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 анормальних 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 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.

Таким чином обґрунтовано задачу 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. 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.

В третьому розділі розроблено математичні моделі системи асинхронного приводу 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 приводу 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 анормальних 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 справедливість 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 однотактному 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. 05.11.2018*о, Бюл. № 2/2019*25, 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 привода похилого дифузійного апарата”, *на 78 наукові й 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-технічні 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
Загальна характеристика технологічних процесів цукрової галузі 26
Особливості роботи системи приводу похилого дифузійного апарата..... 31
Аналіз існуючих систем автоматичного керування дводвигунних електроприводів та їх математичний опис 35
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
Математичні моделі системи електроприводу дифузійного апарату похилого типу з нелінійним пружно-дисипативних зв’язків.....53
Дослідження системи електроприводу похилого дифузійного апарата в динамічному режимі роботи з врахуванням нелінійного характеру пружних зв’язків 65
Вплив параметрів системи та режиму на динамічні властивості нелінійної системи електропривода похилого дифузійного апарата 76
Висновки..... 84
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА 86
Математичні моделі асинхронного електропривода похилого дифузійного апарата з частотним регулюванням, які враховують нелінійний характер пружно-дисипативних зв’язків.....86

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

Обгрунтування 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 незміною. 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 недосконаліть 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 випливають 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 темами «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 символьної 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 такий: [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 колесу 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 «АВІА-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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] В. І. Родінков, та А. М. Коваль, “Оцінка точності вимірювання струмів та напруг складної форми у трифазному однотактному 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. 05.11.2018*о, Бюл. № 2/2019*25,* 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 привода похилого дифузійного апарата”, *на 78 наукові й 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-технічні 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.: Енерговидав, 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 електроприводами.* Учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург: Энергоиздататом, 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: Энергоиздататом,1992.

[49] Ю. А. Борцов, и А. И. Бычков, “Обобщенные оценки влияния упругих звеньев на динамику электроприводов и настройку регуляторов унифицированных схем”, *Элетропромышленость. 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 Orlowska-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. Orlowska-Kowalska, and K. Szabat, "Optimization of fuzzy-logic speed controller for DC drive system with elastic joints", *IEEE Transactions on Industry Applications,v*ol. 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. Олєйніков 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 автоматизированый електропривод с упругими связями”, *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління,* №1, с. 114-119, 2002.

[75] Д. Н. Дочвири, “Оптимизация переходных процесов 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 горнах 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, “Иследование 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, "Автоматизированый электропривод диффузионного апарата 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 вентильних 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] H. 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 (ІПРТ-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. Кацив, 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. Гультяев, *Имитационое 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’е*. 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 обертального 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. Білинська, 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 звязь, 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 H02 H7/08 /.; заявл. 18.06.1999, опубл. 15.02.2001, Бюл. №1, 2001р.