

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

ЧЕРНО Олександр Олександрович

УДК 621.3.07

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ДИНАМІЧНИМИ ВІБРОГАСНИКАМИ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Гуров Анатолій Петрович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова,
професор кафедри автоматики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович,
Кременчуцький державний політехнічний університет,
м. Кременчук, директор Інституту електромеханіки,
електроніки та комп'ютерних технологій

кандидат технічних наук, доцент

Буряковський Сергій Геннадійович,
Українська державна академія залізничного транспорту,
м. Харків, доцент кафедри систем електричної тяги

Провідна установа: **Національний гірничий університет**
Міністерства освіти і науки України,
м. Дніпропетровськ

Захист відбудеться “ 12 ” квітня 2007 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий “ 7 ” березня 2007 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради

Осичев О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Створення ефективних засобів захисту від вібрації є однією з найважливіших проблем сучасної техніки. За останній час ця проблема набуває все більшої актуальності у зв'язку з нарощуванням потужності обладнання в машинобудуванні, в гірничо-збагачувальній, нафтодобувній, деревообробній, текстильній та інших галузях промисловості, а також в сучасних транспортних засобах: літальних апаратах, автомобілях, потягах, морських та річкових суднах. Вібрація є основною причиною виходу з ладу електроприводів: її дія призводить до руйнування підшипникових вузлів та ізоляції електричних машин, а також до хибних спрацьовувань релейної комутаційної апаратури та обриву доріжок печатних плат. При цьому коливання можуть бути викликані електричною або механічною несиметрією у самому електроприводі, або передаватися через опорні зв'язки від інших джерел вібрації.

Найбільш ефективним методом віброзахисту є усунення вібрації у джерелі, однак в більшості випадків це або неможливо технологічно, або неприпустимо, оскільки вібрація джерела забезпечує виробничий процес. В таких випадках боротьба з вібрацією зводиться до ослаблення її дії на навколишнє обладнання і корпусні конструкції за допомогою пасивних засобів віброзахисту, таких як віброізоляція, вібродемпфірування і динамічне віброгасіння. В багатьох випадках перелічені методи не забезпечують достатньої ефективності зниження рівня механічних коливань, тому виникає необхідність в застосуванні керованих віброзахисних систем, серед яких особливе місце займають системи з електромагнітними керованими динамічними віброгасниками (КДВГ). Такі системи відрізняються низьким енергоспоживанням та порівняно простою структурою системи керування, однак за ефективністю віброгасіння вони поступаються активним віброзахисним системам, що значно обмежує область їх застосування. Тому підвищення ефективності систем керованого динамічного віброгасіння є достатньо актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася на кафедрі автоматики НУК ім. адм. Макарова згідно з держбюджетною науково-дослідною темою "Дослідження систем і елементів енергозберігаючого герметичного, суднового і загальнопромислового електроприводу та динамічного віброгасіння з асинхронними та електромагнітними перетворювачами" (№ ДР 0101U008041), затвердженою МОН України, за напрямом 06 "Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі", де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності систем динамічного гасіння вібрації шляхом організації оптимального керування частотою настройки і демпфіруванням електромагнітних віброгасників.

Для досягнення мети дослідження в роботі було поставлено наступні задачі:

– розробити динамічну модель системи автоматичного керування частотою настройки КДВГ, яка враховує інерційну залежність непогодження фаз коливань об'єкту захисту і віброгасної маси від непогодження частот, а також особливості електромеханічних процесів у виконавчому пристрої віброгасника;

– здійснити синтез оптимальної системи автоматичного керування частотою настройки КДВГ;

– сформуванати алгоритм цифрової обробки сигналів з датчиків вібрації, який здійснює керування частотою настройки КДВГ і включає в себе фільтрацію вхідних сигналів та компенсацію нелінійності фазочастотної характеристики віброгасника;

– визначити форму керуючого сигналу, яка дозволяє здійснювати одночасне керування частотою настройки і демпфіруванням пружного підвісу КДВГ;

– визначити діапазон регулювання коефіцієнту відносного демпфірування КДВГ;

– здійснити синтез оптимальної системи автоматичного керування демпфіруванням КДВГ.

Об'єкт дослідження – електромеханічні процеси в керованих системах віброзахисту з електромагнітними КДВГ.

Предмет дослідження – система автоматичного керування електромагнітними КДВГ.

Методи дослідження – При розробці динамічної моделі системи автоматичного керування частотою настройки КДВГ використовувались методи структурного моделювання електромеханічних систем. При синтезі оптимальної системи керування частотою настройки КДВГ використовувався метод мінімально-квадратичної оптимізації. При формуванні алгоритма цифрової обробки сигналів використовувався метод виділення основної гармоніки за допомогою дискретного перетворення Фур'є і метод компенсації нелінійностей за допомогою зворотних функцій. При визначенні форми керуючого сигналу для одночасного керування частотою настройки та демпфіруванням використовувались числові методи розв'язування диференціальних та нелінійних алгебраїчних рівнянь. При розробці регресійних моделей використовувався метод найменших квадратів. При синтезі оптимальної системи керування демпфіруванням КДВГ використовувався метод огинаючих коливальних процесів, метод інтерполяції за допомогою поліноміальних сплайнів і метод сканування для визначення глобального мінімуму цільової функції. При статистичній обробці результатів експериментальних досліджень використовувались методи оцінки похибок.

Наукова новизна одержаних результатів:

– розроблено перспективну динамічну модель системи автоматичного керування частотою настройки КДВГ, яка враховує інерційну залежність між непогодженням фаз і непогодженням частот і дає змогу підвищити точність розрахунків при аналізі та синтезі системи керування;

- визначено оптимальні структуру і параметри системи керування частотою настройки КДВГ, що забезпечують мінімум інтегральної квадратичної похибки керування, що дало змогу підвищити ефективність КДВГ при змінах частоти вібрації за найбільш характерними законами;
- встановлено закон зміни керуючої напруги, рівень якої визначає силу пружності, а форма – силу в'язкого тертя в пружному підвісі, що дає змогу здійснити одночасне керування частотою настройки і демпфіруванням КДВГ і, завдяки цьому, підвищити ефективність гасіння вібрації;
- розроблено регресійні моделі, що дають змогу визначити межі діапазону регулювання коефіцієнту відносного демпфірування КДВГ в залежності від постійної часу виконавчого пристрою, мінімальної та поточної частот настройки і частоти вимушених коливань, що дає можливість врахувати межі зміни керованої величини при синтезі системи керування демпфіруванням, а також оцінити максимальну ефективність КДВГ при проектуванні віброзахисної системи;
- отримано оптимальну характеристику нелінійного коригуючого пристрою в колі керування демпфіруванням КДВГ для умов зміни частоти вимушених коливань, що дало змогу звести до мінімуму інтегральну квадратичну амплітуду віброшвидкості об'єкту захисту і тим самим підвищити ефективність віброзахисної системи в перехідних режимах роботи.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційної роботи використовувались на ДП Науково-виробничий комплекс газотурбобудування "Зоря" – "Машпроект" (м. Миколаїв) при проектуванні керованої віброзахисної системи для зниження рівня низькочастотної вібрації електронно-променевої гармати системи вакуумного зварювання, на науково-виробничому підприємстві ТОВ "Інтком" (м. Миколаїв) при проектуванні керованої віброзахисної системи вібраційного сепаратора, а також в Національному університеті кораблебудування при підготовці магістрів за спеціальністю 8.091401 – системи управління і автоматики.

Особистий внесок здобувача. Всі положення дисертаційної роботи, які виносяться на захист, розроблені здобувачем особисто. Серед них: математичний опис електромеханічних процесів в КДВГ; розробка динамічної моделі системи автоматичного керування частотою настройки КДВГ, визначення її оптимальної структури і параметрів; визначення закону зміни керуючої напруги, що забезпечує одночасне керування частотою настройки і демпфіруванням КДВГ; визначення діапазону регулювання коефіцієнту відносного демпфірування; синтез оптимальної системи автоматичного керування демпфіруванням КДВГ.

Апробація результатів роботи. Основні наукові та практичні результати, отримані в дисертації, обговорювались на Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми создания новых машин и технологий" (Кременчук, 2001 р.), на 2-й Міжнародній науково-технічній конференції "Інформаційна техніка та електромеханіка" (Луганськ, 2003 р.), на науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу УДМТУ, присвяченій пам'яті С.О. Макарова і В.В. Верещагіна (Миколаїв, 2004 р.), на Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю

"Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів" (Миколаїв, 2004, 2006 рр.), на Міжнародній науково-технічній конференції "Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації" (Кременчук, 2004 – 2006 рр.) і на Міжнародній науково-технічній конференції "Вібрації в техніці та технологіях" (Львів, 2006 р.).

Публікації. Основні положення та результати дисертації опубліковані у 7 наукових працях у фахових виданнях ВАК України.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків і 5 додатків. Повний обсяг дисертації складає 182 сторінки, з них 21 ілюстрація на 15 сторінках, 47 ілюстрацій по тексту; 3 таблиці по тексту; 5 додатків на 25 сторінках, 114 найменувань використаних літературних джерел на 13 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи та відображений її зв'язок із науковими програмами, сформульована мета й основні задачі дослідження, наведені нові наукові результати, які виносяться на захист, вказана практична цінність отриманих результатів, а також рівень апробації результатів роботи, наведено кількість публікацій за темою роботи і особистий внесок автора.

В першому розділі проведено огляд літератури за темою дисертації та аналіз стану питання, що дозволило визначити основні напрямки дослідження. Аналіз сучасних керованих систем віброзахисту показав, що найбільш перспективними є системи з електромагнітними КДВГ, основною перевагою яких в порівнянні з активними системами є малі енергетичні затрати. Це пояснюється тим, що в системах з КДВГ енергія джерела використовується не на створення активних силових діянь, які протидіють вібрації, а на зміну за допомогою магнітного поля жорсткості пружних підвісів віброгасників (рис. 1) з метою настройки їх власної частоти (яка інакше називається частотою настройки) на частоту вимушених коливань, що викликає ефект віброгасіння. Керування частотою настройки електромагнітних КДВГ здійснюється за комбінованим принципом із використанням фазового та частотного каналів керування.

Аналіз факторів, що впливають на ефективність віброзахисних систем з електромагнітними КДВГ показав, що для підвищення їх ефективності треба з одного боку покращити динамічні властивості системи керування частотою настройки віброгасників, а з другого боку – створити систему, яка забезпечує зменшення демпфірування пружного підвісу КДВГ в режимах, близьких до усталених, і збільшення – при перехідних процесах. Існуючі на сьогоднішній день знання в даній галузі не дають змогу розв'язати ці задачі, що обумовлено наступними причинами. Існуюча динамічна модель системи автоматичного керування частотою настройки не враховує інерційної залежності між непогодженням фаз коливань рухомої та нерухомої частин КДВГ і непогодженням частот, тому вона не може в повній мірі відображати динамічні властивості системи. Існуючий алгоритм ци-

фрової обробки сигналів з датчиків вібрації, який здійснює керування частотою настройки КДВГ, не може бути використаний для більшості віброзахисних систем, оскільки він, по-перше, не включає в себе фільтрацію вхідних сигналів, а по-друге, не передбачає компенсації нелінійності фазочастотної характеристики віброгасника. Існуючий спосіб керування демпфіруванням пружного підвісу КДВГ базується на формуванні окремого сигналу і передбачає наявність додаткової обмотки і додаткового підсилювача потужності. Це призводить до ускладнення технології виготовлення та підвищення матеріалоємності самого віброгасника, а також до підвищення габаритів і вартості системи керування. На основі результатів проведеного аналізу були сформовані мета і задачі дослідження.

Другий розділ присвячено синтезу системи автоматичного керування частотою настройки КДВГ. В результаті аналізу електромеханічних процесів у системі була сформована динамічна модель системи керування, представлена на рис. 2 у вигляді структурної схеми. Основна відмінність запропонованої моделі від загальновідомих полягає в тому, що вона враховує інерційну залежність між непогодженням фаз коливань рухомої та нерухомої частин КДВГ і непогодженням частот, яка описується передавальною функцією $W_\Phi(p)$. При визначенні цієї передавальної функції спочатку аналітичним шляхом була досліджена зміна кута непогодження фаз $\Delta\varphi(t)$ при малій сходячкостій зміні непогодження частот $\Delta\omega$, а потім, за допомогою методу огинаючих коливальних процесів, – при синусоїдальній зміні $\Delta\omega$. Шляхом аналізу отриманих перехідних та амплітудно-частотних характеристик було встановлено, що при роботі на лінійній ділянці фазочастотної характеристики віброгасника (що забезпечується частотним каналом керування) інерційна залежність між $\Delta\varphi(p)$ та $\Delta\omega(p)$ може бути описана аперіодичною ланкою з коефіцієнтом підсилення $K_\Phi = (\omega_2 \zeta_2)^{-1}$ і постійною часу $T_\Phi = K_\Phi$, де ζ_2 – коефіцієнт відносного демпфірування пружного підвісу КДВГ.

Коефіцієнт передачі $k_{и.у}$ та постійна часу виконавчого пристрою $T_{и.у}$ були отримані шляхом аналізу електромеханічних процесів у КДВГ:

$$k_{и.у} = \frac{k_n W}{R_{обм}} \sqrt{\frac{C_F}{m_2}}; T_{и.у} = \Lambda_0 \cdot \left(\frac{W^2}{R_{обм}} + \frac{1}{R_b} \right),$$

де: m_2 – маса рухомої частини; C_F – конструктивна постійна КДВГ; k_n – безрозмірний коефіцієнт, який визначає кут нахилу лінійної ділянки регульовальної характеристики КДВГ; W – кількість витків обмотки; $R_{обм}$ – активний опір обмотки; R_b – опір, який чиниться вихровим струмам; Λ_0 – провідність магнітного кола в нейтральному положенні полюсів. Величини C_F , Λ_0 та R_b визначаються за допомогою відомих математичних моделей систем із зубцовими зонами.

На основі розробленої динамічної моделі за допомогою методу мінімально-квадратичної оптимізації здійснено синтез оптимальної системи автоматичного керування частотою настройки

КДВГ для двох найбільш характерних законів зміни частоти вібрації: експоненціального, і відповідаючого перехідній характеристиці з коливальністю. Як критерій оптимізації було обрано мінімум інтегральної квадратичної похибки керування

$$J_1 = \int_0^{\infty} \Delta\omega^2(t) dt = \min. \quad (1)$$

При цьому враховувалось обмеження величини керуючого сигналу

$$0 \leq U(t) \leq U_{\text{п}}, \quad (2)$$

де $U_{\text{п}}$ – напруга живлення. Вид корекції обирався виходячи з того, що реалізація системи керування здійснюється на базі мікропроцесора. Оскільки при цьому можуть бути реалізовані практично будь-які структурні ланки, з метою спрощення структури системи доцільно використовувати тільки послідовну корекцію. За допомогою методу невизначених множників Лагранжа були визначені оптимальні структура і параметри послідовного коригуючого пристрою, які забезпечують мінімум цільової функції (1) при обмеженні (2):

при зміні ω за експоненціальним законом

$$W_k(p) = \frac{K_0}{K_{\text{ф.д}} K_{\text{н.ч}}} \cdot \frac{\tau_1 p + 1}{T_0 p + 1} (T_{\text{ф}} p + 1) \cdot (T_{\text{и.у}} p + 1); \quad (3)$$

при зміні ω за законом, відповідаючим перехідній характеристиці з коливальністю

$$W_k(p) = \frac{K_0}{K_{\text{ф.д}} K_{\text{н.ч}}} \cdot \frac{\tau_1^2 p^2 + \tau_2 p + 1}{T_0 p + 1} (T_{\text{ф}} p + 1) \cdot (T_{\text{и.у}} p + 1), \quad (4)$$

де $K_{\text{н.ч}} = K_{\text{у.м}} K_{\text{и.у}}$ – коефіцієнт передачі незмінної частини системи; K_0, T_0, τ_1 і τ_2 визначаються в залежності від параметрів незмінної частини системи та вхідного сигналу. На основі (3) та (4) за допомогою методу кінцевих різниць були сформовані алгоритми підпрограм для керуючого мікропроцесора, які реалізують оптимальну корекцію системи для двох розглянутих законів зміни частоти вібрації.

В ході дослідження було встановлено, що для цифрової обробки сигналів, які поступають з датчиків вібрації, найбільш раціонально використовувати алгоритм на базі дискретного перетворення Фур'є, причому як опорний сигнал доцільно використовувати сигнал з датчика, встановленого на рухомій частині віброгасника. Це дає можливість використовувати фільтруючі властивості механічної частини КДВГ для відстеження основної гармоніки коливань об'єкту захисту. В результаті був сформований алгоритм керуючої програми для системи керування частотою настройки КДВГ. З метою поліпшення динамічних властивостей системи в розробленому алгоритмі передбачена компенсація нелінійності фазового каналу керування.

В третьому розділі здійснено синтез системи автоматичного керування демпфіруванням КДВГ. Шляхом аналітичного перетворення рівнянь, що описують механічні та електромагнітні ко-

ливання в системі динамічного віброгасіння, було встановлено, що для регулювання коефіцієнту відносного демпфірування пружного підвісу КДВГ при тій самій величині жорсткості необхідно, щоб керуюча напруга змінювалася згідно наступному закону:

$$U(t) = \begin{cases} I_{\Sigma \text{ пост}} \frac{\left(T_{\text{н.у}} - C^* \cos^2 \omega t \right) \Delta \zeta_{\text{нд}}^* \frac{\omega}{\omega^*} + \left(1 + C^* \omega \sin 2\omega t \right) \cdot \left(1 + 2 \frac{\Delta \zeta_{\text{нд}}^*}{\omega^*} \text{tg } \omega t \right) \cos^2 \omega t}{\frac{W}{R_{\text{обм}}} \cos^2 \omega t \sqrt{1 + 2 \frac{\Delta \zeta_{\text{нд}}^*}{\omega^*} \text{tg } \omega t}}, \\ \text{якщо } t \in \left[(2k-1) \frac{\pi}{2\omega} + \Delta t_2; (2k+1) \frac{\pi}{2\omega} - \Delta t_1 \right]; \\ 0, \text{ якщо } t \in \left[(2k+1) \frac{\pi}{2\omega} - \Delta t_1; (2k+1) \frac{\pi}{2\omega} + \Delta t_2 \right] \cap \Delta \zeta \geq 0; \\ U_{\text{max}}, \text{ якщо } t \in \left[(2k+1) \frac{\pi}{2\omega} - \Delta t_1; (2k+1) \frac{\pi}{2\omega} + \Delta t_2 \right] \cap \Delta \zeta < 0, \end{cases} \quad (5)$$

де $I_{\Sigma \text{ пост}} = \sqrt{c_{\text{ЭМ}} / C_F}$ – постійна складова сумарної МРС обмотки та вихрових струмів, яка забезпечує задане значення електромагнітної жорсткості $c_{\text{ЭМ}}$, що відповідає частоті настройки ω_2 ;

$C^* = C_F X^2 \cdot \left(\frac{W^2}{R_{\text{обм}}} + \frac{1}{R_{\text{в}}} \right)$; X – амплітуда відносних коливань рухомої та нерухомої частин віброгасника; $\omega^* = (\omega_2^2 - \omega_{20}^2) / (\omega_2 \omega)$; $\Delta \zeta = \zeta_{20} - \zeta_2$; ζ_{20} – коефіцієнт відносного демпфірування КДВГ при $U = \text{const}$; $\Delta \zeta_{\text{нд}}^*$ – величина, яка залежить від $\Delta \zeta$.

Зміна напруги на обмотці КДВГ за законом (5) забезпечує зміну в часі сумарної МРС обмотки та вихрових струмів згідно з наступним законом:

$$I_{\Sigma}(t) = \begin{cases} I_{\Sigma \text{ пост}} \sqrt{1 + 2 \frac{\Delta \zeta_{\text{нд}}^*}{\omega^*} \text{tg } \omega t}, \text{ якщо } t \in \left[(2k-1) \frac{\pi}{2\omega} + \Delta t_2; (2k+1) \frac{\pi}{2\omega} - \Delta t_1 \right]; \\ I_{\Sigma \text{ перех}}(t), \text{ якщо } t \in \left[(2k+1) \frac{\pi}{2\omega} - \Delta t_1; (2k+1) \frac{\pi}{2\omega} + \Delta t_2 \right], \end{cases} \quad (6)$$

де $I_{\Sigma \text{ перех}}(t)$ визначається шляхом розв'язання диференційного рівняння

$$\left(T_{\text{н.у}} - C^* \cos^2 \omega t \right) \frac{dI_{\Sigma \text{ перех}}}{dt} + \left(1 + C^* \omega \sin 2\omega t \right) I_{\Sigma \text{ перех}}(t) = I_{\Sigma \text{ уст}}.$$

Величини U_{max} , Δt_1 та Δt_2 в рівняннях (5) та (6) визначаються з наступних умов: функція $I_{\Sigma}(t)$ повинна бути безперервною; при $\Delta \zeta \geq 0$ максимуми функції $U(t)$ повинні бути рівними між собою; при $\Delta \zeta < 0$ мінімуми функції $U(t)$ повинні дорівнювати нулю.

В результаті взаємодії полюсів магнітної системи КДВГ при зміні сумарної МРС за законом (6), на рухомий магнітопровід віброгасника, крім сили пружності, діє також змінна сила $F_{\text{комп}}$, бли-

зька до синусоїдальної (рис. 3), яка на проміжках часу $t \in \left[(2k-1)\frac{\pi}{2\omega} + \Delta t_2; (2k+1)\frac{\pi}{2\omega} - \Delta t_1 \right]$ пропорційна відносній швидкості магнітопроводів. При $\Delta\zeta > 0$ (рис. 3, а) напрям цієї сили в кожний момент часу співпадає з напрямом швидкості рухомого магнітопровода. В результаті сила $F_{\text{комп}}$ частково компенсує силу в'язкого тертя у пружному підвісі КДВГ, що еквівалентно зменшенню коефіцієнту відносного демпфірування на величину $\Delta\zeta$. При $\Delta\zeta < 0$ (рис. 3, б) сила $F_{\text{комп}}$ спрямована зустрічно швидкості, тому її дія еквівалентна збільшенню коефіцієнту відносного демпфірування на величину $|\Delta\zeta|$.

Таким чином, формування на обмотці КДВГ напруги, яка змінюється в часі за законом (5), дає змогу здійснювати одночасне керування частотою настройки та демпфіруванням пружного підвісу, причому рівень керуючої напруги визначає частоту настройки, а його форма – коефіцієнт відносного демпфірування.

Для визначення величини $\Delta\zeta_{\text{ид}}^*$, а також меж діапазону регулювання величини ζ_2 , шляхом числових розрахунків втрат коливальної енергії рухомої частини віброгасника та апроксимації результатів були отримані регресійні моделі:

$$\Delta\zeta_{\text{ид}}^* = \begin{cases} \frac{k_3\omega^*}{1+k_4T_{\text{и.у}}^*} \operatorname{tg}\left(k_5 \frac{\Delta\zeta - \zeta_e}{\omega^*} (1+k_6T_{\text{и.у}}^*)\right), & \text{якщо } \Delta\zeta - \zeta_e \geq 0; \\ \frac{k_9\omega^*}{1+k_{10}T_{\text{и.у}}^*} \operatorname{tg}\left(k_{11} \frac{\Delta\zeta - \zeta_e}{\omega^*} (1+k_{12}T_{\text{и.у}}^*)\right), & \text{якщо } \Delta\zeta - \zeta_e < 0; \end{cases}$$

$$\zeta_e = \frac{C_F I_{\Sigma \text{пост}}^2}{4\pi\omega m_2} \left(\frac{C^*}{\sum_{i=0}^3 (A_{0,i} + A_{1,i}\omega^2) T_{\text{и.у}}^i} + \frac{(C^*)^2}{\sum_{i=0}^3 (A_{2,i} + A_{3,i}\omega^2) T_{\text{и.у}}^i} \right);$$

$$\zeta_2 \in [\zeta_{20} - \Delta\zeta_{\text{max}}; \zeta_{20} - \Delta\zeta_{\text{min}}];$$

$$\Delta\zeta_{\text{max}} = \frac{k_1\omega^*}{1+k_2T_{\text{и.у}}^*} + \zeta_e; \quad \Delta\zeta_{\text{min}} = -\frac{k_7\omega^*}{1+k_8T_{\text{и.у}}^*} + \zeta_e,$$

де $k_1, k_2, \dots, k_{12}, A_{0,0}, A_{0,1}, \dots, A_{3,3}$ – коефіцієнти апроксимації. За допомогою критерія Ст'юдента були знайдені довірчі інтервали отриманих регресій для рівня надійності 0,95.

Для забезпечення максимальної ефективності КДВГ, при зміні частоти вібрації ω величину ζ_2 необхідно збільшувати, а потім, в процесі настройки віброгасника на нову частоту, – зменшувати до мінімального значення. Тому структура системи керування демпфіруванням була побудована таким чином, що значення ζ_2 формується в залежності від непогодження фаз $\Delta\varphi$ (рис. 4). Оп-

тимальне керування демпфіруванням КДВГ забезпечується оптимальною характеристикою нелінійного коригуючого пристрою $\zeta_2(\Delta\varphi)$.

При розв'язанні задачі оптимізації характеристики $\zeta_2(\Delta\varphi)$ розглядався випадок, коли об'єкт захисту коливається уздовж одного напрямку, на ньому встановлено N однакових електромагнітних віброгасників, які діють уздовж цього ж напрямку, а частота збурної сили змінюється сходинково. Характеристику, що оптимізується, було представлено у вигляді сплайн-функції, а як критерій оптимізації був обраний мінімум інтегральної квадратичної віброшвидкості об'єкту захисту

$$S(\zeta_2^{(1)}, \zeta_2^{(2)}, \dots, \zeta_2^{(N)}) = \int_0^{t_{\max}} (V_1(t))^2 dt = \min, \quad (8)$$

де $\zeta_2^{(1)}, \zeta_2^{(2)}, \dots, \zeta_2^{(N)}$ – ординати базових точок кубічних сплайнів; V_1 – амплітуда віброшвидкості об'єкту захисту; t_{\max} – відрізок часу, більший за час перехідного процесу. При визначенні оптимальних значень $\zeta_2^{(1)}, \zeta_2^{(2)}, \dots, \zeta_2^{(N)}$ враховувалось обмеження (7) і обмеження амплітуди відносних коливань магнітопроводів КДВГ

$$X(t) \leq X_{\max},$$

де X_{\max} – максимально припустима деформація пружних елементів. Функції $V_1(t)$ і $X(t)$ визначались за допомогою методу огинаючих коливальних процесів. При цьому взаємний вплив віброгасників враховувався шляхом умовного об'єднання їх в один КДВГ з еквівалентною масою та жорсткістю. Оскільки цільова функція (8) не є унімодалною, для пошуку її глобального мінімуму використовувався метод сканування.

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням. З метою підтвердження достовірності теоретичних результатів, отриманих в третьому розділі, було проведено наступні експерименти: визначення приросту коефіцієнта відносного демпфірування КДВГ при формуванні на його обмотці напруги спеціальної форми, яка визначається рівнянням (5), на фіксованій частоті настройки; дослідження роботи системи керування частотою настройки КДВГ в режимі повільної рівномірної зміни частоти вібрації при різних значеннях ζ_2 ; дослідження перехідних процесів у системі керованого динамічного гасіння вібрації в режимі сходинкової зміни частоти збурного діяння при постійному демпфіруванні та при зміні демпфірування за оптимальним законом.

Дослідження показали, що шляхом формування на обмотці КДВГ напруги спеціальної форми можна задавати необхідне значення коефіцієнту відносного демпфірування віброгасника з точністю до 6%. При цьому мінімальне значення ζ_2 , яке вдалося забезпечити для досліджуваного експериментального зразка КДВГ, становило 0,0013, що в 4,3 рази менше в порівнянні з початковим значенням при $U = \text{const}$. Це означає, що при тих самих габаритах і масі, тільки за рахунок зміни керуючої напруги за спеціальним законом ефективність даного віброгасника підвищилася в

4,3 рази. В результаті експериментального дослідження динаміки системи керованого динамічного віброгасіння було встановлено, що оптимальне керування демпфіруванням КДВГ дає змогу в 2,1 рази скоротити час перехідного процесу. Огинаючі коливальних процесів, отримані експериментальним шляхом, з точністю до 20% співпадають із розрахунковими.

В п'ятому розділі розглянуті питання практичної реалізації результатів дослідження. Запропоновані рекомендації щодо конструктивного виконання систем керування КДВГ та їх компоновки в системах динамічного гасіння вібрації. Приведено опис промислового впровадження віброзахисної системи з електромагнітними КДВГ.

Досвід проектування і виготовлення систем автоматичного керування електромагнітними віброгасниками показав, що конструктивне виконання і компоновка системи залежить від потужності споживання КДВГ: для віброгасників, потужністю до 30 Вт доцільно застосовувати схему групового керування, а більше 30 Вт – схему індивідуального керування. Для обох випадків створені схеми конструктивного виконання систем керування та їх компоновки з віброгасниками, а також принципові електричні схеми з використанням сучасної елементної бази. Розроблено програму для мікроконтролера, яка здійснює групове керування віброгасниками. Обидві схеми конструктивного виконання і компоновки систем керування КДВГ пройшли випробування у промислових умовах.

Використання розробленої віброзахисної системи з електромагнітними КДВГ на державному підприємстві НВКГ "Зоря" – "Машпроект" дало змогу на 35 дБ знизити рівень низькочастотної вібрації електронно-променевої гармати і тим самим підвищити точність та якість роботи системи вакуумного зварювання АВЗ-180.

ВИСНОВКИ

В дисертації розв'язана науково-практична задача підвищення ефективності зниження рівня вібрації обладнання керованими віброзахисними системами з електромагнітними динамічними віброгасниками. Проведені в роботі дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. В розробленій динамічній моделі системи автоматичного керування частотою настройки КДВГ інерційна залежність непогодження фаз коливань об'єкту захисту та рухомої частини віброгасника від непогодження частот враховується шляхом додавання в основне коло фазового каналу керування аперіодичної ланки з постійною часу, зворотно пропорційною частоті настройки та коефіцієнту відносного демпфірування пружного підвісу. Виконавчий пристрій КДВГ в динамічній моделі представляє собою аперіодичну ланку з постійною часу, яка дорівнює сумі постійних часу електричного і магнітного кола віброгасника.

2. За допомогою методу мінімально-квадратичної оптимізації здійснено синтез оптимальної мікропроцесорної системи автоматичного керування частотою настройки КДВГ. Визначено струк-

туру та параметри послідовного коригуючого пристрою для двох законів зміни частоти вібрації: експоненціального і відповідаючого перехідній характеристиці з коливальністю.

3. Розроблений алгоритм цифрової обробки сигналів з датчиків вібрації, що включає в себе фільтрацію вхідних сигналів і компенсацію нелінійності фазочастотної характеристики КДВГ, дає змогу реалізувати мікропроцесорну систему керування частотою настройки КДВГ, яка здатна стійко функціонувати при наявності значного рівня вищих та низьких гармонік вібрації, а також при швидких змінах частоти основної гармоніки.

4. Формування на обмотці КДВГ напруги, яка змінюється в часі за спеціальним законом, дає змогу здійснювати одночасне керування частотою настройки та демпфіруванням пружного підвісу, причому рівень керуючої напруги визначає частоту настройки, а його форма – коефіцієнт відносного демпфірування. Встановлені в роботі рівняння, які визначають форму керуючої напруги, дають можливість регулювати демпфірування пружного підвісу з точністю до 6%. Це дало змогу в 4,3 рази підвищити ефективність віброгасіння при тих самих габаритах і масі КДВГ.

5. Діапазон регулювання коефіцієнту відносного демпфірування пружного підвісу КДВГ визначається постійною часу виконавчого пристрою, мінімальною та поточною частотами настройки та частотою вимушених коливань. Розроблені регресійні моделі дають змогу з точністю до 3,5% визначити межі регулювання коефіцієнту відносного демпфірування.

6. Здійснено синтез оптимальної системи керування демпфіруванням КДВГ, яка забезпечує мінімум інтегральної квадратичної амплітуди віброшвидкості об'єкту захисту при зміні частоти вимушених коливань, з урахуванням обмеження максимальної деформації пружних елементів. Оптимальне керування демпфіруванням дало змогу в 2,1 рази скоротити час настройки КДВГ на нову частоту і обмежити деформацію пружних елементів.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджені на ДП НВКГ "Зоря" – "Машпроект" і науково-виробничому підприємстві ТОВ "Інтком", а також у навчальний процес в Національному університеті кораблебудування ім. адм. Макарова.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Гуров А.П., Черно А.А.* Управление демпфированием динамических виброгасителей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2004. – №2 (25) – С. 33 – 36.

Здобувачем зроблено: визначення законів, за якими повинні змінюватися електромагнітна жорсткість, сумарна магніторушійна сила і напруга на обмотці для компенсації сили в'язкого тертя у випадку малих коливань рухомої частини КДВГ, визначення діапазону регулювання коефіцієнту відносного демпфірування, проведення експериментів, аналіз отриманих результатів.

2. Черно А.А. Уточненная математическая модель системы автоматического управления частотой настройки динамических виброгасителей // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ, 2004. – №12 (82). – С. 189 – 194.

3. Черно А.А. Оптимальное управление демпфированием динамических виброгасителей при переходных процессах // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК. – 2004. – №6 (399). – С. 109 – 117.

4. Гуров А.П., Черно А.А. Оптимизация параметров зубцовой зоны электромагнитных управляемых динамических виброгасителей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2005. – №4 (33) – С. 27 – 29.

Здобувачем зроблено: визначення критерію оптимізації, формування цільової функції, визначення області реальних значень параметрів, що оптимізуються і незалежних параметрів, дослідження характеру цільової функції, проведення розрахунків і побудова номограм для визначення оптимальних параметрів зубцової зони КДВГ, аналіз отриманих результатів.

5. Гуров А.П., Черно А.А. Оптимальная система управления частотой настройки динамических виброгасителей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2006. – №1 (36) – С. 10 – 14.

Здобувачем зроблено: виведення рівнянь, що визначають оптимальні структуру і параметри коригуючих ланок, формування алгоритмів підпрограм, що реалізують послідовну корекцію системи, складання обчислювальних програм для визначення оптимальних значень множника Лагранжа.

6. Гуров А.П., Черно А.А. Формирование алгоритма цифровой обработки сигналов для микропроцессорной системы управления частотой настройки динамических виброгасителей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2006. – №2 (37), Ч. 2. – С. 19 – 22.

Здобувачем зроблено: виведення аналітичних залежностей, формування алгоритму і складання тексту керуючої програми, виготовлення і налагодження системи керування, проведення експериментів, аналіз отриманих результатів.

7. Гуров А.П., Черно О.О. Керування демпфуванням динамічних віброгасників з великою амплітудою коливань // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Зб. наук. праць. – Львів: НУ "Львівська політехніка", 2006. – Вип. 40. – С. 75 – 83.

Здобувачем зроблено: математичний опис електромеханічних процесів в КДВГ, визначення законів, за якими повинні змінюватися електромагнітна жорсткість, сумарна магніторушійна сила і напруга на обмотці для компенсації сили в'язкого тертя, визначення діапазону регулювання коефіцієнту відносного демпфірування, проведення експериментів, аналіз отриманих результатів.

АНОТАЦІЇ**Черно О.О. Система автоматичного керування електромагнітними динамічними віброгасниками. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності систем динамічного гасіння вібрації шляхом оптимального керування частотою настройки і демпфіруванням електромагнітних віброгасників. Розроблено динамічну модель системи керування частотою настройки керованих динамічних віброгасників (КДВГ) та визначено її оптимальну структуру і параметри. Розроблено алгоритм цифрової обробки сигналів з датчиків вібрації, який здійснює керування частотою настройки КДВГ. Встановлено закон зміни керуючої напруги, який дає змогу здійснити одночасне керування частотою настройки і демпфіруванням КДВГ і, завдяки цьому, підвищити ефективність гасіння вібрації. Розроблено регресійні моделі, що дають змогу визначити межі діапазону регулювання коефіцієнту відносного демпфірування КДВГ. Отримано оптимальну характеристику нелінійного коригуючого пристрою в колі керування демпфіруванням КДВГ.

Ключові слова: система автоматичного керування, електромагнітний керований динамічний віброгасник, керована віброзахисна система, ефективність, частота настройки, демпфірування пружного підвісу.

Черно А.А. Система автоматического управления электромагнитными динамическими виброгасителями. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности систем динамического гашения вибрации путем организации оптимального управления частотой настройки и демпфированием электромагнитных виброгасителей.

Разработана динамическая модель системы автоматического управления частотой настройки управляемых динамических виброгасителей (УДВГ), которая отличается тем, что учитывает инерционную зависимость между рассогласованием фаз и рассогласованием частот и, за счет этого, позволяет повысить точность расчетов при анализе и синтезе системы управления.

Определены оптимальные структура и параметры системы управления частотой настройки УДВГ, обеспечивающие минимум интегральной квадратичной ошибки управления.

Разработан алгоритм цифровой обработки сигналов с датчиков вибрации, включающий в себя фильтрацию входных сигналов и компенсацию нелинейности фазочастотной характеристики УДВГ, который позволяет реализовать микропроцессорную систему управления частотой

настройки УДВГ, способную устойчиво функционировать при наличии значительного уровня высших и низших гармоник вибрации, а также при резких изменениях частоты основной гармоники.

Установлен закон изменения управляющего напряжения, уровень которого определяет силу упругости, а форма – силу вязкого трения в упругом подвесе, что позволяет осуществлять одновременное управление частотой настройки и демпфированием УДВГ. Это дало возможность в 4,3 раза повысить эффективность виброгасителей при тех же габаритах и массе.

Разработаны регрессионные модели, позволяющие определить границы диапазона регулирования коэффициента относительного демпфирования УДВГ в зависимости от постоянной времени исполнительного устройства, минимальной и текущей частот настройки и частоты вынужденных колебаний, что дало возможность учитывать пределы изменения управляемой величины при синтезе системы управления демпфированием, а также оценить максимальную эффективность УДВГ при проектировании виброзащитной системы.

Получена оптимальная характеристика нелинейного корректирующего устройства в цепи управления демпфированием УДВГ, что позволило свести к минимуму интегральную квадратичную амплитуду виброскорости объекта защиты и тем самым повысить эффективность виброзащитной системы в переходных режимах работы.

Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие полученные теоретические результаты.

Предложены рекомендации по конструктивному исполнению систем автоматического управления УДВГ и их компоновке в системах динамического гашения вибрации.

Ключевые слова: система автоматического управления, электромагнитный управляемый динамический виброгаситель, управляемая виброзащитная система, эффективность, частота настройки, демпфирование упругого подвеса.

Tcherno A.A. Automatic control system of electromagnetic dynamic vibration absorbers. – Manuscript.

The dissertation for candidate of technical sciences degree on the speciality 05.09.03. – electrotechnical complexes and systems.

The dissertation deals with the problems of effectiveness increase of dynamic vibroprotective systems by means of electromagnetic adaptive dynamic vibration absorbers (ADVA) natural frequency and damping optimal control. The dynamic model of ADVA natural frequency automatic control system has been prepared, its optimal structure and parameters has been defined. The algorithm of the program,

which realizes automatic control of dynamic vibration absorbers natural frequency, has been shaped. Law of control voltage changing, which provides simultaneous control of the ADVA natural frequency and damping has been derived. The equations to define the relative damping coefficient control band depending on working frequency and unit parameters has been derived. Optimal characteristic of damping control system non-linear correction device has been obtained.

Key words: automatic control system, electromagnetic adaptive dynamic vibration absorber, controllable vibroprotective system, effectiveness, natural frequency, damping of elastic pendant.