

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу Іванова Антона Віталійовича на тему «Енергоефективні електромагнітні приводи вібраційних транспортуючих пристроїв», що подається на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 – Електрична інженерія за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

### **1. Актуальність теми дисертації**

На актуальність даної теми вказує декілька важливих науково-практичних чинників. По-перше – це широке поширення вібраційного обладнання в різних галузях промисловості. По-друге – це обмеженість, але навіть і відсутність промислових рішень систем керування електромагнітними вібраторами для такого обладнання. Електромагнітний привід має беззаперечні переваги з точки зору надійності, довговічності, не потребує обслуговування. Проте, складні електромеханічні та електромагнітні явища, що супроводжують його роботу в умовах зміни частоти збурення відносно вимог до функціонування вібраційного обладнання є недостатньо вивченими. Кількість досліджень в цьому напрямку є доволі обмеженою, а практична потреба є значною. Зважаючи на сучасні потреби в напрямку енергозбереження та енергоефективності, усі зазначені чинники зумовили актуальність та важливість представлених досліджень.

### **2. Новизна представлених теоретичних та експериментальних результатів**

Новизна результатів роботи полягає у синтезі раціональної форми напруги живлення електромагнітів вібраційних машин та розвитку теорії систем автоматичного керування електромагнітними приводами для підвищення їх енергетичної ефективності. Зокрема:

- вперше встановлено і науково обґрунтовано, що підвищення ККД електромагнітного вібраційного приводу забезпечується внаслідок живлення обмотки вібратора напругою у формі двополярних прямокутних імпульсів, амплітуда яких визначається напругою живлення інвертора, а ширина – потрібною амплітудою струму, причому між позитивним та від’ємним імпульсами напруги повинен бути нульовий проміжок певної ширини, що запобігає глибокому насиченню сталі електромагніту при максимальних значеннях струму;

- виявлено закономірності зміни енергетичних характеристик електромагнітного приводу вібраційних пристроїв при запровадженому імпульсному живленні за різних величин навантаження, забезпечуючи при цьому максимум ККД приводу, стабілізацію амплітуди коливань та зміну частоти збурення;

- отримала подальший розвиток структура систем автоматичного керування електромагнітними приводами вібраційних машин в частині урахування імпульсного характеру живлення обмоток вібраторів, підвищуючи їх енергетичну ефективність.

Внаслідок проведених експериментальних досліджень:

- розроблено та виготовлено експериментальний зразок силового перетворювача у складі електромагнітного приводу вібраційного конвеєра;
- розроблено принципову електричну схему силового перетворювача, що забезпечує імпульсне живлення обмоток електромагнітів вібраційного приводу;
- удосконалено керуючу програму, що забезпечує автоматичне керування амплітудою та частотою електромагнітного приводу вібраційного конвеєру з імпульсним живленням;
- розроблено імітаційну модель керованого електромагнітного приводу з імпульсним живленням обмоток вібраторів, яка може використовуватись при проектуванні та модернізації вібраційних конвеєрів та грохотів.

### **3. Наукова обґрунтованість результатів та їх відповідність темі дисертації**

Об'єктом дослідження в роботі є електромагнітні, електромеханічні, механічні та енергетичні процеси в електромагнітних приводах вібраційних машин.

Предметом дослідження – закони зміни та форми напруги і сили струму в обмотках електромагнітних приводів вібраційних транспортуючих пристроїв.

Для визначення форм сигналів застосовувались методи абстрагування і елементарно-теоретичного аналізу та синтезу. При імітаційному моделюванні електромагнітних та електромеханічних процесів у вібраційному транспортуючому пристрої використано коло-польовий метод, що базується на методі скінченних елементів для розрахунку магнітного поля, а також методи електричних заступних схем і методи апроксимації функцій. Складання досліджуваних математичних моделей здійснено на основі рівняння Лагранжа II роду, а чисельне моделювання з використанням методу Рунге-Кутта у програмному середовищі Simulink. Для підтвердження достовірності теоретичних результатів використано методи числового та фізичного експерименту.

Виконаний системний аналіз дає можливість стверджувати, що робота має достатній рівень обґрунтованості та достовірності отриманих в ній результатів. Отримані наукові результати, висновки та практичні рекомендації повною мірою відповідають визначеній темі дисертаційної роботи та вказують на досягнення заявлених в роботі меті.

#### **4. Оцінка рівня виконання поставленого наукового завдання та оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності**

У вступі дисертації доведено актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, Тема, мета та завдання в дисертаційній роботі викладено чітко та логічно. Мета явно впливає з теми роботи, а завдання є зрозумілими та послідовними. У роботі запропоновано новий підхід до забезпечення роботи електромагнітного приводу, з урахуванням низки важливих кінематичних, технологічних і енергетичних характеристик.

У першому розділі дисертації проаналізовано актуальність та перспективність використання вібраційних транспортуючих пристроїв з електромагнітним приводом. Проведено аналіз систем автоматичного керування та енергетичної ефективності електромагнітного вібраційного привода, напрямків її підвищення.

Другий розділ спрямовано на синтез форми напруги живлення електромагнітного вібратора, що підвищує енергетичну ефективність приводу вібраційної машини. Встановлено, що максимум ККД електромагнітного приводу забезпечується внаслідок живлення обмотки напругою у формі двополярних прямокутних імпульсів, амплітуда яких визначається напругою живлення інвертору, а ширина – потрібною амплітудою струму. Між додатнім та від’ємним імпульсами напруги використано нульовий проміжок певної ширини, що запобігає глибокому насиченню сталі електромагніту за максимальних значень сили струму. Проведено моделювання процесів у вібраційному приводі за імпульсного живлення електромагнітів. Результати показали, що застосування імпульсного живлення дає можливість підвищити ККД приводу до 80% у діапазоні потужності від 0,25 від номінальної до номінальної, що в середньому на 10% більше, порівняно з синусоїдальною напругою живлення.

В третьому розділі розроблено структурну схему системи автоматичного керування електромагнітним вібраційним приводом з імпульсним живленням. Вона відрізняється тим, що канал керування амплітудою визначає ширину імпульсів напруги, і, в залежності від неї, ширину нульового проміжку між додатнім та від’ємним імпульсами, а опорні сигнали для виконання дискретного перетворення Фур’є синхронізуються з моментами початку імпульсів напруги. Проведено моделювання роботи системи керування в перехідних процесах.

В четвертому розділі проведено експериментальні дослідження вібраційного конвеєру та його електромагнітного приводу. Зокрема, досліджено роботу обладнання при змінному навантаженні, проаналізовано осцилограми струму та напруги, визначено енергетичні характеристики електромагнітного приводу. Отримані графіки підтверджують, що при імпульсному живленні обмоток вібратора його ККД є на 8% більше, ніж при синусоїдальному ШІМ-модульованому живленні. ККД інвертора при імпульсному живленні є більшим на 10%, а при зменшенні споживаної потужності – майже на 20%.

Загалом, поставлені наукові завдання в дисертаційній роботі виконано повністю та підтверджено експериментально. Це вказує на те, що здобувач оволодів методологією наукової діяльності і успішно її впровадив в даній дисертації. Отримані результати вказують на достатньо високий рівень представленого наукового дослідження.

## 5. Зауваження та рекомендації до дисертації

Представлена дисертаційна робота все ж не вільна від зауважень та неточностей щодо результатів та їхнього представлення. До них відносять наступні.

1. У меті роботи стилістично вказано, що вона досягається «... шляхом забезпечення ...», проте вірним є трактування забезпеченням.

2. Поняття метод кінцевих елементів, що зустрічається на с.19 більш звично трактувати як метод скінченних елементів.

3. У дисертаційній роботі існує прив'язка до амплітуди коливань робочої маси. Проте, в роботі розглядаються вібраційні транспортуючі пристрої, що можуть працювати за різних частот збурення. Тому, для оцінки їх роботи додатково потрібно використовувати швидкість робочої маси.

4. В табл. 3.1 представлено значення коефіцієнтів в'язкого тертя в пружинах. Проте не наведено розрахункових формул за якими вони визначалися. При цьому, незрозумілим є наявний розкид значень між  $b_0=610$  Н·с/м і  $b_3=100$  Н·с/м, оскільки значення  $c_0=4,7$  МН/м і  $c_3=4,25$  МН/м є досить близькими.

5. Ефективність функціонування електромагнітного приводу потрібно розглядати в контексті зміни реального повітряного проміжку між якорем та осердям. Зрозуміло, що значення ККД буде залежати від величини цього проміжку та відносної амплітуди коливань. Доцільно було представити електромеханічні характеристики вібратора в параметричній залежності від зміни повітряного проміжку для оцінки вибору амплітудою відносних коливань номінального значення повітряного проміжку.

6. Основні науково-практичні результати в дисертаційній роботі отримано на основі імітаційної моделі Simulink. Натомість, відсутність узагальненої математичної моделі у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь, поданої у нормальному вигляді дещо обмежує науково-практичну значимість даної роботи.

7. Не зовсім чітко представлено наявність контурів захисту в розробленій системі керування, зокрема за значенням сили струму, температури осердя та іншими параметрами.

Висловлені зауваження носять, в основному, рекомендаційний характер, не є принциповими і не зменшують позитивної оцінки та науково-практичного значення дисертаційної роботи.

## **6. Загальний висновок про дисертаційну роботу**

Дисертаційна робота здобувача освітньо-наукового ступеню доктора філософії Іванова Антона Віталійовича на тему «Енергоефективні електромагнітні приводи вібраційних транспортуючих пристроїв» є завершеним науковим дослідженням, що визначається актуальністю, науковою новизною та має практичну цінність.

За рівнем наукової новизни та практичним значенням отриманих результатів дисертаційна робота на тему «Енергоефективні електромагнітні приводи вібраційних транспортуючих пристроїв» відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», постанові Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», із змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р. та № 507 від 03.05.2024 р.

Здобувач Іванов Антон Віталійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка в галузі знань 14 – Електрична інженерія.

### **Офіційний опонент:**

доцент кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування,  
Національного університету

«Львівська політехніка»

д-р техн. наук, професор

Володимир ГУРСЬКИЙ

Підпис офіційного опонента

доцента кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування,  
д-ра техн. наук, професора Володимира ГУРСЬКОГО

засвідчую:

Проректор з науково-педагогічної роботи (повна вища освіта)

Національного університету

«Львівська політехніка»

Олег ДАВИДЧАК