

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

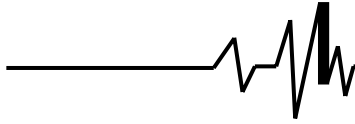
Максімов Джордан Тодоров – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

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., Михалевич 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

**Граняк В. Ф.**

к.т.н., доцент

Солона О. В.

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Hraniak V.**

Ph.D. of Eng., Associate Professor

Solona O.

Ph.D. of Eng., Associate Professor

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.313****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-3****ПЕРСПЕКТИВИ ВИЯВЛЕННЯ
ДЕФЕКТІВ ОБЕРТОВИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА
ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЇХ
ВІБРОСИГНАЛІВ**

Забезпечення надійності функціонування технологічних ліній та механізмів є однією з основних умов безпечної та продуктивної експлуатації технологічного обладнання. А так як одним з ключових елементів переважної більшості сучасного обладнання та механізмів є обертові електричні машини, то надійність роботи останніх значною мірою визначає надійність системи загалом.

У роботі проведено детальний аналіз перспективності використання вібросигналів для виявлення дефектів обертових електричних машин. У результаті статистичного дослідження, проведеного на основі вивчення причин аварійних відмов, що виникають при експлуатації асинхронних електродвигунів середньої потужності на базі ДТГ «Енергомаш» та аналізу літературних джерел було виділено найбільш імовірні дефекти, які виникають в процесі експлуатації обертових електричних машин. Зокрема, було встановлено, що до найбільш імовірних дефектів, які виникають в процесі експлуатації такого обладнання може бути віднесено: невірноваженість ротора, пошкодження підшипників, асиметрія електромагнітного поля статора та порушення механічної жорсткості опорних конструкцій.

На основі проведеного дослідження було теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що найбільш поширені типи дефектів, які характерні для обертових електричних машин, викликають появу істотного вібраційного відгуку. При цьому вібраційний відгук, що містить у собі інформацію про наявні дефекти електричних машин, може бути вимірний безпосередньо у режимі роботи електричної машини без необхідності втручання у конструкцію останньої.

Також було показано, що для дефектів різних типів, які виникають при експлуатації обертових електричних машин, є характерною відносно низька вираженість на ранніх етапах розвитку дефектів та селективність, як за формою так і частотним спектром. Тож очевидною необхідністю розробки високоінформативних ознак наявності дефектів розглянутого типу, що характеризувалися б підвищеною вираженістю та селективністю.

Ключові слова: електрична машина, дефект, діагностування, надійність, аналіз.

Вступ. Забезпечення надійної обладнання не можливе без своєчасного безаварійної роботи технологічного виявлення наявності дефектів, що можуть



виникати при його експлуатації. При цьому варто зазначити, що одним з ключових елементів більшості сучасних технологічних ліній та механізмів є обертові електричні машини [1], надійність роботи яких значною мірою визначає надійність системи загалом.

Застосування сучасних систем контролю технічного стану та діагностування на основі аналізу поточних значень технічних параметрів обертових електричних машин дозволяє підвищити не лише надійність, а й ефективність їх експлуатації за рахунок збільшення періоду між плановими ремонтами, а в перспективі – і повного переходу до ремонтів за фактичним технічним станом. Такий перехід, окрім того, дозволяє збільшити гарантований експлуатаційний ресурс з одночасним забезпеченням безперебійної та надійної роботи обладнання, а, отже, призводить

до суттєвого зростання його продуктивності. Про те застосування таких систем на сьогоднішній день суттєво ускладнюється відсутністю високоінформативних ознак, які б забезпечили можливість достовірного виявлення дефектів обертових електричних машин. Тож очевидно, що вирішення задачі виділення таких високоінформативних ознак є актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз статистичних досліджень імовірності прояву дефектів різних типів. У відповідності з результатами статистичного аналізу несправностей, що виникають при експлуатації асинхронних електродвигунів середньої потужності, проведеного на базі ДТГ «Енергомаш», можна виділити наступні найбільш поширені їх види, що характерні для зазначеного типу електричних машин [2], (табл. 1).

Таблиця 1

Імовірність виникнення найбільш типових дефектів при експлуатації асинхронних електричних машин

Вид несправностей	Імовірність виникнення, %.
Перевантаження чи перегрів статора електродвигуна	31
Міжвиткове коротке замикання	15
Пошкодження підшипників	12
Механічне пошкодження обмоток статора чи їх ізоляції	11
Нерівномірний повітряний зазор між статором і ротором	8
Робота електродвигуна на двох фазах	8
Обрив чи ослаблення кріплення стержнів в білячій клітці	5
Ослаблення кріплення обмоток статора	4
Дисбаланс ротора електродвигуна	3
Неспіввісність валів	2
Інші	1

Аналіз даних, наведених у табл. 1 демонструє, що вагомих відсоток від загальної кількості дефектів, які призводять до виходу з ладу обертових електричних машин, становлять дефекти, пов'язані з пошкодження обмоток, кріплень чи механічною деформацією статора. Зазначена група дефектів для асинхронних електродвигунів, як видно з табл. 1, становить понад 45 % від загальної кількості, які неминуче призводять до асиметрії магнітного поля останнього. Варто зазначити, що остання матиме місце і у її крайньому випадку – обриву однієї з фаз.

Ще одним високо імовірним дефектом обертових електричних машин, що проявляється незалежно від їх типу та потребує врахування в процесі здійснення контролю технічного стану та діагностування, є пошкодження підшипників. Імовірність розвитку цього дефекту фактично не залежить від типу

електричної машини та являється причиною понад 10 % випадків виходу останніх з ладу.

До високоімовірних дефектів, що мають місце в процесі експлуатації електричних машин, відноситься і невідповідність ротора. Зазначений дефект може викликатися як внутрішніми причинами (обрив чи ослаблення кріплення стержнів в білячій клітці, пошкодження конструкції ротора), так і бути пов'язаним з асиметрією робочого механізму, що привожиться у рух електричним двигуном.

Додатковим дефектом, що не належить безпосередньо до пошкодження електричної машини, але може слугувати причиною аварійного руйнування та має доволі високу імовірність виникнення в процесі експлуатації технологічного обладнання, є пошкодження опорних конструкцій та кріплень електричних машин [3]. Тож, враховуючи сказане, є очевидним, що для забезпечення високої ефективності системи технічного



діагностування електричних машин врахування можливості появи зазначеного дефекту є необхідним.

Мета досліджень. Метою досліджень є оцінювання перспективи виявлення найбільш поширених дефектів обертових електричних машин на основі аналізу їх вібровідгуку, а також виділення типових особливостей вібросигналу, характерних для кожного із них. Реалізація поставленої у роботі мети у перспективі дозволить виділити високоінформативних ознаки наявності дефектів обертових електричних машин безпосередньо у режимі їх експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Протягом усього часу експлуатації в елементах конструкції електричної машини протікають процеси взаємодії між окремими частинами та конструктивними вузлами, що обумовлені силами різної природи. Основними з них є: електромагнітна взаємодія, теплопередача, термомеханічні деформування та, власне, механічна взаємодія [4]. Кожна з зазначених взаємодій характеризується інтенсивністю перебігу, просторовою локалізацією, а, також, ступенем впливу на різні технічні параметри машини, значна частина яких може бути вимірюваною безпосередньо в режимі реального часу. При чому, характер зазначених взаємодій повною мірою визначається режимом роботи агрегату та його технічним станом [5, 6], що дає змогу зафіксувати наявність істотних пошкоджень обладнання шляхом вимірювання та інтерпретування значень відповідних технічних параметрів.

Фізичні взаємодії, що протікають у обертовій електричній машині, викликають деформації та вібрації, значення яких повною мірою відображають поточні фізичні процеси у останній. Так, наприклад: електро-магнітна взаємодія, що обумовлена взаємодією між ротором та статором, та механічна пружна деформація конструктивних елементів приводить до появи магнітних вібрацій, які в свою чергу викликають зміну в механічних характеристиках елементів статора (порушення пружної підвіски статора, зміна властивостей лакового покриття сегментів активного заліза статора, тощо). Термомеханічні процеси у електричних машинах призводять до деформацій (пружного стиснення активного заліза статора, деформація обмотки статора, стяжних призм, корпусу, тощо) та низькочастотних вібрацій. Фізичні процеси в роторі головним чином характеризуються вібраціями, що обумовлені магнітною взаємодією і обертаючим моментом, механічними та термомеханічними деформаціями [7]. Зазначені фізичні процеси

характеризується вібраціями та деформаціями конструктивних елементів машини.

Особливості прояву неврівноваженості ротора

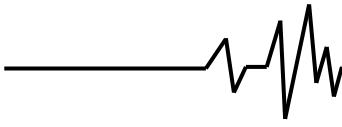
Неврівноваженістю ротора називають такий стан ротора, при якому під час обертання виникають відцентрові сили і моменти, що викликають змінні навантаження на опори ротора і його вигин [8, 9].

Вплив відцентрових сил, або дисбалансу, на опори великою мірою визначається динамічними властивостями ротора, тобто його спроможністю до зміни форми при обертанні. Більшість великих агрегатів мають ротори зі змінюваною при обертанні формою осі, тобто так звані гнучкі ротори, проте, основна частина агрегатів середньої і малої потужності мають практично недеформовані при обертанні жорсткі ротори [10, 11]. Тож умовно види дисбалансу можна розділити на дві категорії: механічний, або «жорсткий», дисбаланс і дисбаланс, пов'язаний із прогином ротора.

Механічний, або «жорсткий», дисбаланс – один з основних джерел підвищеної вібрації устаткування. Причини його виникнення поділяються на дві групи. Перша з них – це дефекти, пов'язані з порушенням технології виготовлення, складання і балансування ротора після складання, із заміною або перестановкою деталей у процесі монтажу, що характеризуються підвищеною вібрацією безпосередньо по завершенні ремонту або монтажу устаткування. Зазначені дефекти активно проявлятимуться в умовах передпускових випробувань, та скоріш за все, будуть усунені іще до введення машини в експлуатацію. Інша група – дефекти експлуатації, такі як руйнація і «виліт» частин ротора (наприклад, частин робочого диска, лопатей тощо) у процесі роботи, що характеризуються раптовими одноразовими стрибкоподібними змінами амплітуди і (або) фази вібрації, і різноманітні види зносу поверхонь ротора [11].

Дисбаланс, пов'язаний із прогином (у багатьох випадках залишковим) вала, також може викликатися дефектами виготовлення (залишкові деформації, неоднорідність поковки вала, теплова нестабільність в електричних машинах тощо), дефектами монтажу і дефектами експлуатації [11].

Криві (форми сигналу) віброзміщення і віброшвидкості при неврівноваженості ротора та відсутності інших розвинутих дефектів агрегату в багатьох випадках періодичні або майже періодичні, із частотою, що відповідає частоті обертання ротора, і мають форму, близьку до синусоїдальної. Амплітуда і фаза вібрації на частоті обертання ротора практично



стабільні в часі. Форма сигналу віброприскорення часто має більш «складний» («випадковий») характер [12].

На рис. 1 наведені форми сигналу віброшвидкості (нижній графік) і віброприскорення (верхній графік), що були обміряні з інтервалом у декілька секунд в одній і тій же точці підшипникового щита електродвигуна, який мав неврівноваженість ротора [12]. На рисунку вертикальними пунктирними лініями позначений тимчасовий інтервал, що відповідає одному обороту ротора. При цьому форма сигналу віброприскорення є доволі складною за рахунок достатньо інтенсивної середньо- і високочастотної випадкової вібрації.

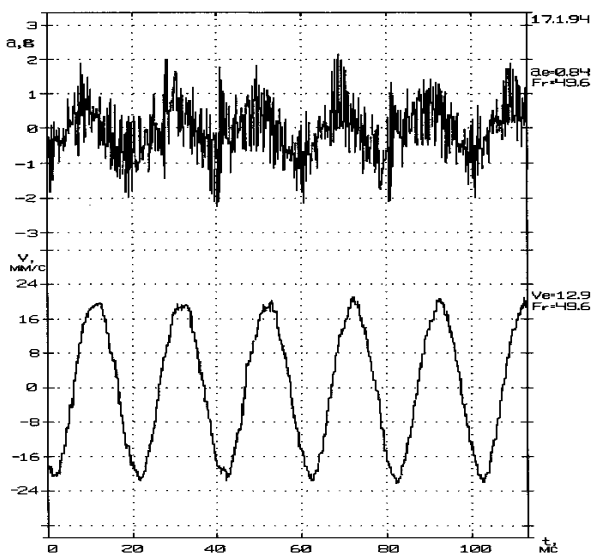


Рис. 1. Форми сигналів віброприскорення і віброшвидкості електродвигуна, що має неврівноваженість ротора

Особливості прояву пошкодження підшипників

Дефекти підшипників ковзання, які типово застосовують у потужних електричних машинах [13], і причини їх виходу з ладу можна умовно розділити на дві групи [9]:

- низькочастотна вібрація підшипників, що виникає внаслідок втрати динамічної усталеності обертання ротора і порушення умов мастила;

- вібрація, пов'язана з дефектами виготовлення, складання й експлуатації підшипників ковзання, що включають різноманітні дефекти складання і підгонки підшипників та відхилення їхніх геометричних розмірів від номінальних, експлуатаційний знос підшипників, дефекти стану шийок тощо.

Різнорізнотні дефекти підшипників ковзання часто бувають взаємопов'язані між собою. Наприклад, підвищена вібрація і знос

підшипника можуть призводити до втрати динамічної усталеності [14].

Характерні риси вібрації при зародженні і розвитку дефектів підшипників ковзання можуть бути дуже різними і залежать від багатьох чинників. Основні з них: розмір і місце прикладення сил, перерозподіл реакцій, навантаженість опор, якість та умови роботи мастильного прошарку в підшипниках, частота обертання ротора, ступінь розвитку дефектів підшипників тощо. У вібраційному сигналі можуть бути присутні коливання з частотою обертання ротора, її першою та другою гармоніками, першою та другою субгармоніками, а також вібрації на некротній частоті обертання ротора, низькочастотна і середньочастотна вібрація, випадкова вібрація [9, 14].

Низькочастотна вібрація підшипників у більшості випадків пов'язана з втратою динамічної усталеності обертання ротора. Втрата динамічної усталеності обертання ротора виникає, коли циркуляційні сили масляної плівки і (або) аеродинамічні циркуляційні сили перевершують сили демпфування. Це явище характерно для підшипників, що мають циліндричну або еліптичну росточку вкладиша, і часто зустрічається у агрегатах із вертикально розташованою віссю обертання роторів, машин із великою площею опорної частини підшипника. Втраті динамічної усталеності сприяє зниження навантаження підшипника, підвищення в'язкості мастила, зростання зазорів у підшипнику, перекося осі вкладиша стосовно осі обертання ротора тощо [9].

Опорні підшипники сприймають радіальні зусилля на ротор і фіксують його радіальне положення щодо корпусу. Основні причини виходу з ладу опорних підшипників такі: підвищений тиск у радіальному напрямку внаслідок порушень технологічних або розрахункових режимів; порушення подачі мастила і його якості; дефекти складання і підгонки; експлуатаційний знос і забруднення підшипників [9].

Підвищений тиск і порушення подачі і якості мастила в багатьох випадках мало впливають на характер вібрації агрегатів, але в більшості випадків призводять до підвищення температури і (або) тиску в клині. Це явище звичайно супроводжується прискореним зносом та пошкодженням бабітового прошарку вкладиша підшипника, нагортанням матеріалу підшипника на шийку вала, і може призводити до раптового швидкоплинного виходу підшипника з ладу.

Підгонка підшипника звичайно супроводжується підвищеною віброактивністю в області середніх і високих частот.



Найбільш надійними діагностичними ознаками порушень підгонки є достатньо характерні зміни форми кривої сигналу віброзміщення.

На рис. 2 наведено форму сигналу віброзміщення підшипникової опори електродвигуна, отриманого за допомогою сенсора абсолютної вібрації [12].

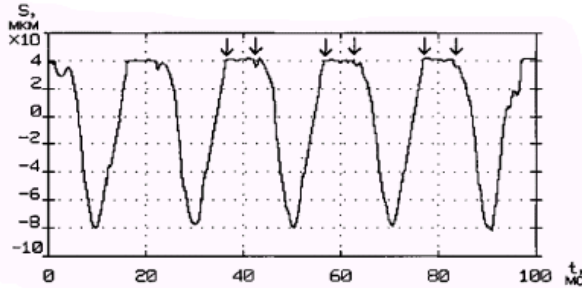


Рис. 2. Форма сигналу віброзміщення електродвигуна, при порушеннях підгонки

Порушення підгонки можуть призводити до наслідків, що роблять неможливою подальшу експлуатацію устаткування, наприклад, таких, як вигин і деформація (можливо залишкова) вала [15].

Підвищений радіальний зазор і (або) його нерівномірність у підшипнику внаслідок дефектів виготовлення або експлуатації призводять до складної залежності жорсткості мастильного прошарку від кута повороту, що практично завжди викликає збільшення вібрації на частоті обертання ротора й особливо її вищих гармоніках. Проте, визначена нерівномірність зазору може підвищити усталеність обертання ротора в підшипнику [8, 12].

Порушення верхнього і бічних зазорів у підшипнику може також призводити до розірвання масляного клина, що супроводжується підвищенням температури підшипника.

На рис. 3 показана форма сигналу віброшвидкості підшипникової опори насосного агрегату, що спостерігалася в процесі підгонки при зниженому (щодо номінального розміру) зазорі підшипника. Діагностичні ознаки в цьому випадку практично збігаються з діагностичними ознаками порушень жорсткості і підгонки підшипника [12].

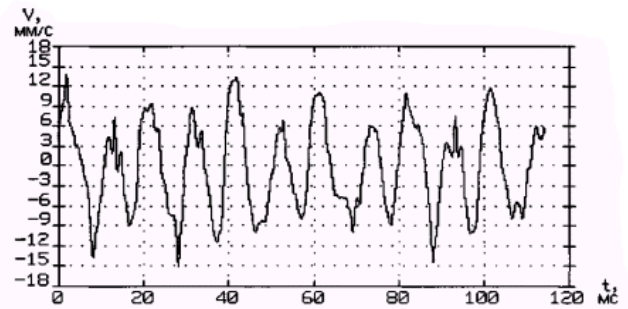


Рис. 3. Форма сигналу віброзміщення електродвигуна, при зниженому зазорі

Порушення жорсткості кріплення підшипників пов'язані з порушенням щільності прилягання вкладишів до постелі; порушенням щільності прилягання вкладишів один до одного; порушенням натягу між кришкою підшипника і верхнього вкладиша, і всі ці дефекти мають діагностичні ознаки порушень жорсткості [16].

Упорні підшипники сприймають осьове зусилля на ротор і фіксують осьове положення ротора щодо нерухомої проточної частини корпусу і лабіринтових ущільнень компресорів насосів, турбін і вентиляторів тощо [7].

Основні причини виходу з ладу упорних підшипників (як і опорних) такі: підвищений тиск в осьовому напрямку внаслідок порушень технологічних або розрахункових режимів; порушення подачі і якості мастила; забруднення підшипників; дефекти складання і підгонки; експлуатаційний знос; миттєвий вихід із ладу при попаданні в компресор навіть невеличкої кількості рідини [12].

Дефекти складання і підгонки підшипників містять у собі [12]:

- перекид по вертикалі або горизонталі поверхнього вкладиша опорного підшипника щодо упорного диска, перекид вкладиша при кріпленні кришки підшипника;
- кутовий зсув упорного диска, корпусу упорного підшипника, що викликає вібрацію в осьовому напрямку;
- порушення розміру номінального осьового зазору в підшипнику (як правило в межах 0,25...0,35 мм), що також викликає вібрацію в осьовому напрямку;
- незадовільна площа контакту (прилягання не менше 70 %), що викликає вібрацію в осьовому напрямку і ріст температури в підшипнику.

У більшості випадків дефекти упорних підшипників викликають збільшення вібрації в осьовому напрямку, при цьому нерідко спостерігається ріст температури.

Особливості прояву дефектів, пов'язаних з зміною електромагнітного поля електричної машини.



Хоча природа вібрації електромагнітного походження є загальною для машин усіх типів, особливості процесів взаємного перетворення електричної і механічної енергії й індивідуальні конструктивні особливості як типу, так і кожної конкретної машини можуть робити істотний вплив на характер її вібрації. Внаслідок цього діагностичні ознаки дефектів кіл у різноманітних типах машин можуть істотно різнитися.

У електричних машинах присутні два основних види сил порушення вібрацій електромагнітного походження [8]:

- радіальні сили, що виникають при тимчасових і просторових змінах магнітного поля в повітряному зазорі між ротором і статором;

- тангенціальні сили, що виникають при взаємодії магнітного поля з лінійним струмовим навантаженням машини.

Характер цих сил визначається зміною магнітно-динамічних сил обмоток і магнітної провідності повітряного зазору машин, тобто індукцією магнітного поля і лінійним струмовим навантаженням в обмотках машини. При цьому електромагнітні сили можуть викликати значні деформації магнітного осердя, збуджуючи просторові коливання статора і вигин ротора. Джерела електромагнітних сил розподілені в просторі і не мають конкретної точки прикладання [17].

При проектуванні електричних машин розподіл електричних і магнітних сил і потоків по колах намагаються зробити просторово симетричним. Їх внесок у загальну вібрацію машин у справному стані в більшості випадків невеликий.

Основний вплив на характер вібрації здійснюють технології виготовлення електричної машини, складання (ремонт) і особливості експлуатації. Низька якість перших двох чинників може призвести до асиметрії електричних і магнітних кіл, із переходом на нелінійні ділянки кривої намагнічування в різних режимах роботи машини, а також проявом нелінійності опору магнітних кіл. Наприклад, відхилення форми статора і ротора, перекося підшипників (опор) та інші дефекти виготовлення і складання, що викликають статичний і динамічний ексцентриситет (тобто нерівномірність повітряного зазору), можуть призводити до появи значної магнітної асиметрії і зміни характеру вібрації. З іншого боку, параметри вібрації машини можуть істотно залежати від умов експлуатації (наприклад, кількості пусків електродвигуна) і якості напруги мережі [12, 14].

При діагностиці дефектів, що супроводжуються підвищеною вібрацією електричних машин, у першу чергу необхідно

встановити, чи є її причина електромагнітного походження або механічного. Між останніми не завжди можна провести чітку грань. Наприклад тріщина в стрижні ротора асинхронного електродвигуна може призвести до його місцевого нагрівання і, як наслідок, теплового дисбалансу [8, 12].

В електромеханічних системах, особливо при наявності електромагнітних і механічних дефектів, одночасне існування і взаємодія різних сил, що викликають вібрацію, може призводити до виникнення складних сигналів вібрації: модуляції і биття [9, 12].

Процеси модуляції коливань і биття в електричних машинах (у тому числі якщо вони викликані електромагнітними дефектами) несуть великий обсяг інформації про її технічний стан. Наявність цих процесів, що певним чином змінюють форму сигналу вібрації, призводить до виникнення характерних ознак, у багатьох випадках легко обумовлених візуально [12].

За формою кривої сигналу вібрації, особливо полігармонічної, дуже складно відрізнити биття від модуляції, тобто класифікувати електромагнітні дефекти машини [9, 12].

Вібрація електромагнітного походження має загальну властивість: її рівень стрибкоподібно падає при відключенні машини від мережі в момент початку зупинки, особливо зупинки під навантаженням. Розмір стрибка вібрації стосовно її вихідного розміру говорить про «внесок» механічних і електромагнітних дефектів у загальний розмір вібрації.

При виникненні дефектів електромагнітного походження, у відсутності інших дефектів машини, рівень випадкової вібрації (шумовий компоненти) практично не змінюється, а високочастотні гармонічні складові, як правило, мають порівняно невеликі значення [8].

Основними причинами, що викликають вібрацію електромагнітного походження, пов'язану з ротором і статором машини, є [9, 12]:

- несиметрія електричних кіл ротора і (або) статора машини;
- несиметрія і нелінійність магнітних кіл ротора і (або) статора машини;
- низька якість електроенергії.

Особливості прояву порушення механічної жорсткості опорних конструкцій.

Як відомо, у стійкому режимі обертання коливання ідеально урівноваженого ротора відсутні, проте на реальний ротор впливають різноманітні неуврівноважені сили, збуджуючи вібрацію. Оскільки самі по собі порушення жорсткості є не джерелами виникнення вібрації, а лише нелінійним відгуком системи (агрегату)



на вплив неврівноважених сил, що викликають вібрацію, то в цьому класі дефектів можна об'єднати ті, що призводять до нерозрахованої зміни жорсткості опорної системи (у тому числі. зменшенню загальних розрахункових мас, що коливаються разом із джерелами порушення) і підвищенню вібрації устаткування. З появою дефектів цієї групи вібрація іноді може багаторазово перевищувати припустимі значення [7].

Вплив жорсткості опорної системи на вібрацію очевидний. Амплітуда вібрації зворотно пропорційна динамічній жорсткості [9]

$$A = P_0 C_d^{-1} \quad (1)$$

де A – амплітуда вібрації; C_d – динамічна жорсткість; P_0 – амплітуда сили.

Істотно знижується динамічна жорсткість в області резонансу. При резонансі навіть невеликі за значенням сили призводять до надмірної вібрації опор. Для усунення цієї проблеми необхідне налагодження опорної системи від резонансу зміною її жорсткості, звичайно убік збільшення, або корегуванням маси встановленого агрегату [14].

Реальні опори у вертикальному і горизонтально поперечному напрямках мають різну жорсткість. Ця властивість опор називається анізотропністю. При анізотропності частотні характеристики для вертикального і горизонтально-поперечного напрямків будуть суттєво відрізнятися [15].

Нелінійна жорсткість опор характеризується порушенням пропорційності між силою і деформаціями. Внаслідок нелінійності при впливі гармонічної сили порушення (що викликається, наприклад, неврівноваженістю ротора) і гармонічних переміщеннях валу опорна реакція може мати складний спектр, що містить різні гармоніки оборотної частоти [9].

Анізотропність і нелінійність у загальному випадку не пов'язані з якимись дефектами, проте їхній вплив на характер вібрації досить значний. На нелінійних опорах можуть спостерігатися субгармонійні коливання, або субгармонійний резонанс. Субгармонійні коливання мають частоту, у ціле число разів меншу частоти обертання, при цьому переважають коливання з половиною частотою [9, 12].

Розмір і характер вібрації при ослабленні жорсткості залежить від ступеня розвитку дефекту (зміни жорсткості системи), величин неврівноважених (які залежать або не залежать від технологічних параметрів) і властивостей конкретного агрегату – анізотропності і нелінійності опорної системи. Вібраційний сигнал зазвичай має складний

характер, у ньому присутні коливання в широкому діапазоні частот [12].

Промислові агрегати мають велику кількість з'єднань, ослаблення жорсткості яких може призвести до ушкодження або аварії. Ослаблення жорсткості можна умовно розділити на два класи [4, 11]:

- ослаблення жорсткості структурних елементів (опорної системи): фундаменту (тріщини на фундаменті, контакт столу фундаменту і перекриття, осадка фундаменту, відрив фундаментної плити від фундаменту тощо), рами, корпусних елементів (корпусні тріщини), підшипникових опор, нерухомих деталей підшипників;

- ослаблення жорсткості обертових елементів: деталей, що кріпляться на роторі, ротора в підшипнику, у зубчастих муфтах, у редукторах.

При ослабленні жорсткості (і відсутності інших дефектів) для форми сигналу віброприскорення, у низці випадків, властиві такі особливості [12]:

- неперіодичний, хаотичний характер кривої вібрації: немає повторюваної «картинки» кривої вібрації від обороту до обороту ротора;

- нерегулярні інтервали між переважними піками, кількість і розмір котрих (протягом часового інтервалу, що відповідає кільком оборотам ротора) можуть значно змінюватися; при цьому пікове значення може мати доволі велике значення (досягати $6g$ і більше у випадку розвитих дефектів).

Проте цього може не спостерігатися (особливо при сильному розвитку деяких видів порушень жорсткості) при «далекості» площини ослаблення жорсткості від ротора.

Форма сигналу віброшвидкості може мати більш «упорядкований» характер (у порівнянні із сигналом віброприскорення), проте амплітуда сигналу зазвичай буває нестабільна від обороту до обороту (або у продовж декількох оборотів) і може змінюватися іноді навіть у декілька разів [12].

Прикладом цьому служать дві форми сигналу вібрації, наведені на рис. 4, обміряні з інтервалом у декілька секунд на підшипнику електродвигуна насосного агрегату у вертикальному напрямку, над прокладкою віброізолятора, що мала дефект. Вертикальними стрілками позначені деякі нерегулярні піки сигналу віброприскорення, кількість і розмір яких від обороту до обороту значно змінюється. Форма сигналу віброшвидкості менш (у порівнянні із сигналом віброприскорення) «хаотична». Флуктуації значень позначених максимумів достатньо великі [12].

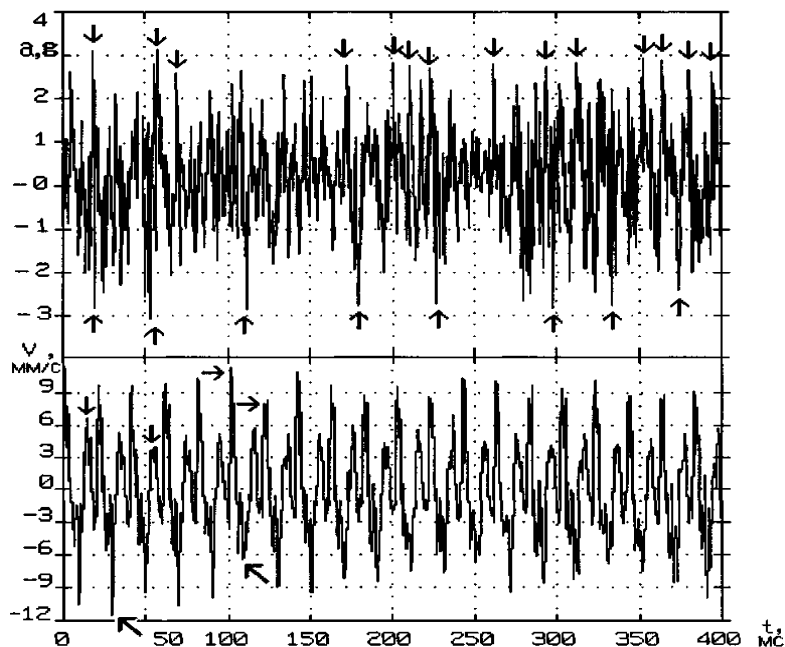
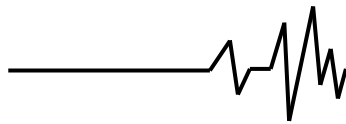


Рис. 4. Форми сигналів віброприскорення і віброшвидкості електродвигуна, що має дефект прокладки віброізолятора

Висновки

1. Здійснено аналіз результатів статистичного дослідження, проведеного на основі вивчення несправностей, що виникають при експлуатації асинхронних електродвигунів середньої потужності на базі ДТГ «Енергомаш» та літературних джерел, що дозволило виділити найбільш імовірні дефекти, які виникають в процесі експлуатації обертових електричних машин. Зокрема, було встановлено, що до найбільш імовірних дефектів, які виникають в процесі експлуатації такого обладнання може бути віднесено: невідповідність ротора, пошкодження підшипників, дефекти, які викликають деформацію електромагнітного поля статора та порушення механічної жорсткості опорних конструкцій.

2. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що найбільш поширені типи дефектів, які характерні для обертових електричних машин, викликають появу істотного вібраційного відгуку. При цьому вібраційний відгук, що містить у собі інформацію про наявні дефекти електричних машин, може бути вимірний безпосередньо у режимі роботи електричної машини без необхідності втручання у конструкцію останньої.

3. Показано, що для дефектів різних типів, які виникають при експлуатації обертових електричних машин, є характерною відносно низька вираженість на ранніх етапах розвитку дефектів та селективність, як за формою так і частотним спектром. Враховуючи це, є очевидною необхідність розробки

високоінформативних ознак наявності дефектів розглянутого типу, що характеризувалися б підвищеною вираженістю та селективністю.

Список використаних джерел

1. Ялпачик Ф. Ю., Ломейко О. П., Олексієнко В. О., Циб В. Г. Монтаж та пусконаладження обладнання переробних підприємств: навчальний посібник. Мелітополь: Таврійський національний агротехнологічний університет, 2008. 154 с.
2. ИТГ Энергомаш. Определение неисправности асинхронного двигателя. Донецк, 2021 URL: <http://energo.ucoz.ua/publ/5-1-0-10> (дата звертання: 13.03.2022).
3. Ривли Л. Б. Монтаж крупных электрических машин. Москва: Государственное энергетическое издательство, 1956. 412 с.
4. Абрамов А. И., Иванов-Смоленский А. В. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. 2-е изд., переработанное и дополненное. Москва: Высшая школа, 2001. 389 с.
5. Счастливый Г. Г., Титко О. І., Ахременко В. Л., Васьковський Ю. М. Фізичні процеси в роторах енергетичних і електричних машин і способи підвищення їхньої надійності. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Збірник наукових праць. Київ: Інститут електродинаміки НАНУ, 2010. Вип 26. С. 105-113.
6. Кармазін В. В., Семенець В. В. Курс загальної фізики. Київ: Кондор, 2009. 786 с.



7. Извеков В.И., Серихин Н.А., Абрамов А.И. Проектирование турбогенераторов: Учебное пособие. Москва: МЭИ, 2005. 440 с.

8. Кухарчук В. В., Кацев С. Ш., Мадьяров В. Г., Усов В. В. та ін. Моніторинг, діагностування, та прогнозування вібраційного стану гідроагрегатів: монографія Вінниця: ВНТУ, 2014. 168 с.

9. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. Москва: Машиностроение, 1996. 276 с.

10. Mottershead G., Bomben S., Kerszenbaum I., Klempner G. Handbook of Large Hydro Generators: Operation and Maintenance. Wiley-IEEE Press, 2020. 672 p.

11. Hughes A., Drury B. Electric motors and drives. 5th Edition. Elsevier Ltd, 2013. 511 p.

12. Кухарчук В. В., Кацев С. Ш., Граняк В. Ф., Биковський С. О. Дискретні вейвлет-перетворення в діагностуванні гідроагрегатів: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2018. 118 с.

13. Gulliver J. S.; Roger E. A. A. Hydropower engineering handbook. McGraw-Hill, 1991. 752 p.

14. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. Санкт-Петербург: Издательство СПбГМТУ, 2000. 158 с.

15. Меркель І. І. Деталі машин: навчальний посібник. Київ: Алерта, 2005. 368 с.

16. Федорів М. Й., Галушак І. Д., Курляк П. О. Підвищення надійності електроприводів насосних агрегатів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 2. С. 47-52.

17. Яцун М. А. Электричні машини. Львів: Львівська політехніка, 2001. 428 с.

References

1. Yalpachyk F. Yu., Lomeyko O. P., Oleksienko V. O., Tsyb V. G. (2008) Installation and commissioning of equipment of processing enterprises: textbook. Melitopol: Tavriya National Agrotechnological University. [in Ukrainian].

2. STG "Energomash". Determining the malfunction of an asynchronous motor. (2021) Donetsk. [in Russian]. URL: <http://energo.ucoz.ua/publ/5-1-0-10> (date of entry: 13.03.2022).

3. Rivli L. B. (1956) Installation of large electrical machines. Moscow: State Energy Publishing House. [in Russian].

4. Abramov A. I., Ivanov-Smolensky A. V. (2001) Design of hydro generators and synchronous compensators. 2nd edition, revised

and enlarged. Moscow: Higher School. [in Russian].

5. Schastlywii G. G., Titko O. I., Akhremenko V. L., Vaskovsky Yu. M. (2010) Physical processes in rotors of power and electric machines and ways to increase their reliability. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Collection of scientific papers. Kyiv: Institute of Electro-Dynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. [in Ukrainian].

6. Karmazin V. V., Semenets V. V. (2009) Course of general physics. Kyiv: Condor. [in Ukrainian].

7. Izvekov V. I., Serikhin N. A., Abramov A. I. (2005) Design of turbogenerators: Textbook. Moscow: MPEI. [in Russian].

8. Kukharchuk V. V., Katsiv S. Sh., Madyarov V. G., Usov V. V. et al. (2014) Monitoring, diagnosing and forecasting the vibration state of hydraulic units: monograph Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian].

9. Shirman A. R., Solovyov A. B. (1996) Practical vibration diagnostics and monitoring of the state of mechanical equipment. Moscow: Mashinostroenie. [in Russian].

10. Mottershead G., Bomben S., Kerszenbaum I., Klempner G. (2020) Handbook of Large Hydro Generators: Operation and Maintenance. Wiley-IEEE Press. [in English].

11. Hughes A., Drury B. (2013) Electric motors and drives. 5th Edition. Elsevier Ltd. [in English].

12. Kukharchuk V. V., Katsiv S. Sh., Hraniak V. F., Bykovsky S. O. (2018) Discrete wavelet transforms in diagnosing hydraulic units: monograph. Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian].

13. Gulliver J. S.; Roger E. A. A. (1991) Hydropower engineering handbook. McGraw-Hill. [in English].

14. Barkov A. V., Barkova N. A., Azovtsev A. Yu. (2000) Monitoring and diagnostics of rotary machines by vibration. St. Petersburg: SPbGMTU Publishing House. [in Russian].

15. Merkel I. I. (2005) Details of machines: a textbook. Kyiv: Alerta. [in Ukrainian].

16. Fedorov M. Y., Galushchak I. D., Kurlyak P. O. (2018) Improving the reliability of electric drives of pump units. Exploration and development of oil and gas fields. [in Ukrainian].

17. Yatsun M. A. (2001) Electric machines. Lviv: Lviv Polytechnic University. [in Ukrainian].



PROSPECTS FOR DETECTING DEFECTS IN ROTATING ELECTRIC MACHINES ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF THEIR VIBRATION SIGNALS

Ensuring the reliability of the operation of technological lines and mechanisms is one of the main conditions for the safe and productive operation of technological equipment. And since one of the key elements of the vast majority of modern equipment and mechanisms are rotating electrical machines, the reliability of the latter largely determines the reliability of the system as a whole.

The paper provides a detailed analysis of the prospects of using vibration signals to detect defects in rotating electrical machines. As a result of a statistical study conducted on the basis of studying the causes of emergency failures that occur during the operation of medium-power asynchronous electric motors based on the DTG "Energomash" and the analysis of literary sources, the most probable defects that occur during the operation of rotating electrical machines were identified. In particular, it was found that the most probable defects that occur during the operation of such equipment can be attributed to: rotor

imbalance, bearing damage, asymmetry of the stator electromagnetic field and violation of the mechanical rigidity of the supporting structures.

Based on the study, it was theoretically substantiated and experimentally confirmed that the most common types of defects that are typical for rotating electrical machines cause a significant vibration response. In this case, the vibration response, containing information about the existing defects of electrical machines, can be measured directly in the operating mode of the electrical machine without the need to intervene in the design of the latter.

It was also shown that defects of various types that occur during the operation of rotating electrical machines are characterized by a relatively low severity in the early stages of defect development and selectivity, both in shape and in the frequency spectrum. Therefore, it is obvious that it is necessary to develop highly informative signs of the presence of defects of the considered type, characterized by increased severity and selectivity.

Key words: *electrical machine, defect, diagnostics, reliability, analysis.*

Відомості про авторів

Граняк Валерій Федорович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електротехніки, електроенергетики та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: titanxp2000@ukr.net).

Солона Олена Василівна – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: solona_o_v@ukr.net)

Hraniak Valerii – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power engineering, electrical engineering and electromechanics of Vinnitsa National Agrarian University. (3 Soniachna St., Vinnitsa, Ukraine, 21008, e-mail: titanxp2000@ukr.net)

Solona Olena – Candidate of Technical Sciences, (Ph. D in Engineering), Associate Professor, Head of the Department of General Technical Disciplines and Occupational Safety, Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonyachna Str., Vinnytsia, 21008, e-mail: solona_o_v@ukr.net)