

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1

Вібрації в техніці та технологіях



Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

Вібрації в техніці та технологіях

№ 1 (104)

Вінниця 2022

**ВІБРАЦІЇ В
ТЕХНІЦІ ТА
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального
спрямування Видавець: Вінницький національний
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та
технологіях”

*Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової
інформації*

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

*Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та
технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця,
2022. – 1 (104) – 137 с.*

*Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного
університету (протокол № 10 від 29.04.2022 р.)*

*Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань
України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки
України від 02.07.2020 р. № 886)*

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., професор,
академік НААН України, Вінницький
національний аграрний університет

**Заступник головного
редактора**

Адамчук В.В. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Національний науковий
центр “Інститут механізації та електрифікації
сільського господарства”

Відповідальний секретар

Солона О.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Національний університет
біоресурсів і природокористування України

Граняк В.Ф. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Деревенько І. А. – к.т.н., доцент,
Національний університет «Львівська
політехніка»

Зіньковський А.П. – д.т.н., професор,
Інститут проблем міцності імені Г. С.
Писаренка НАН України

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Матвєєв В.В. – д.ф.-м.н., професор,
академік НАН, Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Севостьянов І.В. – д.т.н., професор,
Вінницький національний аграрний
університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Цуркан О.В. – д.т.н. доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

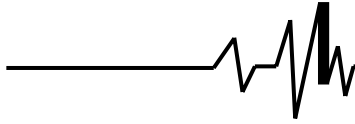
Максімов Джордан Тодоров – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

Технічний редактор **Замрій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/>

Електронна адреса: vibration.vin@ukr.net

**З М І С Т****1. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН**

| | |
|---|----|
| <i>Sevostianov I., Ivanchuk Ya.</i> ELABORATION AND RESEARCHES OF A VIBRO-PRESS FOR DEHYDRATION OF DAMP DISPERSIVE MATERIALS..... | 5 |
| <i>Цуркан О. В.</i> ПЕРЕДУМОВИ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ НАСІННЯ ГАРБУЗА У ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ..... | 12 |
| <i>Граняк В. Ф., Солоня О. В.</i> ПЕРСПЕКТИВИ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ОБЕРТОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЇХ ВІБРОСИГНАЛІВ..... | 20 |
| <i>Омельянов О. М., Токарчук О. А.</i> ОБҐРУНТУВАННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕПАРАТОРА З ВІБРАЦІЙНИМ ПРИВОДОМ ЗБУДЖЕННЯ ПРОСТОРОВИХ КОЛИВАНЬ..... | 30 |
| <i>Мельник В. М., Косова В. П., Остапенко Ж. І., Швиденко В. В.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ НА М'ЯСНУ СИРОВИНУ..... | 38 |
| <i>Ярошенко Л.В., Чубик Р.В.</i> ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НЕЙРОКОНТРОЛЕРА ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВІБРОПРИВОДОМ АДАПТИВНИХ ВІБРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН..... | 44 |

2. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА

| | |
|---|-----|
| <i>Sevostianov I., Melnyk O.</i> ELABORATION AND RESEARCHES OF APPARATUS OF CONTROL FOR HYDROPONIC INSTALLATIONS..... | 57 |
| <i>Бовсуновський А. П., Носаль О. М.</i> МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ТРІЩИНИ ВТОМИ ПРИ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАННЯХ ВАЛУ ТУРБІНИ..... | 63 |
| <i>Веселовська Н. Р.</i> РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИПРОБУВАЛЬНО-ДІАГНОСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВЕРСТАТІВ З ЧПК..... | 71 |
| <i>Матвійчук В. А., Михалевиц В. М., Колісник М. А.</i> ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПРИ ПРЯМОМУ І ЗВОРОТНОМУ ВИТИСКУВАННІ МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ..... | 81 |
| <i>Сивак Р. І., Островський А. Й., Залізняк Р. О.</i> ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧНОЇ ТЕЧІЇ МЕТАЛУ В УМОВАХ ОСЬОВОЇ СИМЕТРІЇ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ..... | 92 |
| <i>Яропуд В. М., Грицун А. В., Мазур І. М.</i> ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ОБРОБКИ РІДКОГО ГНОЮ НА СВИНОФЕРМАХ..... | 98 |
| <i>Trukhanska O.</i> RESEARCH OF THE WORKING PROCESS OF THE CLEANING SYSTEM OF MACHINES FOR HARVESTING ROOT CROPS..... | 106 |

3. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА

| | |
|--|-----|
| <i>Присяжнюк Д. В.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІБРООЗОНУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ..... | 117 |
| <i>Полевода Ю. А., Соломон А. М., Бондар М. М.</i> МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СИРНОГО ПРОДУКТУ..... | 124 |
| <i>Шибецький В. Ю., Остапенко Ж. І., Фесенко В. В.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ І ТЕПЛООБМІНУ У ВІНОСНИХ ТЕПЛООБМІННИХ ЕЛЕМЕНТАХ ЕКСТРАКТОРІВ..... | 132 |

**Ярошенко Л. В.**

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Чубик Р. В.**

к.т.н., доцент

**Національний
університет «Львівська
політехніка»****Yaroshenko L.**PhD of Engineering, Associate
Professor**Vinnitsia National Agrarian
University****Chubyk R.**PhD of Engineering, Associate
Professor**Lviv Polytechnic National
University****УДК 621.8:681.5; 004.75****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-6****ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
НЕЙРОКОНТРОЛЕРА ДЛЯ СИСТЕМИ
КЕРУВАННЯ ВІБРОПРИВОДОМ
АДАПТИВНИХ ВІБРАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН**

У статті запропоновано і проаналізовано структуру нейроконтролера для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин (АВТМ), яка дозволяє реалізувати двоконтурну систему нейрокерування енергетичними та технологічними параметрами АВТМ кожний контур якої враховує інерційні та дисипативні характеристики коливної механічної системи АВТМ. Завдяки відслідковуванню в первинному контурі зсуву фаз між частотою вимушених коливань робочого органу АВТМ та частотою циклічної вимушуючої сили віброприводу та застосуванню технології прогнозуючого модельного нейрокерування для корекції частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу нейроконтролер забезпечує резонансний режим роботи та мінімальні енергозатрати на вібропривод. Другий контур нейрокерування забезпечує на резонансній частоті відслідковування та стабілізацію питомої роботи вібраційного поля АВТМ протягом циклу віброобробки застосовуючи для корекції амплітуди коливань робочого органу систему гібридного нейро-ПІД управління із само-налаштуванням на основі нейромоделі АВТМ яка враховує інерційні та дисипативні характеристики коливної механічної системи АВТМ.

Запропоноване конструктивне рішення нейроконтролера для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин дозволяє покращити якісні характеристики керування динамічними параметрами як електромагнітного так і дебалансного віброприводу. Застосування нейромережових технологій в конструктивному рішенні дозволяє впровадити алгоритми нейрокерування які при зміні параметрів технологічного процесу віброобробки, що реалізуються АВТМ, або при зміні маси завантаження робочого органу АВТМ, завдяки застосуванню технології прогнозуючого модельного нейрокерування на основі сіплекс-методу або квазі-ньютонівського алгоритму оптимально вибиратимуть стратегію корекції частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу з метою забезпечення та підтримування постійного резонансного режиму роботи АВТМ і на резонансній частоті АВТМ проводитимуть стабілізацію питомої роботи вібраційного поля АВТМ шляхом автоматичної корекції амплітуди коливань робочого органу за допомогою нейромережового ПІД-регулятора із само-налаштуванням на основі прямого нейроемулатора АВТМ.

Ключові слова: нейрокерування, нейронна мережа, нейроконтролер, вібропривод, вібраційна технологічна машина.



Постановка проблеми. Ідея застосування нейронних мереж для керування динамічними об'єктами вперше була висловлена ще 1964 р. у працях У. Видроу [1], проте інтенсивні дослідження цього напрямку розгорнулися лише наприкінці 80-х років минулого століття. З того часу кількість методів нейрокерування багаторазово збільшилася, з'явилися нові рішення на основі багатомодульного підходу та наближеного динамічного програмування.

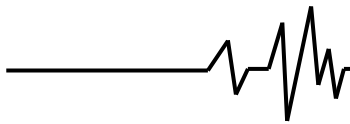
У ході розвитку нейрокерування, досліджувалися різні способи побудови нейроконтролерів із застосуванням різних типів нейронних мереж: лінійних, багатопарових персептронів, рекурентних мереж, мереж радіальних базисних функцій та ін. Найкращі результати отримані під час використання багатопарових персептронів з лініями затримок [2]. Сформувалися два основних напрямки застосування нейронних мереж всередині синтезованих регуляторів: прямі методи, засновані на безпосередньому управлінні об'єктом за допомогою нейронної мережі, і непрямі методи, коли нейронна мережа використовується для виконання допоміжних функцій управління, таких як фільтрація шуму або ідентифікація динамічного об'єкта. Залежно від кількості нейронних мереж, що становлять нейроконтролер, системи нейрокерування можуть бути одномодульними або багатомодульними. Схеми нейрокерування, що застосовуються разом із традиційними контролерами, називаються гібридними.

На сьогоднішній день нейроконтролери займають провідне місце у системі математичного моделювання. Одним із методів побудови даних контролерів є метод нейронних мереж, що базується на принципах функціонування мозку людини. Поєднуючи знання в галузі медицини та нейрофізіології з наявними розробками та ідеями в галузі інформатики, вчені виділили основні функціональні та структурні одиниці, які забезпечують розумову діяльність людини. Ці знання послужили потужним поштовхом до створення такого незамінного інструменту, як штучні нейронні мережі. Аналіз наукової літератури присвяченої даному напрямку показує, що нейронні мережі задіяні в досить широкому спектрі галузей наукової діяльності, вони застосовуються при обробці та розпізнаванні образів, у статистиці та чисельних методах, біології. Вирішення задач побудови нейронних контролерів є дуже важливим завданням, яке необхідно вирішувати при розробці різних наукових комплексів, зокрема, систем управління. Вирішення цієї задачі дозволяє вирішити проблему визначення параметрів різних систем з метою визначення можливості їхньої роботи; можна вирішити задачу автоматизації систем та управління механізмами. На основі цих знань можна розробити методу, яка забезпечуватиме високу якість та малий час

розпізнавання основних параметрів. Для цього в роботі запропоновано спосіб побудови нейроконтролера, заснований на застосуванні методу прогноуючого модельного нейрокерування з використанням прямого нейроемулатора.

Аналіз останніх досліджень. Як показує аналіз науково-технічної літератури, на даному етапі розвитку вібраційної техніки та технологій відомо багато методів для керування параметрами вібраційного поля та засобів для їх реалізації які докладно описані в роботі [3]. Відомо ряд пристроїв для керування електромагнітним та дебалансним віброприводами вібраційних технологічних машин (ВТМ) зокрема [4], у якому для керування електромагнітним віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин, що складається із робочого органу з вібродатчиком, який встановлений на пружній системі та електромагнітного віброприводу і з'єднаний із блоком керування, що виконаний у вигляді промислового мікроконтролера із зашитою програмою корекції параметрів коливного руху та пов'язаний через інтерфейс із перетворювачем частоти, який як показано в роботах [5, 6] забезпечує живлення електромагнітного віброприводу двополярною широтно-імпульсно модульованою напругою. Такий пристрій дозволяє автоматизувати процес керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин, за рахунок регулювання одночасно двох параметрів – частоти та амплітуди, що дозволяє забезпечити оптимальні режими роботи при мінімальних затратах енергії на вібропривод.

Недоліком даного пристрою є те, що програмне забезпечення яке реалізує корекцію параметрів коливного руху АВТМ базується на покроковому принципі [7] пошуку екстремуму амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) АВТМ. Пристрої керування такого типу вираховують приріст керуваної величини і за допомогою певних законів генерують керуючий вплив на вібропривод. Якщо АВТМ працювала на вершині максимуму АЧХ АВТМ і відбулась зміна маси завантаження робочого органу на певну величину то за приростом амплітуди коливань робочого органу неможливо визначити напрям зміни маси робочого органу, тому пристрої та системи такого типу роблять пробну корекцію, у даному випадку це зміна циклічної частоти віброприводу і за реакцією механічної коливної системи АВТМ визначають напрям переміщення власної резонансної частоти АВТМ при новій масі завантаження робочого органу. Маючи інформацію про напрям зміни власної резонансної частоти АВТМ, даний пристрій починає проводити корекцію циклічної частоти віброприводу у необхідну сторону за певним законом керування, аж до моменту коли у АВТМ виникне обернена реакція на приріст циклічної частоти віброприводу. Тобто, коли на зміну циклічної частоти віброприводу у певну сторону, виникає позитивний приріст



амплітуди коливань система виконує таку корекцію, а як тільки виникає зменшення амплітуди при тому ж самому напрямі приросту циклічної частоти віброприводу, пристрій зупиняє корекцію циклічної частоти віброприводу. Отже даний пристрій керування АВТМ затрачає додатковий час на встановлення напряму зміни власної резонансної частоти АВТМ і це є причиною того, що АВТМ протягом цього часу знаходиться на режимах роботи які є енергетично невідповідними.

Серед інших відомих пристроїв керування роботою АВТМ слід відмітити пристрій [8] (див. рис. 1) в якому для керування електромагнітним віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин 1, який включає коливну масу 3 (робочий орган) із вібродатчиком 7, встановлену на пружній системі 4, і електромагнітний вібратор (що складається з якоря 5, та котушки з осердям 6), з'єднаний із блоком керування, блок керування виконаний у вигляді двох контурів - первинного, який складається із підсилювача потужності,

реалізованого на базі широтно-імпульсної модуляції, детектора зсуву фаз 8, елемента порівняння зсуву фаз 11, задавача зсуву фаз 12 та регулятора частоти циклічної примушуючої сили 13 та вторинного який складається із елемента завдання технологічно-оптимальних параметрів 16 коливань робочого органу, елемента синтезу необхідного значення амплітуди коливань робочого органу 9, елемента порівняння амплітуди 10, регулятора амплітуди циклічної вимушуючої сили електромагнітного віброприводу 14 та підсилювача реалізованого на базі широтно-імпульсної модуляції 15, причому вихід вібродатчика 7 з'єднаний із входами детектора зсуву фаз 8, блоком синтезу необхідного значення амплітуди коливань 9 та елементом порівняння амплітуди 10, другий вхід детектора зсуву фаз 9 з'єднаний із елементом підсилення на базі широтно-імпульсної модуляції 15, а вихід із входом елемента порівняння зсуву фаз 11, другий вхід якого з'єднаний із задавачем зсуву фаз 12.

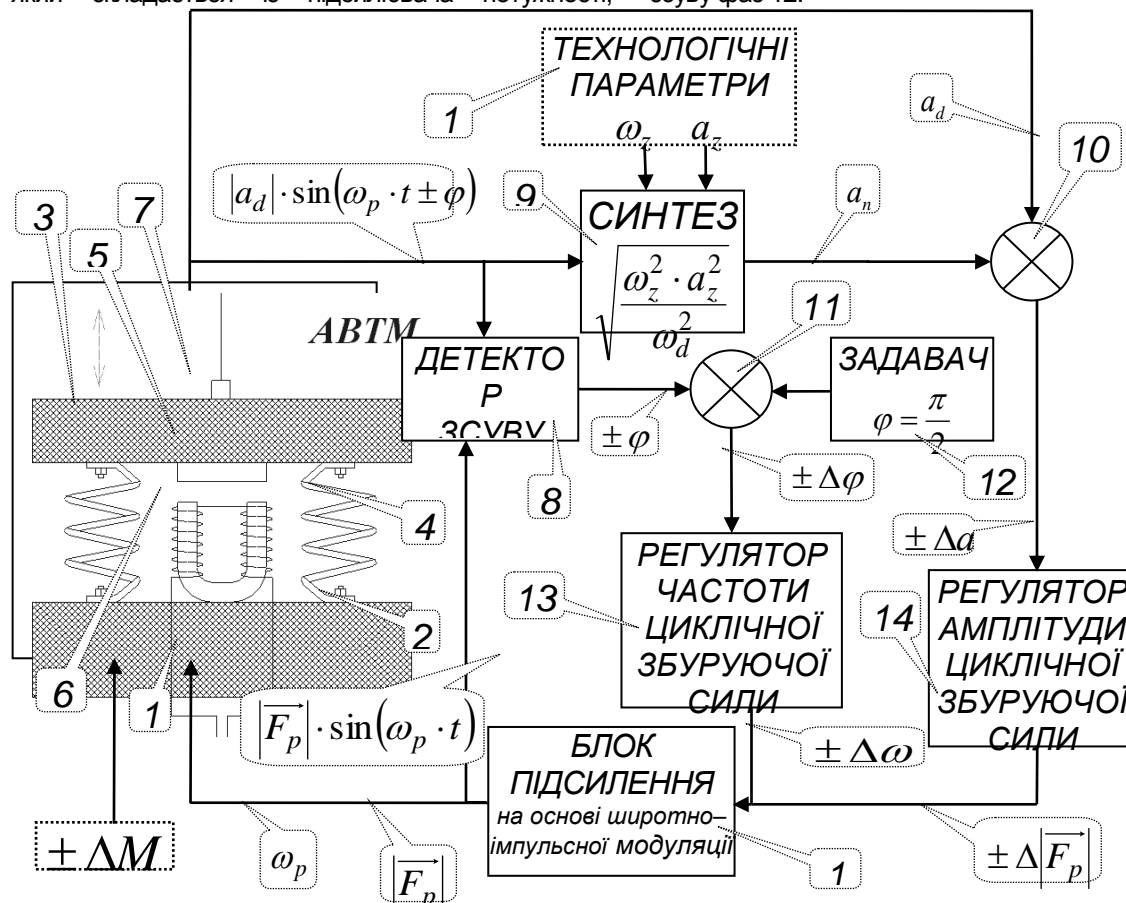
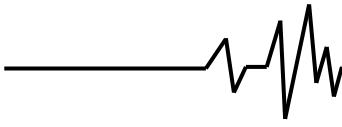


Рис. 1. Пристрій для керування електромагнітним віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин

Вихід елемента порівняння зсуву фаз 11 з'єднаний із входом регулятора частоти циклічної вимушуючої сили 13, вихід якого з'єднаний із підсилювачем на базі широтно-імпульсної модуляції 15, у свою чергу два інші входи елемента синтезу 9 необхідного значення амплітуди коливань

робочого органу з'єднані із елементом завдання технологічно-оптимальних параметрів коливань робочого органу 16 а вихід із другим входом елемента порівняння амплітуди 10, вихід якого з'єднаний із входом регулятора амплітуди циклічної вимушуючої сили 14, вихід якого з'єднаний із



підсилювачем на базі широтно-імпульсної модуляції 15, вихід підсилювача з'єднаний із електромагнітним віброприводом 6. Позитивною стороною даного пристрою керування є його комплексний підхід до впливу на вібропривод зокрема те, що він дозволяє реалізувати резонансний режим роботи відслідковуючи зсув фаз між частотою циклічної вимушуючої сили віброприводу та переміщенням робочого органу і вже на резонансній робочій частоті проводити корекцію амплітуди циклічної вимушуючої сили віброприводу із метою забезпечення стабілізації заданих технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля АВТМ.

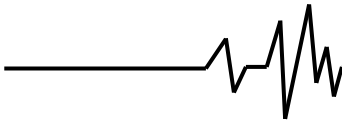
Недоліком даного пристрою є те, що його конструктивне рішення не пов'язує причинно-наслідкового зв'язку між інерційно-дисипативними характеристиками адаптивних вібромашин, керованого ним віброприводу та динамікою робочого органу АВТМ у всіх перехідних режимах роботи. Тобто в конструкції самого пристрою керування віброприводом АВТМ немає конструктивних елементів які б враховували інерційні та дисипативні параметри АВТМ та застосовували б ці дані разом із даними про поточну динаміку робочого органу АВТМ для проектування поточних впливів на корекцію амплітуди та частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу з метою забезпечення енергоощадного та технологічно оптимального режиму роботи одночасно. Наприклад в таких вібромашинах як вібромлини [9], вібросепаратори [10], ... одна довільна маса на робочий орган адаптивної вібромашини постійно надходить інша постійно в процесі віброобробки його покидає тому приведена маса системи постійно змінюється і як наслідок змінюється власна резонансна частота коливань коливної механічної система АВТМ. Тому такий пристрій керування буде проводити корекцію частоти як наслідок отримуватиме перехідний процес зі змінною амплітуди коливань і як реакцію на нову амплітуду коливань знову проводитиме корекцію вже тепер по амплітуді циклічної вимушуючої сили з метою стабілізації амплітуди і знову отримає перехідний процес, як реакцію на корекцію бо об'єкт управління коливна ланка. Відсутність в структурі даного пристрою ланок які характеризують інерційні та дисипативні характеристики конкретної АВТМ унеможлиблює проведення оптимізації всіх перехідних процесів протягом технологічного циклу віброобробки, і враховуючи те, що для більшості типів адаптивних вібромашин є характерною постійна зміна приведеної маси або жорсткості пружної системи можна прийти до висновку, що перехідні процеси супроводжують постійно весь цикл віброобробки. І якщо перехідні процеси не враховувати наприклад при таких процесах віброобробки як віброшліфівка або віброзачисна обробка [11] то даний пристрій

або зніме додатковий шар матеріалу або не добре його частину.

Постановка задачі. Зважаючи на зазначене обґрунтування та розробка способу побудови нейроконтролера, що заснований на застосуванні методу прогнозуючого модельного нейрокерування з використанням прямого нейроемулятора для розширення функціональних можливостей адаптивних вібраційних машин, який дозволяє значно економити енергозатрати на вібропривод їхніх коливань представляє актуальну науково-технічну задачу, вирішення якої і становить основну мету даної роботи.

Виклад основного матеріалу. Зважаючи на результати попередніх досліджень для досягнення поставленої мети можна досягнути, якщо у нейроконтролері для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин, який включає коливну масу (робочий орган) із вібродатчиком, встановлену на пружній системі, і вібратор, з'єднаний із блоком керування, блок керування виконаний у вигляді двох контурів, побудувати, первинний контур у складі детектора зсуву фаз, елемента оптимізаційного алгоритму частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу, елемента прямого нейроемулятора по зсуву фаз адаптивної вібраційної технологічної машини і лінії затримки TDL, а вторинний контур - із елемента завдання технологічно-оптимальних параметрів коливань робочого органу, елемента синтезу необхідного значення амплітуди коливань робочого органу, елемента порівняння необхідної амплітуди, елемента порівняння похибки розповсюдження, ПІД-регулятора, елемента «штучна нейронна мережа» який використовується для автоматичної настройки коефіцієнтів k_p , k_i , k_d ПІД-регулятора,

елемента прямого нейроемулятора по амплітуді адаптивної вібраційної технологічної машини і лінії затримки TDL1 та TDL2, причому вихід вібродатчика з'єднати із одним із двох входів детектора зсуву фаз, одним із трьох входів елемента синтезу необхідного значення амплітуди коливань робочого органу, двома іншими своїми входами елемент синтезу необхідного значення амплітуди коливань робочого органу з'єднаний із двома виходами елемента завдання технологічно-оптимальних параметрів коливань робочого органу, також вихід вібродатчика з'єднано із одним із двох входів елемента порівняння необхідної амплітуди, одним із двох входів елемента порівняння похибки розповсюдження та входами двох ліній затримки TDL1 та TDL2, своїм другим входом елемент порівняння необхідної амплітуди з'єднаний із виходом елемента синтезу необхідного значення амплітуди коливань робочого органу, а своїм виходом елемент порівняння необхідної амплітуди з'єднаний із одним із трьох входів елемента «штучна нейронна мережа» та одним із чотирьох входів ПІД-регулятора, другий вхід елемента



«штучна нейронна мережа» з'єднано із лінією затримки TDL2, а три виходи (k_p , k_i , k_d) елемента «штучна нейронна мережа» з'єднані із трьома із чотирьох входів ПІД-регулятора, вихід лінії затримки TDL1 з'єднано із одним із трьох входів елемента прямого нейроемулятора по амплітуді адаптивної вібраційної технологічної машини, а один із двох його виходів з'єднано із другим входом елемента порівняння похибки розповсюдження, вихід елемента порівняння похибки розповсюдження з'єднано із другим входом елемента прямого нейроемулятора по амплітуді адаптивної вібраційної технологічної машини. Даний інформаційний сигнал потрапляє в елемент «штучна нейронна мережа» завдяки тому, що другий вихід елемента прямого нейроемулятора по амплітуді адаптивної вібраційної технологічної машини з'єднано із третім входом елемента «штучна нейронна мережа», вихід ПІД-регулятора з'єднано із третім входом елемента прямого нейроемулятора по амплітуді адаптивної вібраційної технологічної машини, одним із двох виходів елемента «оптимізаційний алгоритм», входом лінії затримки TDL, другим входом детектора зсуву фаз та адаптивною вібраційною технологічною машиною, вихід детектора зсуву фаз з'єднано із одним із двох входів елемента «оптимізаційний алгоритм», а другий вихід елемента «оптимізаційний алгоритм» з'єднано з одним із двох входів елемента прямого нейроемулятора по зсуву фаз адаптивної вібраційної технологічної машини, другий вхід елемента прямого нейроемулятора по зсуву фаз адаптивної вібраційної технологічної машини з'єднано із виходом лінії затримки TDL, а вихід елемента прямого нейроемулятора по зсуву фаз адаптивної вібраційної технологічної машини з'єднано із другим входом елемента «оптимізаційний алгоритм».

Така структура нейроконтролера для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних дозволяє реалізувати двоконтурну систему нейрокерування енергетичними та технологічними параметрами АВТМ кожний контур якої враховує інерційні та дисипативні характеристики коливної механічної системи АВТМ. Завдяки відслідковуванню в первинному контурі зсуву фаз між частотою вимушених коливань робочого органу АВТМ та частотою циклічної вимушуючої сили віброприводу та застосуванню технології прогнозуючого модельного нейрокерування для корекції частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу нейроконтролер забезпечує резонансний режим роботи та мінімальні енергозатрати на вібропривод. Другий контур нейрокерування забезпечує на резонансній частоті відслідковування та стабілізацію питомої роботи вібраційного поля АВТМ протягом циклу віброобробки застосовуючи для корекції амплітуди

коливань робочого органу систему гібридного нейро-ПІД управління із само-налаштуванням на основі нейромоделі АВТМ яка враховує інерційні та дисипативні характеристики коливної механічної системи АВТМ.

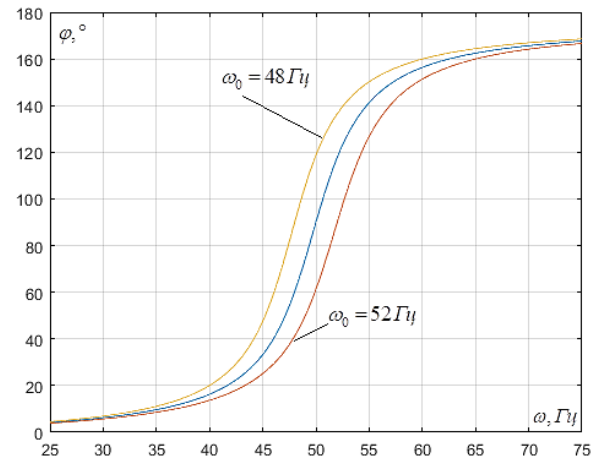


Рис. 2. Фазочастотна характеристика АВТМ із власною резонансною частотою коливань $\omega_0 = 52 \text{ Гц}$

На рис. 2 зображено фазочастотну характеристику (ФХЧ) АВТМ із власною резонансною частотою коливань $\omega_0 = 52 \text{ Гц}$ та показано динаміку зміни ФХЧ АВТМ при довантаженні її робочого органу і розвантаженні його в технологічному процесі віброобробки додатковою приведеною масою.

На рис. 3 зображено перехідні процеси при використанні нейромережевого ПІД регулятора із само-налаштуванням (та без нього) в АВТМ при корекції амплітуди коливань робочого органу на резонансній частоті з метою забезпечення стабільності питомої роботи вібраційного поля робочого органу протягом технологічного циклу віброобробки.

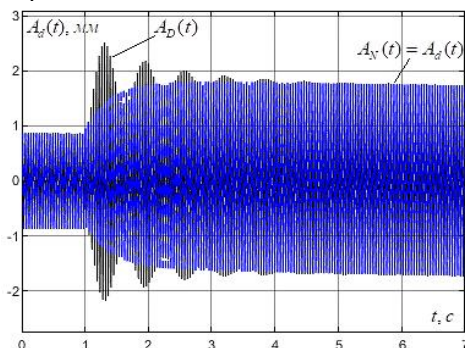
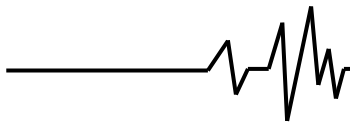


Рис. 3. Перехідні процеси при використанні нейромережевого ПІД регулятора із само-налаштуванням та без нього

На рис. 4 зображено функціональну схему нейроконтролера для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин.



На адаптивну вібраційну технологічну машину 1 (на рис. 4 зображена із керованим дебалансним віброприводом) діє параметричне збурення ($\pm \Delta M$) 2. Завдяки зворотному зв'язку по частоті ω_d коливань робочого органу АВТМ 1 з'єднана із одним із двох входів детектора зсуву фаз 3 одним із трьох входів елемента синтезу необхідного значення амплітуди коливань робочого органу 15. Двома іншими своїми входами елемент синтезу необхідного значення амплітуди коливань робочого органу 15 з'єднаний із двома виходами елемента завдання технологічно-оптимальних параметрів коливань робочого органу 8. Завдяки

зворотному зв'язку по амплітуді A_d коливань робочого органу АВТМ 1 з'єднана із одним із двох входів елемента порівняння необхідної амплітуди 7, одним із двох входів елемента порівняння похибки розповсюдження 10 та входами двох 14 і 12 ліній затримки TDL (Tapped Delay Line). Своім другим входом елемент порівняння необхідної амплітуди 7 з'єднаний із виходом елемента синтезу необхідного значення амплітуди коливань робочого органу 15, а своїм виходом елемент порівняння необхідної амплітуди 7 з'єднаний із одним з трьох входів елемента «штучна нейронна мережа» 13 та одним входом із чотирьох входів ПІД-регулятора 9.

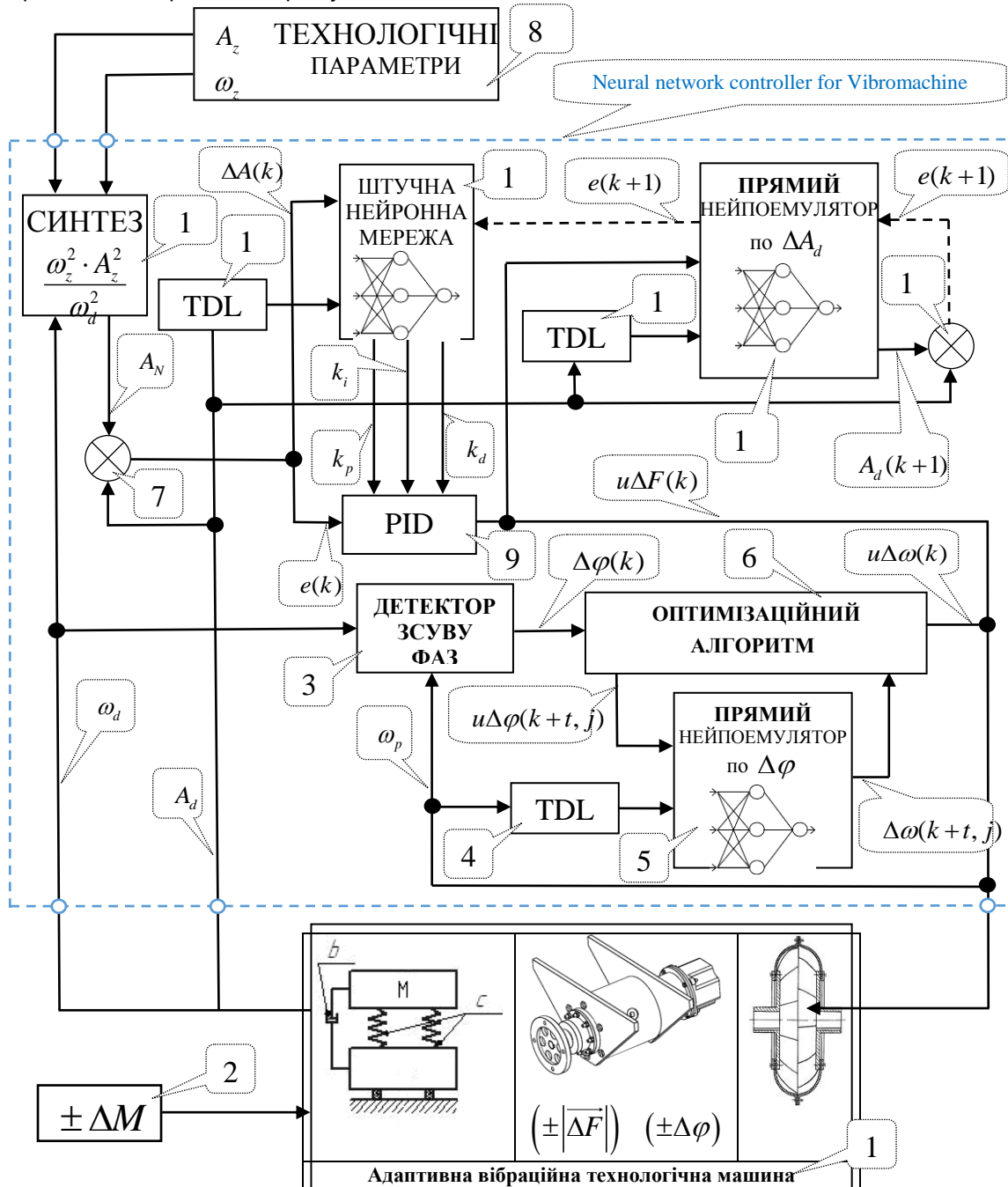


Рис. 4. Функціональна схема нейроконтролера для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин



Другий вхід елемента «штучна нейронна мережа» 13 з'єднано із лінією затримки TDL 14, причому три його виходи (k_p , k_i , k_d) з'єднані із трьома із чотирьох входів ПІД-регулятора 9. Вихід лінії затримки TDL 12 з'єднано із одним із трьох входів елемента прямого нейроемулятора по амплітуді 11 адаптивної вібраційної технологічної машини 1, а один із двох його виходів з'єднано із другим входом елемента порівняння похибки розповсюдження 10. Вихід елемента порівняння похибки розповсюдження 10 з'єднано із другим входом елемента прямого нейроемулятора по амплітуді 11 адаптивної вібраційної технологічної машини 1 і даний інформаційний сигнал потрапляє в елемент «штучна нейронна мережа» 13 завдяки тому, що другий вихід елемента прямого нейроемулятора по амплітуді 11 адаптивної вібраційної технологічної машини 1 з'єднано із третім входом елемента «штучна нейронна мережа» 13. Вихід ПІД-регулятора 9 з'єднано із третім входом елемента прямого нейроемулятора по амплітуді 11 адаптивної вібраційної технологічної машини 1, одним із двох входів елемента «оптимізаційний алгоритм» 6, входом лінії затримки TDL 4, другим входом детектора зсуву фаз 3 та адаптивною вібраційною технологічною машиною 1. Вихід детектора зсуву фаз 3 з'єднано із одним із двох входів елемента «оптимізаційний алгоритм» 6, а другий вихід елемента «оптимізаційний алгоритм» 6 з'єднано з одним із двох входів елемента прямого нейроемулятора по зсуву фаз 5 адаптивної вібраційної технологічної машини 1. Другий вхід елемента прямого нейроемулятора по зсуву фаз 5 адаптивної вібраційної технологічної машини 1 з'єднано із виходом лінії затримки TDL 4, а вихід елемента прямого нейроемулятора по зсуву фаз 5 адаптивної

вібраційної технологічної машини 1 з'єднано із другим входом елемента «оптимізаційний алгоритм» 6.

Принцип роботи нейроконтролера для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин наступний. Реалізація конструктивного рішення нейроконтролера для керування віброприводом АВТМ базується на зваженому комплексному підході до реалізації способу керування роботою АВТМ [12], способу стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля АВТМ [13] та використанні прямого нейроемулятора [14] АВТМ з метою врахування інерційних та дисипативних характеристик АВТМ при реалізації конструктивного рішення нейромережевої структури для динамічного управління та стабілізації параметрів вібраційного поля АВТМ протягом технологічного циклу віброобробки при заданих оптимальних параметрах вібраційного поля та при мінімальних енергозатратах (на резонансній робочій частоті). Підхід до реалізації конструктивного рішення нейроконтролера для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин забезпечує виконання основного фундаментального принципу механіки для коливних систем. Зокрема виконання та підтримування протягом технологічного циклу віброобробки умови резонансу для коливної механічної системи, тобто при резонансі в АВТМ існує відставання вимушених коливань робочого органу АВТМ від циклічної вимушуючої сили віброприводу на чверть періоду ($\pi/2$). Рівняння яке описує зв'язок між циклічною вимушуючою силою віброприводу та переміщенням робочого органу має вигляд:

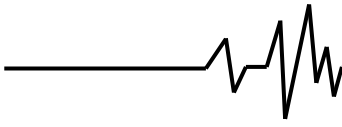
$$S(t) = \frac{F}{C} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \gamma^2 \cdot \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \cdot \sin \left(\omega \cdot t - \arctan \left(\frac{\gamma \cdot \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega}{\omega_0}} \right) \right), \quad (1)$$

C - жорсткість пружної системи АВТМ, F - амплітуда циклічної вимушуючої сили віброприводу, ω_0 - власна резонансна частота АВТМ, ω - частота циклічної вимушуючої сили віброприводу, γ - коефіцієнт демпфування коливної механічної системи.

Тобто при резонансному режимі роботи $\omega_0 \approx \omega$ АВТМ виконується рівність:

$$\varphi(\omega) = \arctan \left(\frac{\gamma \cdot \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega}{\omega_0}} \right) = \frac{\pi}{2}.$$

На рис. 2 показано як зміниться відставання вимушених коливань робочого органу АВТМ від циклічної вимушуючої сили віброприводу АВТМ із власною резонансною частотою коливань $\omega_0 = 52 \text{ Гц}$ при довантаженні (та розвантаженні в зворотному порядку) робочого органу додатковою масою протягом технологічного



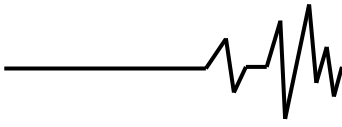
циклу віброобробки. З рис. 2 видно, що із довантаженням робочого органу АВТМ приведеної маси 2 ФЧХ АВТМ переміщується вліво по осі частот. Це зумовлюється переміщенням власної резонансної частоти f_0 АВТМ при зміні приведеної маси коливної механічної системи в сторону зменшення частоти при збільшенні приведеної маси АВТМ, виходячи із наступного співвідношення:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{C}{M}}, \quad (2)$$

де C – жорсткість пружної системи, M – приведена маса, що рівна $M = [m_a \cdot m_r] / [m_a + m_r]$, де m_a – активна маса, тобто маса робочого органу АВТМ, m_r – реактивна маса, тобто маса рами (корпусу) АВТМ.

Для того, щоб ефективно оцінювати та відслідковувати $\varphi(\omega)$ відставання вимушених коливань робочого органу АВТМ від циклічної вимушуючої сили віброприводу на яке впливає коефіцієнт демпфування коливної механічної системи γ , жорсткість пружної системи АВТМ C , приведена маса коливної механічної системи АВТМ M в конструкції нейроконтролера передбачено окремий контур нейрокерування. Конструктивне рішення запропонованого контуру нейрокерування динамічними параметрами віброприводу АВТМ попри врахування перерахованих вище параметрів АВТМ, дозволяє додатково вирішити ще одну проблему яка виникає у випадку керування АВТМ за допомогою керованого дебалансного віброприводу на основі зсуву фаз ($\varphi = \pi/2$) між частотою циклічної вимушуючої сили віброприводу і частотою вимушених коливань робочого органу АВТМ. Основна складність такого керування полягає в тому, що керований дебалансний вібропривод є двох масовою електромеханічно системою із пружним зв'язком і тому в процесі коливань (роботи АВТМ) немає жорсткого кінематичного зв'язку і важко визначити точно (однозначно) про кут між валом електродвигуна та дебалансним валом віброприводу. Запропонований контур нейрокерування динамічними параметрами віброприводу АВТМ який є частиною структури нейроконтролера дозволяє ефективно керувати частотою циклічної вимушуючої сили, як електромагнітного так і дебалансного віброприводу.

Корекція частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу проводиться завдяки тому, що (див. рис. 4) інформація про коливання ω_d АВТМ 1 від датчика вібрації у вигляді електричного сигналу надходить на вхід детектора зсуву фаз 3, а на другий вхід даного детектора надходить сигнал ω_p який є прямо пропорційний циклічній вимушуючій силі керованого віброприводу (дебалансного або електромагнітного). В детекторі зсуву фаз 3 проводиться постійне співставлення цих двох сигналів в часі та визначення зсуву фаз між ними $\Delta\varphi$ (при певній частоті циклічної вимушуючої сили). Інформація про біжучий стан зсуву фаз між частотою вимушених коливань робочого органу АВТМ та частотою циклічної вимушуючої сили віброприводу $\Delta\varphi(k)$ на умовному k -тому такті в процесі роботи поступає в блок 6 оптимізаційного алгоритму системи прогнозуючого модельного нейрокерування (NN Predictive Control) [15, 16, 17]. Дана система мінімізує функціонал вартості інтегральної помилки $Q(k)$, прогнозованої на декілька тактів в перед стосовно зсуву фаз $\Delta\varphi$ шляхом корекції $\pm\Delta\omega_p$ частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу АВТМ. Для прогнозування подальшої поведінки коливної механічної системи адаптивної вібраційної технологічної машини і розрахунку помилок $\pm\Delta\varphi$ використовується «прямий нейроемулятор» 5 АВТМ по зсуву фаз $\Delta\varphi$. «прямий нейроемулятор» по $\Delta\varphi$ 5 створюють шляхом його навчання подаючи набір випадкових комбінацій частот віброприводу (при сталому значенні амплітуди циклічної вимушуючої сили) із діапазону близького до робочого для АВТМ (наприклад якщо робоча частота для АВТМ становить $\omega_0 = 50 \text{ Гц}$, то достатньо дослідити від $\omega_{\min} = 25 \text{ Гц}$ до $\omega_{\max} = 75 \text{ Гц}$) та сформувати навчаючу вибірку $U = \{P_i, T_i\}_{i=1}^M$: де $P_i = [\omega(i) \varphi(i-1)]^T$, $T_i = \varphi(i)$. Отримана таким чином нейромережева модель не дозволяє судити про фізичні процеси, що протікають в адаптивній вібраційній технологічній машині 1, але згідно [14, 15, 16] може бути ефективно використана для аналізу та прогнозу поведінки даного об'єкта управління, а також для синтезу системи управління. Формуючи таку



нейромережеву модель із реальної АВТМ ми вже врахували (записали) її дисипативні та інерційні характеристики.

Елемент «оптимізаційний алгоритм» 6 отримує на k - тому такті цільову траєкторію ($\varphi = \pi/2$) на L тактів вперед яка відповідає резонансному режиму роботи АВТМ. Далі, для вибору оптимального керуючого впливу $\pm u\Delta\varphi$ стосовно корекції частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу АВТМ, розрахунки відбуваються у внутрішньому циклі першого контуру нейрокерування (його ітерації позначені як j). За час одного такту управління елемент «оптимізаційний алгоритм» 6 подає на вхід прямого нейроемулатора по $\Delta\varphi$ 5 серію різних впливів $u\Delta\varphi(k+t, j)$, де t - глибина прогнозування, $0 \leq t \leq L-1$, та отримує у відповідь різні варіанти поведінки коливної механічної системи адаптивної вібраційної технологічної $\Delta\omega(k+t, j)$, на основі чого «оптимізаційний алгоритм» 6 розраховує функцію вартості і визначає найкращу стратегію управління

$$S = \{u\Delta\varphi(k, j_1) u\Delta\varphi(k+1, j_2) \dots u\Delta\varphi(k+L-1, j_L)\}$$
 в сенсі мінімізації функціоналу вартості інтегральної помилки $Q(k)$ з метою забезпечення рівності $\varphi = \pi/2$. Тобто елемент «оптимізаційний алгоритм» 6 на основі інформації про реальний зсув фаз $\Delta\varphi$ між частотою циклічної вимушуючої сили віброприводу і частотою вимушених коливань робочого органу АВТМ та нейромережевої моделі АВТМ, що враховує реальні інерційні та дисипативні характеристики АВТМ проводить розрахунок та прогнозування реакції АВТМ. На основі цього робить вибір оптимальної стратегії для корекції частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу з метою забезпечення та підтримання постійного резонансного режиму роботи, шляхом забезпечення автоматичного виконання умови $\varphi = \pi/2$.

Вторинний контур нейрокерування, що входить в структуру нероконтролера для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин відповідає за автоматичну оптимізацію технологічних параметрів віброобробки АВТМ. Первинний контур нейрокерування є головним і він відповідає за

енергетичні параметри коливної системи, тобто забезпечує підтримання резонансного режиму роботи шляхом підлаштування частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу до власної резонансної частоти АВТМ. Іншими словами внаслідок роботи первинного контуру нейроуправління відбувається постійне в часі відслідковування зміни приведеної маси або непрямих параметрів таких, як зміна жорсткості пружної системи, зміна в'язкості оброблюваного середовища, або інших параметрів які мають вплив на власну резонансну частоту АВТМ. Внаслідок функціонування первинного контуру нейрокерування відбувається постійне переміщення по осі частот, частоти віброобробки АВТМ бо вона відповідає ω_0 власній резонансній частоті АВТМ.

Постійний перехід коливної механічної системи із однієї власної резонансної частоти на іншу вимагає корекції амплітуди A_d для забезпечення стабільності A_k питомої роботи вібраційного паля АВТМ протягом технологічного циклу віброобробки. Враховуючи те, що АВТМ є вібромашиною резонансного типу і працює в дуже вузькому діапазоні частот де коефіцієнт підсилення μ коливної механічної системи має дуже стрімку характеристику то реакція на одне і теж саме значення амплітуди циклічної вимушуючої сили буде суттєво відрізнятись по величині. І як наслідок у моменти переходу із одної власної резонансної частоти на іншу в амплітуді коливань робочого органу будуть виникати додаткові затухаючі в часі коливання амплітуди $A_D(t)$ (див. рис. 2), що будуть більші за оптимальні для даного технологічного процесу віброобробки $A_D > A_d$ на резонансній частоті. Аналогічна ситуація буде зберігатися у всіх перехідних процесах (тобто при довантаженні чи відвантаженні робочого органу АВТМ) тому що АВТМ як об'єкт управління є коливною ланкою. Враховуючи той факт, що для АВТМ характерна постійна зміна приведеної маси (наприклад: вібромлини, вібросепаратори, ...) протягом технологічного циклу віброобробки первинний контур нейрокерування буде постійно проводити корекцію частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу, а вторинний контур нейрокерування буде за ним проводити корекцію амплітуди циклічної вимушуючої сили віброприводу з метою стабілізації A_k питомої роботи вібраційного паля АВТМ після корекції частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу або у випадку необхідності зміни технологічних параметрів віброобробки. На рис. 2 показано два перехідні процеси які виникають у АВТМ при корекції A_d амплітуди коливань робочого органу



АВТМ на резонансній робочій частоті ($\omega_0 = 25 \text{ Гц}$) із $A_d = 0.9 \text{ мм}$ до технологічно оптимальної $A_d = A_N = 1.8 \text{ мм}$. Один із перехідних процесів має перерегулювання по амплітуді які із часом стабілізуються, що є характерними для АВТМ як об'єкту управління. Другий перехідний процес, що без перерегулювання по амплітуді коливань робочого органу АВТМ побудований із застосуванням запропонованого конструктивного рішення вторинного контуру нейрокерування нероконтролера для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин. Аналізуючи рис. 2 можна побачити, що наявність перерегулювання (коли $A_D > A_d$) помножена на постійну зміну власної резонансної частоти АВТМ протягом технологічного циклу віброобробки призведе до того, що рівність про питоме значення роботи вібраційного поля на різних частотах не буде виконуватись $A_z^2 \cdot \omega_z^2 = A_N^2 \cdot \omega_d^2 = A_d^2 \cdot \omega_d^2$. Дана рівність буде виконуватись протягом усього циклу віброобробки у випадку із другим перехідним процесом коли для управління амплітудою циклічної вимушуючої сили віброприводу застосовано нейромережевий ПІД регулятор із самоналаштуванням на основі прямого нейроемулятора АВТМ по амплітуді (ΔA_d).

Робота вторинного контуру нейрокерування нейроконтролера для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин базується на тому, що із елемента завдання технологічно-оптимальних параметрів коливань робочого органу 8 у нейроконтролер в 15 елемент синтезу необхідного значення амплітуди коливань робочого органу поступають A_z , ω_z задані технологічно оптимальні параметри для віброобробки (амплітуда та частота коливань робочого органу АВТМ) протягом технологічного циклу. В елементі синтезу необхідного значення амплітуди коливань робочого органу 15 на основі інформації про реальну частоту коливань робочого органу (яка відповідає частоті віброобробки) з метою забезпечення тієї ж самої питомої роботи вібраційного поля на даній частоті відповідно до принципу, що викладений в роботі [13] проводить розрахунок необхідного значення амплітуди на даній частоті A_N . Дана інформація поступає на елемент порівняння необхідної амплітуди 7 де проходить співставлення необхідного значення A_N амплітуди коливань робочого органу та дійсного значення A_d амплітуди коливань робочого органу і значення різниці амплітуд коливань робочого органу

$\Delta A(k)$ на такті k подається в навчену систему гібридного нейро-ПІД управління (NNPID Auto-tuning, Neuromorphic PID Self-tuning [18, 19]) зокрема до елемента 13 «штучна нейронна мережа» та одночасно результат цього порівняння $e(k)$ поступає в ПІД-регулятор 9.

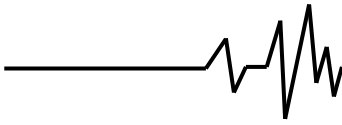
Таке конструктивне рішення контуру нейрокерування амплітудою коливань робочого органу АВТМ дозволяє використати для мінімізації помилки зворотного зв'язку $e(k) = A_N(k) - A_d(k)$ пропорційно-інтегрально-диференціальний контролер на кожному такті керування. Після того як на такті k значення різниці амплітуд коливань робочого органу АВТМ 1 поступає в елемент 13 «штучна нейронна мережа» дана «штучна нейронна мережа» отримує установку $\Delta A(k+1)$ і як наслідок

генерує коефіцієнти $k_p(k)$, $k_i(k)$, $k_d(k)$ які поступають на вхід блоку ПІД-регулятора 9 разом із значенням миттєвої похибки зворотного зв'язку $e(k) = A_N(k) - A_d(k)$ і ПІД-регулятор 9 проводить розрахунок керуючого впливу $u\Delta F(k)$ на керований вібропривод. В результаті чого ПІД-регулятор 9 формує на кожному такті керуючий сигнал $u\Delta F(k)$ який є зваженою сумою трьох складових k_p , k_i , k_d і подає їх на вібропривод

для корекції $\pm |\overline{\Delta F}|$ амплітуди циклічної вимушуючої сили. Навчання елемента 13 «штучна нейронна мережа» проходить в реальному масштабі часу по помилці зворотного зв'язку методом найшоршого спуску, градієнти обчислюються методом зворотного розповсюдження помилки $e(k+1)$ (див. рис. 4)

через 11 «прямий нейроемулятор» по ΔA_d (адаптивної вібраційної технологічної машини 1). «прямий нейроемулятор» по ΔA_d 11 створюють шляхом його навчання, подаючи набір випадкових комбінацій частот віброприводу (при сталому значенні амплітуди циклічної вимушуючої сили) із діапазону близького до робочого для АВТМ (наприклад якщо робоча частота для АВТМ становить $\omega_0 = 50 \text{ Гц}$, то достатньо про

сканувати від $\omega_{\min} = 25 \text{ Гц}$ до $\omega_{\max} = 75 \text{ Гц}$) та сформувати навчаючу вибірку $U = \{P_i, T_i\}_{i=1}^M$: де $P_i = [\omega(i) A_d(i-1)]^T$, $T_i = A_d(i)$. В результаті роботи даного контуру нейрокерування ПІД-регулятор 9 провівши розрахунок керуючого впливу $u\Delta F(k)$ здійснить вплив на робочий орган АВТМ за допомогою керованого



віброприводу дана інформація також потрапить в елемент 11 «прямий нейроемулятор» по ΔA_d адаптивної вібраційної технологічної машини 1, в результаті чого коливний робочий орган АВТМ 1 отримує нову амплітуду коливань $A_d(k+1)$, а елемент 11 «прямий нейроемулятор» по ΔA_d

АВТМ1 згенерує реакцію $A_d(k+1)$. Після цього в 10 елементі порівняння похибки розповсюдження проводиться обчислення помилки управління $e(k+1) = A_d(k+1) - A_d(k+1)$ яка

пропускається в зворотному напрямку за правилом зворотного розповсюдження. Вагові коефіцієнти зв'язків в елементі 11 «прямий нейроемулятор» по ΔA_d адаптивної вібраційної технологічної машини при цьому не коректуються. Пройшовши через елемент 11 «прямий нейроемулятор» по ΔA_d адаптивної вібраційної технологічної машини 1 помилка $e(k+1)$ дальше розповсюджується через елемент 13 «штучна нейронна мережа», але тепер її проходження супроводжується корекцією вагових коефіцієнтів $\Delta w(k)$ даної штучної нейронної мережі. В наслідок цього проходження ми отримуємо автоматичну настройку векторів виходів k_p, k_i, k_d штучної нейронної мережі елемента 13 «штучна нейронна мережа», які поступають на ПІД-регулятор 9. По суті в даному випадку елемент 11 «прямий нейроемулятор» по ΔA_d адаптивної вібраційної технологічної машини 1 виконує функцію додаткових шарів штучної нейронної мережі із елемента 13 «штучна нейронна мережа», в яких корекція вагових коефіцієнтів не проводиться.

Висновок. Запропоноване конструктивне рішення нейроконтролера для керування віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин дозволяє покращити якісні характеристики керування динамічними параметрами як електромагнітного так і дебалансного віброприводу. Застосування нейромережових технологій в конструктивному рішенні дозволяє впровадити алгоритми нейрокерування які при зміні параметрів технологічного процесу віброобробки, що реалізуються АВТМ, або при зміні маси завантаження робочого органу АВТМ, завдяки застосуванню технології прогнозуючого модельного нейрокерування на основі сіплекс-методу або квазі-ньютонівського алгоритму оптимально вибиратимуть стратегію корекції частоти циклічної вимушуючої сили віброприводу з метою забезпечення та підтримування постійного резонансного режиму роботи АВТМ і на резонансній частоті АВТМ проводитимуть стабілізацію питомої роботи вібраційного поля

АВТМ шляхом автоматичної корекції амплітуди коливань робочого органу за допомогою нейромережового ПІД-регулятора із самоналаштуванням з врахуванням інерційних та дисипативних характеристики вібромашини на основі прямого нейроемулятора АВТМ.

Список використаних джерел

1. Widrow B., Smith F.W. Pattern-recognizing control systems. *Proceedings of Computer and Information Sciences*. Washington, USA 1964. Vol. 12. P. 288 – 317.
2. Venayagamoorthy G.K., Harley R.G., Wunsch D.C. Implementation of Adaptive Criticbased Neurocontrollers for Turbogenerators in a Multimachine Power System". *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2003. Vol. 14, Issue 5. P. 1047 -1064.
3. Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. Керовані вібраційні технологічні машини: Монографія. Вінниця.: ВНАУ, 2011. 355 с.
4. Пристрій для керування електромагнітним віброприводом. Пат. 10971 А Україна, МПК В65ВG27/24. П.С. Берник, Р.В. Чубик, В.А. Пашистий. № а 200502375; заявл. 16.03.2005 опубл. 15.12.2005; Бюл. № 11.
5. R. Chubyk, Optimal ruling system of electromagnetic vibrodrive of adaptive vibrational technological machines. *Proceedings of the 8th international conference "VIBROENGINEERING 2009"*, Klaipeda University, Lithuania, 2009, Pages 10-14.
6. R. Chubyk Investigation of current parameter in electromagnetic drive of resonance adaptive vibromachines while using the duopolar latitude-impulsive voltage for its power supply. *VIBROENGINEERING. Journal of vibroengineering*. June 2011. Volume 13, 295-301.
7. Берник П.С., Чубик Р.В. Алгоритм функціонування адаптивної системи керування приводом вібраційних технологічних машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2006. № 1 (43) С.4-10.
8. Пристрій керування електромагнітним віброприводом адаптивних вібраційних технологічних машин. Пат. 90820 А Україна, МПК В65G27/10. Середа Л.П., Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. № а200903730; Опубл. 25.05.2010; Бюл. № 10.
9. Адаптивний вібраційний млин. Пат. 101196 UA Україна, МПК В02С 19/16. Чубик Р.В., Ярошенко Л.В., Яремчук О.С., Скварок Ю.Ю. № а201015004; Опубл. 11.03.2013; Бюл. № 5.
10. Адаптивний вібраційний сепаратор. Пат. 104487 UA Україна, МПК В07В 1/28 (В07В 1/40). Ярошенко Л.В., Пагута М.В., Чубик Р.В. № а201203390; Опубл. 10.02.2014; Бюл. № 3.
11. Адаптивний пристрій для віброобразивної обробки деталей. Пат. 76368 А



Україна, МПК В24В31/06. Горбатюк Р.М., Скварок Ю.Ю., Чубик Р.В., Паламарчук І.П. № u201112534; Опубл. 10.01.2013; Бюл. № 1.

12. Спосіб керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин. Пат. 87776 А Україна, МПК В65G27/00. Середя Л.П., Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. № а200803685; Опубл. 10.08.2009; Бюл. № 15.

13. Спосіб стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин. Пат. 92041 А Україна, МПК В65G27/100. Середя Л.П., Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. № а200806209; Опубл. 27.09.2010; Бюл. № 18.

14. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения: пер. с англ. М.: ИПРЖР, 2000. 272 с.

15. Чернодуб А.Н., Дзюба Д.А. Обзор методов нейроуправления. *Проблеми програмування*. 2011. № 2. С. 79-94.

16. Rossiter J.A. Model-based Predictive Control: a Practical Approach. *CRC Press*, 2003. 318 с.

17. Василець Т.Ю., Варфоломійєв О.О., Іщенко В.С., Ковальчук С.Л., Сусли О.О. Синтез нейромережевого регулятора для електромеханічної системи з пружними зв'язками в кінематичних передачах. *Системи обробки інформації*. 2018. № 2(153). С. 7-17.

18. D'Emilia G., Marrab A., Natalea E. Use of neural networks for quick and accurate auto-tuning of PID controller. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2007. Vol. 23. P. 170 – 179.

19. Chang W.D., Hwang R.C., Hsieh J.G. A multivariable on-line adaptive PID controller using auto-tuning neurons. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2003. Vol. 16, Issue 1. P. 57 – 63.

References

1. Widrow B., Smith F.W. Pattern-recognizing control systems. *Proceedings of Computer and Information Sciences*. Washington, USA 1964. Vol. 12. P. 288 – 317.

2. Venayagamoorthy G.K., Harley R.G., Wunsch D.C. Implementation of Adaptive Criticbased Neurocontrollers for Turbogenerators in a Multimachine Power System". *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2003. Vol. 14, Issue 5. P. 1047 -1064.

3. Chubyk R.V., Yaroshenko L.V. Керування вібраційними технологічними машинами. Вінницька: ВНАУ, 2011. 355 с.

4. Prystriy dlya keruvannya elektromagnitnym vibropryvodom. Pat. 10971 А Украина, МПК В65BG27/24. Bernik P.S., Chubyk R.V., Pashystyy V.A. № а 200502375; zayavl. 16.03. 2005 opubl. 15.12 .2005; Byul. № 11.

5. R. Chubyk, Optimal ruling system of electromagnetic vibrodrive of adaptive vibrational technological machines. *Proceedings of the 8th international conference "VIBROENGINEERING 2009"*, Klaipeda University, Lithuania, 2009, Pages 10-14.

6. R. Chubyk Investigation of current parameter in electromagnetic drive of resonance adaptive vibromachines while using the duopolar latitude-impulsive voltage for its power supply. *VIBROENGINEERING. Journal of vibroengineering*. June 2011. Volume 13, 295-301.

7. Bernik P.S., Chubyk R.V. Algoritm funkcionuvannya adaptivnoyi systemy keruvannya pryvodom vibratsiynyh tehnologichnyh mashin. *Vibratsiyni v tehnitsi ta tehnologiyah*. 2006. № 1 (43) P.4-10.

8. Prystriy keruvannya elektromagnitnym vibropryvodom adaptivnyh vibratsiynyh tekhnologichnyh mashyn. Pat. 90820 А Украина, МПК В65G27/10. Sereda L.P., Chubyk R.V., Yaroshenko L.V. № а200903730; opubl. 25.05.2010; Byul. № 10.

9. Adaptivnyy vibratsiynny mlyn. Pat. 101196 UA Украина, МПК В02С 19/16. Chubyk R.V., Yaroshenko L.V., Yaremchuk O.S., Skvarok Y.Y. № а201015004; opubl. 11.03.2013; Byul. № 5.

10. Adaptivnyy vibratsiynny separator. Pat. 104487 UA Украина, МПК В07В 1/28 (В07В 1/40). Yaroshenko L.V., Paguta M.V., Chubyk R.V. № а201203390; opubl. 10.02.2014; Byul. № 3.

11. Adaptivnyy prystriy dlya vibroabrazivnoyi obrobky detaley. Pat. 76368 А Украина, МПК В24В31/06. Gorbatiyuk R.M., Skvarok Y.Y., Chubyk R.V., Palamarchuk I.P. № u201112534; opubl. 10.01.2013; Byul. № 1.

12. Sposib keruvannya robotoyu adaptivnyh vibratsiynyh tehnologichnyh mashyn. pat. 87776 А Украина, МПК В65G27/00.. Sereda L.P., Chubyk R.V., Yaroshenko L.V. № а 200803685; zayavl. 24.03. 2008 opubl. 10.08.2009; Byul. № 15.

13. Sposib stabilizatsiyi tekhnologichno optymalnyh parametriv vibratsiynogo polya adaptivnyh vibratsiynyh tekhnologichnyh mashyn. Pat. 92041 А Украина, МПК В65G27/100. Sereda L.P., Chubyk R.V., Yaroshenko L.V.. № а200806209; opubl. 27.09.2010; Byul. № 18.

14. Omatu S., Halid M., Yusof R. Neyroupravlyeniye i yego prilogeniya: per. s angl. M.: IPРЖР, 2000. 272 с.

15. Chernodub A.N., Dzyuba D.A. Obzor metodov neyroupravlyeniya. *Problemy programirovaniya*. 2011. № 2. P. 79-94.

16. Rossiter J.A. Model-based Predictive Control: a Practical Approach. *CRC Press*, 2003. 318 с.

17. Vasylets T.Y., Varfolomiyev O.O., Itshenko V.S., Kovalchuk S.L., Susla O.O. Syntez neyromerejevogo regulatora dlya elektromehaničnoyi systemy z prujnymy zvyazkamy



v kinematychnyh peredachah. *Systemy obrobky informatsiyi*. 2018. № 2(153). P. 7-17.

18. D'Emilia G., Marrab A., Natalea E. Use of neural networks for quick and accurate auto-tuning of PID controller. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2007. Vol. 23. P. 170 – 179.

19. Chang W.D., Hwang R.C., Hsieh J.G. A multivariable on-line adaptive PID controller using auto-tuning neurons. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2003. Vol. 16, Issue 1. P. 57 – 63.

SUBSTANTIATION OF NEUROCONTROLLER PARAMETERS FOR THE CONTROL SYSTEM OF THE VIBRATOR DRIVE OF ADAPTIVE VIBRATION TECHNOLOGICAL MACHINES

The article proposes and analyzes the structure of the neurocontroller for controlling the vibratory drive of adaptive vibrating technological machines (AVTM), which allows to implement a two-circuit neurocontrol system of energy and technological parameters of AVTM that its each circuit takes into account inertial and dissipative characteristics. By monitoring the phase shift between the frequency of forced oscillations of the AVTM working body and the frequency of cyclic forcing force of the vibrating drive and using predictive model neurocontrol technology to correct the frequency of cyclic forcing force of the vibrating drive, the neurocontroller provides mini resonant

operation. The second circuit of neurocontrol provides on the resonant frequency tracking and stabilization of the specific work of the vibration field of AVTM during the vibration cycle using to adjust the amplitude of oscillations of the working body hybrid neuro-PID control system with self-tuning based on neuromodel AVTM system.

The proposed design of the neurocontroller to control the vibratory drive of adaptive vibrating technological machines can improve the quality characteristics of the control of dynamic parameters of both electromagnetic and unbalanced vibratory drive. The use of neural network technologies in the design solution allows the introduction of neurocontrol algorithms that change the parameters of the process of vibration processing implemented by AVTM, or change the load mass of the working body AVTM, through the use of predictive model neurocontrol based on the simplex method or quasi-Newtonian algorithm that will optimally choose a strategy for correcting the frequency of cyclic forcing force of the vibrator to ensure and maintain a constant resonant mode of AVTM and at the resonant frequency AVTM will stabilize the specific operation of the neural network PID-controller with self-adjustment on the basis of the direct AVTM neuroemulator.

Key words: neurocontrol, neural network, neurocontroller, vibratory drive, vibrating technological machine.

Відомості про авторів

Ярошенко Леонід Вікторович кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету, Службова адреса: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ 21008, e-mail: volvinlv@gmail.com

Yaroshenko Leonid Victorovich candidate of technical sciences, associate professor of the department of electric power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnitsa national agrarian university, Service address: Vinnitsa, st. Sonyachna 3, VNAU 21008, e-mail: volvinlv@gmail.com

Чубик Роман Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри опору матеріалів та будівельної механіки Національного університету «Львівська політехніка», Службова адреса: м. Львів 79013, вул. С. Бандери 12, e-mail: Roman.V.Chubyk@lpnu.ua

Chubyk Roman Vasyliovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Resistance of Materials and Structural Mechanics, Lviv Polytechnic National University, Office address: Lviv 79013, vul. S. Banderi 12, e-mail: Roman.V.Chubyk@lpnu.ua