних величин. На рис. 2.11 зображені часові діаграми напруги керування U_k , середнього значення випрямленої напруги U , струму якоря двигунів I , кутових швидкостей верхнього та нижнього двигунів відповідно та їх різниці $\Delta\omega$.

Як видно з отриманих залежностей при досягненні напругою керування певного значення напруги на двигунах відповідає заданому і її значення забезпечується стабільним 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 $\chi = I_{\max 2} / I_{\max 1} < 1$), а параметри на графіках відповідають нестійкому режиму роботи системи ($\chi = I_{\max 2} / I_{\max 1} > 1$).

За проведеним моделюванням можна визначити коливальність, як один з головних показників якості перехідних процесів, що дає вичерпну інформацію про динамічні властивості системи при певній конфігурації параметрів та в певному режимі роботи. Постає задача дослідження впливу вказаних вище параметрів системи та параметрів режиму на стійкість системи, оцінити існуючий запас стійкості та визначити які параметри найбільшим чином погіршують якість перехідних процесів.

2.3 Вплив параметрів системи та режиму на динамічні властивості нелінійної системи електропривода ПДА

Вирішення даної задачі можна звести до побудови зони стійкості в системах координат тих параметрів, які найбільшим чином впливають на характер перехідних режимів роботи системи, а також в системах координат

тих величин, за якими оператор здійснює оцінку експлуатаційних характеристик приводу

Оскільки, як було вище описано, таких параметрів досить багато, то проведемо оцінку їх впливу на величину коливальності поступово.

Для оцінки впливу параметрів системи проведемо моделювання перехідних режимів роботи при включенні приводу в номінальний режим роботи, що відповідає номінальним значенням напруги та струму двигунів. Змінюючи в моделі величини моменту інерції валу J_{12} та коефіцієнту тертя шнеків β_{12} при сталому значенні коефіцієнту нерівномірності завантаження валу $\alpha = 0.55$ за часовими залежностями вихідних величин будемо визначати значення коливальності χ . Отриманні результати представимо у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення коливальності системи при $\alpha = 0.55$.

β_{12} , Дж/рад J_{12} , кг·м ²	4	4,6	5,2	5,8	6,4	7	7,5
80	1,400	1,128	0,908	0,731	0,590	0,477	0,382
92	1,342	1,110	0,918	0,754	0,635	0,517	0,443
104	1,294	1,094	0,930	0,786	0,667	0,565	0,488
116	1,261	1,085	0,935	0,805	0,694	0,597	0,515
128	1,235	1,077	0,942	0,823	0,717	0,628	0,548
140	1,214	1,072	0,945	0,836	0,733	0,647	0,576
152	1,193	1,065	0,949	0,846	0,759	0,674	0,602

Таким чином, отримавши необхідний масив даних, побудуємо залежність коливальності $\chi = f(J_{12}, \beta_{12})$ у вигляді поверхні, а також у вигляді сімейства залежностей $\chi = f(\beta_{12})$ при фіксованих значеннях J_{12} (рис. 2.12).

З отриманого сімейства залежностей видно, що зі збільшенням коефіцієнту розсіювання енергії β_{12} коливальність знижується й система стає більш стійкою. Це пояснюється тим, що при зростанні втрат енергії внаслідок тертя

умов для виникнення незатухаючих коливань зменшується. Залежності $\chi = f(\beta_{12})$ мають однаковий характер при усіх значеннях моменту інерції, величина якого впливає лише на її нахил (крутість).

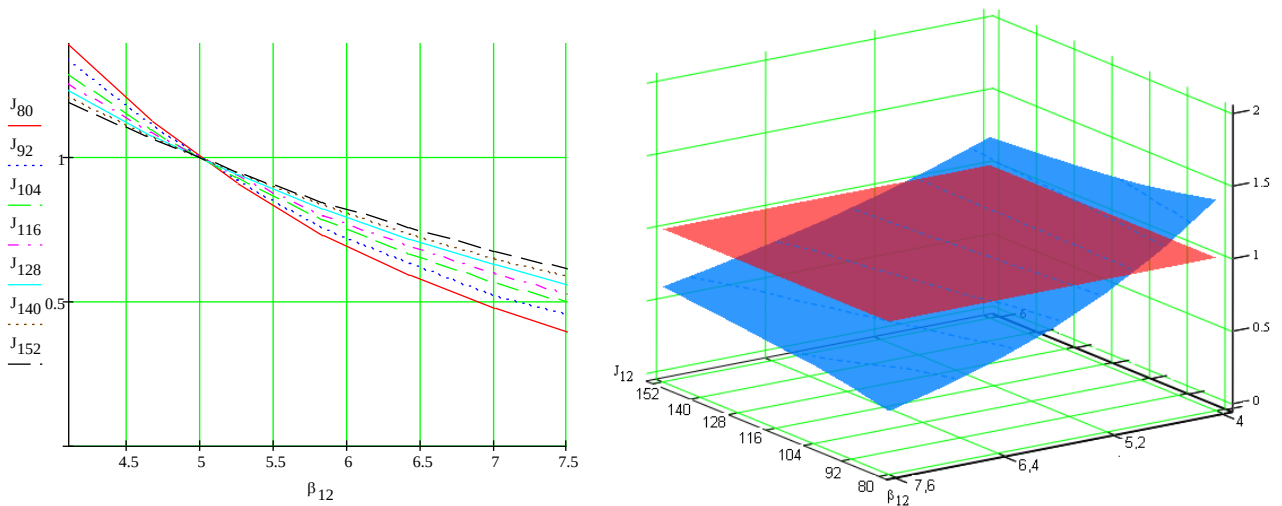


Рисунок 2.12 – Залежність коливальності системи від моменту інерції та коефіцієнту розсіювання енергії валу в номінальному режимі при $\alpha = 0.55$

Слід зазначити, що усі криві $\chi = f(\beta_{12})$ мають спільну точку перетину приблизно при $\beta_{12} = 5$ Дж/рад та значенні коливальності $\chi \approx 1$, що відповідає критичному (автоколивальному) режиму роботи САК приводу. В тій частині залежностей де система знаходиться в стійкому стані $\chi < 1$, $\beta_{12} > 5$ значення коливальності прямо пропорційно величині моменту інерції J_{12} .

Побудуємо площину $\chi = 1$ та знайдемо лінію перетину її з площиною $\chi = f(J_{12}, \beta_{12})$, яка є лінією критичного режиму. При значеннях моменту інерції J_{12} та коефіцієнту розсіювання енергії β_{12} валу, для яких $\chi > 1$ система стає нестійкою з різною швидкістю наростання амплітуди коливань.

Побудувавши проекцію лінії критичного режиму на площину (J_{12}, β_{12}) можна визначити зону стійкості приводу ДА в відповідній системі координат при певному значенні коефіцієнту нерівномірності завантаження валу. З метою визначення впливу цього параметру на динамічні властивості системи

проведемо аналогічні операції для різних значень коефіцієнту α та побудуємо критичні лінії які відмежовують зону стійкості в координатах (J_{12}, β_{12}) .

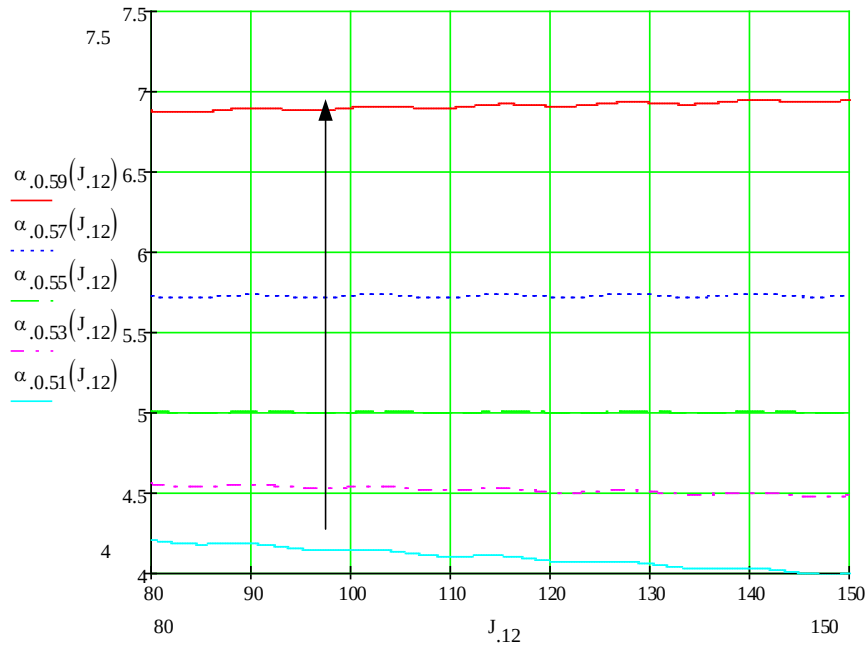


Рисунок 2.13 – Зміна зони стійкості в системі координат (J_{12}, β_{12}) від коефіцієнту нерівномірності завантаження α .

На рис. 2.13 зображено зони стійкості для п'яти значень коефіцієнту α . Для усіх них залежності $\chi = f(J_{12}, \beta_{12})$ мають такий самий характер, як і залежність зображена на рис. 2.12. Стрілкою позначено напрямок зростання стійкості системи. Звідси добре видно, що коефіцієнт нерівномірності завантаження валу має значний вплив на властивості стійкості системи. Зона стійкості значно зменшується при збільшенні нерівномірності завантаження валу. Це пояснюється тим, що наявність неоднакових навантажень на валах є передумовою зміни швидкостей обертання кінців валу. Це зумовлює його пружну деформацію, що є основою коливальних процесів в системах дводвигунних приводів.

Проведені дослідження показали, що вказані параметри мають значний вплив на властивості приводу ПДА в динамічних режимах роботи й можуть

викликати в ньому незатухаючі електро механічні коливання пов'язані з втратою системою стійкості, однак визначення величин цих параметрів в ході виробництва є неможливим. Це пов'язано з тим, що вони є складними функціями конструкційних особливостей ДА, маси та технологічних особливостей завантаженої бурякової стружки, температурних режимів у різних відділах ДА. Тому на практиці оператор при керуванні приводом мусить користуватися іншими джерелами інформації про стан приводу, передусім показами технологічних сенсорів та щитових приладів, які вимірюють середнє значення випрямленої напруги (напруги на двигунах) та струму роторних обмоток двигунів. Як було описано вище дані прилади в умовах несинусоїдності вимірювальних сигналів не завжди забезпечують необхідну точність. В таких умовах постає надзвичайно актуальне завдання дослідити вплив на динамічні властивості приводу цих величин в умовах виникнення ймовірних похибок вимірювання, пов'язаних з несинусоїдністю в комплексі з уже отриманими результатами впливу параметрів системи приводу.

Таким чином, будемо змінювати в моделі напругу U_{κ} та, фіксуючи величину напруги на двигунах при фіксованих значеннях коефіцієнту нерівномірності завантаження валу α , визначатимемо значення коливальності χ . Отримавши необхідний масив даних побудуємо залежність коливальності $\chi = f(U, \alpha)$ у вигляді поверхні та знайдемо лінію її перетину з площиною $\chi = 1$, яка є лінією критичного режиму.

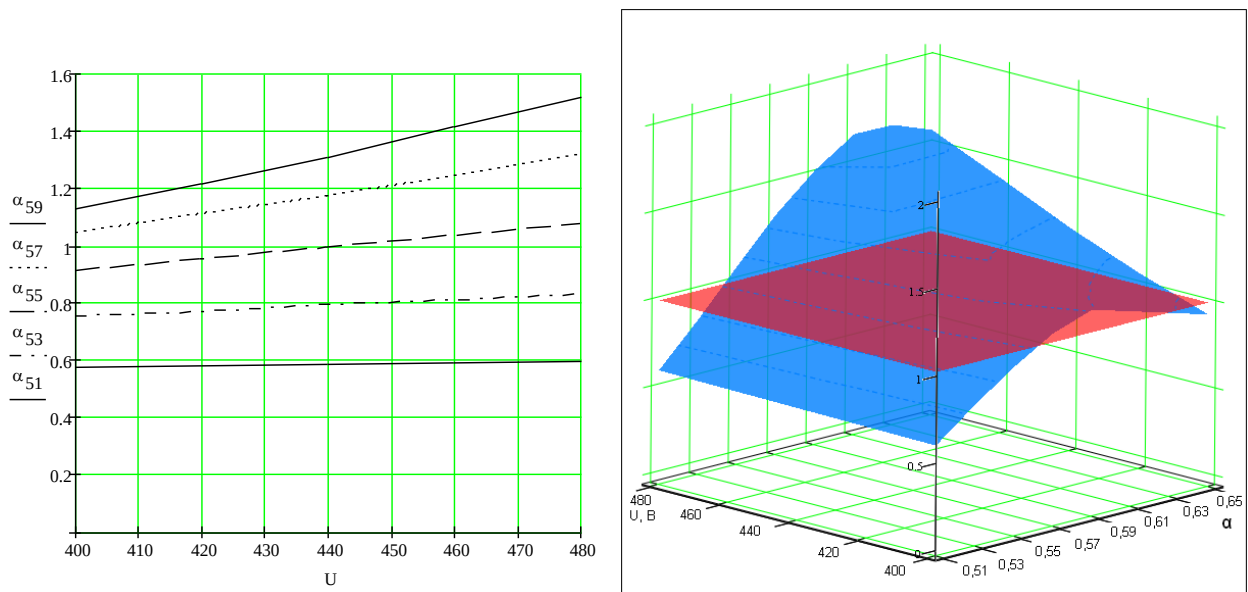


Рисунок 2.14 – Залежність коливальності $\chi = f(U, \alpha)$ при $I = I_{ном}$

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 при будь-яких значеннях коефіцієнту α . Оцінити запас стійкості можна за величиною коливальності χ . Запас стійкості збільшується по мірі зменшення від одиниці значення коливальності.

Побудувавши проекцію лінії критичного режиму на площину (U, α) можна визначити зону стійкості приводу ДА в відповідній системі координат (рис. 2.15). На даному рисунку позначено, при яких значеннях досліджуваних параметрів система є стійкою, а при яких – втрачає стійкість.

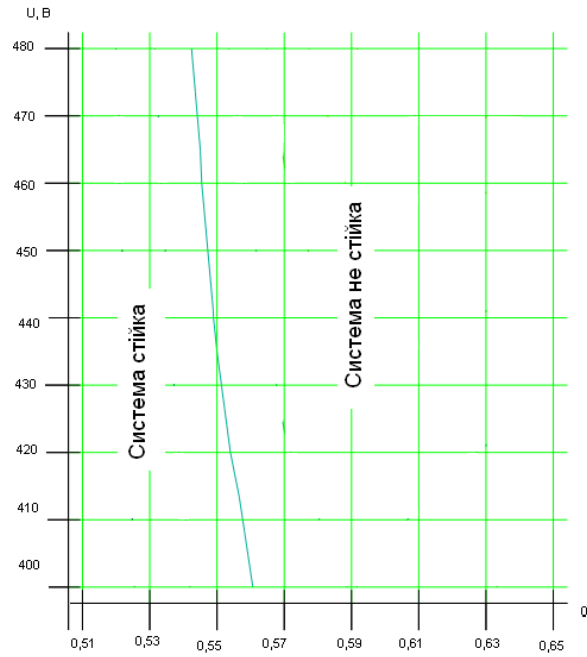


Рисунок 2.15 – Зона стійкості системи приводу ДА в системі координат (U, α)
при $I = I_{ном}$

З метою визначення зони стійкості за струмом (статичним моментом) побудуємо подібні графіки для різних значень струму двигунів:

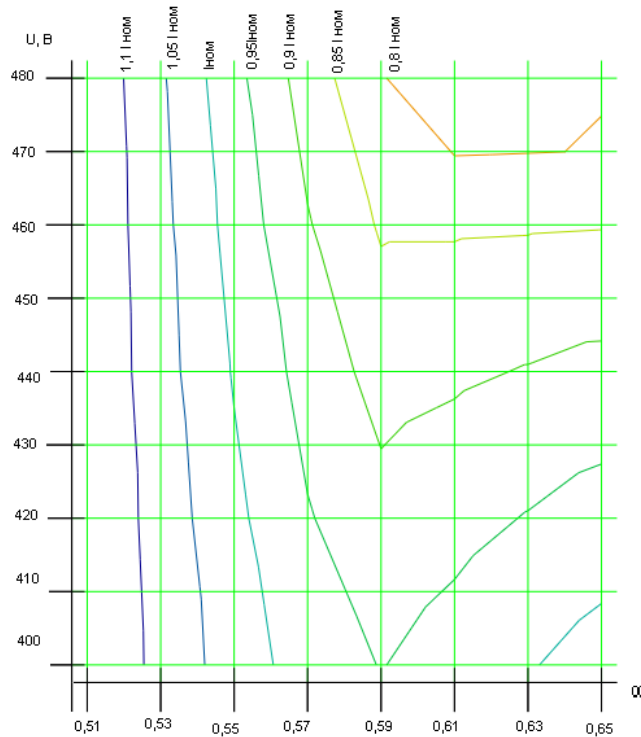


Рисунок 2.16 – Зміна зони стійкості системи приводу ДА в системі координат (U, α) при зміні струму двигунів

На рис. 2.16 різними лініями відмічено границі зони стійкості для різних значень струму навантаження, вказаних у відносних до $I_{ном}$ величинах. Правий верхній куток відповідає найнестійкішому стану системи, нижній лівий – навпаки найстійкішому.

Проведемо аналіз отриманих залежностей та визначимо, яким чином залежать властивості системи приводу ДА в перехідних режимах від досліджуваних величин. При збільшенні напруги коливальність перехідного процесу за законом близьким до лінійного збільшується для будь-яких значень коефіцієнту нерівномірності завантаження валу α . Від величини α залежить нахил (крутість) залежності $\chi = f(U)$. При збільшенні нерівномірності завантаження валу крутість залежності зменшується. Тобто при більш рівномірному завантаженні валу (тобто $\alpha \rightarrow 0.5$) коливальність меншим чином залежить від напруги, і навпаки, при зростанні нерівномірності завантаження валу коливальність більшим чином залежить від величини напруги на двигунах. Збільшення коливальності означає зменшення запасу стійкості.

Залежність коливальності від величини статичного моменту на валу двигуна, а отже, і величини роторного струму двигунів є більш складною. Однак з рис. 2.16 чітко видно, що зі збільшенням струму зона стійкості системи в координатах (U, α) зменшується. Таким чином при десятивідсотковому перевищенні значення номінального струму система може втратити стійкість при напругах значно менших $U_{ном}$.

Збільшення коливальності означає зменшення запасу стійкості. Тому вище сказане стосується не лише для характеристики якості перехідного процесу, а й характеризує властивості стійкості системи приводу ДА. Отримані результати є дуже важливими при оцінці роботи приводу в режимах близьких до номінальних, оскільки вона проводиться за значеннями тих величин, які суттєво впливають на динамічні властивості системи. Постає актуальна задача точного контролю даних величин, оцінки точності вимірювальних приладів,

якими здійснюється вимірювання відповідних величин, враховуючи всі специфічні особливості роботи даного типу приводу.

2.4 Висновки

В даному розділі було розроблено математичні моделі системи електроприводу ПДА, які враховують основні експлуатаційні характеристики роботи даного типу приводу та нелінійний характер пружних зв'язків між двигунами. Також створено імітаційну модель, яка дає змогу досліджувати динамічні режими роботи та вплив на її властивості основних параметрів роботи даної системи автоматичного керування.

В результаті аналізу розроблених математичних моделей системи дводвигунного приводу ПДА було встановлено, що пружний зв'язок між двигунами, який має нелінійний характер суттєво впливає на динамічні властивості системи, серед яких основною є стійкість. Наявність нелінійного пружного зв'язку в даній системі приводу є однією з основних умов для виникнення незатухаючих коливальних режимів, що по своїй сутті є аварійним режимом.

Встановлено, що визначальну роль на динамічні властивості приводу має коефіцієнт нерівномірності завантаження двигунів приводу. Це пояснюється тим, що за умови нерівномірного завантаження дифузійного апарата вздовж шнеків виникає різниця швидкостей обертання двох двигунів, наслідком чого є пружна деформація (закручення) валу між двигунами. Таким чином відбувається перерозподіл кінетичної енергії між двигунами, а також накопиченою в деформованому тілі потенційної енергії. При зростанні нерівномірності завантаження зона стійкості системи приводу значно зменшується.

Тому виникає актуальна задача розробки системи автоматизованого керування, яка б на відміну від існуючих забезпечувала контроль не лише

електричних, але й механічних параметрів приводу, серед яких кут радіальної деформації шнековалів та швидкостей обертання валів двигунів.

Також було визначено характер впливу інших параметрів системи, серед яких приведенні до швидкості обертання двигунів момент інерції завантажених шнековалів та коефіцієнту розсіювання енергії внаслідок тертя. Показано значний вплив напруги на двигунах та струму їх роторних обмоток на стійкість системи приводу, що є надзвичайно важливим, оскільки в виробничих умовах дані величини є основними при визначенні оператором режиму роботи приводу.

Отримані результати досліджень будуть використанні при розробці методів та засобів автоматизованого керування дводвигунним електроприводом похилого дифузійного апарата, що дозволять підвищити надійність та ефективність його роботи.

Результати, отримані у розділі 2, висвітлено в [6] – [10], [19] – [20].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА

3.1 Математичні моделі асинхронного привода ПДА з частотним регулюванням, які враховують нелінійний характер пружно-дисипативних зв'язків

Останнім часом досить часто зустрічаються намагання запровадити асинхронний привод з частотним регулюванням [84] – [88], що ґрунтується на відомих перевагах даного типу приводу та застарілості основного обладнання існуючих систем приводу постійного струму. На практиці ці намагання зустрічаються зі значними труднощами, пов'язаних із необхідністю забезпечення синхронного обертання двох двигунів при виникненні режиму їх нерівномірного завантаження внаслідок технологічних особливостей роботи ПДА.

Дослідження таких режимів ускладнюється відсутністю адекватного математичного опису механічної частини привода, яка б враховувала основні експлуатаційні характеристики роботи ПДА. Зокрема, у вказаних роботах не враховано явищ, пов'язаних з наявністю нелінійних пружних зв'язків між двома двигунами приводу, а також нерівномірного завантаження шнековалів, що, як показали дослідження представлені у розділі 2, значно впливають на його динамічні властивості.

У зв'язку з цим значної актуальності набуває математичне моделювання частотно-регульованого привода ПДА, що дасть змогу правильно синтезувати та проектувати системи автоматичного керування цим приводом, а також дослідження динамічних властивостей таких систем та їх порівняння з традиційною системою привода постійного струму.

3.1.1 Математичні моделі асинхронного двигуна як електро-механічного перетворювача

В якості електромагнітного перетворювача в асинхронному приводі ПДА використовуються два асинхронних двигуни (АД) з короткозамкненим ротором. Для дослідження електромагнітних процесів, які виникають в АД, звернемося до математичного опису, поданого у вигляді проекцій просторових векторів на пряму та квадратурну осі α та β обертової системи координат записаній в операторній формі запису [113]. Ця система координат обертається з швидкістю, рівною кутовій частоті напруги живлення АД ω_{0el} , тобто є нерухомою відносно електричного простору. Кожний просторовий вектор у будь-який момент часу має проекцію на пряму та квадратурну осі.

$$\left\{ \begin{array}{l} p\psi_{1\alpha} = u_{1\alpha} - \frac{1}{\sigma T_1} \psi_{1\alpha} + \omega_{0el} \psi_{1\beta} + \frac{k_2}{\sigma T_1} \psi_{2\alpha}; \\ p\psi_{1\beta} = u_{1\beta} - \frac{1}{\sigma T_1} \psi_{1\beta} - \omega_{0el} \psi_{1\alpha} + \frac{k_2}{\sigma T_1} \psi_{2\beta}; \\ p\psi_{2\alpha} = \frac{k_1}{\sigma T_2} \psi_{1\alpha} - \frac{1}{\sigma T_2} \psi_{2\alpha} + \omega_p \psi_{2\beta}; \\ p\psi_{2\beta} = \frac{k_1}{\sigma T_2} \psi_{1\beta} - \frac{1}{\sigma T_2} \psi_{2\beta} - \omega_p \psi_{2\alpha}; \\ i_{1\alpha} = \frac{1}{\sigma L_1} (\psi_{1\alpha} - k_2 \psi_{2\alpha}); \\ i_{1\beta} = \frac{1}{\sigma L_1} (\psi_{1\beta} - k_2 \psi_{2\beta}); \\ i_{2\alpha} = \frac{1}{\sigma L_2} (\psi_{2\alpha} - k_1 \psi_{1\alpha}); \\ i_{2\beta} = \frac{1}{\sigma L_2} (\psi_{2\beta} - k_1 \psi_{1\beta}); \\ M_d = \frac{3}{2} p_{II} \frac{k_1}{\sigma L_2} (\psi_{2\alpha} \psi_{1\beta} - \psi_{1\alpha} \psi_{2\beta}); \\ \omega_p = \omega_{0el} - p_{II} \omega. \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де p – оператор Лапласа; $u_{1\alpha}$ та $u_{1\beta}$ – проекції вектора напруги на статорі; $\psi_{1\alpha}$, $\psi_{1\beta}$ та $\psi_{2\alpha}$, $\psi_{2\beta}$ – проекції вектора потокозчеплення статора та ротора

відповідно; $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ та $i_{2\alpha}$, $i_{2\beta}$ – проекції вектора струму статора та ротора відповідно; ω_p – кутова швидкість роторної ЕРС; ω – кутова швидкість обертання ротора; M_d – електродинамічний момент АД, p_n – кількість пар полюсів; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} = 1 - k_1 k_2$ – коефіцієнт розсіювання машини; $k_1 = \frac{L_m}{L_1}$ та $k_2 = \frac{L_m}{L_2}$ – безрозмірні коефіцієнти; $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$ та $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ – сталі часу обмоток ротора та статора відповідно; R_1 , L_1 та R_2 , L_2 – активний опір та індуктивність обмоток статора та ротора.

На рис. 3.1 зображено структурну схему двигуна, складену за рівняннями системи (3.1)

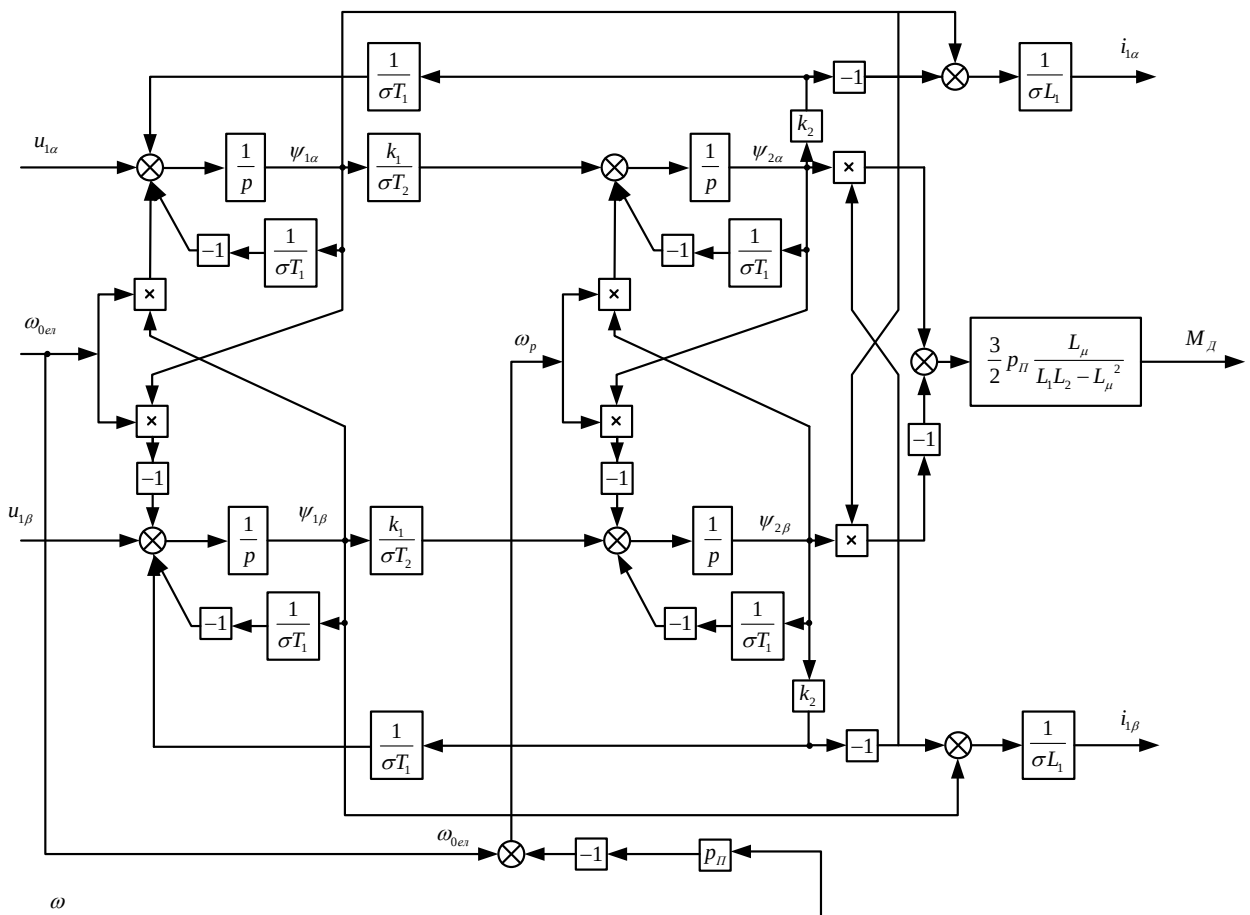


Рисунок 3.1 – Структурна схема АД

Подана структурна схема є описом електромагнітних процесів АД за умови, що в електричній машині діють трифазні змінні напруги синусоїдної форми. На виході вона формує електромагнітний момент $M_{\text{Д}}$, а вхідними діями є проекції вектора напруги на статорі $u_{1\alpha}$ та $u_{1\beta}$, а також її частота $\omega_{0\text{ел}}$. Таку систему можна представити у вигляді підсистеми, зображеної на рис. 3.2.

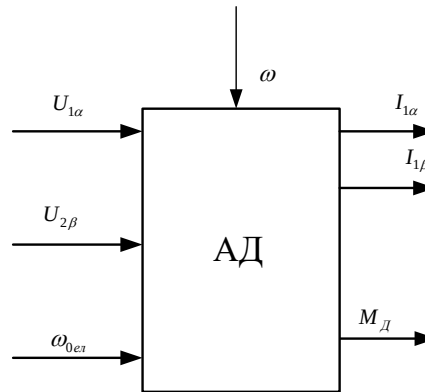


Рисунок 3.2 – АД у вигляді підструктури

Проекції струму та потокозчеплення є інформативними величинами. Швидкість обертання залежить від механічної частини привода і в найпростішому випадку пов'язане з електродинамічним моментом основним рівнянням механіки приводу.

Значення модулів векторів струму а також потокозчеплення статора можна знайти за формулами:

$$I_{\text{max1}} = \sqrt{i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2}, \quad \psi_{\text{max1}} = \sqrt{\psi_{1\alpha}^2 + \psi_{1\beta}^2} \quad (3.2)$$

Визначені за допомогою даних моделей проекції просторових векторів на пряму та квадратурну осі α та β обертової системи координат дозволяють знайти не тільки модулі, а й початкові фази усіх величин, які описують електромагнітні та електромеханічних процесів в АД. Ці дані можуть бути використані при розробці систем та алгоритмів як скалярного так і векторного керування асинхронним приводом.

У попередньому розділі були отримані рівняння руху ПДА, які являють собою зв'язок електромагнітного моменту двигунів з швидкостями. Вони описуються системою рівнянь в операторній формі запису (2.11) з умовами (2.10) та представлені на рис. 2.4 у вигляді структурної схеми.

Використовуючи систему (2.11) та структурну схему АД (рис.3.1), представлену у вигляді підсистеми (рис.3.2) можна скласти структурну схему асинхронного привоу ПДА, подану на рис. 3.3.

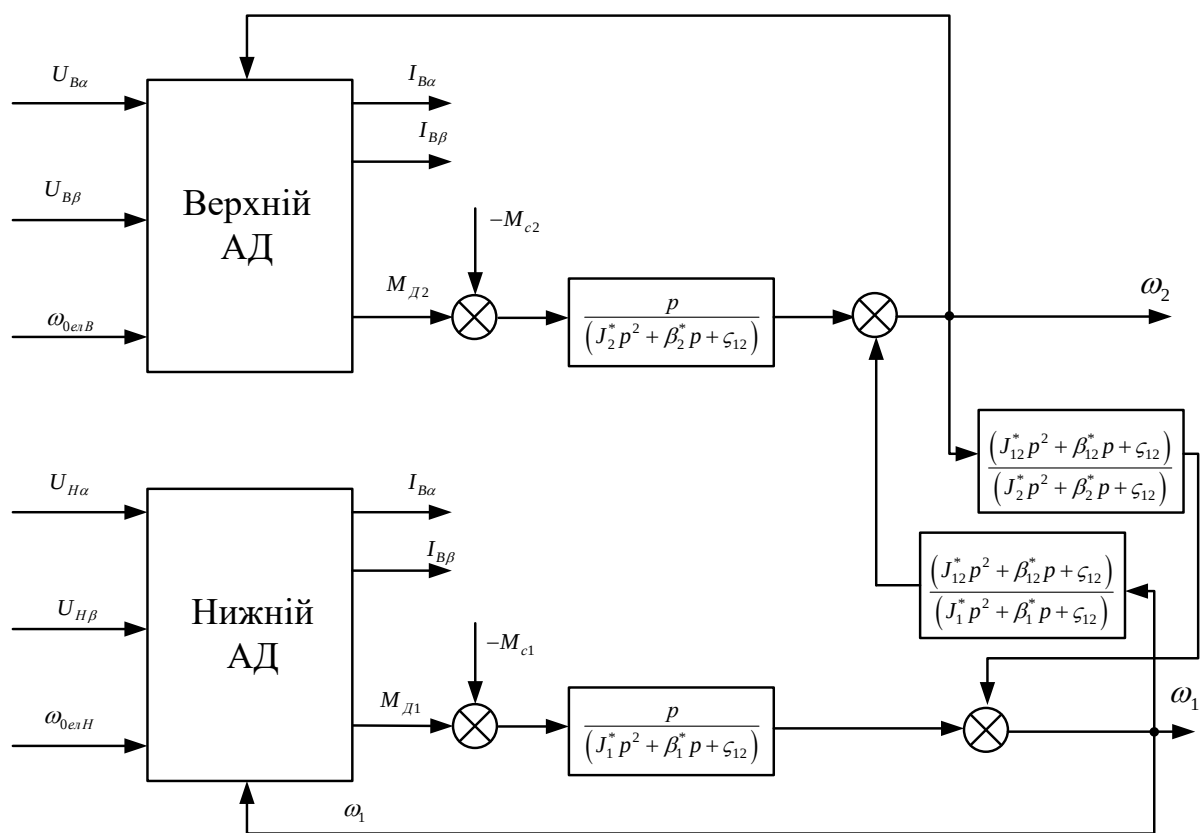


Рисунок 3.3 – Структурна схема асинхронного привоу ПДА

На рис. 3.3 ω_{0elH} та ω_{0elB} – частоти, $U_{H\alpha}$, $U_{H\beta}$ та $U_{B\alpha}$, $U_{B\beta}$ – проекції векторів напруг, $I_{H\alpha}$, $I_{H\beta}$ та $I_{B\alpha}$, $I_{B\beta}$ – проекції струмів статорних обмоток нижнього та верхнього двигунів відповідно, $M_{Д1}$, M_{c1} та $M_{Д2}$, M_{c2} – динамічні та статичні моменти, нижнього та верхнього двигунів відповідно.

Отримана структурна схема є системою асинхронного привода ПДА, на якій показані усі зв'язки змінних та їх взаємовплив.

3.1.2 Математичні моделі групового асинхронного привоу ПДА при живленні АД від спільного ПЧ

Джерелом регульованої напруги в асинхронних приводах є перетворювач частоти (ПЧ), на виході якого за допомогою частотної або широтної модуляції створюється синусоїдна напруга, діюче значення та частота якої регулюються. Оскільки ПДА приводиться в рух двома двигунами, то при побудові системи привода постає питання живлення двох двигунів.

Очевидно, що найпростішим є варіант живлення обох двигунів від одного ПЧ, зображений на рис. 3.4. В такому разі частота та значення напруги статорних обмоток обох двигунів буде однаковим, тобто $\omega_{0елH} = \omega_{0елB} = \omega_{0ел} = 2\pi f$, $U_{H\alpha} = U_{B\alpha} = U_{\alpha}$, $U_{H\beta} = U_{B\beta} = U_{\beta}$, де f – частота $U_{H\alpha}$, $U_{B\alpha}$, $U_{H\beta}$, $U_{B\beta}$ – проекції просторових векторів напруги нижнього та верхнього двигунів відповідно.

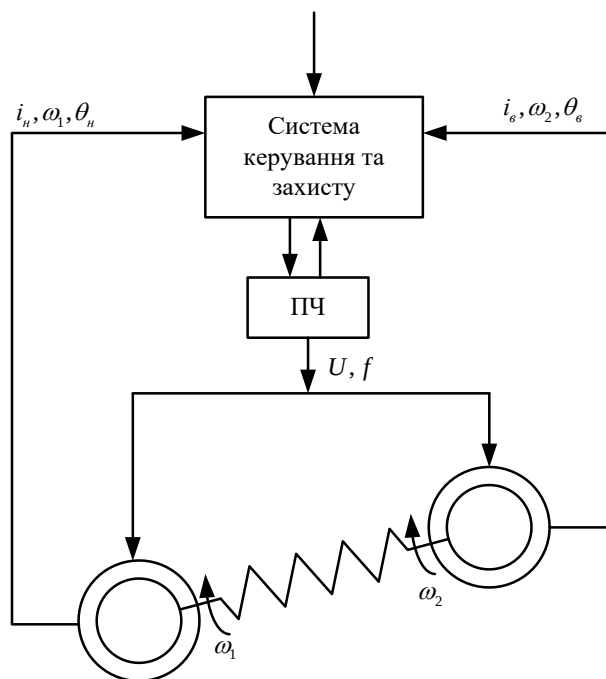


Рисунок 3.4 – Система привоу ПДА при живленні АД від спільного ПЧ

Система частотно-регульованого асинхронного приводу ПДА за такого варіанту живлення може містити зворотні зв'язки за струмом, кутовою швидкістю та кутом повороту валу, але впливати на швидкість обертання чи момент окремого двигуна не здатна. Тому в такій системі навіть при невеликих значеннях нерівномірності завантаження шнековалів ПДА різко погіршуються динамічні властивості, збільшується коливальність системи.

Одним з варіантів їх покращення є ввімкнення на виході ПЧ та послідовно з статорними обмотками індуктивних реакторів, як схематично показано на рис. 3.5.

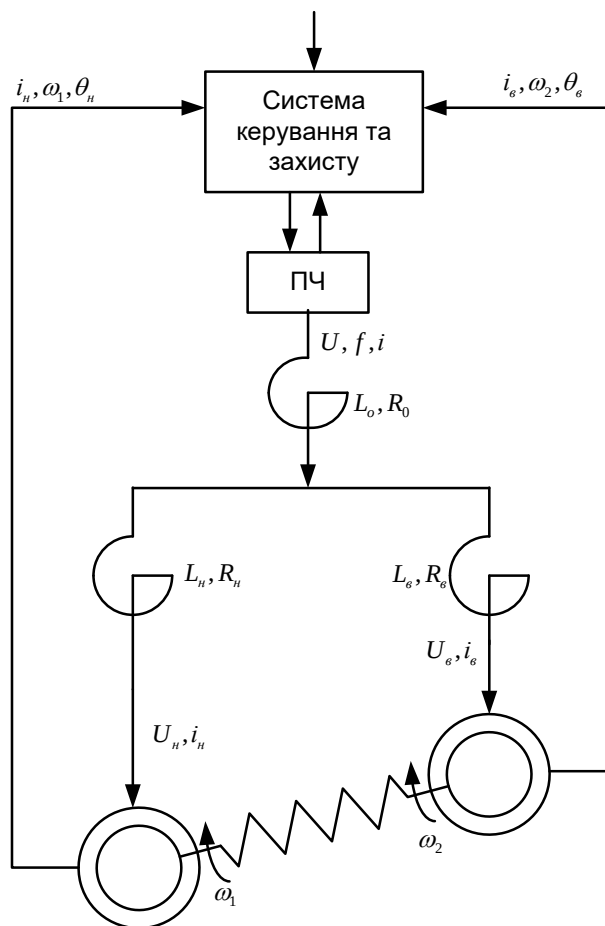


Рисунок 3.5 – Структурна схема системи приводу ПДА зі зрівноважуючими реакторами

Визначення оптимального співвідношення значень індуктивностей L_0 , L_H , L_B та активних опорів R_0 , R_H , R_B реакторів, включених на виході ПЧ та послідовно з статорними обмотками нижнього та верхнього двигунів відповідно, а також впливу цих величин на динамічні властивості системи вимагає математичного моделювання електромагнітних процесів, що відбуваються у них.

На рис. 3.6 представлена заступна схема ввімкнених реакторів індуктивностей для однієї фази.

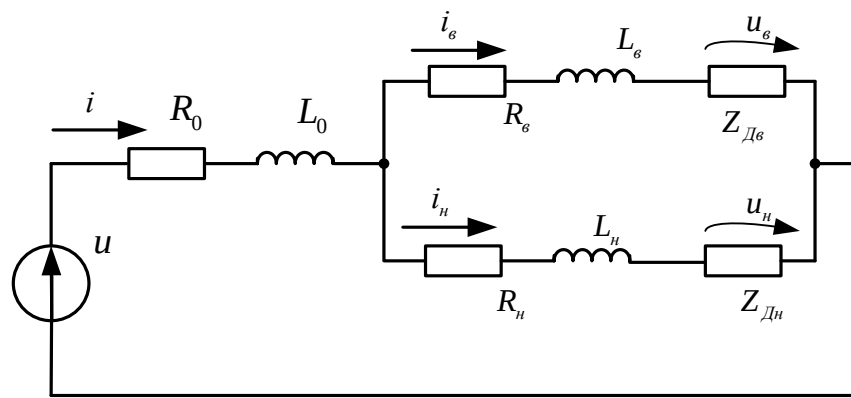


Рисунок 3.6 – Схема ввімкнення реакторів

Використовуючи 2 закон Кірхгофа запишемо вираз для напруги на верхньому двигуні u_ϵ в диференційній формі запису:

$$u_\epsilon = u - iR_0 - L_0 \frac{di}{dt} - i_\epsilon R_\epsilon - L_\epsilon \frac{di_\epsilon}{dt} \quad (3.3)$$

Перепишемо рівняння (3.3) у вигляді просторових векторів в системі координат $x-y$, нерухомій відносно статора двигуна:

$$\tilde{u}_{\epsilon_{x-y}} = \tilde{u}_{x-y} - L_0 \frac{d\tilde{i}_{x-y}}{dt} - L_\epsilon \frac{d\tilde{i}_{\epsilon_{x-y}}}{dt} - \tilde{i}_{x-y} R_0 - \tilde{i}_{\epsilon_{x-y}} R_\epsilon \quad (3.4)$$

Перейдемо від системи координат $x-y$ до системи електричного простору $\alpha-\beta$, що рухається зі швидкістю $\omega_{0ел}$, скориставшись з поданими в [113] виразами для переходу:

$$\begin{cases} \tilde{f}_{x-y} \rightarrow \tilde{f}_{\alpha-\beta} \\ \frac{d\tilde{f}_{x-y}}{dt} \rightarrow \frac{d\tilde{f}_{\alpha-\beta}}{dt} + \tilde{f}_{\alpha-\beta} \cdot j\omega_{0el} \end{cases}$$

В результаті отримаємо:

$$\tilde{u}_\epsilon = \tilde{u} - L_0 \frac{d\tilde{i}}{dt} - j\omega_{0el} L_0 \tilde{i} - L_\epsilon \frac{d\tilde{i}_\epsilon}{dt} - j\omega_{0el} L_\epsilon \tilde{i}_\epsilon - \tilde{i} R_0 - \tilde{i}_\epsilon R_\epsilon \quad (3.5)$$

В рівнянні (3.5) усі просторові вектори перебувають в системі координат $\alpha - \beta$. Застосуємо до отриманого рівняння пряме перетворення Лапласа та перейдемо до операторних зображень функцій:

$$\tilde{U}_B = \tilde{U} - L_0 p \cdot \tilde{I} - j\omega_{0el} L_0 \cdot \tilde{I} - L_\epsilon p \cdot \tilde{I}_B - j\omega_{0el} L_\epsilon \cdot \tilde{I}_B - \tilde{I} \cdot R_0 - \tilde{I}_B \cdot R_B \quad (3.6)$$

Перейдемо до проекцій просторових векторів на осі $\alpha - \beta$. Враховуючи, що

$$\tilde{U}_B = U_{B\alpha} + jU_{B\beta}, \quad \tilde{U} = U_\alpha + jU_\beta, \quad \tilde{I} = I_\alpha + jI_\beta, \quad \tilde{I}_B = I_{B\alpha} + jI_{B\beta},$$

після певних перетворень та розділення дійсних та уявних частин отримаємо:

$$\begin{cases} U_{B\alpha} = U_\alpha - (L_0 p + R_0) \cdot I_\alpha + \omega_{0el} L_0 \cdot I_\beta - (L_\epsilon p + R_B) \cdot I_{B\alpha} + \omega_{0el} L_\epsilon \cdot I_{B\beta} \\ U_{B\beta} = U_\beta - (L_0 p + R_0) \cdot I_\beta - \omega_{0el} L_0 \cdot I_\alpha - (L_\epsilon p + R_B) \cdot I_{B\beta} - \omega_{0el} L_\epsilon \cdot I_{B\alpha} \end{cases} \quad (3.7)$$

Аналогічним чином отримаємо проекції просторового вектору напруги на нижньому двигуні:

$$\begin{cases} U_{H\alpha} = U_\alpha - (L_0 p + R_0) \cdot I_\alpha + \omega_{0el} L_0 \cdot I_\beta - (L_H p + R_H) \cdot I_{H\alpha} + \omega_{0el} L_H \cdot I_{H\beta} \\ U_{H\beta} = U_\beta - (L_0 p + R_0) \cdot I_\beta - \omega_{0el} L_0 \cdot I_\alpha - (L_H p + R_H) \cdot I_{H\beta} - \omega_{0el} L_H \cdot I_{H\alpha} \end{cases} \quad (3.8)$$

Проекції просторового вектору струму в нерозгалуженій частині знаходяться за 1 законом Кірхгофа:

$$\begin{cases} I_\alpha = I_{H\alpha} + I_{B\alpha} \\ I_\beta = I_{H\beta} + I_{B\beta} \end{cases} \quad (3.9)$$

Використовуючи рівняння (3.7 – 3.9), а також структурну схему, представлену на рис. 3.3, можна скласти структурну схему системи асинхронного приводу ПДА з одним ПЧ зі зрівноважуючими реакторами, яка подана на рис. 3.7. Дана структурна схема є математичним описом вказаного

типу приводу, що включає взаємозв'язки усіх змінних та може бути використана для дослідження системи в динамічному режимі засобами імітаційного моделювання.

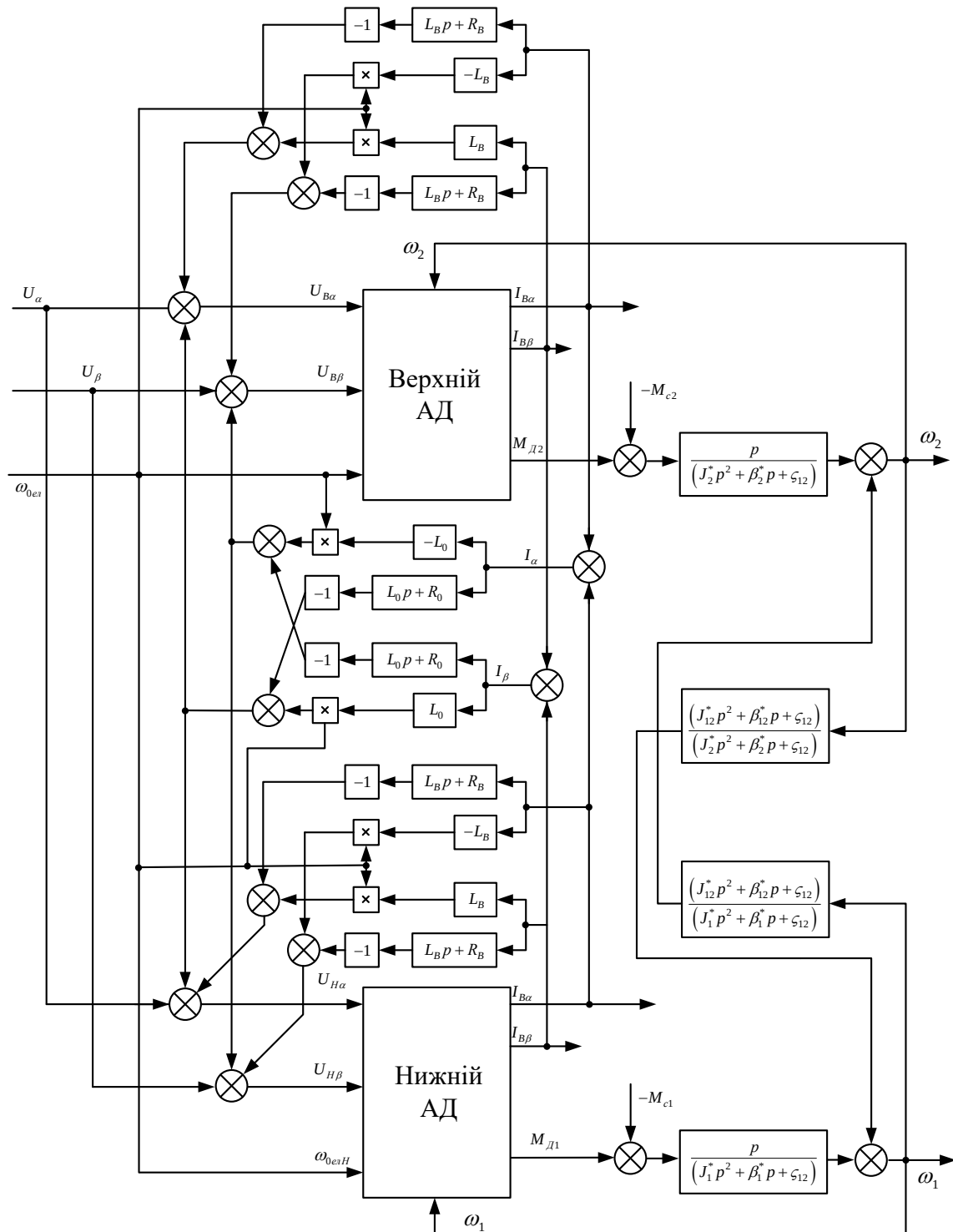


Рисунок 3.7 – Математичний опис системи асинхронного приводу ПДА зі спільним ПЧ зі зрівноважуючими реакторами

Попередні дослідження, більш детально викладені нижче, показали не досить задовільні динамічні властивості такої системи в умовах навіть незначної нерівномірності шнековалів. Використання зрівноважуючих реакторів з певними параметрами дещо їх покращують, однак погіршують пускові характеристики.

3.1.3 Математичні моделі асинхронного приводу ПДА при живленні АД від індивідуальних ПЧ

Більш складним у порівнянні з попереднім є варіант живлення системи асинхронного приводу від індивідуальних ПЧ. Така система схематично показана на рис. 3.8.

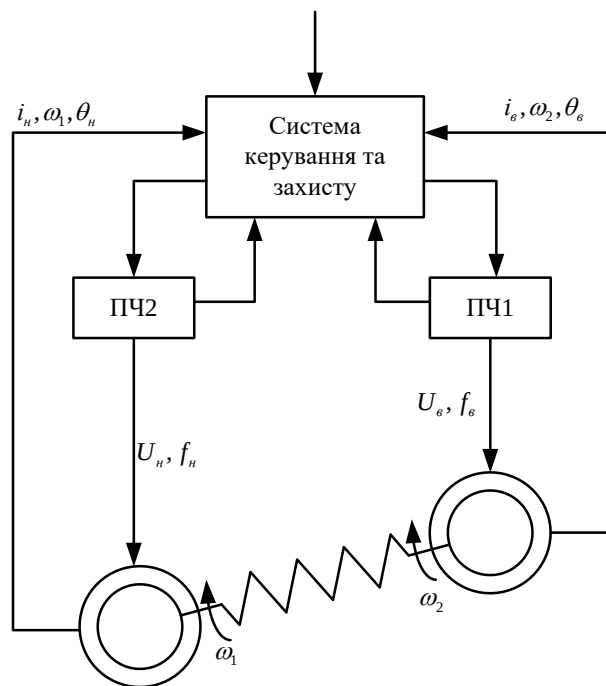


Рисунок 3.8 – Система приводу ПДА при живленні АД від індивідуальних ПЧ

При живленні АД від індивідуальних ПЧ система керування може змінювати напругу та частоту окремо на кожному двигуні та таким чином впливати на швидкість обертання та кут повороту валу окремого двигуна.

Такі системи, в яких існує кінематичний пружний зв'язок, зазвичай реалізують в системі «ведучий – ведений». В таких системах один привод

вибирається «ведучим» та отримує завдання щодо швидкості обертання робочого органу, а завдання другого – «веденого» формується з врахуванням отриманих реакцій приводів (швидкості обертання, динамічні моменти тощо). За такої концепції можна синтезувати безліч систем та алгоритмів керування та забезпечення синхронного обертання валів АД, в залежності від того за якими величинами існує зв'язок.

Тому для оцінки їх ефективності постає задача адекватного математичного моделювання таких систем, що можна виконати на основі поданого на рис. 3.3.

Впровадження таких систем в першу чергу вимагає застосування пристроїв вимірювання механічних величин, які характеризують роботу приводу. Зокрема, мова йде про вимірювання швидкостей кутових швидкостей валів двигунів та робочого органу, зміну кутових положень валів двигунів один відносно одного.

3.2 Порівняльна характеристика приводів різних типів

Іншою важливою задачею є порівняльна характеристика розглянутих типів асинхронного приводу ПДА з частотним регулюванням по відношенню до традиційної системи приводу постійного струму, яка має включати в себе як порівняння технічних характеристик приводу ПДА, зокрема динамічних властивостей системи, так і економічних, які враховують витрати на основне обладнання та експлуатаційні витрати.

Отримані вище математичні моделі дають змогу створити імітаційні моделі різних типів приводу в середовищі MATLAB Simulink для дослідження його динамічних властивостей з врахуванням різних особливостей роботи приводу, зокрема змінних в ході роботи статичного моменту на валу двигуна, приведенного моменту інерції усього механізму, виникнення за певних умов роботи нерівномірного завантаження шнековалів.

На рис. 3.9 подано приклад такого моделювання плавного пуску ПДА за різних параметрів системи. На ньому зображено часові діаграми напруги на

двигунах U , моментів на валах нижнього і верхнього двигунів M_1 , M_2 , кутові швидкості нижнього і верхнього двигунів ω_1 , ω_2 , їх різниці $\Delta\omega$, отримані в результаті моделювання.

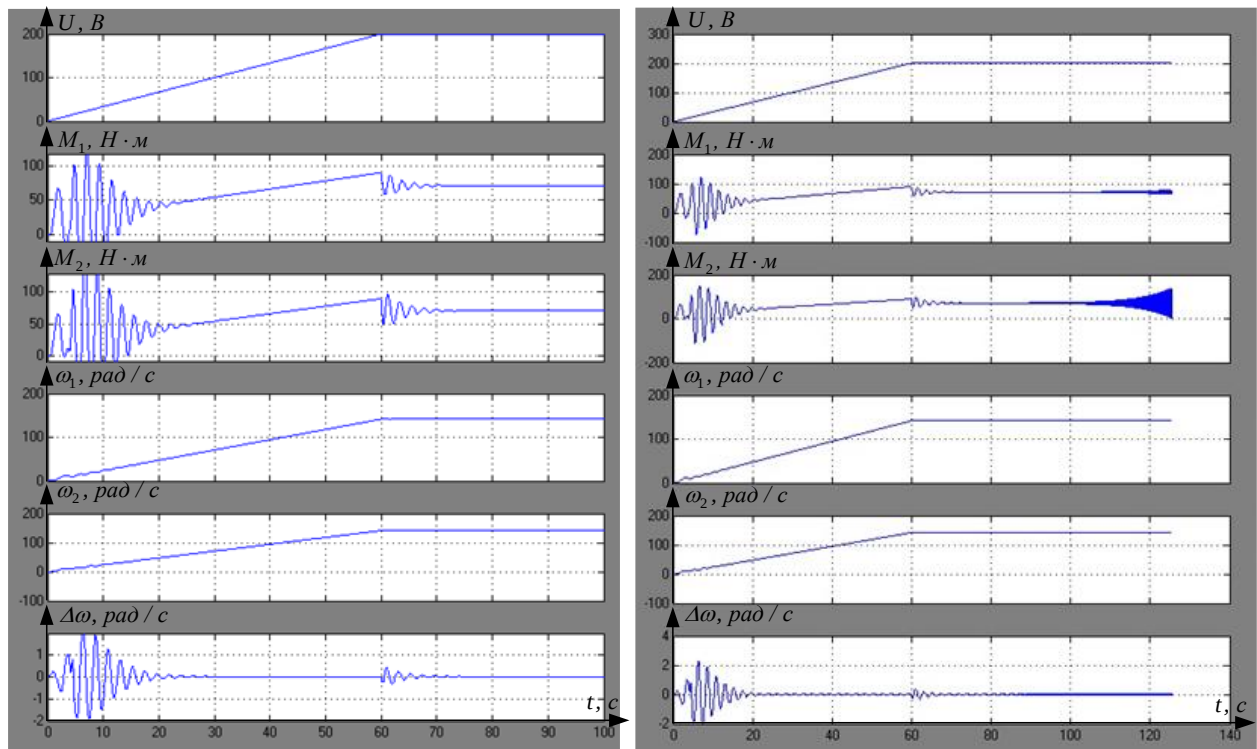


Рисунок 3.9 – Часові діаграми пуску ПДА з асинхронним приводом

Як видно з отриманих залежностей, динамічні властивості системи залежать від параметрів системи. Зокрема, за певних їх значень система приводу ПДА система є стійкою (часові діаграми ліворуч), а в іншому випадку вона втрачає стійкість. Тому постає задача визначення впливу параметрів системи на динамічні властивості системи на стадії синтезування та проектування частотно-регульованих приводів ПДА.

Дана задача вирішується у відповідності до методики детально описаної в розділі 2 і полягає в визначенні зони стійкості приводу в певних системах координат.

Перш за все проведемо визначення зони стійкості системи асинхронного приводу в координатах: коефіцієнт нерівномірності завантаження шнековалів α , частота вихідної напруги ПЧ f при фіксованих значеннях статичного моменту

(відносно номінального моменту двигунів), тобто при однаковому навантаженні ПДА. Таку систему координат можна вважати еквівалентною системі координат (U, α) в системі приводу постійного струму, для якої було визначено зони стійкості в розділі 2 (рис. 2.16)

Результати досліджень подано на рис. 3.10. Штрихованою лінією вказано зону, в якій система перебуває в стійкому стані.

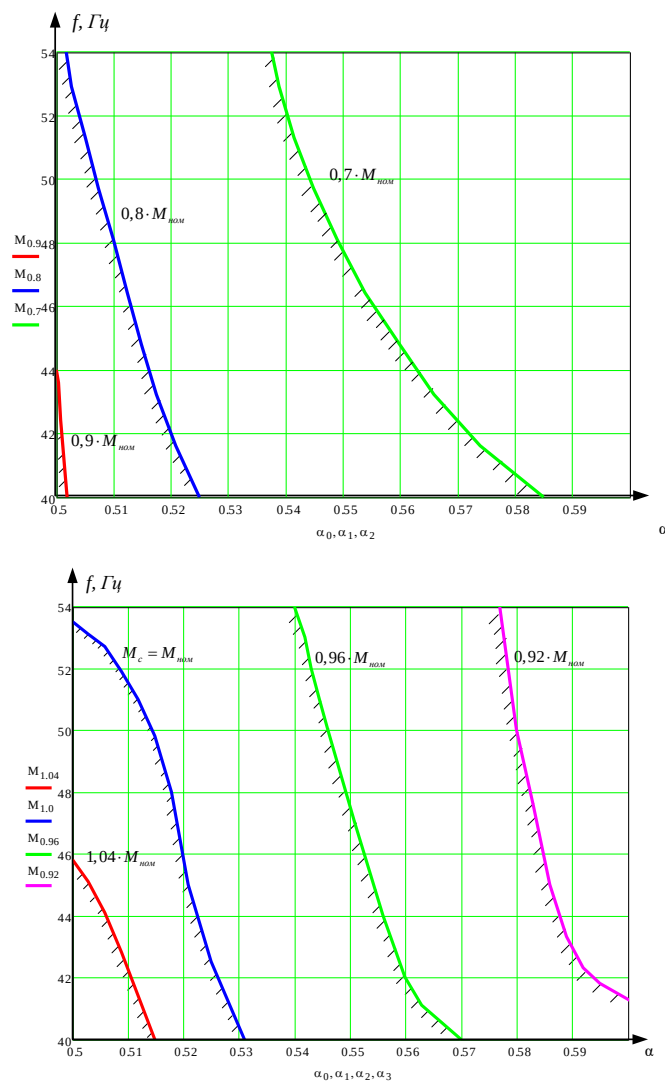


Рисунок 3.10 – Зміна границі стійкості системи асинхронного приводу ПДА зі спільним (вгорі) та індивідуальними (внизу) ПЧ в системі координат (f, α) за різних значень статичних моментів.

З поданих на рис. 3.10 видно, що система приводу зі спільним ПЧ має

гірші властивості, ніж система з індивідуальними, що виливається в меншу завантажувальну здатність ПДА, тому використання його у виробничих умовах є не можливим.

З метою більш чіткого порівняння динамічних властивостей системи асинхронного приводу (з системою постійного струму зокрема) проведемо визначення границі стійкості в системі координат: в системі координат: статичний момент (у відносних одиницях до номінального моменту двигунів), коефіцієнт нерівномірності завантаження шнековалів за умови номінального значення інших параметрів (напруги, частоти, швидкості обертання тощо) . Результати досліджень подамо на рис. 3.11

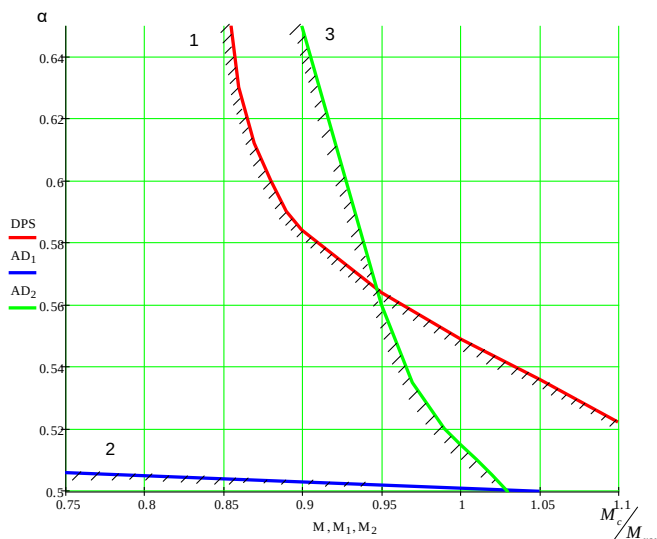


Рисунок 3.11 – Визначення зони стійкості різних типів привода ПДА

На рис. 3.11 кривою 1 вказано границю стійкості системи приводу постійного струму, 2 – асинхронного приводу зі спільним ПЧ, 3 – асинхронного приводу з індивідуальними ПЧ. Штриховкою вказано стійку зону.

Аналіз отриманих на рис. 3.10 та 3.11 результатів, а також порівняння з результатами на рис. 2.16 дають змогу зробити такі висновки:

- стійкість системи приводу ПДА значною мірою залежать від швидкості обертання шнековалів, величини та нерівномірності їх завантаження;
- система приводу зі спільним ПЧ значно поступається за динамічними

властивостями системи з індивідуальними та має значно меншу перевантажувальну здатність;

- система асинхронного приводу з індивідуальними ПЧ за динамічними властивостями не поступається системі постійного струму в умовах незначного статичного моменту ($M_{ст} \leq 0.95M_{ном}$) та може працювати зі значною нерівномірністю завантаження шнековалів.

- перевагою привода постійного струму є його перевантажувальна здатність на низьких швидкостях обертання, чого досягти в асинхронному приводі можливо за умови використання систем векторного керування та збільшення номінальної потужності частотних перетворювачів.

Ще однією важливою характеристикою в порівнянні типів привода є пусковий момент, оскільки в реальних виробничих умовах дифузійний апарат досить часто доводиться зупиняти та розганяти з повним завантаженням. Такий показник з однаковою номінальною потужністю значно вищий у привода постійного струму. Тому для забезпечення надійного запуску ПДА з повним завантаженням при використанні асинхронного приводу необхідно збільшувати номінальну потужність ПЧ та запровадження більш досконалих алгоритмів векторного керування.

До поданого вище варто також врахувати економічні показники. Основне обладнання при використанні привода постійного струму складають два двигуни постійного струму, один тиристорний перетворювач (керований випрямляч), система керування та індикації роботи привода, при використанні асинхронного приводу – два асинхронних двигуни, два перетворювачі частоти та система керування та індикації роботи привода. Досить часто декілька або усі ці елементи дублюють з метою забезпечення резерву.

Встановлено, що загальна вартість основного обладнання асинхронного приводу більша за вартість основного обладнання привода постійного струму однакової потужності приблизно в 1,5-2 рази. Якщо врахувати вказану вище необхідність завищення номінальної потужності ПЧ асинхронного приводу це співвідношення збільшується до 2,5-3 разів. Крім цього вартість встановлення

та монтажу відрізняється в 5-7 разів на користь системи приводу постійного струму.

Витрати на експлуатацію та сезонне налагоджування в асинхронному приводі значно нижчі від приводу постійного струму. Крім цього варто згадати більший строк служби асинхронних двигунів у порівнянні з двигунами постійного струму, що зменшує амортизаційні відрахування на їх заміну. Однак як уже зазначалось вище, використання асинхронного приводу доцільне з технічного боку при використанні алгоритмів векторного керування, що здорожує систему керування та вимагає додаткових витрат на розробку нової на заміну вже існуючій.

Запровадження асинхронного частотно-регульованого приводу може бути економічно доцільним при монтажу нового обладнання. Однак, на теперішній час, враховуючи стан цукрової галузі, основним типом приводу ПДА залишається груповий електропривод постійного струму, який використовується на 90-95% підприємств. Економічний їх стан у більшості випадків не дозволяє значних капіталовкладень в технічне переоснащення. Тому надзвичайно важливим є забезпечення стійкої роботи системи електропривода ПДА постійного струму в усьому діапазоні зміни експлуатаційних параметрів за рахунок модернізації вже існуючої системи керування.

Підсумовуючи вище викладене, можна зробити висновок, що в даний час використання приводу постійного струму технічно й економічно є більш обґрунтованим.

3.3 Узагальнена структурна схема САК приводом ПДА

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 гостро постає задача синтезу такої системи автоматизованого керування приводом ПДА, де було б враховано вищі сказані аспекти. Розв'язання цієї задачі вимагає розробки методів та засобів вимірювання як механічних, так і електричних, параметрів, а також алгоритмів обробки даних та керування.

Варто зазначити, що пропонована система автоматизованого керування приводом ПДА (рис. 3.12), 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.

В традиційному приводі постійного струму спосіб синхронізації швидкості обертання полягає в послідовному ввімкненні якірних обмоток двигунів. Можливість керування швидкістю обертання окремого двигуна відсутня. При побудові систем асинхронного частотно-регульованого основного приводу для синхронізації обертання може бути використаний блок вимірювання механічних параметрів.

Першочерговим завданням є контроль механічних параметрів приводу 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 відносяться швидкості обертання нижнього ω_1 та верхнього ω_2 двигунів та відносний кут закручування валів двигунів $\Delta\theta$. Останній параметр характеризує нерівномірність завантаження шнековалів та перебуває в залежності з коефіцієнтом α .

Вимірювання швидкості обертання двигунів основного привода дає змогу синтезувати системи автоматичного керування встановленого режиму роботи ПДА, а також можуть бути використані для синхронізації обертання двигунів при побудові систем асинхронного приводу з частотним регулюванням.

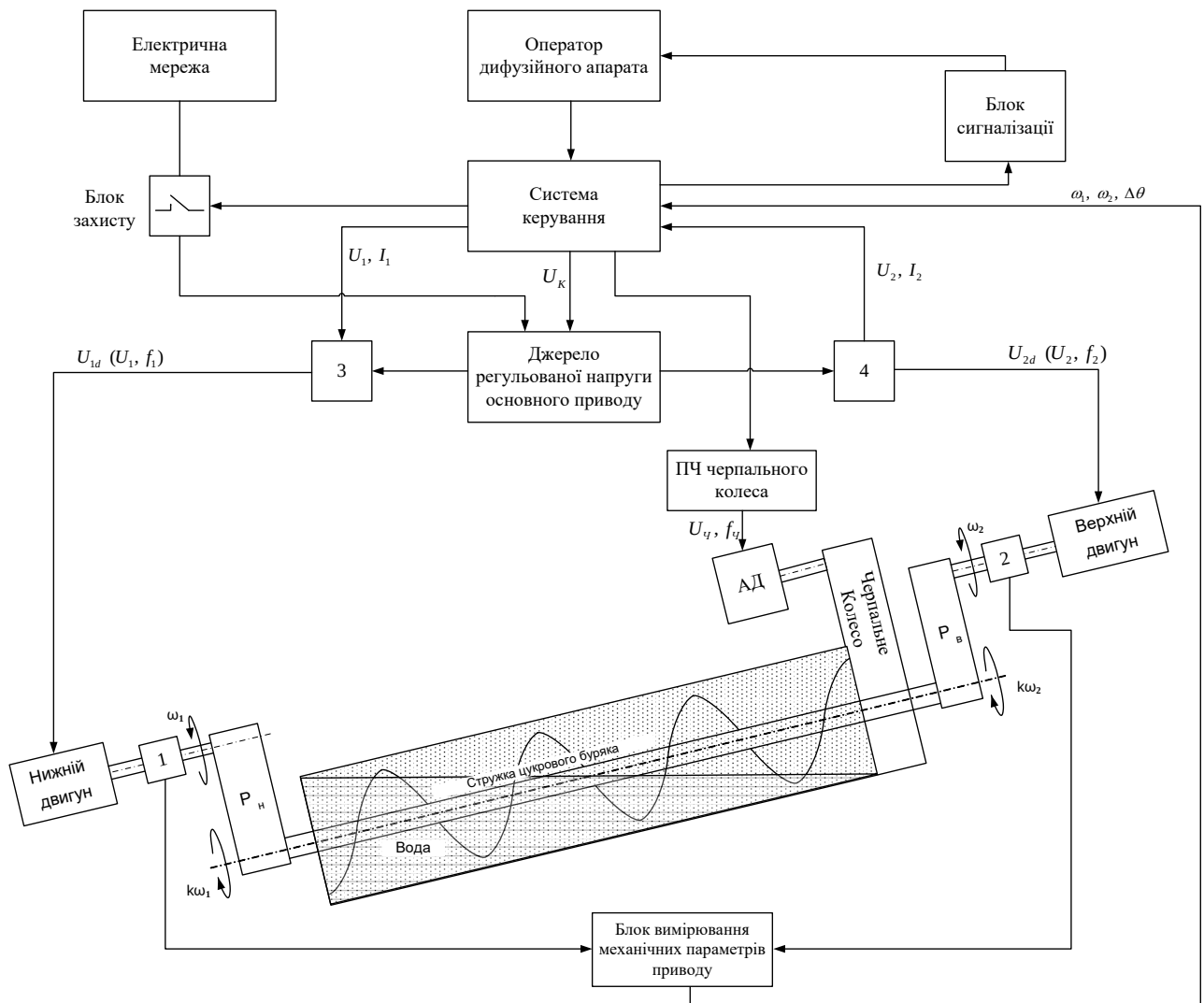


Рисунок 3.12 – Структурна схема системи автоматизованого керування приводом ПДА

Також пропонована 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 пропонованій системі черпальне колесо приводиться в рух частотно-регульованим приводом. Основною цільовою функцією такого регулювання є:

$$\Delta\theta_{-} \rightarrow \min, \quad (3.10)$$

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

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

Реалізація запропонованої системи автоматизованого керування приводом ПДА потребує розробки засобів та алгоритмів роботи окремих блоків та пристроїв цієї системи, що буде викладено нижче.

3.4 Вимірювання механічних параметрів привода ПДА

До контрольованих механічних параметрів привода ПДА належать швидкості обертання нижнього ω_1 та верхнього ω_2 двигунів та відносний кут повороту валів двигунів $\Delta\theta$.

На рис. 3.13 схематично зображено сенсорну структуру вимірювального каналу (ВК) відносного кута повороту валів, яка складається з двох сенсорів повороту (обертання) валів двигунів, що мають пружний зв'язок через редуктори та шнековали ПДА та обертаються з кутовими швидкостями ω_H та ω_B відповідно.

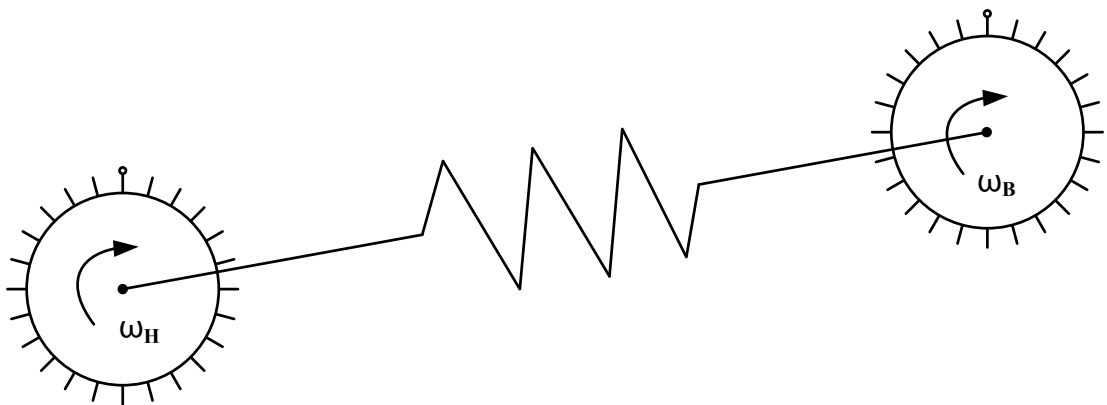


Рисунок 3.13 – Сенсори повороту валів двигунів

Сенсор повороту валу має Z міток, а кут між двома сусідніми мітками:

$$\theta_0 = \frac{360^\circ}{Z}. \quad (3.10)$$

На рис. 3.14 подана структурна схема ВК відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА. Пояснюють його принцип роботи часові діаграми (рис. 3.15)

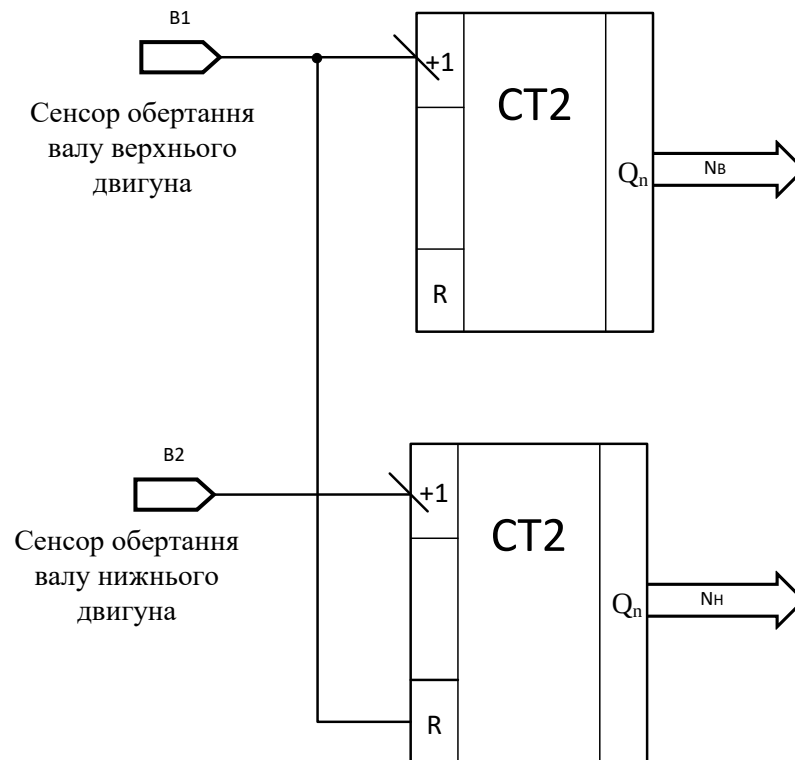


Рисунок 3.14 – Структурна схема ВК відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА

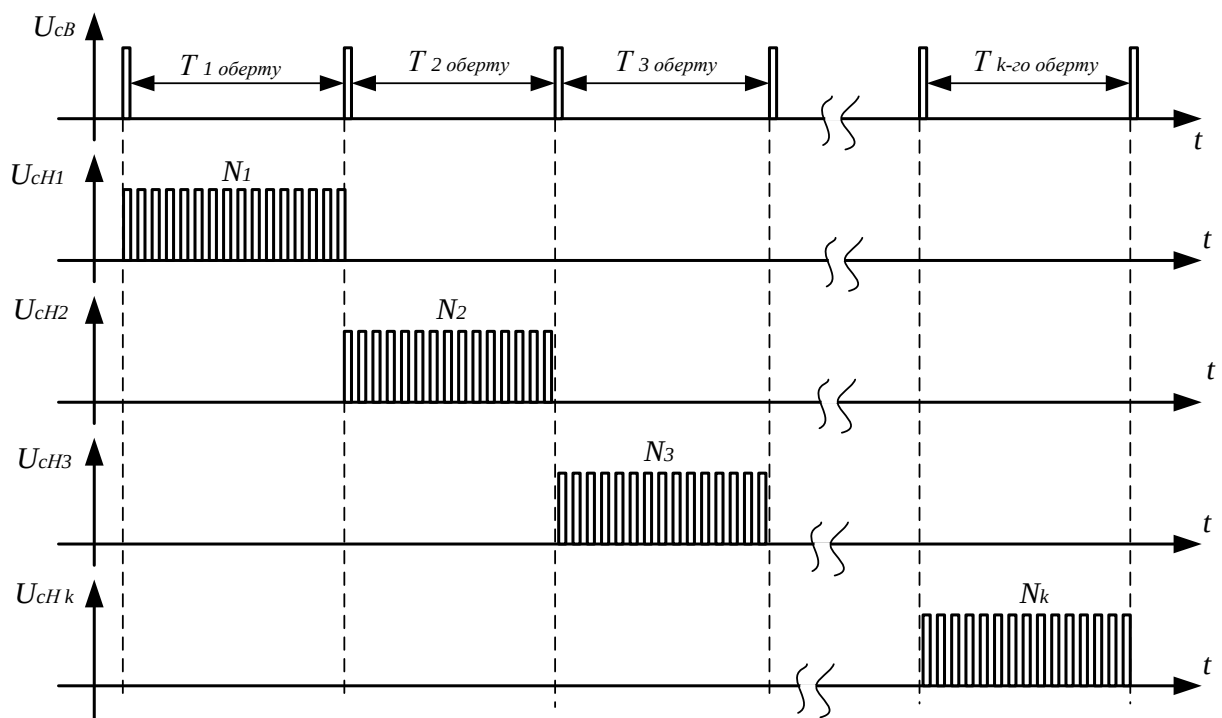


Рисунок 3.15 – Часові діаграми роботи ВК відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА

Нульова мітка сенсора обертання верхнього двигуна відмічає його оберт. При проходженні вперше за час роботи ПДА нульової мітки біля чутливого елементу сенсора верхнього двигуна відкривається система збігу і починається підрахунок міток, що проходять біля чутливого елементу сенсора обертання нижнього двигуна, який закінчується при наступному її проходженні. Тобто за цей час вал верхнього двигуна зробить один повний оберт або $\theta_{B1} = 360^\circ$, а вал нижнього двигуна повернеться на кут:

$$\theta_{H1} = N_1 \cdot \theta_0,$$

де N_1 – кількість міток, підрахована двійковим лічильником.

Тоді відносний кут між двома валами двигунів за час першого оберту верхнього двигуна, тобто на момент другого проходження нульової мітки його сенсора, складе:

$$\Delta\theta_1 = \theta_{H1} - \theta_{B1} = N_1 \cdot \theta_0 - 360^\circ.$$

Отримане значення кута заноситься до регістру і в цей же момент стартує підрахунок міток сенсора нижнього двигуна за другий оберт верхнього. Вали верхнього і нижнього двигунів за цей час обернуться на кути $\theta_{B2} = 360^\circ$ та $\theta_{H2} = N_2 \cdot \theta_0$ відповідно, а відносний кут між валами зміниться на величину $\Delta\theta_2 = N_2 \cdot \theta_0 - 360^\circ$. У випадку коли за цей оберт лічильник підрахує Z міток, то це означатиме, що відносне положення валів протягом цього часу не змінилось. В будь якому іншому випадку відносний кут повороту валів двох двигунів на момент проходження втретє нульової мітки сенсора на валу верхнього двигуна визначиться як сума його значень за два оберти:

$$\Delta\theta_{\Sigma(2)} = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 = (N_1 + N_2) \cdot \theta_0 - 2 \cdot 360^\circ$$

Далі вимірювання проводиться циклічно, і в момент проходження кожної нульової мітки сенсора верхнього двигуна результат, отриманий за попередній період, додається до вже отриманого раніше значення.

Аналогічно можна записати відносний кут, на який закрутяться вали двигунів за k -й оберт верхнього двигуна:

$$\Delta\theta_k = N_k \cdot \theta_0 - 360^\circ. \quad (3.11)$$

А відносний кут на момент завершення k -го оберту верхнього двигуна визначиться як їх сума значень за окремі його оберти:

$$\Delta\theta_{\Sigma K} = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \dots + \Delta\theta_k = (N_1 + N_2 + \dots + N_k) \cdot \theta_0 - K \cdot 360^\circ = \theta_0 \sum_{k=1}^K N_k - K \cdot 360^\circ,$$

або, якщо позначити $N_{\Sigma K} = \sum_{k=1}^K N_k$, отримаємо:

$$\Delta\theta_{\Sigma K} = \theta_0 \cdot N_{\Sigma K} - K \cdot 360^\circ \quad (3.12)$$

Визначимо з рівняння (3.11) кількість підрахованих двійковим лічильником міток сенсора нижнього двигуна за k -й оберт верхнього:

$$N_k = \frac{\Delta\theta_k + 360^\circ}{\theta_0} = \frac{\Delta\theta_k}{\theta_0} + \frac{360^\circ}{\theta_0}.$$

Враховуючи (3.10) після певних перетворень отримаємо:

$$N_k = \frac{Z}{360^\circ} \Delta\theta_k + Z. \quad (3.13)$$

Отримане рівняння є рівнянням перетворення розробленого вимірювального каналу за один цикл, яким є повний оберт верхнього двигуна. Його статична характеристика наведена на рис. 3.16.

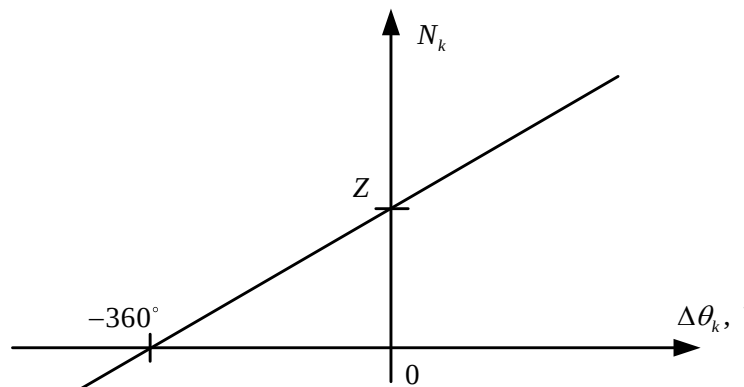


Рисунок 3.16 – Статична характеристика ВК відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА

Похибка квантування визначається за виразом:

$$\delta_k \% = \frac{1}{N} 100\% = \frac{1}{\frac{Z}{360^\circ} \Delta\theta_k + Z} 100\% \quad (3.14)$$

та представлена графічно на рис. 3.17.

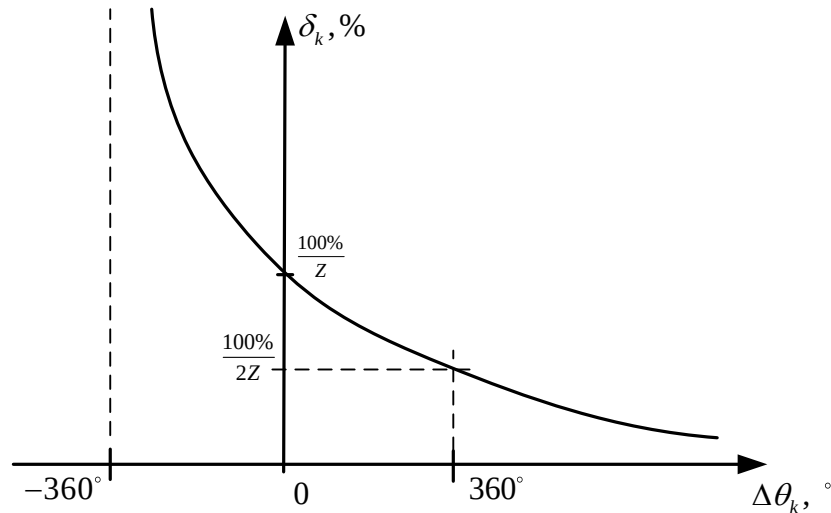


Рисунок 3.17 – Похибка квантування ВК відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА

З отриманої залежності видно, що похибка квантування зменшується зі збільшенням вимірюваної величини, а також залежить від кількості міток сенсорів повороту валу двигуна. Шляхом зменшення похибки квантування є використання енкодерів з більшою кількістю міток.

На основі описаного принципу дії ВК відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА можна розробити наступний алгоритм його роботи (рис. 3.18). Його робота полягає в наступному. Після ініціалізації системи відбувається підрахунок імпульсів, сформованих мітками сенсорів верхнього та нижнього двигунів. На наступному етапі за (3.11) визначається відносний кут повороту валів двигунів за час одного повного оберту верхнього двигуна після чого визначене значення додається до отриманого у попередньому циклі. Результат суми записується у пам'ять та передається до бази даних та за допомогою UART порта до системи моніторингу та керування приводом ПДА.

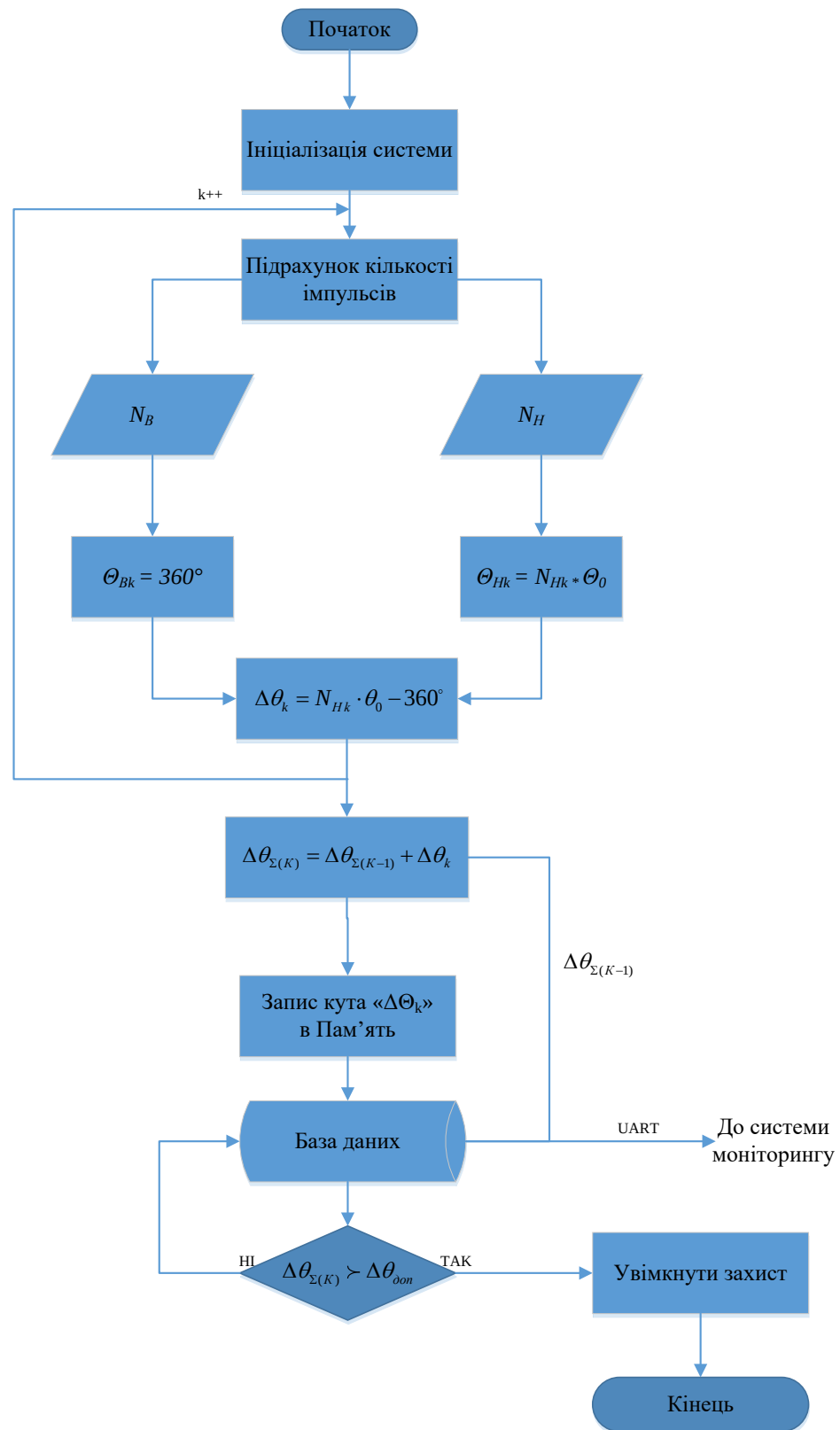


Рисунок 3.18 – Алгоритм роботи ВК відносного кута повороту валів двигунів привода ПДА

Крім цього поточне значення відносного кута повороту валів двигунів порівнюється з допустимим і в разі його перевищення подається сигнал ввімкнення захисту.

Варто зазначити, що відносний кут повороту валів двигунів приводу ПДА є приведеним до швидкості обертання двигунів кутом радіального закручування шнековалів ПДА і відрізняється передатнім числом редукторів, яке дорівнює 1:1250.

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 (рис. 3.19).

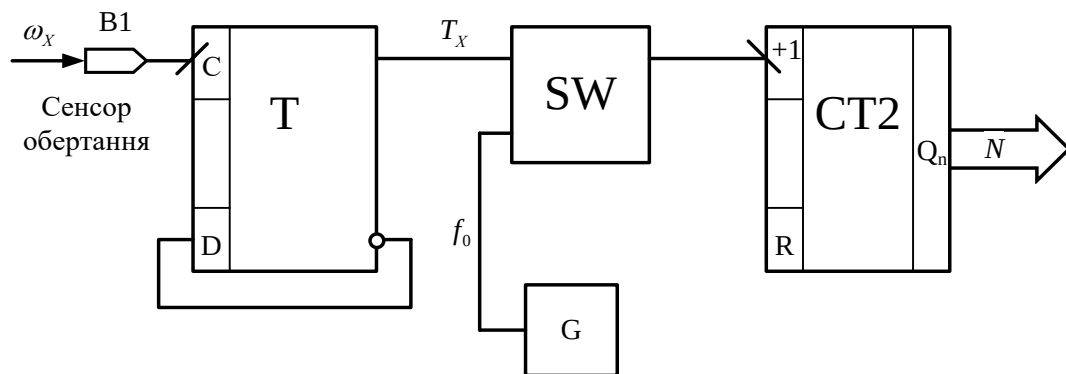


Рисунок 3.19 – Структурна схема ВК кутової швидкості

Принцип дії ВК кутової швидкості засновано на квантуванні часового проміжку проходження двох сусідніх міток сенсорів повороту валу T_x сигналами зразкової частоти. Даний процес ілюструють миттєві діаграми, зображені на рис. 3.20.

Кутова швидкість обертання валу дорівнює відношенню кута між двома сусідніми мітками $\frac{2\pi}{Z}$ до часу проходження їх біля чутливого елементу сенсора обертання валу T_x :

$$\omega_x = \frac{2\pi}{Z \cdot T_x}.$$

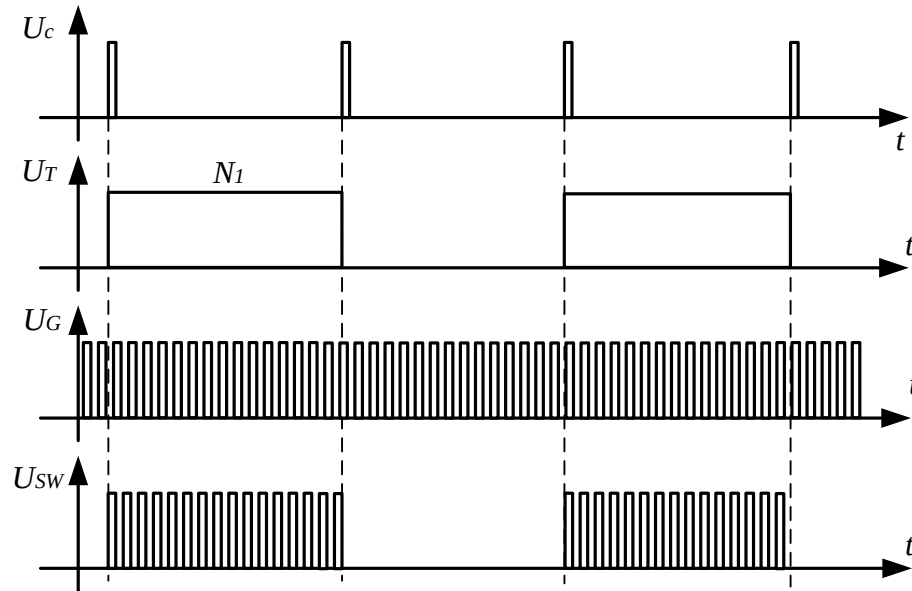


Рисунок 3.20 – Часові діаграми ВК кутової швидкості

Час T_x у схемі збігу SW квантується імпульсами зразкової частоти f_0 . Імпульси f_0 із виходу генератора G через відкриту схему збігу SW надходять на вхід двійкового лічильника СТ2. У лічильнику після закінчення кожного проміжку T_x формується код:

$$N = f_0 \cdot T_x = \frac{2\pi \cdot f_0}{Z \cdot \omega_x}. \quad (3.15)$$

Останнє співвідношення є рівнянням перетворення ВК кутової швидкості, графічне представлення (статична характеристика) якого подано на рис. 3.20.

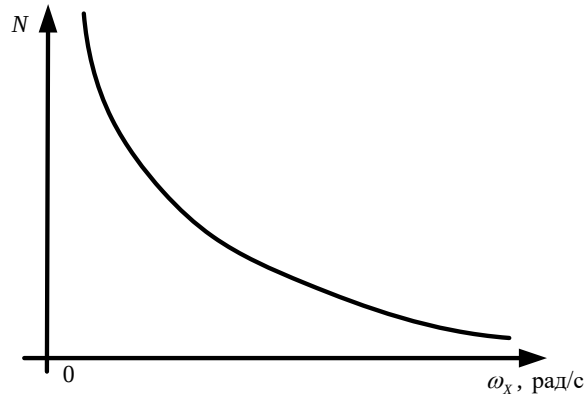


Рисунок 3.21 – Статична характеристика ВК кутової швидкості

Похибка квантування визначається за виразом:

$$\delta_{кв}, \% = \frac{1}{N} 100\% = \frac{Z \cdot \omega_x}{2\pi \cdot f_0} 100\% \quad (3.16)$$

та подана на рис. 3.22 у вигляді графічної залежності.

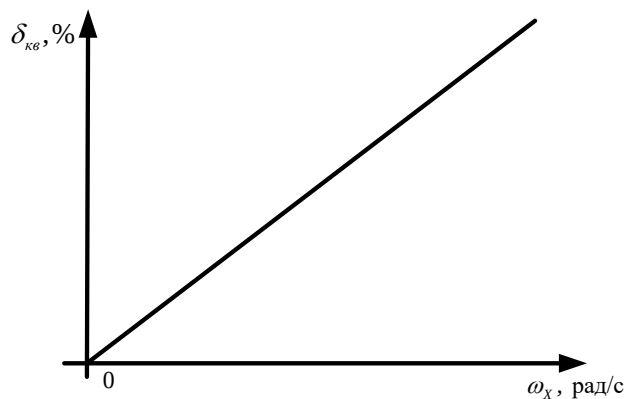


Рисунок 3.22 – Похибка квантування ВК кутової швидкості

Аналіз рівняння похибки квантування показує, що можливим шляхом зменшення $\delta_{кв}$ є збільшення частоти квантування f_0 , а також залежить від вимірювальної величини та числа міток сенсора обертання валу двигуна Z .

Дослідимо залежність похибки квантування вимірювальних каналів механічних параметрів ПДА від числа міток сенсорів обертання валу двигуна Z . Вони описуються рівняннями (3.14) та (3.16) та представлені на рис. 3.23.

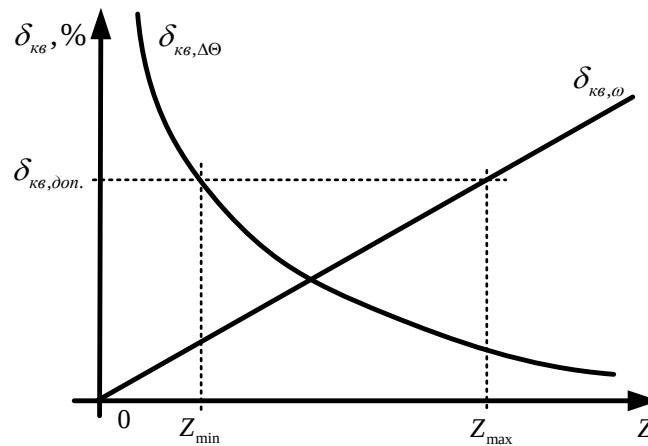


Рисунок 3.23 – Залежність похибки квантування від числа міток

Аналіз отриманих результатів показує, що кількість міток енкодерів задовольняє умову допустимої похибки квантування для ВК відносного кута повороту та ВК кутової швидкості обертання валів двигунів лише в певних межах $Z_{min} < Z < Z_{max}$. Розширення цього діапазону можливе за рахунок ВК кутової швидкості, використовуючи квантування не одного а двох сусідніх проміжків. В такому разі похибку квантування ВК можна зменшити.

Розроблені ВК відносного кута повороту та ВК кутової швидкості обертання валів двигунів дають змогу визначати механічні параметри, які характеризують роботу системи приводу ПДА з необхідною точністю та швидкодією. Це в свою чергу дозволить реалізувати таку систему автоматизованого керування, динамічні властивості якої будуть кращими за існуючу.

3.5 Вимірювання електричних параметрів привода ПДА

До контрольованих електричних параметрів в системі привода постійного струму належать струм роторних обмоток двигунів I_d та напруги U_{d1} й U_{d2} , що падають на кожному з них. На рис. 3.24 зображено структурну схему мікропроцесорного засобу вимірювання вказаних величин.

Вхідним аналоговим перетворювачем струму є сенсор на основі ефекту Холла, на виході якого генерується постійна напруга U_x . Рівняння перетворення такого сенсора описується виразом:

$$U_x = b \cdot I_d,$$

де b – коефіцієнт, що визначається конструкцією сенсора та є постійним за умови роботи в межах лінійної області гістерезису. Тобто його рівняння перетворення є лінійним.

При вимірюванні напруги в якості вхідних аналогових перетворювачів використовується вимірювальний підсилювач, виконаний на ізольованому операційному підсилювачі, що дозволяє, як і сенсор струму Холла, здійснити гальванічну розв'язку інформаційно-вимірювальних кіл від силового. Вони мають лінійні рівняння перетворення:

$$U_1 = k_{eU} U_{d1}, U_2 = k_{eU} U_{d2},$$

де k_{eU} – постійний коефіцієнт.

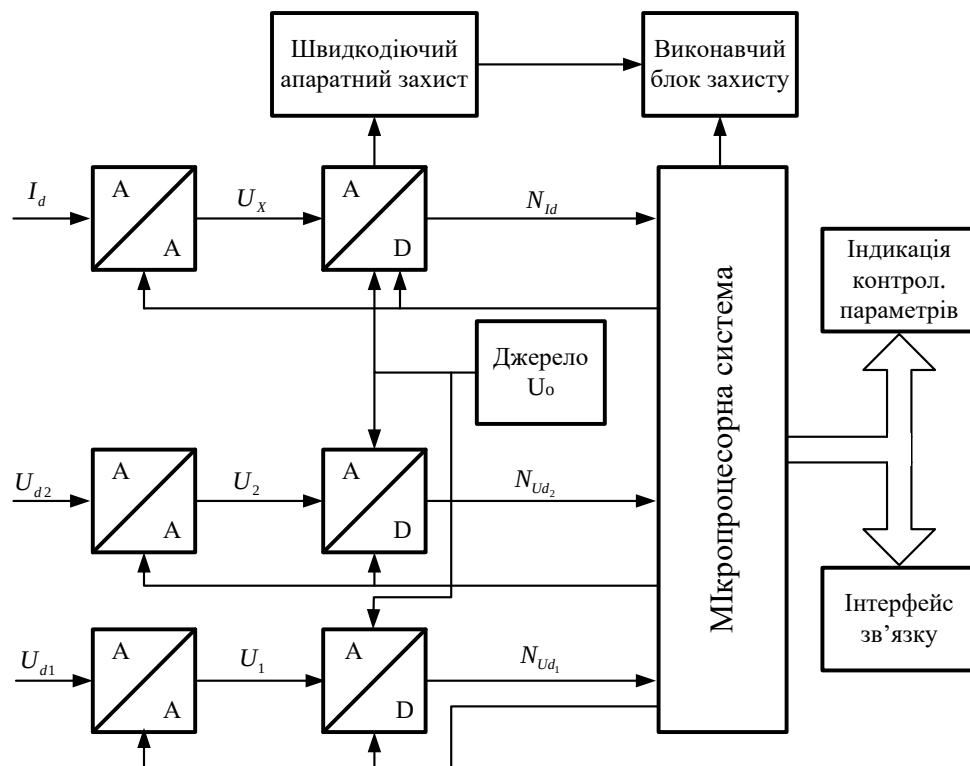


Рисунок 3.24 – Структурна схема засобу вимірювання електричних параметрів приводу постійного струму ПДА

Сигнали з виходів вхідних перетворювачів подаються на аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що служать основними вимірювальними перетворювачами. Вони під'єднанні до джерела високостабільної напруги U_0 , відносно якої проводяться вимірювання в АЦП. Рівняння перетворення АЦП має вигляд:

$$N_x = \frac{U_x}{U_0} \cdot (2^{n-1} - 1),$$

де n – розрядність АЦП.

Враховуючи подане співвідношення, а також рівняння перетворення вхідних вимірювальних перетворювачів, можемо отримати:

$$N_{I_d} = \frac{b}{U_0} (2^{n-1} - 1) \cdot I_d, \quad (3.17)$$

$$N_{U_d} = \frac{k_{\epsilon U}}{U_0} (2^{n-1} - 1) \cdot U_d. \quad (3.18)$$

Вирази (3.17) й (3.18) є рівняннями перетворення пропонованого мікропроцесорного засобу вимірювання для струму та напруг відповідно. Обидва рівняння є лінійними та відрізняються лише коефіцієнтом вхідних перетворювачів.

Виходи АЦП зв'язані з мікропроцесорною системою керування, яка здійснює аналіз отриманих даних та забезпечує їх індикацію та узгодження з іншими елементами системи автоматизованого керування приводом ПДА.

Визначимо похибку квантування засобу вимірювання для струму та напруг:

$$\delta, \% = \frac{1}{N_{I_d}} 100\% = \frac{U_0}{b \cdot (2^{n-1} - 1) \cdot I_d} 100\% \quad (3.19)$$

$$\delta, \% = \frac{1}{N_{U_d}} 100\% = \frac{U_0}{k_{\epsilon U} \cdot (2^{n-1} - 1) \cdot U_d} 100\% \quad (3.20)$$

На рис. 3.25 подано статичну характеристику засобу вимірювання для струму та його залежність похибки квантування від вимірювальної величини. Аналізуючи вирази (3.19) та (3.20), видно, що похибка квантування обернено

пропорційна вимірювальним величинам, а також визначається розрядністю АЦП.

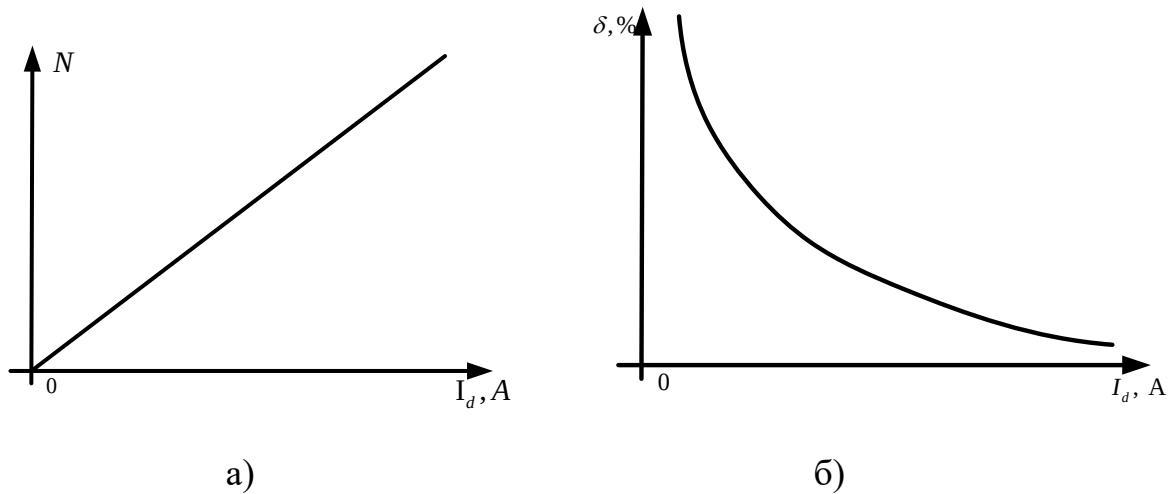


Рисунок 3.25 – Теоретичні статична характеристика (а) та залежність похибки квантування (б) засобу вимірювання струму

Розроблений засіб дозволяє визначити напруги на нижньому та верхньому двигуні окремо. За цими значеннями мікропроцесорна система обчислює також значення загальної напруги приводу, як суми двох напруг двигунів

$$U_d = U_{d1} + U_{d2},$$

а також різниці цих напруг

$$\Delta U = U_{d1} - U_{d2}.$$

Значення загальної напруги може бути використане для зворотного зв'язку за напругою системи автоматичного керування приводом ПДА. Обчислене значення різниці напруг використовується для організації високоточного диференційного захисту за електричними параметрами. У разі перевищення певної уставки значення різниці напруг на двигунах приводу мікропроцесорна система приводить в дію виконавчий блок захисту та зупиняє роботу ПДА.

Виміряне значення струму в системі автоматизованого керування використовується для ефективного струмообмеження, що дозволяє запобігти перевантаженню двигунів приводу. Засіб також оснащений швидкодіючим

максимальним струмовим захистом від надструмів у приводі, спричинених різними негативними факторами.

3.6 Висновки

В розділі розроблено математичні моделі системи асинхронного приводу ПДА з частотним регулюванням для двох варіантів живлення АД: від спільного та індивідуальних ПЧ. На їх основі було проведено дослідження динамічних властивостей системи засобами імітаційного моделювання та дано порівняльну характеристику їх відносно системи приводу постійного струму.

В результаті було встановлено, що система асинхронного приводу ПДА зі спільним ПЧ має низькі показники якості перехідних процесів, особливо в режимах близьких до номінального, а тому може бути використана лише в умовах завантаження значно нижчих паспортних даних АД. Система приводу з індивідуальними ПЧ при використанні скалярної системи синхронізації обертання двигунів володіє динамічними властивостями, які поступаються системі постійного струму лише при навантаженні близько та більше номінального, та може працювати зі значними значеннями коефіцієнту нерівномірності завантаження шнековалів. При порівнянні техніко-економічних показників різних типів приводів зроблено висновок, що в сучасних умовах використання системи приводу постійного струму залишається більш доцільним за впровадження асинхронного з частотним регулюванням.

З метою покращення динамічних властивостей системи та зменшення негативного впливу на них нерівномірності завантаження вздовж шнековалів було запропоновано узагальнену структурну схему системи автоматизованого керування приводом ПДА, як електро-технічного комплексу, що включає в себе керування, як основним, так і допоміжними приводами. Така система, на від існуючих, по перше, має здатність враховувати нерівномірність завантаження шнековалів, а по друге має засоби впливати на неї. Для цього систему оснащено

засобами вимірювання електричних та механічних параметрів приводу, що характеризують його роботу. На основі виміряних значень та заданої оператором уставки мікропроцесорна система керування формує вхідні завдання для джерел регульованої напруги основного та допоміжного приводів.

Також у розділі розроблено методи й структурні схеми засобів вимірювання контрольованих параметрів та проведено оцінку їх метрологічних характеристик.

Створена структурна схема є універсальною та може бути використана для реалізації у системі приводу постійного струму та системі асинхронного приводу з частотним регулюванням.

Впровадження запропонованої системи автоматизованого керування вимагає розробки функціональних схем її реалізації, а також алгоритмів, за якими буде здійснено вимірювання основних параметрів та керування основним та додатковими приводами. З метою оцінки ефективності використання такої системи необхідно провести експериментальні дослідження в умовах виробництва.

Результати, отримані у розділі 3 висвітлено у [11] – [12].

РОЗДІЛ 4

АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА.

Впровадження основних результатів досліджень поданих в попередніх розділах вимагає апаратної реалізації системи автоматизованого керування ПДА, що включає в себе розв'язання ряду задач:

- синтезу функціональних та принципових електричних схем на основі отриманих в розділі 3 структурних схем системи в цілому та пристроїв контролю основних параметрів приводу, зокрема, з використанням мікропроцесорної техніки;
- розробка методів та засобів обробки даних вимірювальних сенсорів;
- визначення законів регулювання основним приводом постійного струму та частотно-регульованим приводом черпального колеса, а також дослідження їх ефективності;
- розробка алгоритмів роботи мікропроцесорної системи автоматизованого керування приводом ПДА, як електромеханічним комплексом;
- фізична реалізація розробленої системи та експериментальні дослідження ефективності її роботи в умовах виробництва.

Крім цього існує задача реалізації засобів захисту приводу ПДА, як в межах мікропроцесорної системи, так і окремими пристроями. У такому разі можна буде підвищити надійність системи приводу, в якій не передбачено встановлення мікропроцесорної системи в цілому.

4.1 Функціональні схеми системи автоматизованого керування приводом похилого дифузійного апарату

Для реалізації поставлених задач спочатку необхідно синтезувати електричну принципову схему системи приводу ПДА, як електромеханічного комплексу, що включає в себе основний та усі допоміжні приводи. Така схема подана на рис. 4.1.

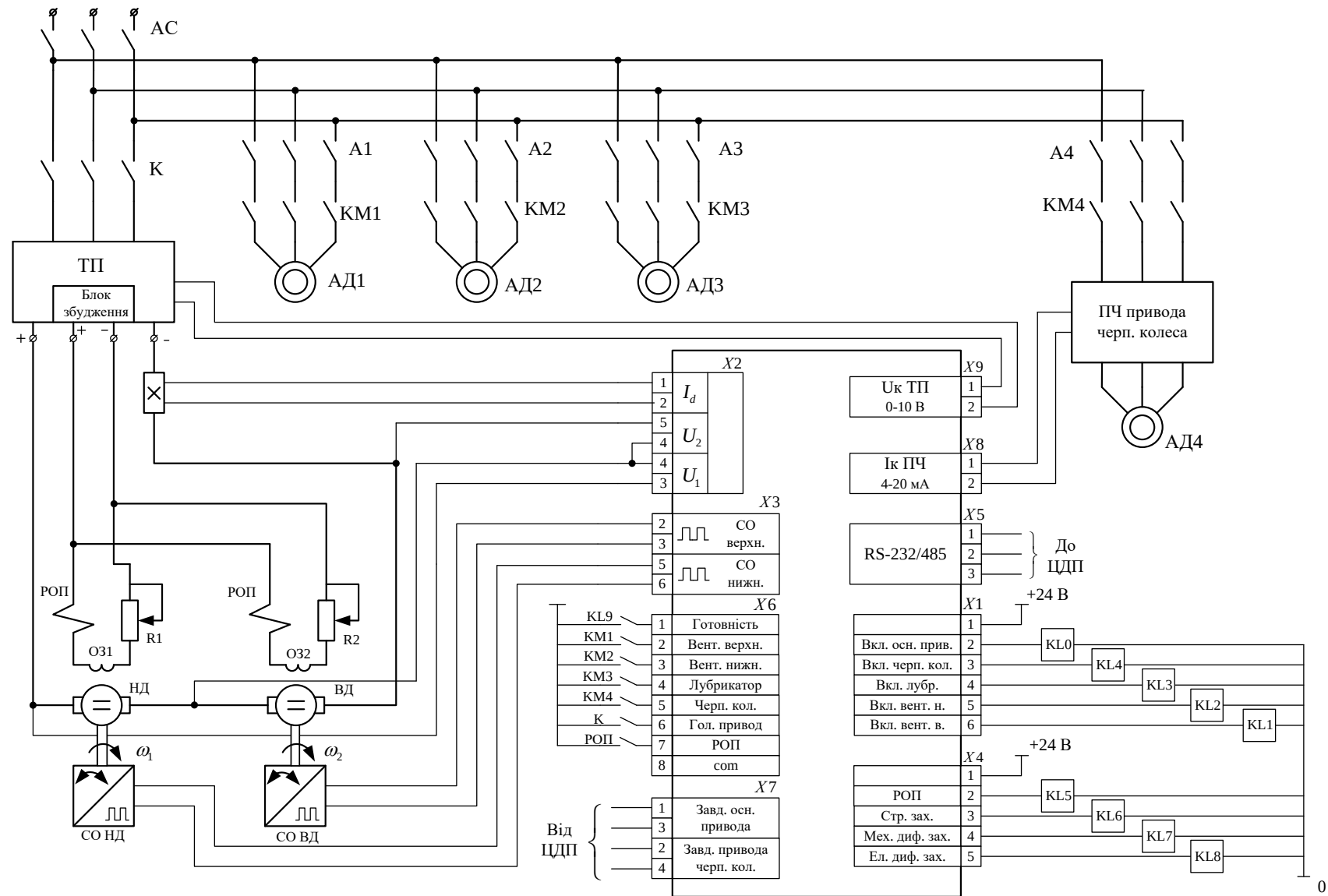


Рисунок 4.1 – Схема електрична принципова системи привоу ПДА

Силова частина схеми складається з основного приводу та приводів допоміжних механізмів та живиться від трифазної мережі промислової частоти з лінійною напругою 380 В через автоматичний вимикач АС.

Електромагнітним контактором К до неї під'єднується тиристорний перетворювач, що є джерелом регульованої напруги для двох послідовно ввімкнених роторних обмоток двигунів постійного струму НД та ВД. ТП також містить блок збудження, що живить обмотки збудження ОЗ1, ОЗ2 через обмотки реле обриву поля РОП, які здійснюють захист двигунів основного приводу від втрати збудження. Реостати R1 та R2 слугують для вирівнювання механічних характеристик двигунів за рахунок регулювання струмів збудження кожного з двигунів окремо.

Асинхронні двигуни АД1, АД2, АД3 приводять в рух допоміжні механізми приводу (вентилятори охолодження двигунів основного приводу, лубрикатор) та підключаються до мережі електромагнітними контакторами КМ1, КМ2, КМ3 відповідно. Для їх захисту служать автоматичні вимикачі А1, А2, А3.

Черпальне колесо приводиться асинхронним двигуном АД4 з частотним регулюванням, яке забезпечує ПЧ черпального колеса. Він живиться від мережі через електромагнітний контактор КМ4 та захищений автоматичним вимикачем А4.

На схемі рис. 4.1 також зображено усі зв'язки силової частини приводу з системою її автоматизованого керування, принципову електричну схему якої подано на рис. 4.2.

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 мікроконтролером DD1, до якого поступають через узгоджуючі транзисторні ключі VT5, VT7. Це цифровий сигнальний контролер серії C2000 Piccolo від TexasInstruments на ядрі MIPS. Його основна галузь застосування – вимірювання та САК реального часу. На цей контролер покладено завдання вимірювання, обробки та аналізу лише механічних параметрів приводу.

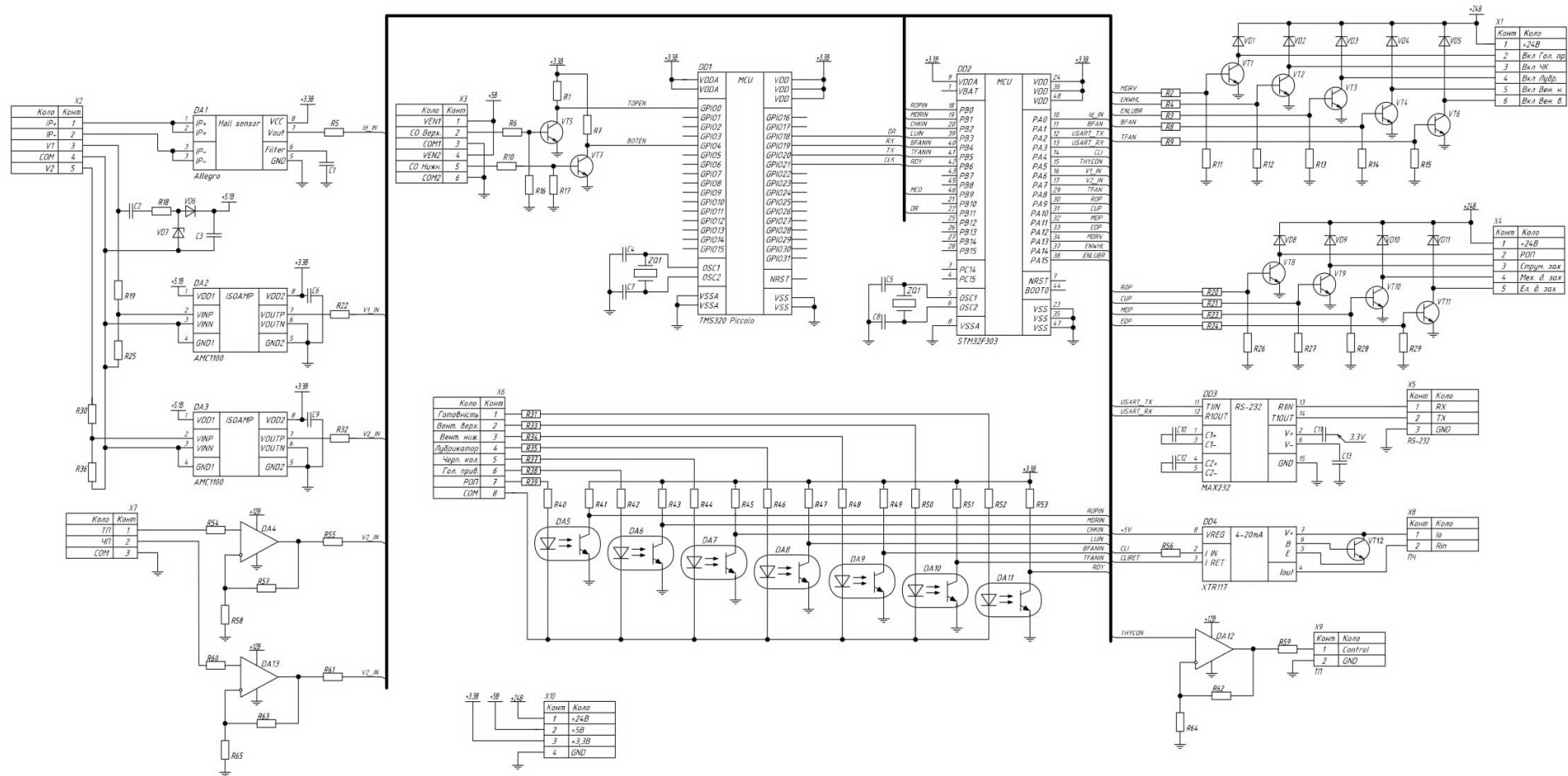


Рисунок 4.2 – Схема електрична принципова мікропроцесорної системи автоматизованого керування приводом ПДА

Контролер DD1 має зв'язок з основним мікроконтролером DD2. Це мікроконтролер загального призначення серії F3 виробництва STMicroelectronics, на ядрі ARM Cortex-M4.

На нього покладено усі інші функції системи керування, до яких, зокрема, належать вимірювання електричних параметрів приводу, до яких належать напруги роторних обмоток двигунів та струм, що протікає через них. Вихід сенсора струму, заснованого на ефекті Холла, а також потенціальні провідники від двигунів зведено на клемну колодку X2. Обробка даних сенсора струму здійснює мікросхема DA1, а для вимірювання напруг використано ізольовані операційні підсилювачі DA2 та DA3.

Система має декретні входи, через які до неї поступає інформація за станами електромагнітних контакторів та реле (клемна колодка X6). Гальванічна розв'язка та узгодження рівнів напруг відбувається за допомогою оптопар DA5 – DA11

Для включення електромагнітних контакторів використовуються дискретні виходи DD2, що подають напругу на проміжні реле KL0 – KL4, які включають відповідні електромагнітні контактори (К, КМ1 – КМ4). Також дискретні виходи відключають привод у разі виникнення небажаного режиму роботи, диференціюючи причини їх виникнення: реле обриву поля, максимальний струмовий захист, диференційний захист за електричними та механічними параметрами, включаючи відповідні реле KL5 – KL8. Виконавчими елементами дискретних виходів є транзисторні ключі VT1 – VT11, колектори яких виведені на клемні колодки X1 та X4.

Від оператора до мікропроцесорної системи автоматизованого керування через аналогові входи (колодка X7) подаються уставки обертів основного приводу та приводу черпального колеса. Система, ґрунтуючись на значеннях цих уставок, а також контрольованих параметрів, за певними законами визначає рівень сигналів на аналогових виходах, які подаються на вхід ТП основного приводу та ПЧ приводу черпального колеса.

На вхід ТП подається сигнал 0 – 10 В, а на вхід ПЧ 4 – 20 мА. Вихідними формувачами аналогових виходів є операційний підсилювач DA12 у першому випадку та мікросхема DD4 – у другому.

Важливим завданням системи є зв'язок та узгодження її роботи з центральним диспетчерським пунктом, який здійснюється за допомогою інтерфейсу RS 232/485, по протоколу ModBus RTU. Дані про роботу приводу ПДА інтегруються в систему керування технологічним процесом бурякопереробного відділення. Візуалізація режиму роботи системи приводу, здійснена програмно на вищому рівні допомагає в організації найбільш оптимального керування технологічним процесом.

4.2 Розробка законів регулювання та алгоритмів роботи системи автоматизованого керування приводом ПДА

4.2.1 Обробка даних та розробка законів регулювання основним приводом та приводом черпального колеса

Для забезпечення працездатності системи, що розробляється, постає задача розробки алгоритмів її роботи. Для цього, перш за все, необхідно створити математичне забезпечення обробки даних та законів регулювання.

Як було вже зазначено вище система оснащена засобами вимірювання наступних величин: напруга нижнього та верхнього двигунів, струм їх роторних обмоток (електричні параметри), відносний кут повороту валів двигунів, їх швидкості обертання (механічні параметри). Деякі параметри приводу, такі як сумарна напруга приводу, різниця напруг двигунів та різниця їх швидкостей обертання, визначаються шляхом обчислень.

Вимірювання та обчислення цих величин відбувається циклічно через певний інтервал часу або за час обертання валу двигуна на фіксований кут весь час роботи приводу. Тому для здійснення моніторингу та оцінки зміни параметрів у часі постає задача математичної обробки отриманих даних, що, в

свою чергу, дозволить розробки та здійснення оптимального регулювання керованими приводами системи.

Розглянемо почергово математичні операції, які мусить здійснювати система для отримання достатньо-інформативної картини про розвиток процесів у часі з кожним із контрольованих параметрів.

Структурні схеми засобів вимірювання та їх метрологічні характеристики подані у розділі 3.

Обробку механічних параметрів приводу здійснює мікроконтролер DD1. Кутові швидкості двигунів здійснюються з циклічністю, яка дорівнює проміжку часу проходження двох сусідніх міток сенсорів обертання, тобто мінімальне значення цього часу буде:

$$t_{\omega \min} = \frac{60}{Z \cdot n_{\max}}. \quad (4.1)$$

З такою ж циклічністю здійснюється обчислення різниці швидкостей обертання за формулою:

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \quad (4.2)$$

Як показало імітаційне моделювання різних режимів роботи, проведене в розділі 2, а також спостереження в умовах виробництва за роботою привода в режимах близьких до описаних у [8], [9], [19-20], показали, що кутові швидкості двигунів не є постійною та можуть змінюватись в часі за законом близьким до синусоїдного накладеного на постійну складову, а їх різниця не містить постійної складової. Контроль за цими параметрами здійснюється за миттєвими значеннями та не передбачає подальших математичних перетворень. У разі перевищення $\Delta\omega$ допустимого значення, тобто за виконання умови $\Delta\omega > \Delta\omega_{\text{дон}}$, мікроконтролер здійснює аварійну зупинку привода ПДА, а при наближенні до цього значення подає попереджувальний сигнал до оператора.

Час між двома черговими вимірюваннями відносного кута повороту валів двигунів приводу складає періоду обертання валу верхнього двигуна, тобто:

$$t_{\Delta\Theta \min} = \frac{60}{n_{\max}}. \quad (4.3)$$

Вказані вище дослідження свідчать, що при роботі системи приводу ПДА можуть досить часто виникати режими, в яких відносний кут повороту валів двигунів змінюється у часі за складним непередбачуваним законом. На рис. 4.3 поданий можливий закон зміни цього параметру.

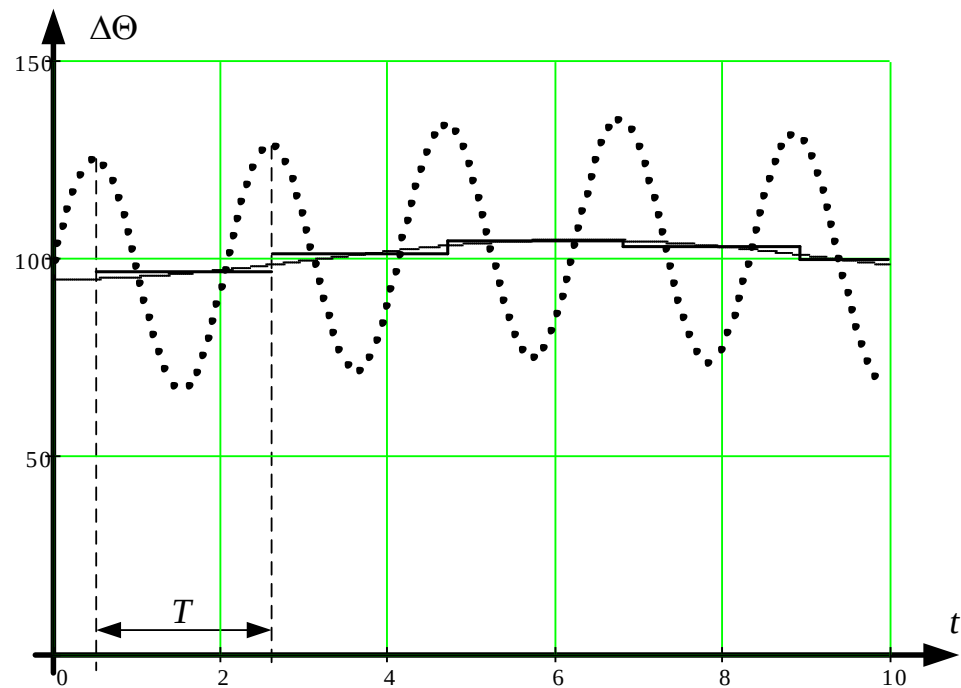


Рисунок 4.3 Графік зміни відносного кута повороту валів двигунів

Для якісної оцінки роботи приводу за цим параметром миттєвих значень не достатньо, а тому постає необхідність визначення його середнього та середньо-квадратичного значення в реальному часі. Крім того середнє значення відносного кута повороту валів, яке пов'язане передатнім числом редукторної системи з кутом закручування валу ПДА, опосередковано зв'язано з коефіцієнтом нерівномірності завантаження шнековалів та може слугувати його індикатором. Це зумовлює те, що саме середнє значення кута повороту валів двигунів визначає разом із уставкою оператора швидкість обертання черпального колеса, закони регулювання якої будуть досліджуватись нижче. Зміна швидкості розвантаження верхньої частини приводу впливає на нерівномірність завантаження вздовж шнеку.

Середнє значення відносного кута повороту валів двигунів визначається як середнє арифметичне отриманих за період даних:

$$\overline{\Delta\Theta} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta\Theta_k, \quad (4.4)$$

де $\Delta\Theta_k$ – значення кута в ході одного k -го вимірювання, а N – кількість вимірювання за період. Оскільки період зміни даної величини може змінюватись, то постає необхідність дослідного визначення періоду, як відстань між двома екстремумами функції з однаковим знаком похідної, як показано на рис. 4.3.

Середньо-квадратичне значення визначається за виразом:

$$\Delta\Theta_{CK} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^N \Delta\Theta_k^2} \quad (4.5)$$

Умовами зупинки приводу за цим параметром є співвідношення:

$$\Delta\Theta_k \succ \Delta\Theta_{don}, \quad \overline{\Delta\Theta} \succ \overline{\Delta\Theta}_{don}, \quad \Delta\Theta_{CK} \succ \Delta\Theta_{CKdon}. \quad (4.6)$$

Про наближення вказаних величин до допустимих значень подається попереджувальний сигнал оператору.

Грунтуючись на отриманих за виразами (4.4) та (4.5) даних, система обчислює вихідну дію для ПЧ приводу черпального колеса за одним з двох можливих законів регулювання, які подані на рис. 4.4 у вигляді структурних схем.

Найпростішим випадком регулювання є структурна схема, зображена на рис. 4.4, а. За нею до заданої оператором уставки U_s додається величина з виходу аперіодичної ланки, на вхід якої подається виміряне значення відносного кута повороту валів двигунів. Коефіцієнт передачі цієї ланки k_Θ вибирається таким чином, щоб забезпечити необхідне збільшення швидкості обертання черпального колеса, а її стала часу T_Θ забезпечує фільтрування змінної складової коливань відносного кута повороту вищої частоти до задовільного рівня, але не повинна бути значною для забезпечення швидкодії регулювання. Вихідне значення струму керування ПЧ черпального колеса

$I_{К_ПЧ}$ формується аперіодичною ланкою з коефіцієнтом передачі k_n та сталою часу T_n , на вхід якої подається сума вказаних вище величин. Її призначення забезпечення плавного регулювання.

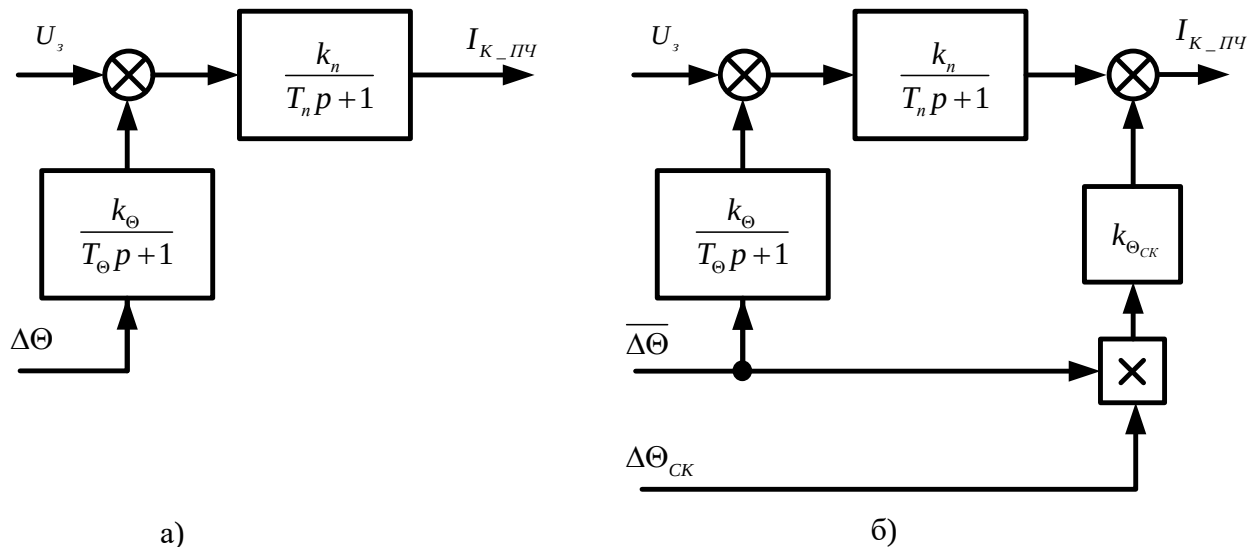


Рисунок 4.4 – Закони регулювання вхідною дією ПЧ черпального колеса

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

Нівелювати цей недолік покликаний канал регулювання, виконаний на основі структурної схеми, поданої на рис. 4.4, б. Вона відрізняється тим, що до обчисленого за попередньою схемою вихідного значення додається добуток $k_{\Theta_{СК}} \cdot \overline{\Delta\Theta} \cdot \Delta\Theta_{СК}$, 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. 4.5 подано результати моделювання законів регулювання ПЧ черпального колеса за наступних параметрів: $k_{\Theta} = 0,01 B/o$; $T_{\Theta} = 10c$; $k_n = 2 A/B$; $T_n = 1c$; $k_{\Theta_{CK}} = 5 \cdot 10^{-5} A/(^{\circ})^2$. Відносний кут повороту валів двигунів $\Delta\Theta$ змінюється в часі, як показано на графіку зверху.

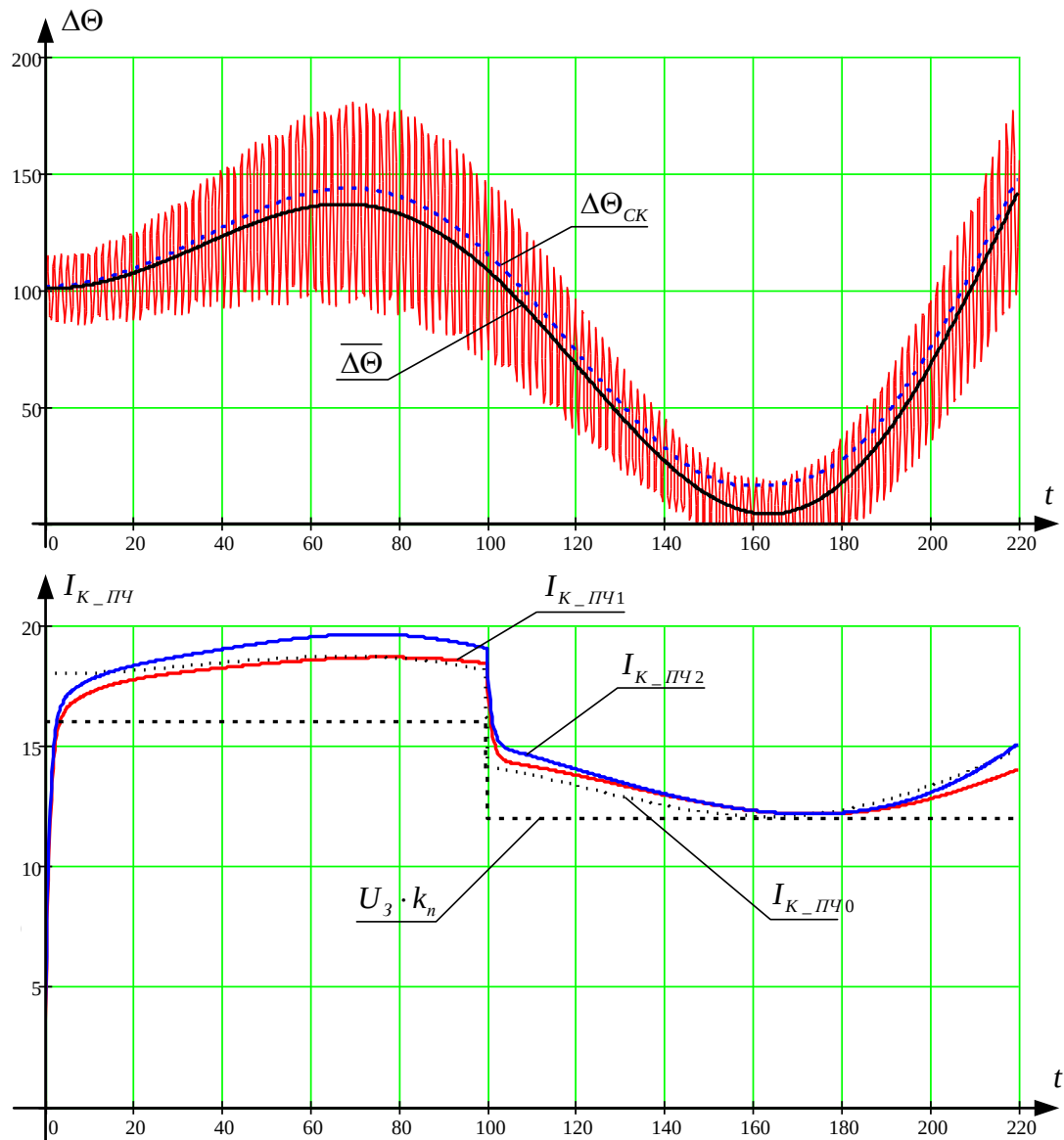


Рисунок 4.5 – Часові діаграми законів регулювання ПЧ черпального колеса

Часові діаграми подані за умови заданої оператором уставки $U_s = 8B$, яка в момент часу $t = 100c$ зменшується на 25 %. Результатом моделювання є вихідні дії системи $I_{K_ПЧ1}$, $I_{K_ПЧ2}$, обчислені за законами регулюваннями, поданими на рис 4.4, а та рис. 4.4, б відповідно.

Як видно з отриманих залежностей вихідна дія системи для ПЧ черпального колеса визначається уставкою оператора та середнім значенням відносного кута повороту валів двигунів, а у випадку вдосконаленого закону регулювання (рис. 4.4 б) ще й його середньо-квадратичним значенням.

Швидкість обертання асинхронного двигуна приводу черпального колеса регулюється ПЧ за лінійним законом регулювання, що разом з математичним описом АД, поданого на рис. 3.1, та рівнянням механіки дає змогу синтезувати наступну структурну схему.

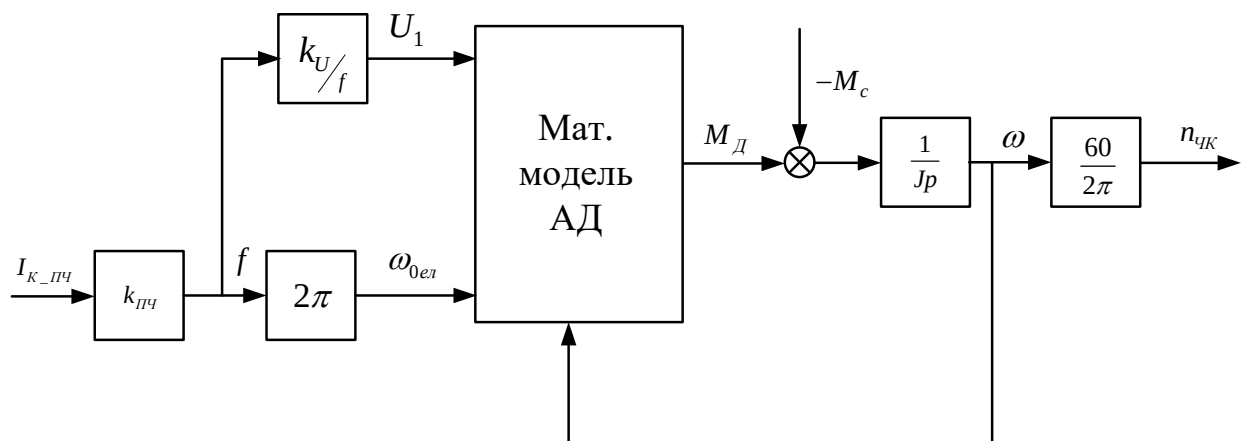


Рисунок 4.6 – Структурна схема керування швидкістю обертання ЧК

Таким чином швидкість обертання черпального колеса є функцією двох керуючих дій: уставка завдання та відносний кут повороту валів двигунів основного приводу ПДА. При практичній реалізації такого регулювання уставка завдання може бути пропорційна швидкості обертання основного приводу. В такому разі:

$$n_{чк} = f(\omega_{осн.пр.}; \Delta\theta). \quad (4.7)$$

При зростанні нерівномірності завантаження вздовж шнеків ПДА збільшується середнє значення кута закручування валу ПДА ($\Delta\Theta$ – його приведенє значення). В такому разі система підвищує швидкість обертання черпального колеса і верхня (більш завантажена частина ПДА) починає розвантажуватись швидше, що призводить до зниження нерівномірності завантаження та зменшення відповідного коефіцієнту.

Таким чином виконується цільова функція регулювання швидкістю обертання черпального колеса (3.16) та забезпечується покращення динамічних характеристик основного приводу ПДА.

Керування основним приводом ПДА ґрунтується на контролі електричних параметрів, серед яких вимірюються напруги на кожному двигуні та їх струм. За виміряними значеннями U_1 та U_2 обчислюються загальна напруга приводу:

$$U = U_1 + U_2 \quad (4.8)$$

та їх різниця:

$$\Delta U = U_1 - U_2. \quad (4.9)$$

За значенням різниці ΔU виконано диференційний захист за електричними параметрами приводу у відповідності до умови спрацювання:

$$\Delta U \geq \Delta U_{дон} \quad (4.10)$$

Умовою спрацювання максимального струмового захисту є співвідношення:

$$I \geq I_{дон}. \quad (4.11)$$

При наближенні вказаних параметрів до допустимих значень система інформує оператора за допомогою зв'язку з ЦДП.

Крім цього визначенні значення напруги та струму можуть бути використані для реалізації САК за протиЕРС, виконані за математичними моделями, поданими на рис.2.5, на основі засобів мікропроцесорної системи керування приводом ПДА, а не вбудованих засобів ТП.

4.2.2 Алгоритми функціонування мікропроцесорної системи автоматизованого керування

Описане вище дають змогу розробити алгоритми роботи МК DD1 та DD2. Як зазначалось, МК DD1 призначений для вимірювання та обробки даних механічних параметрів приводу, а алгоритм його роботи подано на рис. 4.7 – 4.8. Перша його частина виконує вимірювання швидкостей обертання нижнього та верхнього двигунів та відносного кута повороту їх валів та ґрунтується на положеннях отриманих у розділі 3.

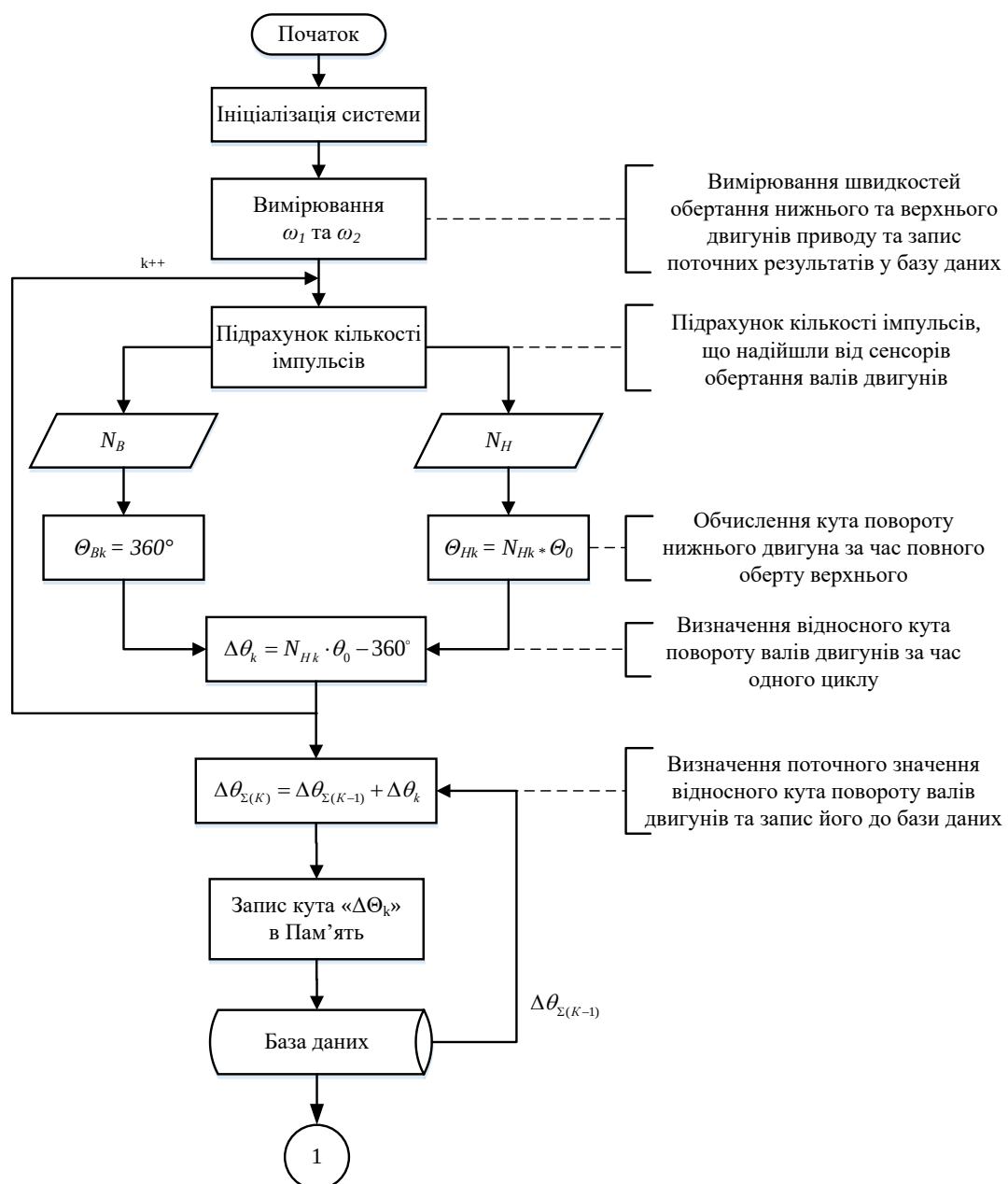


Рисунок 4.7 – Алгоритм роботи МК DD1

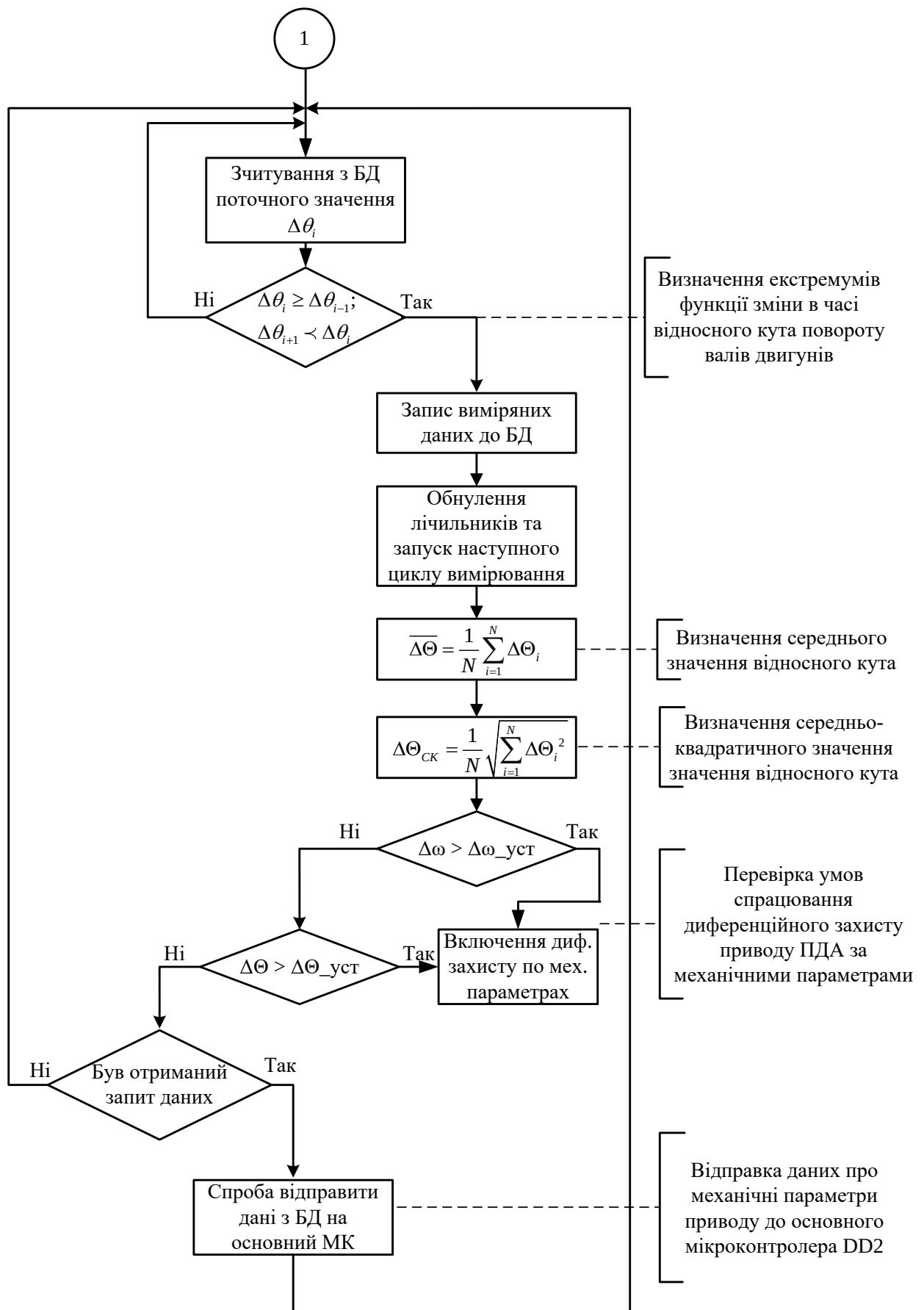


Рисунок 4.8 – Алгоритм роботи МК DD1 (продовження)

На другому етапі виконується обробка вимірних даних, що полягає у визначенні середнього та середньо-квадратичного значень відносного кута повороту валів. Після цього здійснюється перевірка виконання умов аварійної зупинки приводу за механічними параметрами (співвідношення 4.6). Також МК DD1 здійснює передачу даних по запиту до МК DD2.

Останній є основним та здійснює керування усією периферією системи автоматизованого керування приводом ПДА, як електромеханічним комплексом. Алгоритм його роботи подано на рис. 4.9 – 4.10.

Після ініціалізації відбувається обробка команд пуску периферійних приводів системи, що полягає у формуванні на дискретних виходах МК відповідних сигналів, а також очікуванні підтвердження про успішність їх включення. Пуск головного приводу можливий лише після того, як на дискретні входи прийдуть сигнали успішності включення усіх додаткових приводів. Зупинка головного приводу у разі відключення будь-якого додаткового прописано у перериваннях.

За умови успішного пуску основного приводу МК починає вимірювання напруг на двигунах та їх струму та здійснює запит до МК DD1 про отримання поточних даних про механічні параметри приводу. Отримана інформація записується до бази даних.

Наступним кроком є перевірка умов максимального струмового та диференційного за напругою на двигунах захистів (співвідношення (4.10 – 4.11)). Потім МК обчислює вихідні дії для ПЧ черпального колеса та ТП основного приводу за розробленими вище передатними функціями та формують сигнали відповідного рівня на аналогових виходах МК, що здійснюють керування ними.

За розробленими алгоритмами було розроблено та відложено відповідне програмне забезпечення, використовуючи мову програмування C++, фрагменти якої приведено в додатках.

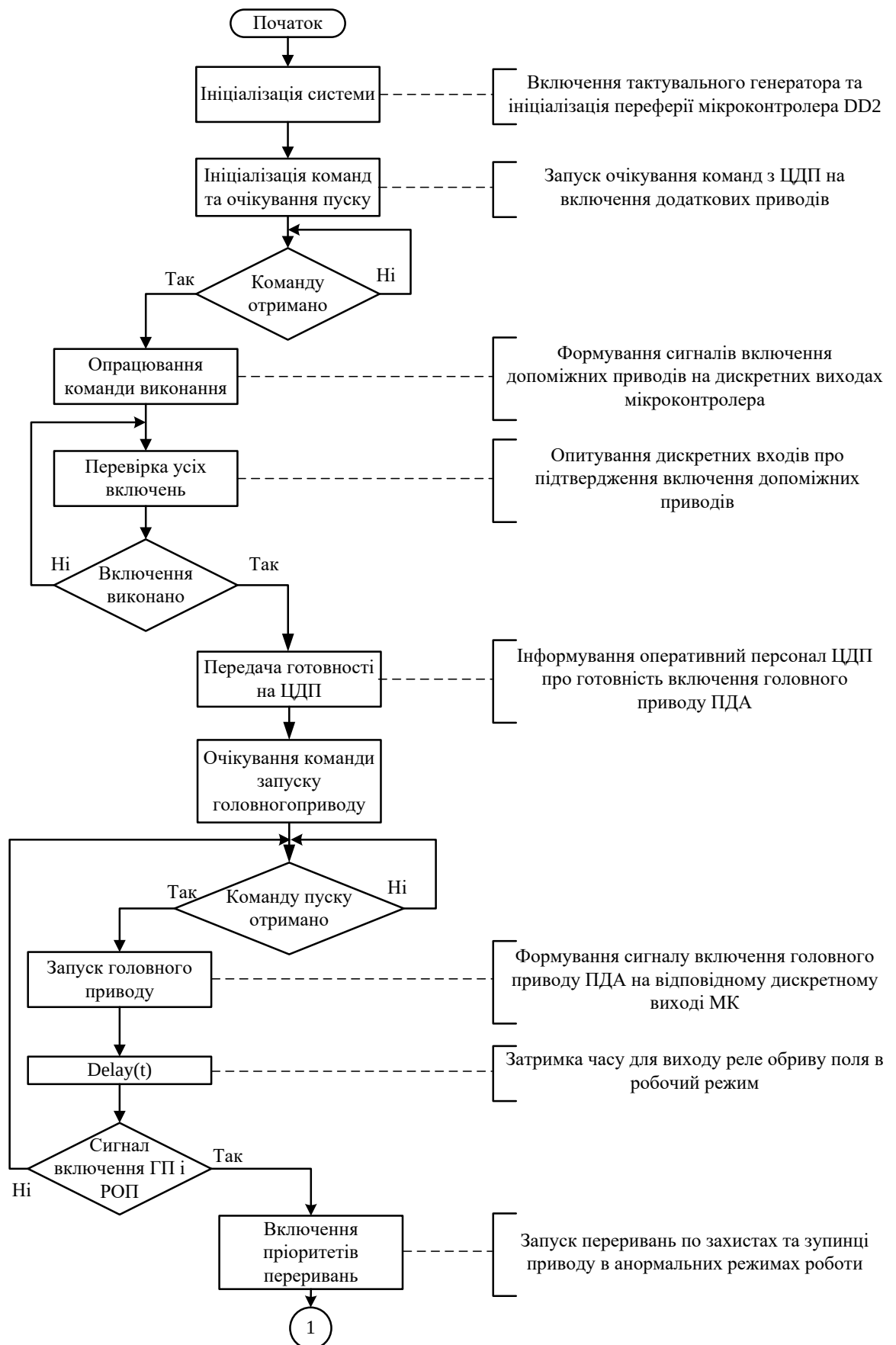


Рисунок 4.9 – Алгоритм роботи МК DD2

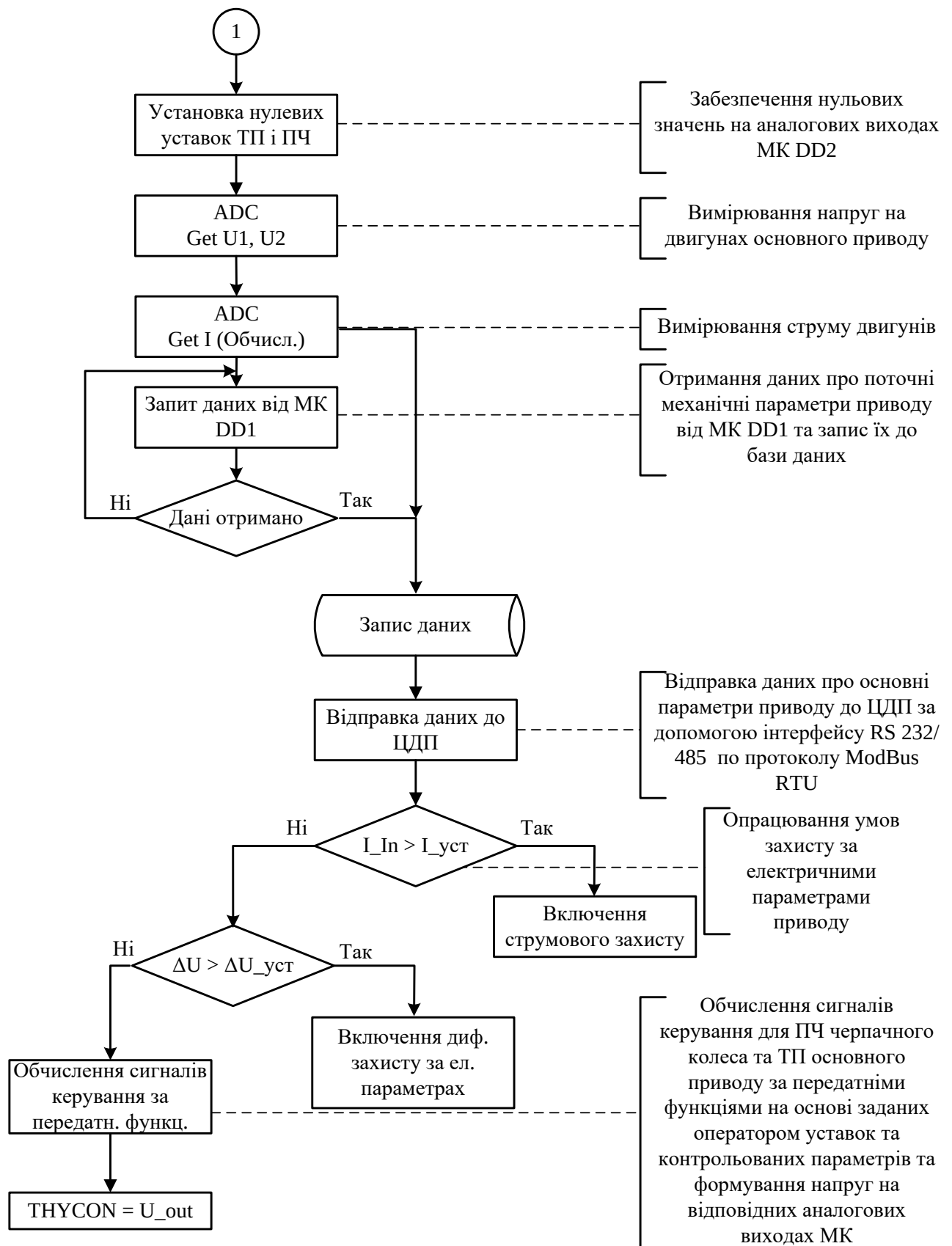


Рисунок 4.10 – Алгоритм роботи МК DD2 (продовження)

Розроблена система автоматизованого керування приводом ПДА разом з її алгоритмічним та програмним забезпеченням може бути використана для здійснення оптимального керування даним електромеханічним комплексом. Остаточне налаштування та узгодження роботи окремих ланок вимагає впровадження її в умовах виробництва. Це дасть можливість виконати оцінку ефективності її використання та очікуваного покращення динамічних властивостей системи, що зрештою виливається в підвищення її надійності, вимагає проведення. Цим дослідженням присвячено підрозділ 4.4.

4.3 Пристрої захисту ПДА в аномальних режимах роботи

Використання розробленої системи автоматизованого керування приводом ПДА, яка оснащена декількома видами захистів від аномальних режимів роботи, що виникають у ході експлуатації, не передбачає застосування окремих пристроїв захисту, оскільки в такому разі ці пристрої будуть виконувати дублювання певних функцій системи. Однак в певних умовах з об'єктивних та суб'єктивних причин, що лежать, в першу чергу, в економічній площині, впровадження пропонованої системи не можливе.

В такому разі гострої необхідності набуває розробка окремих пристроїв, які б мали невисоку вартість, але забезпечували надійний захист ПДА від режимів, пов'язаних із нерівномірним завантаженням вздовж шнековалів і як наслідок збільшенням кута закручування шнековалів. Без використання таких пристроїв ПДА в описаних режимах може бути виведений з ладу. Пристрої диференційного захисту від таких режимів мають бути чутливі до величини кута закручування або ж швидкості його зміни (тобто різниці швидкостей обертання двигунів).

Реалізація цих пристроїв може бути виконана за допомогою аналогової або ж цифрової схемотехніки. В другому випадку вони можуть бути реалізовані як обмежена частина системи автоматизованого керування, що представлена вище. Зокрема це стосується диференційного захисту за механічними

параметрами, що був розроблений у [17]. Його структурна схема подана на рис. 4.11.

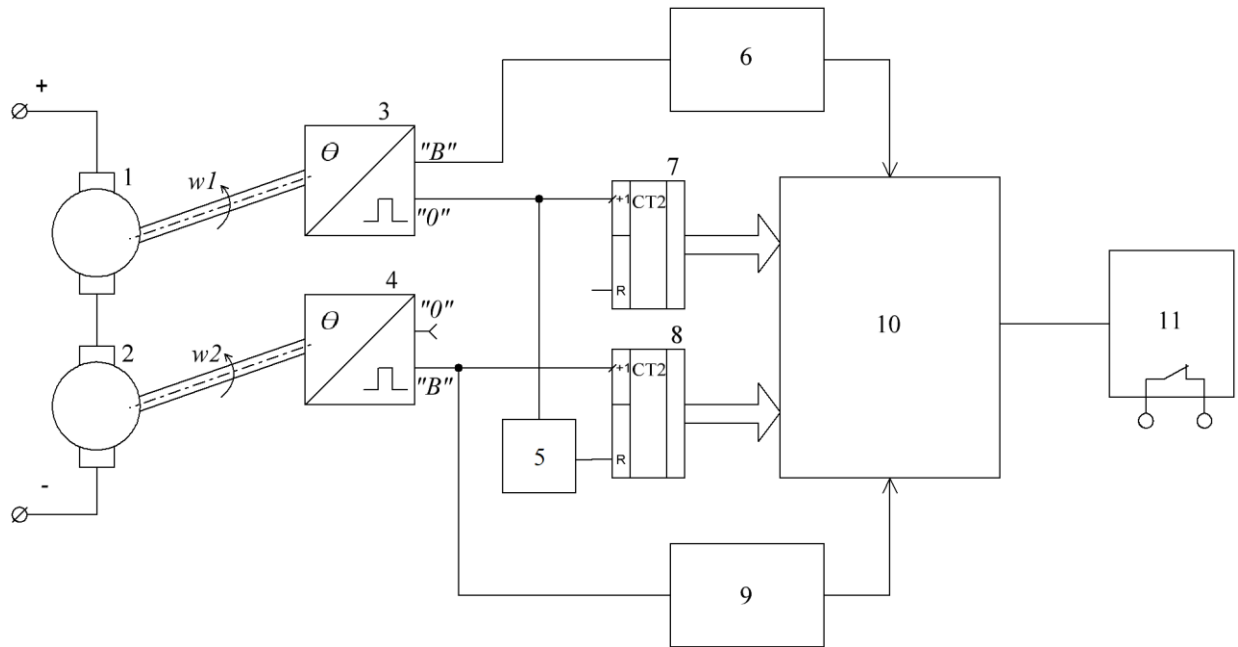


Рисунок 4.11 – Пристрій диференційного захисту приводу ПДА за механічними параметрами

Пристрій містить сенсори кута повороту 3 та 4, які встановлені на валах двигунів 1 та 2. Їх вимірювальні виходи підключені до двох частотомірів миттєвих значень 6 та 9, а вихід нульової мітки першого сенсора кута повороту валу 3 підключено до інкрементного входу першого двійкового лічильника 7 та через схему виділення імпульсу 5, що формує імпульс сталої тривалості, до обнуляючого входу другого двійкового лічильника 8, інкрементний вхід якого підключено до вимірювального виходу другого сенсора кута повороту валу 4. Виходи частотомірів миттєвих значень 6, 9 та двійкових лічильників 7, 8 підключені до мікропроцесорної системи обробки даних а захисту 10, яка обробляє отримані дані та подає сигнали захисту на керований вихід, який підключено до блоку захисту 11.

Пристрій диференційного захисту ПДА за механічними параметрами працює наступним чином: в нормальному режимі роботи вали двигунів 1 та 2

обертається синхронно з однаковою швидкістю. Сенсори кута повороту валів 3 та 4 перетворюють кути повороту в послідовності імпульсів, які подаються на частотоміри 6 та 9. Крім того, пристрій містить схему вимірювання відносного кута повороту валів двигунів, принцип роботи якої полягає в циклічному квантуванні кожного повного оберту двигуна 2 сигналами, що поступають з вимірювального виходу другого сенсора кута повороту валу 4. Схема вимірювання відносного кута повороту працює наступним чином: нульова мітка сенсора повороту валу 3 відмічає оберти двигуна 1 і підраховується першим двійковим лічильником 7. При проходженні вперше за час роботи приводу нульової мітки біля чутливого елементу першого сенсора 3 починається підрахунок другим двійковим лічильником 8 імпульсів від другого сенсора кута повороту валу 4 біля чутливого елементу якого проходять мітки другого валу. Після повного оберту валу двигуна 1 з виходу нульової мітки сенсора 3 подається сигнал на обнуляючий вхід лічильника 8, а підраховане ним значення імпульсів передається до мікропроцесорної системи обробки даних та захисту і одночасно стартує наступний цикл підрахунку.

Далі вимірювання проводиться циклічно, і в момент проходження кожної нульової мітки сенсора 1 результат, отриманий за попередній період, додається до вже отриманого раніше значення. Значення відносного кута повороту валів двигунів після K обертів двигуна 1 визначається з співвідношення

$$\Delta\theta_{\Sigma K} = \theta_0 \sum_{k=1}^K N_k - K \cdot 360^\circ, \quad (4.12)$$

де K – кількість підрахованих імпульсів двійковим лічильником 7, N_k – кількість підрахованих імпульсів двійковим лічильником 8 в k -му циклі вимірювання, θ_0 – кут між двома сусідніми мітками сенсорів 3 та 4.

Виміряні частотомірами 6 та 9 значення частот імпульсів, що прямо пропорційні швидкості обертання валів двигунів 1 та 2, а також відносний кут повороту валів передаються до мікропроцесорної системи обробки даних та захисту 10, яка обробляє необхідні дані, порівнює їх, та за умови перевищення

допустимих значень подає сигнал на виконавчий орган блоку захисту 11, який відключає живлення приводу.

Запропонований пристрій апаратно реалізується як обмежена частина принципової схеми, запропонованої на рис. 4.2, на основі мікроконтролера DD1. Цей пристрій відноситься до цифрової схемотехніки. Аналогічно може бути реалізовано пристрій диференційного захисту за напругами на двигунах. Однак в певних умовах виникає необхідність синтезу простого та надійного пристрою диференційного захисту, виконаного на основі аналогової схемотехніки, що пов'язано з їх низькою вартістю та простотою обслуговування.

Зокрема, до таких пристроїв можна віднести розроблений пристрій диференційного захисту дводвигунного приводу постійного струму ПДА за напругами на двигунах на базі віконного компаратора, схему якого подано на рис. 4.12, а миттєві діаграми, що пояснюють його роботу, – на рис. 4.13.

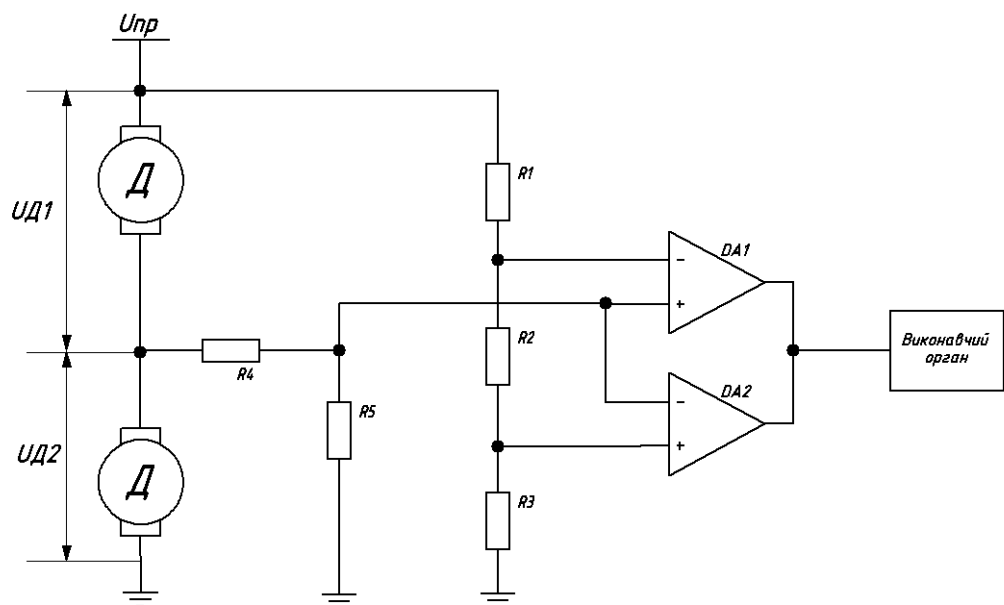


Рисунок 4.12 – Пристрій диференційного захисту приводу ПДА на основі віконного компаратора

Пристрій диференційного захисту дводвигунного приводу постійного струму працює наступним чином. В нормальному режимі роботи вали двигунів

1 та 2 обертається синхронно з однаковою швидкістю. Оскільки двигуни увімкнуті послідовно та мають однакові механічні характеристики, то й напруги на них будуть однакові або близькими за значенням.

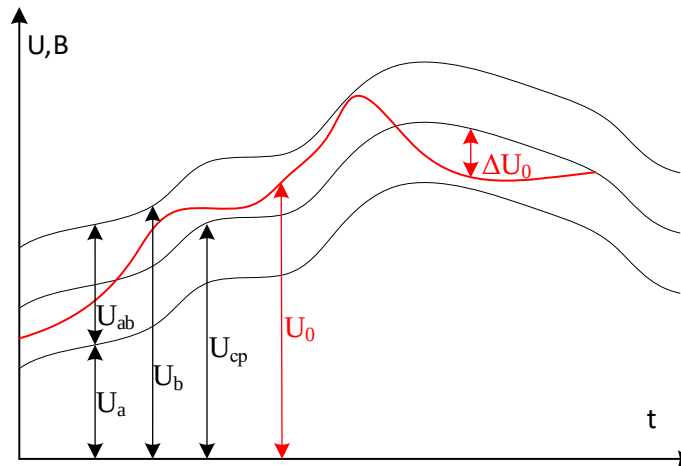


Рисунок 4.13 – Миттєві діаграми пристрою диференційного захисту приводу ПДА на основі віконного компаратора

Падіння напруги на резисторі R2 резистивного подільника напруги R1-R2-R3

$$U_{ab} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U \quad (4.13)$$

утворює «вікно» значень віконного компаратора утвореного операційними підсилювачами DA1 (верхня межа) та DA2 (нижня межа):

$$U_a = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U_{пр}; \quad U_b = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U_{пр},$$

де $U_{пр}$ – загальна напруга приводу, U_a – напруга на інверсному вході U_b – напруга на прямому вході операційних підсилювачів DA1 та DA2 відповідно.

В нормальних режимах у в межах $[U_a; U_b]$ перебуває напруга U_0 , яка діє на прямому вході операційного підсилювача 3 та інверсному вході операційного підсилювача 4, що утворюють вхід віконного компаратора.

Напруга U_0 прямо пропорційна напрузі в середній точці з'єднання двигунів $U_{д2}$ та визначається зі співвідношення опорів подільника напруги R_4 - R_5 за виразом:

$$U_0 = U_{д2} \frac{R_5}{R_4 + R_5}. \quad (4.14)$$

В такому разі на виходах операційних підсилювачах напруга відсутня.

Враховуючи, що: $U_{np} = U_{д1} + U_{д2}$; $\Delta U = U_{д2} - U_{д1}$, після певних перетворень рівняння (4.14) перетворюємо у вираз:

$$U_0 = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot \frac{U_{np}}{2} + \frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot \frac{\Delta U}{2} \quad (4.15)$$

При виникненні аварійних режимів роботи, коли різниця напруг на двигунах ΔU перевищує встановлене значення з будь-яким знаком напруга на вході віконного компаратора U_0 виходить за межі створеного подільником R_1 - R_2 - R_3 «вікна» допустимих значень відхилення напруг на двигунах, на виході відповідного операційного підсилювача формується сигнал відключення, що подається до виконавчого органу пристрою захисту, який здійснює аварійну зупинку приводу.

Визначимо умови налаштування захисту. Для цього визначимо напругу рівновіддалену від напруг U_a та U_b :

$$U_{cp} = U_a + \frac{1}{2} \cdot U_{ab} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U_{np} + \frac{1/2 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U_{np} = \frac{R_3 + 1/2 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U_{np}.$$

Різниця між напругою U_0 та U_{cp} :

$$\Delta U_0 = U_0 - U_{cp} = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot \frac{U}{2} + \frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot \frac{\Delta U}{2} - \frac{R_3 + 1/2 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U \quad (4.16)$$

Параметри схеми підбираються таким чином, щоб за умови рівності напруг на двигунах ($U_{д1} = U_{д2}$), $U_{cp} = U_0$. В такому разі $\Delta U_0 = 0$; $\Delta U = 0$.

Тоді рівняння (4.16) перетвориться:

$$\frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot \frac{U}{2} - \frac{R_3 + 1/2 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U = 0.$$

Звідки отримуємо:

$$\frac{1/2 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{R_3 + 1/2 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (4.17)$$

Дане співвідношення є умовою налаштування пристрою з міркувань рівності максимально допустимого додатного і від'ємного відхилення ΔU .

Враховуючи (4.17) рівняння (4.16) перетвориться до виразу:

$$\Delta U_0 = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot \frac{\Delta U}{2} \quad (4.18)$$

Умовою спрацювання захисту є вираз:

$$|\Delta U_0| \geq \frac{1}{2} \cdot U_{ab},$$

або, після підстановки в останній вираз рівнянь (4.13) та (4.18), отримаємо:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{R_5}{R_4 + R_5} \cdot |\Delta U| \geq \frac{1}{2} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot U \quad (4.19)$$

Співвідношення (4.19) є умовою налаштування пристрою за величиною допустимого значення розбіжності напруг на двигунах.

Підсумовуючи отримані результати, маємо дві умови налаштування пристрою диференційного захисту ((4.17) та (4.19)), що зумовлює використання підстроєчних резисторів у двох подільниках напруг.

Оцінка ефективності запровадження розроблених пристроїв диференційного захисту приводу ПДА, яка полягає у визначенні показників надійності зупинки приводу в режимах недопустимих для експлуатації, пов'язаних з несиметричним завантаженням двигунів, вимагає експериментальних досліджень в виробничих умовах.

4.4 Експериментальні дослідження розробленої системи автоматизованого керування приводом ПДА

Проведення експериментальних досліджень виконаних на основі матеріалів, розроблених у дисертаційній роботі, має загальну мету дослідної перевірки результатів отриманих теоретичним шляхом, а також оцінки ефективності та доцільності впровадження їх в умовах виробництва. Ці дослідження вимагають розв'язання конкретних експериментальних задач:

- експериментальні дослідження актуальності отриманих математичних моделей існуючих та розроблених систем керування електричним приводом, виконаних на основі спостереження за роботою привода, зокрема, в критичних режимах роботи;

- дослідне дослідження метрологічних характеристик розроблених засобів вимірювання основних контрольованих параметрів приводу та порівняння їх з теоретичними;

- дослідження впливу керування швидкістю обертання черпального колеса, здійсненого на основі розроблених законів регулювання на відносний кут повороту валів двигунів основного приводу;

- експериментальне визначення доцільності ефективності впровадження розробленої системи автоматизованого керування приводом ПДА в умовах виробництва, а також визначення показників надійності у порівнянні з традиційною системою;

- моніторинг за спрацюваннями пристроїв захисту приводу.

У відповідності до першої поставленої задачі пасивні експерименти були проведені на декількох цукрових заводах. Зокрема, на Іллінецькому цукровому заводі неодноразово спостерігались незатухаючі електромеханічні коливальні режими, детально описані у [6]. Ці режими характеризувались значними коливаннями струму двигунів та асиметричними коливаннями напруг на двигунах. При цьому загальну напругу приводу система автоматичного керування забезпечувала стабільною або змінювала у дуже незначній мірі.

Коливання вказаних величин здійснювалось з низькою частотою від десятих частин до одиниць герц. Ці спостереження підтверджують актуальність математичних моделей, розроблених у розділі 2, оскільки отримані результати моделювання подібних режимів, подане на рис. 2.11, є аналогічні описаним.

Аналіз таких режимів, виконаний на основі показань оперативного персоналу та даних залишених самописцями та інших засобів моніторингу за роботою системи приводу та особистих спостережень, показав такі основні причини їх виникнення:

- перевантаження приводу (значення струму двигунів безпосередньо перед виникненням таких режимів було близьким або перевищувало номінальний для двигунів, а також фіксувалось значна швидкість завантаження струшкою ПДА);
- максимальні оберти шнеків ПДА (зафіксовано приладами магніто-електричної системи значення напруги приводу близькі до номінальних, що у відповідності до досліджень, проведених у [1], [5], могли на 5-10% занижати її);
- помилки оперативного персоналу, що призводили до нерівномірності завантаження ПДА вздовж шнековалів (аналіз даних моніторингу за технологічними режимами роботи показував невідповідність температурних та рівневих показників в окремих відділах ПДА значенням, характерним для нормальної роботи, напередодні виникнення таких режимів).

Таким чином визначений спектр основних причин виникнення таких режимів чітко корелюється з даними, отриманими при дослідженні різних чинників погіршення динамічних властивостей системи ПДА, отриманий у розділі 2.

Основною відмінністю розробленої системи автоматизованого керування від існуючих та широко застосованих на промислових підприємствах систем приводу ПДА є вимірювання та контроль механічних параметрів, зокрема швидкостей обертання та відносного кута повороту валів двигунів. Тому надзвичайно важливим є експериментальні дослідження їх метрологічних характеристик.

Експериментальні дослідження метрологічних характеристик полягають у побудові експериментальних статичних характеристик вимірювальних каналів швидкостей обертання та відносного кута повороту валів двигунів приводу ПДА, а також оцінку похибок квантування цих каналів й порівняння їх з результатами, отриманими в ході теоретичних досліджень.

В дослідному зразку сенсорами обертання валів двигунів обрано інкрементний енкодер Wachendorff WDG58E. Даний пристрій оснащений порожнистим валом, що дозволяє зручно з'єднати його механічно з валом двигуна основного приводу. В проведених дослідженнях використовувався енкодер з кількістю імпульсів на періоді, яка складає $Z = 720$.

Дослідні дані знімалися на дослідному зразку, зібраному на ПДА марки ДС-8 Іллінецького цукрового заводу у відповідності до наведених вище схем. В таблиці 4.1 наведено вибірку з роботи пристрою.

Таблиця 4.1 – Зведені дані експериментальних досліджень метрологічних характеристик ВК

t, с	T_2 , с	N_k	$\Delta\theta_k$, град.	t, с	T_2 , с	N_k	$\Delta\theta_k$, град.
66	0.057	739	9.5	67.485	0.059	738	9
66.056	0.056	738	9	67.544	0.059	739	9.5
66.11	0.055	736	8	67.601	0.058	740	10
66.164	0.054	734	7	67.658	0.057	740	10
66.218	0.054	730	5	67.713	0.056	739	9.5
66.271	0.053	727	3.5	67.768	0.055	737	8.5
66.324	0.053	723	1.5	67.822	0.054	734	7
66.377	0.053	719	-0.5	67.876	0.054	731	5.5
66.43	0.053	715	-2.5	67.929	0.053	727	3.5
66.483	0.053	712	-4	67.982	0.053	723	1.5
66.537	0.054	708	-6	68.035	0.053	720	0

66.591	0.054	705	-7.5	68.088	0.053	716	-2
66.646	0.055	703	-8.5	68.141	0.053	712	-4
66.702	0.056	701	-9.5	68.194	0.054	708	-6
66.759	0.057	700	-10	68.249	0.054	705	-7.5
66.817	0.058	700	-10	68.304	0.055	703	-8.5
66.876	0.059	701	-9.5	68.36	0.056	701	-9.5
66.936	0.06	703	-8.5	68.416	0.057	700	-10
66.996	0.061	706	-7	68.474	0.058	700	-10
67.058	0.061	710	-5	68.533	0.059	701	-9.5
67.119	0.062	714	-3	68.593	0.06	703	-8.5
67.181	0.062	718	-1	68.653	0.061	706	-7
67.243	0.062	723	1.5	68.715	0.061	709	-5.5
67.304	0.062	728	4	68.776	0.062	713	-3.5
67.365	0.061	732	6	68.838	0.062	718	-1
67.426	0.06	735	7.5				

Дана вибірка знята на проміжку часу $t=[66;68,838]с$, що відповідає 50 обертам верхнього двигуна. В другій колонці таблиці наведено час T_2 , за який він здійснює повний оберт, а в третій кількість імпульсів сенсора обертів нижнього двигуна за відповідний проміжок часу. Відповідно до формули (3.11) можна знайти відносний кут повороту валів двигунів $\Delta\theta_k$ за час повного оберт верхнього, що відображено в четвертій колонці.

З отриманих даних можна побудувати експериментальну статичну характеристику ВК відносного повороту валів двигунів, яка подана на рис. 4.14 у вигляді точок. Суцільною лінією побудована теоретична статична характеристика, яка майже повністю збігається з отриманими дослідними даними.

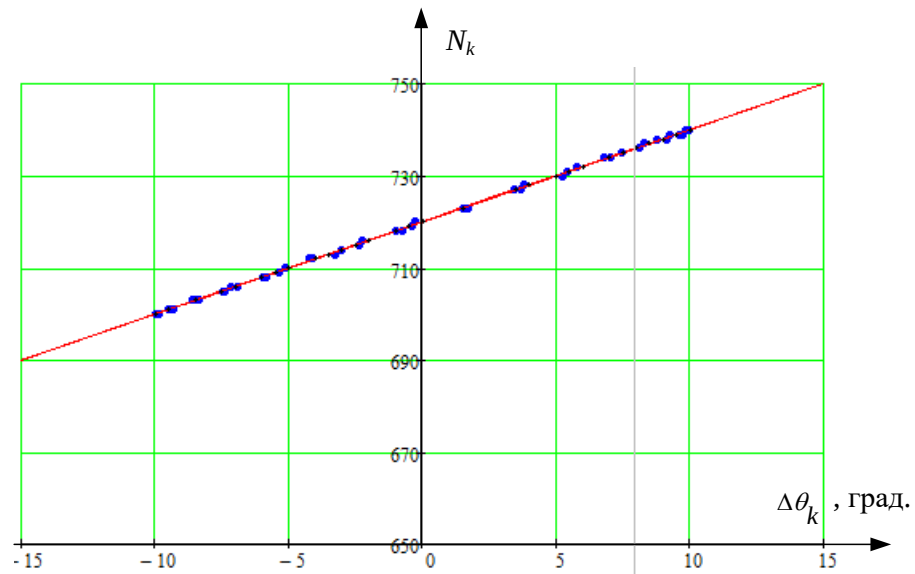


Рисунок 4.14 – Експериментальна статична характеристика ВК відносного повороту валів двигунів

На рис. 4.15 аналогічним чином зображено графік експериментальної та теоретичної похибки квантування.

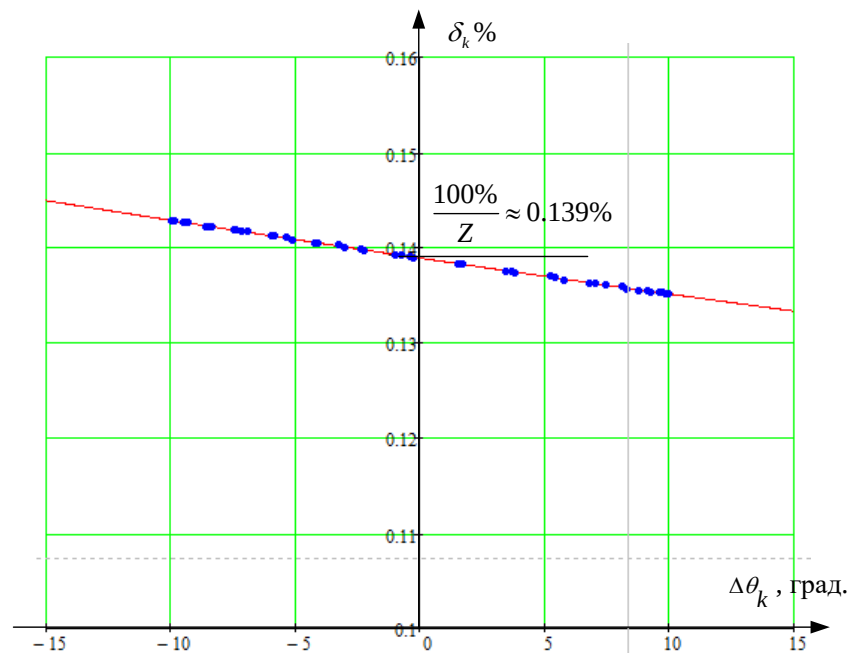


Рисунок 4.15 – Експериментальна та теоретична залежність похибки квантування ВК відносного кута повороту валів двигунів.

Як видно з приведених рисунків отримані експериментальним чином дані повністю корелюються з отриманими у розділі 3 теоретичними викладками (рис. 3.16 – 3.17).

На підставі отриманих значень $\Delta\theta_k$ за кожний оберт верхнього двигуна на підставі формули (3.12) можна визначити поточний відносний кут повороту валів двигунів $\Delta\theta_{\Sigma K}$. результати обрахунків приведені у вигляді часової діаграми у верхній частині рис. 4.16. Крива $\Delta\theta_{\Sigma K}$ є кривою інтегрування кривої $\Delta\theta_k$, що чітко видно із діаграми.

У нижній частині рис. 4.16 подано отримані часові діаграми швидкостей обертання двигунів ПДА, а також їх різницю за той самий період часу. Дослідні результати чітко корелюються з результатами, отриманими на попередніх етапах засобами математичного та імітаційного моделювання, представленими у розділі 2, зокрема діаграмами, поданими на рис. 2.11.

Отже, проведені експериментальні дослідження роботи засобів вимірювання механічних параметрів приводу ПДА показали повну адекватність вимірювання, як швидкостей обертання двигунів, так і відносного кута повороту їх валів. Реальні метрологічні характеристики цих засобів корелюється з теоретичними розробками. Таким чином розроблені засоби вимірювання механічних параметрів приводу ПДА можуть бути використані при побудові нових систем автоматизованого керування технологічним процесом або інтегровані до існуючих у якості додаткових засобів інформативності технологічного процесу. Також вони можуть бути використанні при конструюванні пристроїв захисту від аномальних режимів пов'язаних, в першу чергу, з виникненням коливальних режимів дводвигунних приводів з пружними зв'язками.

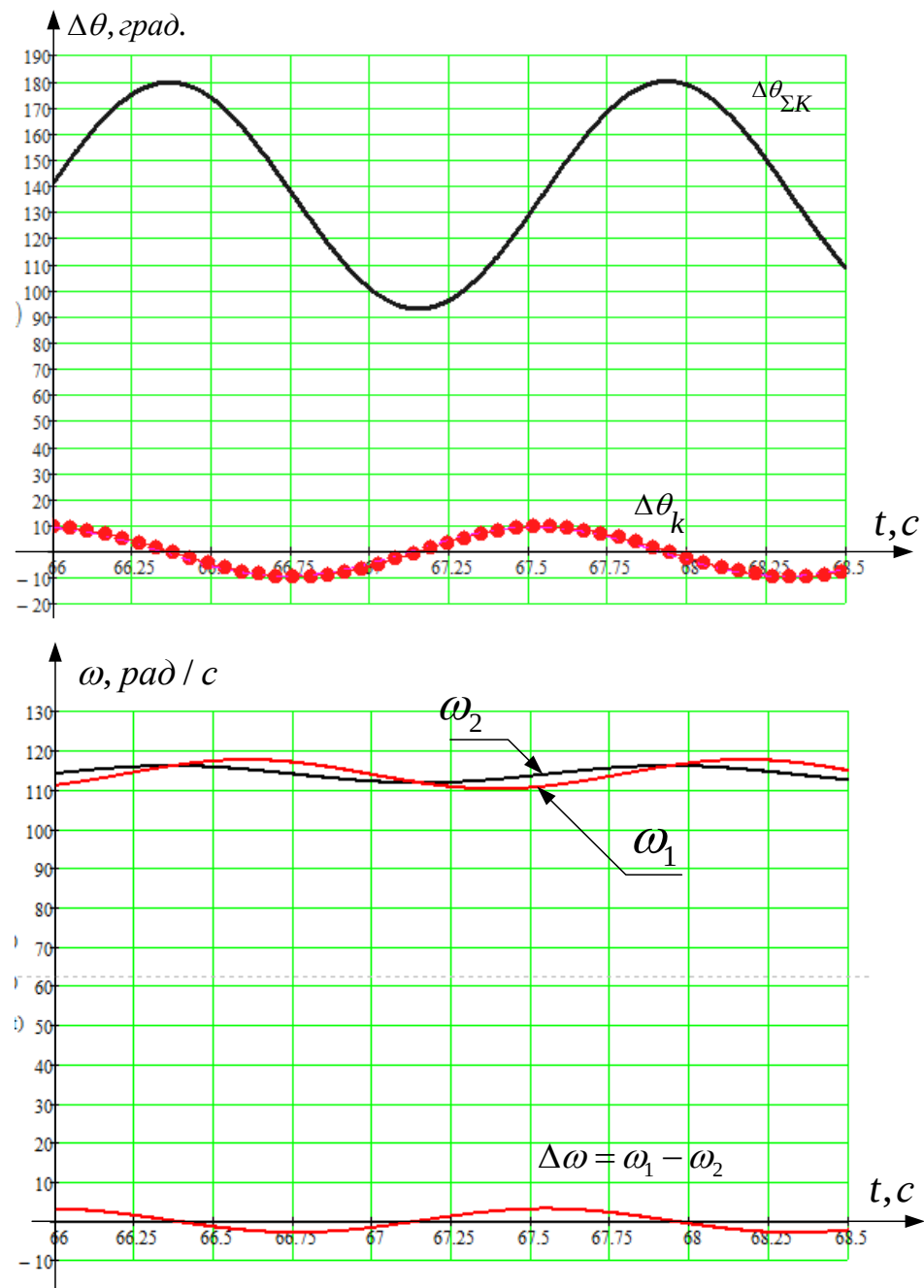


Рисунок 4.16 – Експериментальні часові діаграми механічних параметрів приводу ПДА

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. В табл. 4.2 подані деякі технічні характеристики обладнання, яке досліджувалось.

Таблиця 4.2 – 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

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.

Дослідження, що проводились на підприємствах були здійснено приблизно за один і той же період на трьох приводах ПДА з різними системами керування та вимірювання та захистів, що зумовлено, в першу чергу

суб'єктивними причинами економічного характеру. 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 стара система автоматизованого керування без вимірювання механічних параметрів приводу.

Для аналізу доцільності та ефективності використання досліджуваних систем автоматизованого керування звернімося до теорії надійності [135] – [137]. Очевидно, що при експлуатації складних систем, виникають зупинки пов'язанні з відмовою обладнання в досліджуваній підсистемі або порушеннями роботи в зв'язаних підсистемах. Такі відмови виникають випадковим чином, а оскільки вони усуваються то протягом певного часу дослідження буде спостерігатись потік відмов, тобто певна послідовність інтервалів, коли обладнання працювало та інтервалів простою пов'язаних з відмовами.

Часова діаграма, що ілюструє потік відмов показано на рис. 4.17: $t_1, t_2 \dots t_k$ – інтервали часу справної роботи обладнання; $t_{e1}, t_{e2} \dots t_{ek}$ значення часу відновлення; $t_{(1)}, t_{(2)} \dots t_{(k)}$ моменти часу появи відмови; $t_{e(1)}, t_{e(2)} \dots t_{e(k)}$ моменти часу відновлення.

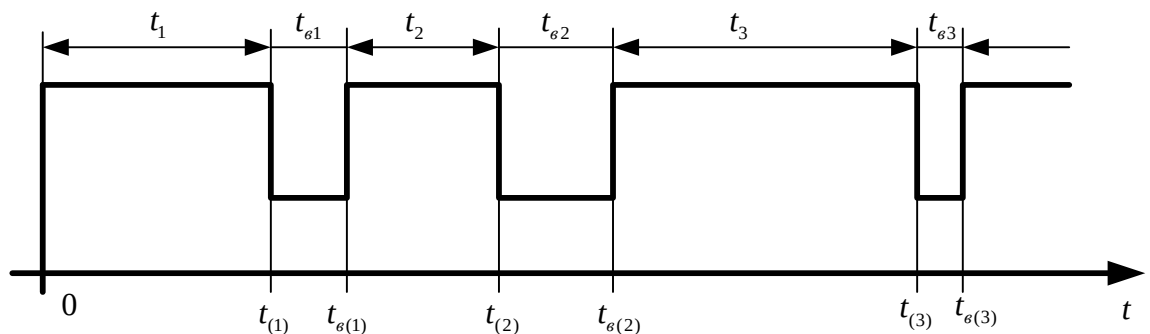


Рисунок 4.17 – Часові діаграми потоку відмов

Таким чином чергуються випадкові періоди безвідмовної роботи t_i та часу відновлення обладнання t_{ei} . Процес відновлення характеризується часом відновлення, що можна вважати випадковою величиною. Основними параметрами, що характеризують процес відновлення, а, отже, складність отриманих пошкоджень, є:

- імовірність відновлення $V(t) = P(t_e \leq t_n)$ імовірність, що час відновлення буде менше певного нормованого значення. В нашому дослідженні прийнято $t_n = 1 \text{ год}$, оскільки зупинка на такий термін не приносить значної шкоди синхронності роботи підприємства. Статистично імовірність обраховується за формулою:

$$V(t) = \frac{N(t_e)}{N_e} \quad (4.20)$$

де $N(t_e)$ кількість відновлень за час менший нормованого, N_e загальне число відмов;

- імовірність невідновлення за час t_n :

$$G(t) = P(t_e > t_n) = 1 - V(t); \quad (4.21)$$

- середній час відновлення T_v математичне очікування тривалості відновлення;

- інтенсивність відновлення

$$\mu(t) = \frac{1}{T_e}. \quad (4.22)$$

Окрім вказаних параметрів важливими показниками надійності системи є коефіцієнт готовності (відношення сумарного часу, коли обладнання знаходиться в робочому стані до загального часу спостереження) та коефіцієнту простою (відношення часу простою обладнання до загального часу спостереження)

До табл. 2 зведені основні результати статистичних даних, отриманих в ході дослідження із системи SCADA, призначеної для управління технологічним процесом, з якою система автоматизованого керування має

мережевий зв'язок. До неї зведено усі показники, які характеризують надійність роботи приводу ПДА як електромеханічного комплексу.

Таблиця 4.3 – Зведені результати експериментальних досліджень

	Параметр	Не встановлено	Встановлено розроблену систему автоматизованого керування	Встановлено систему вимірювання та захисту	Од.
1.	Місце встановлення	Гайсин ДА 1	Гайсин ДА 2	Капітанівка	
2.	Період експериментальних досліджень	15.10.2018 – 28.10.2018		22.10 – 31.10.2018	
3.	Загальний час спостережень	336,00	336,00	240,00	год.
4.	Загальна кількість зупинок	73,00	56,00	53,00	
5.	з них по причині відмови обладнання	48,00	29,00	26,00	
6.	Середня кількість зупинок за зміну	2,61	2,00	2,65	
7.	Середня кількість відмов за зміну	1,71	1,04	1,30	
8.	Загальний час роботи	292,00	307,00	219,00	год.
9.	Загальний час простою	44,00	29,00	21,00	год.
10.	З нього по причині відмов	27,00	13,00	11,00	год.
11.	Коефіцієнт готовності	0,92	0,96	0,95	
12.	Коефіцієнт простою з причин відмов	0,08	0,04	0,05	
13.	Середній час роботи після запуску ПДА	4,00	5,48	4,13	год.
14.	Середній час безвідмовної роботи	6,44	11,14	8,81	год.
15.	Середній час простоїв	0,60	0,52	0,40	год.
16.	Середній час відновлення	0,56	0,45	0,42	год.
17.	Інтенсивність відновлення	1,79	2,22	2,38	1/ год
18.	Кількість зупинок тривалістю більше $t_n = 1 \text{ год}$.	13	5	6	

19.	Імовірність відновлення за час $t_n = 1 \text{ год}$	0,73	0,83	0,77	
20.	Імовірність невідновлення за час $t_n = 1 \text{ год}$	0,27	0,17	0,23	
21.	Середня продуктивність за добу	3470,00	3960,00	3510,00	т.
22.	По відношенню до планового показника	86,75	99,00	100,29	%

Для наочності на рис. 4.18 подано результати розрахованих та зведених до табл. 4.3 основних показників надійності роботи у вигляді гістограм.

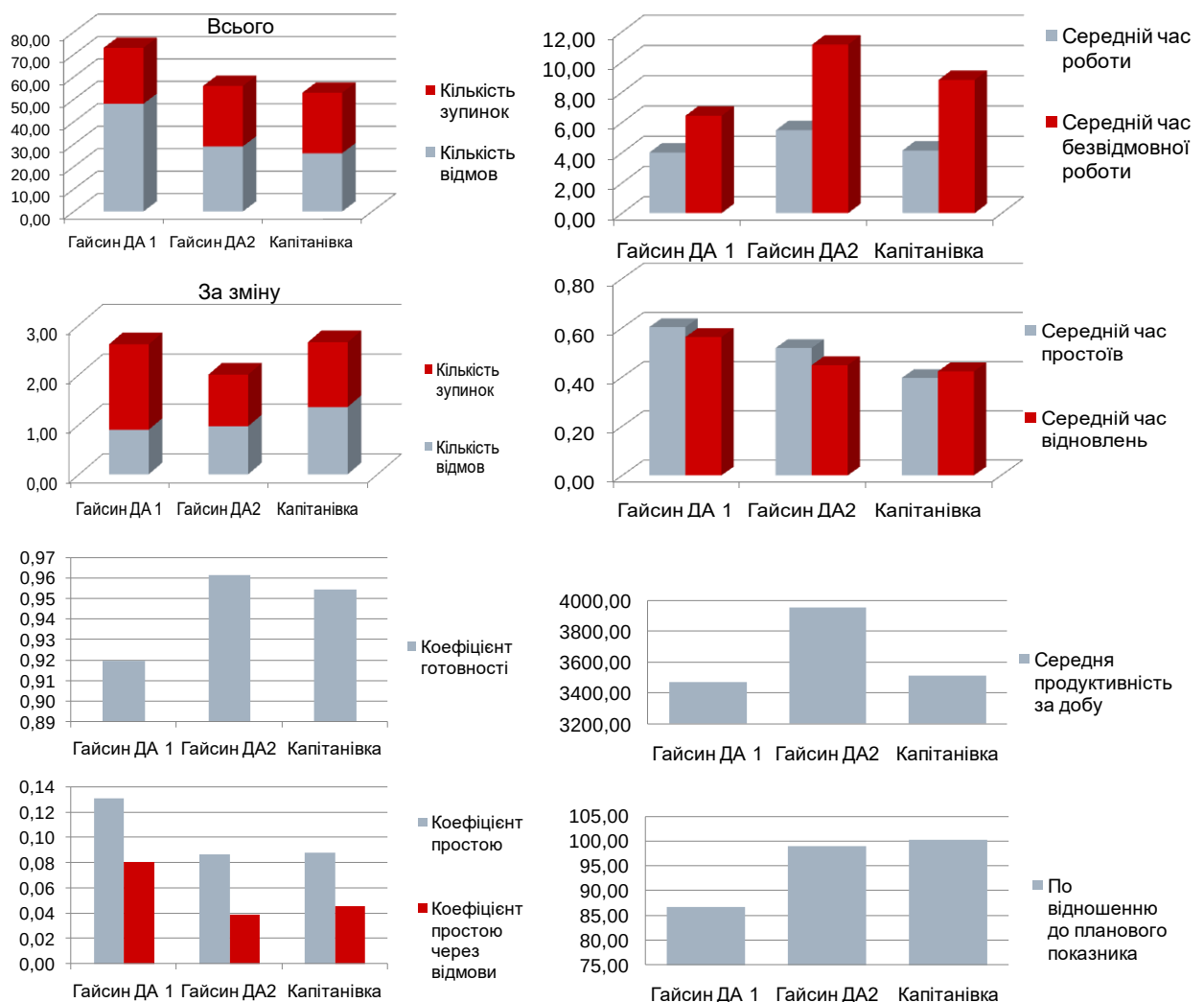


Рисунок 4.18 – Основні показники надійності роботи системи приводу трьох ПДА.

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 була встановлена розроблена система автоматизованого керування з вимірюванням механічних параметрів та автоматичним регулюванням швидкості обертання черпального колеса за відносним кутом закручування валу двигуна 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.

Також цікавим є аналіз причин зупинок ДА, встановлених на Гайсинському цукровому заводі, поданий на рис. 4.19.

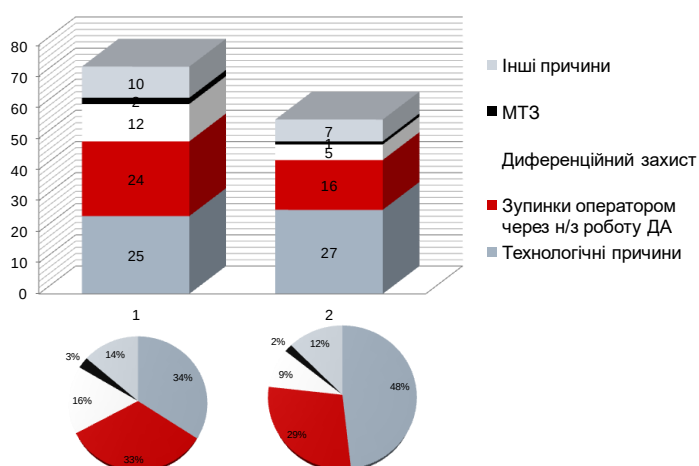


Рисунок 4.19 – Причини зупинок ДА №1 (ліворуч) та ДА №2 Гайсинського цукрового заводу.

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

Останнє є підтвердженням доцільності встановлення регульованого приводу черпального колеса, який змінюючи швидкість розвантаження верхньої більш завантаженої частини ДА в залежності від контролюваного 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.

В цілому, підсумовуючи проведені експериментальні дослідження, можна зробити висновки, що результати, отримані на попередніх етапах дисертаційного дослідження, цілком підтверджуються практичним застосуванням в умовах виробництва.

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.

А доцільність застосування розроблених на основі них систем автоматизованого керування приводом ПДА підтверджується значно кращими

показниками надійності та ефективності її роботи у порівнянні з традиційними системами.

4.5 Висновки

На основі отриманих у попередньому розділі структурних схем було розроблено функціональні та електричні принципові схеми САК приводом ПДА з використанням мікропроцесорної техніки та алгоритми їх роботи, що стали основою апаратної реалізації отриманих результатів та застосуванням її в у мовах виробництва.

Основною відмінністю розроблених схем від існуючих є наявність засобів вимірювання та контролю не тільки електричних, а й механічних параметрів приводу, які обробляються мікроконтролером. Система інтегрована до SCADA-системи керування технологічним процесом дифузійного відділення цукрового заводу, що дозволяє оператору здійснювати керування ДА, враховуючи в тому числі швидкості обертання та відносний кут повороту валів двигунів, а також значення струмів та напруг на двигунах на моніторі комп'ютера.

Крім цього пропонується система здійснює керування включенням допоміжних приводів та контролю їх станів. Окремим засобом впливу на динамічні властивості системи є використання частотно-регульованого привода черпального колеса, який здійснює розвантаження стружки у верхній частині ДА за розробленими законами регулювання на основі вимірювання механічних параметрів привода.

Також система оснащена захистами за усіма контрольованими параметрами. Окремо було розроблено ряд самостійно працюючих засобів захисту ПДА від аномальних режимів роботи з використанням як аналогової, так і цифрової схемотехніки.

В розділі подано результати експериментальних досліджень, які включали в себе дослідження проведені в умовах виробництва на трьох підприємствах цукрової галузі. Вони показали актуальність та справедливість

отриманих теоретичних результатів, представлених в дисертаційній роботі. Встановлено позитивний вплив використання розробленої САК роботи дифузійного апарата, як електромеханічного комплексу в системі безперервного виробництва, на показники надійності та ефективності. Аналіз причин відмов також показав доцільність та актуальність розроблених пристроїв.

Результати, отримані у розділі висвітлено у [13] – [17].

ВИСНОВКИ

В 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.

В теоретичному аспекті:

- Розроблено математичні моделі дводвигунного електропривода похилого дифузійного апарата двох типів (постійного струму та асинхронного частотно-регульованого), яка враховує електромеханічні процеси пов'язані з наявністю пружно-дисипативного зв'язку між двигунами, що 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, в 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 атоматизованого 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.

В методологічному аспекті:

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

- Розроблено алгоритми роботи мікропроцесорної системи атоматизованого керування приводом ПДА.

В інженерно-технічному аспекті:

- Розроблено функціональні і електричні принципові схеми системи атоматизованого 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] В. І. Родінков, та А. М. Коваль, “Оцінка точності вимірювання струмів та напруг складної форми у трифазному однофазному 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 дводвигунного 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 конференції. *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 апарату”, 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 апарату” на XIII міжнародній науково-технічній конференції. *Авіа-2017*, Київ, 2017, с. 3.62-3.65.

[22] М. М. Масліков, *Сучасні технологічні процеси, обладнання та енерговикористання в харчовій промисловості. Цукрова, Олійна, Консервна галузі*. Київ, Україна: Юнідо, 2015.

[23] М. О. Прядко, М. О. Масліков, В. П. Петренко, В. І. Павелко, та В. М. Філоненко, *Основи теплотехнології цукрового виробництва*. Вінниця, Україна: Нова книга, 2007.

[24] А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін., “Вирощування, зберігання цукрових буряків, видобування сахарози ”, у *Технологія цукру = Sugar technology*, В. М. Логвін, А. І. Українець, Ред. Київ, Україна: Нац. ун-т харч. технол. Експрес-об'ява, 2015, Т. 1, с. 288, підручник в 3 т.

[25] М. М. Калакура, Л. Ф. Романенко, *Загальні технології харчової промисловості: підручник*. Київ, Україна, 2010.

- [26] Hubert Schiweck, Margaret Clarke, *Sugar*. 2000.
- [27] William J. Colonna, Upasiri Samaraweera, Margaret A. Clarke, Michael Cleary, Mary An Godshall, and J. S. White, *Sugar*, 2006.
- [28] Mary A. Godshall, Gillian Eggleston, Jack Thompson, Vadim Kochergin, SUGAR, 2021.
- [29] Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. - Доступно: <http://www.ukrstat.gov.ua>
- [30] В. С. Бондар, “Тенденції і перспективи цукрового ринку України (До підсумків роботи галузі в 2016 р.)”, *Цукрові буряки*, № 1, с. 4-5, 2017.
- [31] М. Г. Чиликин, и А. С. Сандлер, *Общий курс электропривода: Учебник для вузов*. М.: Энерговидав, 1981.
- [32] *Теорія електропривода: Підручник*, М. Г. Попович, Ред. Київ. Україна: Вища школа, 1993.
- [33] М. Г. Попович, та О. Ю Лозинський, *Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи*. Київ, Україна: Либідь, 2005.
- [34] Б. И. Фираго, и Л. Б. Павлячик, *Теория электропривода: Учебное пособие*. Мн.: ЗАО «Техноперспектива», 2004.
- [35] А. Б. Зеленов, *Теория электропривода. Часть 1* Учебное пособие (механика электропривода, электромеханические свойства электроприводов постоянного и переменного тока). г. Алчевск, Украина: ИПЦ «Ладо», 2005.
- [36] Rik De Doncker, Duco W.J. Pulle, and André Veltman, *Electrical Drives. Analysis, Modeling, Control*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2020.
- [37] Г. И. Бабокин, Д. М. Шпрехер, и Т. В. Насонова, “Исследование системы выравнивая нагрузок электропривода скребкового конвейера”, *Горный информационно-аналитический бюллетень*, №2, с. 307-310, 2004.
- [38] А.И. Вольдек, *Электрические машины*. Учебник для студентов высших технических учебных заведений, 3-е изд, перераб.. Ленинград, 1978.
- [39] Под общей ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова, *Справочник по*

электрическим машинам: Москва: Энергоатомиздат, 1988 -1989.

[40] В. Л. Лихачев, *Электродвигатели асинхронные*. Москва, 2002.

[41] А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, и Е. А. Соболенская, *Асинхронные двигатели серии 4А: справочник*. Москва: Энергоиздат, 1982.

[42] М. Г. Попович, та О.В. Ковальчук, *Теорія автоматичного керування*. Київ, Україна: Либідь, 1997.

[43] Е. И. Юркевич, *Теория автоматического управления*. Учебник для студ. вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Ленинград: Энергия, 1975.

[44] А. В. Башарин, В. А. Новиков, и Г. Г. Соколовский, *Управление электроприводами*. Учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург: Энергоиздатом, 1982.

[45] В. М. Терехов, О. И. Осипов, *Системы управления электроприводов*, 2005.

[46] М. Г. Попович, В. А. Гаврилюк, О. В. Ковальчук, та В. І. Теряєв, *Елементи автоматизованого електропривода*. Київ, Україна, 1990.

[47] М. П. Белов, В. А. Новиков, и Л. Н. Рассудов, *Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов*. Учебник для вузов. Москва, Россия: Академия, 2007.

[48] Ю. А. Борцов, и Г. Г. Соколовский, *Автоматизированный электропривод с упругими связями*. – 2 изд-е., перераб. и доп. Санкт-Петербург, Россия: Энергоиздатом, 1992.

[49] Ю. А. Борцов, и А. И. Бычков, “Обобщенные оценки влияния упругих звеньев на динамику электроприводов и настройку регуляторов унифицированных схем”, *Электропромышленность. Серийный электропривод*, №7, 1973.

[50] Я. Г. Пановко, *Введение в теорию механических колебаний*. Москва: Наука, 1991.

[51] Е. С. Ребенков, “Упруговязкая механическая система электропривода с инверсным регулятором демпфирования колебаний”, *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*, №1, с.

187-192, 2018.

[52] Ghazanfar Shahgholian, “Modeling and Simulation of a Two-Mass Resonant System with Speed Controller”, *International Journal of Information and Electronics Engineering*, vol. 3, no. 5, p. 448-452, September 2013

[53] Chen Ke, Ai Wu, and Chen Bing, “ Mechanical parameter identification of two-mass drive system based on variable forgetting factor recursive least” *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2018. Available: <https://doi.org/10.1177%2F0142331218765614>

[54] Д. Ю. Скубов, и К. Ш. Ходжаев, *Нелинейная электромеханика*. Москва, Россия: ФИЗМАЛИТ, 2003.

[55] В. А. Иванков и др., “Модальное управление взаимосвязанными электроприводами с упругими звеньями и зазорами в кинематических передачах”, *Вестник ИГЭУ*, №3, с.55-60, 2006.

[56] С. В. Тарарыкин и др., “Системы управления взаимосвязанными электроприводами с упругими звеньями и зазорами в кинематических передачах”, *Известия ТРТУ*, №3, с. 143-150, 2007.

[57] Andrzej Popenda, Marek Lis, Marcjan Nowak and Krzysztof Blecharz, “Mathematical Modelling of Drive System with an Elastic Coupling Based on Formal Analogy between The Transmission Shaft and The Electric Transmission Line”, *Energies*, № 12, 2019,

[58] Dominik Łuczak, “Mathematical model of multi-mass electric drive system with flexible connection”, in 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2014. Available:

[59] Yunshan Liu, Xueliang Zhang, Dawei Gu, Lei Jia, and Bangchun Wen, “Synchronization of a Dual-Mass Vibrating System with Two Exciters Hindawi Shock and Vibration Volume 2020, Article ID 9345652, 12 pages Available:

[60] Akuro Big-Alabo, and Chinwuba Victor Ossia, “Analysis of the Coupled Nonlinear Vibration of a Two-Mass System”, *Journal of Applied and Computational Mechanics*, vol. 5, no. 5, pp. 935-950, 2019. Available:

[61] Hashemi Kachapi et al., “Analysis of the nonlinear vibration of a two-

mass-spring system with linear and nonlinear stiffness”, *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, № 11, pp. 1431-1441, 2010.

[62] M. Bayat, M. Shahidi, A. Barari, and D. Ganji, “Analytical Evaluation of the Nonlinear Vibration of Coupled Oscillator Systems”, *Z. Naturforsch.*, № 66a, pp. 67-74, 2011.

[63] L.Cveticanin, “The motion of a two-mass system with non-linear connection”, *Journal of sound and vibration*, vol. 252, Issue 2, pp. 361-369, 2002.

[64] Tolgay Kara , and Ilyas Eker, “Nonlinear modeling and identification of a DC motor for bidirectional operation with real time experiments”, *Energy Conversion and Management*, 2003.

[65] Hidehiro Ikeda, “PID Controller Design Methods for Multi-Mass Resonance System”, *PID Control for Industrial Processes*, 2018. Available:

[66] Krzysztof Szabat, and Teresa Orłowska-Kowalska, “Vibration Suppression in a Two-Mass Drive System Using PI Speed Controller and Additional Feedbacks Comparative Study”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 54, no. 2, pp.1193-1206, 2007.

[67] Mats Tallforms, *Parameter Estimation and Model Based Control Design of Drive Train Systems*. Stockholm, Sweden, 2005.

[68] В. І. Мороз, В. М. Стефанюк, В. Б. Цяпа, та Г. О. Сивякова, “Аналіз динаміки дводвигунного приводу повороту кар’єрних екскаваторів”, *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи*, №785, с. 50-54. 2014.

[69] T. Orłowska-Kowalska, and K. Szabat, “Optimization of fuzzy-logic speed controller for DC drive system with elastic joints”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, pp. 1138-1144, 2004.

[70] Р. П. Погребняк, “Пружна нелінійна динаміка руху супорта карусельного верстата для обробки суцільнокатаних залізничних коліс”, *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, № 4, с. 98-105, 2017.

[71] В. В. Осадчий, М. О. Олейников та О. С. Назарова, “Дослідження позиційного електропривода двомасової системи з внутрішнім слідкуючим контуром”, *Вісник НТУ «ХПІ»*, № 4, с. 47-54, 2019.

[72] В. С. Ловейкін, Ю. В. Човнюк, та М. Г. Діктерук “Динамічні навантаження у нелінійно-пружних елементах механізму підйому вантажу мостових кранів на стадії їх пуску”, *Техніка будівництва*, Київ, №12, с. 8-15, 2002.

[73] Г. В. Зырянов, “О выборе контура синхронизации в системе многодвигательного электропривода”, *Вестник ЮУрГУ*, №7, с.18-23, 2007.

[74] Д. Н. Дочвири, “Многодвигательный автоматизированный электропривод с упругими связями”, *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*, №1, с. 114-119, 2002.

[75] Д. Н. Дочвири, “Оптимизация переходных процессов многодвигательных тиристорных электроприводов с упругими связями для прессовых механизмов непрерывных технологических машин”, *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*, №1, с. 145-153, 2005.

[76] Г. И. Бабокин, и Т. В. Насонова, “Система управления многодвигательного регулируемого привода горных машин”, *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, №6.1., с. 135-138, 2011.

[77] Г. И. Бабокин, “Двухдвигательный электропривод конвейера с системой выравнивания нагрузок”, *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, №3.2., с. 230-234, 2010.

[78] В. И., Хильмон, О. Ф, Опейко, и Д. С. Однолько, “Анализ динамики многодвигательного привода рельсового транспорта”, *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, с. 24-33, 2015.

[79] В. Г. Омельницкий, “Исследование наклонных шнековых диффузионных аппаратов как объектов автоматизации и разработка систем автоматического управления”, дис. канд. техн. наук: 05.18.12, Київ, 1973.

[80] Г. В. Горячев, Б. І. Мокін, “Математичні моделі та методи

комп'ютерного моделювання процесу екстрагування цукру в похилому дифузійному апараті: монографія”, Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2004.

[81] Rahmat Sotudeh-Gharebagh, Hani Shamekhi, Navid Mostoufi, and Hamid Reza Norouzi, “Modeling and Optimization of the Sugar Extraction Process January”, *International Journal of Food Engineering*, №5(4), 2009.

[82] *Process. Automation examples from various plant stations in a beet sugar factory*. ABB Technical information, 2014

[83] С. И. Моногаров, “Автоматизированный электропривод диффузионного аппарата ПДС-20:автореф”, дис. канд.. техн. наук., Краснодар, 2011.

[84] С. И. Моногаров, “Частотно-регулируемый электропривод диффузионной установки ГТДС-20”, *Технические и технологические системы*. Краснодар, с. 178-180, 2009.

[85] В. И. Куроедов, и С. И. Моногаров, “Модернизация автоматизированного электропривода диффузионного аппарата ПДС-20”, в *Энергосбережение и водоподготовка*, №3 (65). Москва, Россия: Энергоинвест, 2010, с.60-61.

[86] Б. Х. Гайтов, и С. И. Моногаров, “Построение математической модели электропривода диффузионного аппарата ПДС-20”, в *Энергосбережение и водоподготовка*, №2 (64), Москва, Россия: Энергоинвест, 2010, с.63-64.

[87] С. И. Моногаров, “Модель короткозамкнутого асинхронного двигателя при частотном управлении автоматизированного двигателя при частотном управлении автоматизированного электропривода в системе MATLAB/Simulink”, *Технические и технологические системы*, Краснодар, с. 171-175, 2009.

[88] С. И. Моногаров, “Определение расчетных параметров схемы замещения асинхронной машины”, на межвузовской науч.-производств. Конференции. Научный потенциал вуза - производству и образовани. Т.4. Армавир, 2008, с.209.

- [89] В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, та В. В. Трифонюк, *Промислова електроніка. Підручник*. Київ, Україна: Либідь, 1993.
- [90] Ю. С. Забродин, *Промышленная электроника*. Москва: Высшая школа, 1980.
- [91] В. С. Руденко, И. М. Чиженко, и В. И Сенько, *Преобразовательная техника*. Киев: Вища школа”, 1978.
- [92] Г. С. Зиновьев, *Основы силовой электроники: Учебник*, Ч. 1, Новоси-бирск: НГТУ, 1999.
- [93] Г. С. Зиновьев, *Основы силовой электроники: Учебник*, Ч. 2, Новосибирск, Россия: НГТУ, 2000.
- [94] И. М. Чиженко, *Справочник по преобразовательной технике*. Киев: Техніка, 1978.
- [95] В. М. Перельмутер, *Комплектные тиристорные электроприводы: справочник*. Москв.: Энергоатомиздат, 1988.
- [96] Агрегаты тиристорные серий ТЕ, ТП, ТПР, ТЕР / ОАО «Электровыпрямитель». Саранск, 2011.
- [97] В. Б. Павлов, А. К. Шидловский, В. М. Скиданов, и В. А. Рычков *Полупроводниковые преобразователи в автономном электроприводе постоянного тока*. Киев: Наукова думка, 1987.
- [98] Т. І. Такеути *Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателей*. Пер. с англ. М.: Энергия, 1973
- [99] Г. П. Минин, *Несинусоидальные токи и их измерение*. Москва: Энергия, 1979.
- [100] М. А. Павловський, *Теоретична механіка: Підручник*, 2-ге вид. Київ:Техніка, 2004.
- [101] Н. F. Olson, *Dynamical Analogies*. New York: D. Van Nostrand company, 1943.
- [102] Г. Ф. Ольсон, *Динамические аналоги*. Гизиностр. лит., 1947.
- [103] Ю. Г. Ведміцький, та В. В. Кухарчук, “Елементи теорії електродинамічного моделювання вимірювального перетворення і контролю

моменту інерції. Проблематика, динамічні аналогії та принцип дуальності”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №5(80), с. 25-30, 2008.

[104] Ю. Г. Ведміцький, “Вимірювальне перетворення і контроль моменту інерції механічних та електромеханічних систем в процесі їх експлуатації. Теорія і практика”, *Вісник Хмельницького національного університету*, №4(113), с. 47-55, 2008.

[105] Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, та В. В. Богачук, “Узагальнений перетворювач моменту інерції. Теореми взаємодії”, *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТ-2009) : друга МНПК, 25-28 травня 2009 року*, Київ, Україна : тез. доп., с. 342-344. – К.: НАУ, 2009. 366 с. (збірка тез).

[106] Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, В. В. Богачук, “Узагальнений перетворювач моменту інерції та теореми взаємодії”, *Вісник інженерної академії України*, вип.1, с. 112-115. 2009.

[107] Ю. О. Карпов, С. Ш. Кацев, В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, *Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами : підручник*, під ред. проф. Ю. О. Карпова. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011.

[108] В. П. Тарасик, *Математическое моделирование технических систем: Учеб. для вузов*. Минск: Дизайн ПРО, 2004.

[109] С. Г. Герман-Галкин, *Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие*. Київ: Корона принт, 2001.

[110] А. Гульятеев, *Имитационное моделирование в среде MATLAB*. Питер, 2000.

[111] О. І. Толочко, *Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник*. Київ, НТУУ «КПІ», 2016.

[112] Liuping Wang; Shan Chai; Dae Yoo; Lu Gan; Ki Ng PID and Predictive, “Control of Electrical Drives and Power Converters using MATLAB”,

Simulink Wiley-IEEE Press , 2015

[113] Г. Г. Соколовский, *Электроприводы переменного тока с частотным регулированием*. Москва: Академия, 2006.

[114] М. П. Белов, *Моделирование компьютеризированных электроприводных систем: монография*, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб.: ООО "Технолит", 2008.

[115] М. П. Белов., Д. Б. Арефьев., П. О. Щелков, “Современные методы синтеза электромеханических систем с распределенными параметрами”, Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Серия "Электротехника": сб. науч. тр. вып. 1. с. 56-60, 2004.

[116] В. Б. Исаков, *Элементы численных методов*. Москва: Академия, 2003.

[117] В. М. Заварыкин, В. Г. Житомирский, и М. П. Лапчик, *Численные методы: [учеб. пособие для студентов физ.-мат. спец. пед. ин-тов]*. Москва: Просвещение, 1990.

[118] Дж. Ортега, *Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений*. Москва: Наука, 1986.

[119] М. Дж. Сальвадори, *Численные методы в технике [пер. с англ.]*. Москва: Издательство иностранной литературы, 1955.

[120] Ю. Ю. Тарасович, *Численные методы на Mathcad'e*. Астрахань: Астраханский гос. пед. ун-т, 2000.

[121] В. П. Дьяконов, *Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO*. Москва: СК Пресс, 1998.

[122] В. П. Дьяконов, и В. Абраменкова, *MathCAD 7 в математике, в физике и в Internet*. Москва: Нолидж. – 1998.

[123] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко, *Основи метрології та електричних вимірювань. Підручник*. Вінниця: ВНТУ, 2011, 522 с.

[124] В. В. Кухарчук, Ю.Г. Ведміцький, В.Ф. Граняк, *Вимірювання параметрів обертового руху електромеханічних перетворювачів енергії в*

перехідних режимах роботи. Монографія. Вінниця: ВНТУ, 2019.

[125] М. Дорожовець, В. Мотало, В. Василюк та ін., *Основи метрології та вимірювальної техніки. Т1. Основи метрології*, Б. Стадник, Ред. Львів: Львівська політехніка, 2005, 532с.

[126] М. Дорожовець, В. Мотало, В. Василюк та ін., *Основи метрології та вимірювальної техніки. Т2. Вимірювальна техніка*, Б. Стадник, Ред. Львів: Львівська політехніка, 2005, 656 с.

[127] Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, Б. І. Стадник та ін., *Засоби та методи вимірювань неелектричних величин*. Львів: БІТ, 2008.

[128] Г. Виглеб, *Датчики* [пер. с нем]. Москва: Мир, 1989.

[129] *Преобразователи угловых перемещений ЛИР. Технические условия. ЛИР – 158.000ТУ – С. П.*: Специальное конструкторское бюро информационно-измерительных систем, 2003.

[130] В. В. Кухарчук, М.Й. Білінська, та В.В. Усов, “Мікропроцесорний засіб вимірювання кутового положення крокових двигунів”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3,с. 165-167, 2005.

[131] Р. Корне, и Х. Шмидт-Вальтер, *Справочник инженера-схемотехника*. Москва: Техносфера, 2008.

[132] Г. Хокинс, *Цифровая электроника для начинающих* [пер. с англ.]. Москва: Мир, 1986.

[133] Paul Horowitz, and Winfield Hill, *The art of electronics*. Monograph, Cambridge university press, 1998.

[134] Г. Я. Мирский, *Микропроцессоры в измерительных приборах*. Москва: Радио и связь, 1984.

[135] Г. В. Дружинин, *Надёжность автоматизированных систем*. Москва:Энергия, 1977.

[136] В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, та М. В. Кутіна, *Діагностика електрообладнання: навчальний посібник*, Вінниця: ВНТУ, 2013.

[137] О. В. Губаревич, *Надійність і діагностика електрообладнання: підручник*. Сєвєродонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2016.

[138] В. І. Родінков, та Г. В. Горячев, “ Пристрій для захисту від коротких замикань і перевантажень послідовно ввімкнутих електродвигунів постійного струму”, Патент України 34252 Н02 Н7/08 /.; заявл. 18.06.1999, опубл. 15.02.2001, Бюл. №1, 2001р.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Акти впровадження дисертаційної роботи

УЗГОДЖЕНО

Проректор з наукової
роботи

В.В. Грабко

«___» _____ 2021р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «Зоря Поділля»

Войтенко О.І.

«___» _____ 2021р.



АКТ УПРОВАДЖЕННЯ № ___

результатів дисертаційного дослідження

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційного дослідження асистента кафедри ТЕЕВ Коваля Андрія Миколайовича
«Система автоматизованого керування дводвигуновим електроприводом похилого дифузійного апарата»

(найменування НДР)

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03. - «Електротехнічні комплекси та системи»
на двох дифузійних апаратах Гайсинського цукрового заводу ТОВ «Зоря Поділля»
впровадженні в 2018 - 2020 р.р

(найменування підприємства, організації, установи тощо, де здійснюється упровадження)

1. Вид упровадженої продукції

Вдосконалена система дводвигунового приводу похилого дифузійного апарата
(техніка, технологія, матеріал, методи, теорії і інше)

2. Характеристика масштабу упровадження дифузійний апарат ДС-12

(одиничне, дрібносерійне, серійне, інше)

3. Новизна результатів науково-дослідної роботи. Впроваджені результати дозволили дослідити динамічні властивості системи приводу завантаженого сировиною дифузійного апарату і визначити вплив окремих параметрів системи та режиму на область стійкості електроприводу та підвищивши надійність його роботи в номінальному режимі за рахунок автоматизованого контролю його електричних та механічних параметрів

(важливі показники, які характеризують рівень отриманого наукового результату; переваги над аналогами)

4. Соціальний ефект

Підвищення запасу стійкості дифузійного апарату ДС-12 та надійності його роботи

(підвищення надійності роботи, охорона навколишнього середовища;)

Від ВНТУ:

Начальник НДЧ

Богачук В.В.

Науковий керівник

Кухарчук В.В.

Від організації

Головний інженер

І. Б. Матвійшин

Головний енергетик

О.І. Довгополук

УЗГОДЖЕНО

Проректор з наукової
роботи

В.В. Грабко

«__» ____ 2021р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
Філії "ВП "Цукорремналадка"
ПрАТ "АК "САТЕР"

В.П. Печенюк

«__» ____ 2021р.



АКТ УПРОВАДЖЕННЯ № ____ результатів дисертаційного дослідження

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційного дослідження
асистента кафедри ТЕЕВ Ковалю Андрія Миколайовича
«Система автоматизованого керування дводвигуновим електроприводом
похилого дифузійного апарата»
(найменування НДР)

на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.09.03. - «Електротехнічні комплекси та системи»

на підприємстві Філія "ВП "Цукорремналадка" ПрАТ "АК "САТЕР"
впровадженні в 2017 - 2020 р.р

(найменування підприємства, організації, установи тощо, де здійснюється упровадження)

1. Вид упровадженої продукції

Методика визначення динамічних властивостей дводвигунової систем
електроприводу похилого дифузійного апарата
(техніка, технологія, матеріал, методи, теорії і інше)

2. Характеристика масштабу упровадження дифузійний апарат ДС-12 (одиничне, дрібносерійне, серійне, інше)

3. Новизна результатів науково-дослідної роботи. Вдосконалено матема-
тичні моделі дводвигунового електропривода похилого дифузійного апарата,
які враховують наявність нелінійного пружно-дисипативного зв'язку між дви-
гунами, що дозволяє визначати динамічні властивості системи приводу при
здійсненні модернізації систем автоматизованого керування електроприводом
та виконанні пуско-налагоджувальних робіт на підприємствах цукрової галузі
(важливі показники, які характеризують рівень отриманого наукового результату; переваги над аналогами)

4. Соціальний ефект

Збільшення запасу стійкості системи привода дифузійного апарата похи-
лого типу та підвищення надійності його роботи
(підвищення надійності роботи, охорона навколишнього середовища;)

Від ВНТУ:

Начальник НДЧ

Богачук В.В.

Науковий керівник

Кухарчук В.В.

Від організації

ДОДАТОК Б

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 дводвигунного 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 конференції. *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.