

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Васілевський Олександр Миколайович

УДК 621.313.333:621.317

**ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО
КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РОТОРНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.11.16 – *Інформаційно-вимірювальні системи*

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2005

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Поджаренко Володимир Олександрович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри метрології та промислової автоматики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Сопрунюк Петро Маркіянович,
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка
НАН України, м. Львів, керівник відділу
Електричних вимірювань фізичних величин

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Колпак Богдан Дмитрович,
Державне підприємство „Науково-дослідний інститут
метрології, вимірювальних та управляючих систем”
(ДП НДІ „Система”), м. Львів, заступник директора з
наукової роботи та якості

Провідна установа: Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут”,
кафедра автоматизації експериментальних досліджень,
Міністерство освіти та науки України, м. Київ

Захист відбудеться “ 21 ” січня 2006 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021,
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного
університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “ 2 ” грудня 2005 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Павлов С. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній день велику увагу приділяють підвищенню якості продукції, що в свою чергу потребує розвитку інформаційно-вимірвальних систем (ІВС) для автоматичного контролю параметрів роторних систем. Враховуючи те, що основу професійних знань в науці і техніці складає вимірвальна інформація, то стає зрозумілою необхідність забезпечення виробництва високоефективними методами і засобами вимірювання, контролю та керування, які вміщують в собі останні досягнення науки та техніки в різних галузях.

Розробка і дослідження ІВС для автоматичного контролю параметрів роторних систем (РС), що дозволяє одержати своєчасну і достовірну інформацію про частоти обертання РС, їх несинхронність обертання та фактичний стан електромеханічних і вібраційних параметрів РС, є одним із компонентів стратегії підвищення якості обробки сировини під час обдирки алмазів, який дозволяє знизити витрати на огляд РС в процесі експлуатації. Організація технічного обслуговування за фактичним станом механічного обладнання дозволяє знизити середньорічні витрати на підтримку працездатності РС приблизно в 1.5 рази у порівнянні з витратами на проведення з цією ж метою планово-попереджувальних ремонтів, і майже в 2 рази у порівнянні з витратами на технічне обслуговування після виходу з ладу.

Дуже часто в технічних системах виникає необхідність в автоматичному контролі параметрів РС під час технологічного процесу, наприклад, при обдирці алмазів, коли необхідно безперервно контролювати несинхронність обертання двох РС. Оскільки на несинхронність обертання в значній мірі впливає момент опору механічної частини при виникненні дефектів, то доцільно також проводити автоматичний контроль як моменту опору, так і вібраційного стану електрошпинделів, від яких залежить точність синхронізації частот обертання та якість продукції, що виробляється. Віброприскорення в даній ІВС є головним параметром, який необхідно вимірювати та контролювати, і на основі якої приймається рішення. Сучасний рівень обчислювальних засобів дозволяє більш повно реалізувати природну потенційно високу інформативність віброметричних параметрів РС, що розкриває додаткові можливості у створенні нового методу вимірювання частот обертання, алгоритму автоматичного контролю несинхронності обертання РС, методів автоматичного контролю електромеханічних і віброметричних параметрів РС та підходів до проектування ІВС.

Разом з тим комплексний підхід до одночасного вимірювання частот обертання за вібрацією РС, автоматичного контролю несинхронності обертання РС та контролю електромеханічних і віброметричних параметрів РС раніше не використовувався. Тому обґрунтування і розробка ІВС для автоматичного контролю параметрів РС, що здатна забезпечити підвищений рівень вірогідності автоматичного контролю, є актуальною науковою проблемою. Її вирішення дозволить підвищити надійність ІВС, точність синхронізації частот обертання, вірогідність автоматичного контролю параметрів РС та якість обдирки алмазів, а також знизити витрати на ремонт і обслуговування РС в процесі експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до тематичних планів і технічного завдання за господарчо-договірною тематикою „На створення науково-технічної продукції” № Р-032 від 23 вересня 2002 р. на Вінницькому заводі „Кристал” та на ВАТ “Ямпільський приладобудівний завод” за договором № Р-061 від 10 січня 2005р.. Також тематика дисертаційної роботи є частиною планової держбюджетної науково-дослідної роботи № 42-Д-277 „Розробка теоретичних основ побудови систем діагностування електромоторів в енергозберігаючих технологіях”, номер державної реєстрації 0105U002432.

Автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт в якості відповідального виконавця.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення вірогідності автоматичного контролю за рахунок комплексного використання інформації про електромеханічні і віброметричні параметри роторних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Проаналізувати відомі ІВС для автоматичного контролю параметрів РС та методи контролю технічного стану РС.

2. Розробити модель збудження вібрації в механічній частині, модель перетворення вібромертичних параметрів у частоту обертання вала та математичні моделі системи автоматичного контролю параметрів РС під час синхронізації частот обертання.

3. Розробити нові методи автоматичного контролю параметрів РС на основі комплексного використання електромеханічних і віброметричних даних.

4. Обґрунтувати структурно-алгоритмічну організацію вимірювальних каналів ІВС для автоматичного контролю параметрів РС.

5. Виконати експериментальні дослідження для перевірки адекватності розробленої ІВС для автоматичного контролю параметрів РС.

Об'єкт дослідження – процеси отримання інформації про стан параметрів РС, які контролюються, за допомогою методу вимірювання частот обертання і методів автоматичного контролю електромеханічних та віброметричних параметрів РС.

Предмет дослідження – ІВС для автоматичного контролю параметрів РС.

Методи дослідження ґрунтуються на фундаментальних положеннях теорії цифрової обробки і передачі інформації, теорії електроприводів, теорії машин та механізмів, теорії функцій чутливості, елементах теорії вібродіагностики та метрології.

При розробці технічного забезпечення експериментальних досліджень використовувалися методи схемотехніки. При аналізі результатів експериментальних досліджень та вирішенні задач автоматичного контролю параметрів РС, використовувалися: математичний апарат теорії коливань; методи кореляційного аналізу; елементи теорії систем автоматичного контролю.

Наукова новизна отриманих результатів роботи полягає у розробці і обґрунтуванні методу вимірювання частот обертання РС та методів автоматичного контролю електромеханічних і віброметричних параметрів для підвищення вірогідності автоматичного контролю, що реалізовано у отриманні таких наукових результатів:

1. Вперше розроблено метод вимірювання частот обертання РС за віброметричними параметрами, який відрізняється тим, що в ньому частота обертання вимірюється за допомогою акселерометрів шляхом утворення ВКФ між двома зміщеними в часі ВС. На відміну від існуючих, використання такого методу дозволяє одночасно з вимірюванням частот обертання здійснювати автоматичний контроль вібраційних параметрів РС, що сприяє підвищенню вірогідності автоматичного контролю.

2. Вперше розроблено модель системи автоматичного контролю параметрів РС, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній запропоновано адаптивний алгоритм автоматичного контролю параметрів РС, який дозволяє мінімізувати похибку несинхронності обертання РС, і тим самим підвищити точність синхронізації в 1.5-2 рази порівняно з відомими ІВС.

3. Розроблено та досліджено нові методи автоматичного контролю параметрів РС з використанням функцій чутливості, струму статора і ЛДЗ ВС, які відрізняються від існуючих комплексним використанням електромеханічних і віброметричних параметрів та дозволяють отримувати достовірну інформацію про стан цих параметрів, на основі яких проводити ремонт РС за фактичною потребою. Показано, що одночасне використання декількох методів сприяє зниженню ймовірності прийняття помилкового рішення.

4. Набули подальшого розвитку математичні моделі для оцінювання метрологічних характеристик ВК вібрації, в яких на відміну від існуючих враховано його нелінійні властивості, що дозволило визначити діапазон роботи ВК та розробляти їх з наперед заданими нормованими метрологічними характеристиками.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено та впроваджено ІВС для автоматичного контролю параметрів РС з покращеними метрологічними характеристиками;

- розроблено алгоритм вимірювання частот обертання РС та адаптивний алгоритм автоматичного контролю несинхронності обертання РС використання яких дозволяє підвищити точність синхронізації у 1.5 - 2 рази порівняно з відомими ІВС;

- розроблено алгоритми автоматичного контролю параметрів РС за функціями чутливості, за струмом статора та за ЛДЗ авто-кореляційної функції ВС на основі аналізу віброметричних характеристик та використання розробленого математичного апарату, впровадження яких дозволяє під-

вищити вірогідність автоматичного контролю за рахунок більш повного отримання вимірювальної інформації про стан параметрів РС;

- удосконалено структури вимірювальних каналів ІВС для автоматичного контролю параметрів РС шляхом адаптації параметрів РС, що сприяє підвищенню точності синхронізації частот обертання та вірогідності автоматичного контролю.

Розроблена ІВС для автоматичного контролю параметрів РС, метод вимірювання частот обертання за допомогою віброметричних параметрів та алгоритми автоматичного контролю електромеханічних і віброметричних параметрів РС впроваджені на Вінницькому заводі „Кристал” та на ВАТ „Ямпільський приладобудівний завод”.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати з формулюванням відповідних висновків отримані автором самостійно. Окремі результати отримані в співавторстві, у цих випадках особистий внесок автора у патентах на винахід, статтях та тезах доповідей такий: [1] – розроблено модель збудження вібрації у механічній частині РС та блок-схему алгоритму перетворення вібропараметрів у частоту обертання вала; [2, 9] – розроблено адаптивну систему автоматичного контролю параметрів РС; [3] – розроблено метод функцій чутливостей для автоматичного контролю механічних параметрів РС; [4] – розроблено метод вібраційного контролю технічного стану РС; [5] – розроблено структурну схему вимірювальних каналів вібрації, математичний апарат методу перетворення вібропараметрів у частоту обертання вала та проаналізовано їх похибки вимірювання; [6] – розроблено метод автоматичного контролю моменту опору за струмом статора; [7] – оцінено основні статичні метрологічні характеристики ВК; [8, 10] – розроблено структурну схему ІВС, представлено результати досліджень і визначено похибки вимірювань.

Апробація результатів дослідження. Основні положення та результати виконаних в дисертації досліджень доповідалися та обговорювалися на міжнародних і регіональних науково-технічних конференціях, а саме: IV Міжнародна науково-технічна конференція „Метрологія та вимірювальна техніка” (Харків, 2004); XXXIII науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ (Вінниця, 2004); VIII Міжнародна науково-практична конференція “Наука і освіта 2005” (Дніпропетровськ, 2005); III Міжнародна науково-технічна конференція „Інформаційна техніка та електромеханіка” (Луганськ, 2005); Міжнародна науково-технічна конференція “Комп’ютерні системи в автоматизації виробничих процесів” (Хмельницький, 2005); III Международная научно-техническая конференция “Вибрация машин: измерение, снижение, защита” (Донецьк, 2005); I Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні проблеми радіотехніки, телекомунікацій та приладобудування” (Вінниця, 2005); Второй Международной радиоэлектронный Форум “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития” (МРФ-2005) (Харків, 2005).

Публікації. Основний зміст роботи опублікований у 17 друкованих працях, в тому числі 10 статей у наукових журналах, що входять до переліку ВАК України, 5 статей у збірниках матеріалів і тезах доповідей науково-технічних конференцій, 1 патент України на винахід і 1 рішення про видачу патенту України.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п’яти розділів, основних висновків по роботі, списку літературних джерел (108 бібліографічних посилань на 10-ти сторінках) та 15 додатків (36 сторінок). Загальний обсяг дисертації, в якому викладено основний зміст, складає 185 сторінок і містить 104 рисунки та 2 таблиці. Повний обсяг дисертації складає 248 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, розкрито сутність науково-технічної проблеми, зазначено зв’язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і задачі досліджень, висвітлено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів та приведені відомості про публікації автора і апробацію результатів дисертаційної роботи.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан ІВС для автоматичного контролю параметрів роторних систем (РС), наведено їх класифікацію та розглянуто існуючі схеми і методи кон-

тролю параметрів при побудові ІВС. Встановлено, що існуючі на виробництві діамантів системи контролю параметрів РС відстають від стану розвитку технічного забезпечення.

Відзначено особливості технологічного процесу обдирки алмазів, який пов'язаний з підвищеними вимогами до якості виробів, в результаті чого виникає проблема побудови систем автоматичного контролю параметрів РС. Встановлено, що на якість продукції значною мірою впливає несинхронність обертання РС. На несинхронність обертання РС суттєво впливає технічний стан РС, зміну якого можна контролювати за механічними та віброметричними параметрами РС. Слід відмітити, що існуючі методи і алгоритми автоматичного контролю у повній мірі не дозволяють одночасно вимірювати частоти обертання РС та проводити автоматичний контроль як електромеханічних, так і віброметричних параметрів РС з високою швидкістю, точністю та вірогідністю. Тому розробка і дослідження ІВС для автоматичного контролю параметрів РС, що дозволяє підвищити вірогідність автоматичного контролю залишається актуальною задачею. На підставі проведеного аналізу сучасного стану проблеми сформульовано основні завдання дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячено розробці моделі збудження вібрації у РС, моделі перетворення віброметричних параметрів у частоту обертання вала та моделюванню системи автоматичного контролю параметрів РС і аналізу отриманих в результаті моделювання характеристик.

При розробці моделі перетворення віброметричних параметрів у частоту обертання вала було встановлено, що до вібрації РС призводять ряд причин: недосконалості підшипників кочення; овальність, гранність доріжок та тіл кочення, наявність радіального зазору; недосконалості, що виникають при експлуатації РС - зношення, забруднення мастила, залишковий дисбаланс ротора та інші. Навантаження на опору РС носить циклічний характер, а зміна механічних коливань – періодична, що відображається на законі зміни параметрів результуючої вібрації опори. Траєкторію руху в часі центра ваги шийки ротора в підшипнику кочення з позитивним радіальним зазором можна представити у вигляді зворотної синусоїди, а механічні коливання можна описати рівнянням

$$X(t) = a \cdot \left| \sin \left(\frac{\omega}{2} \cdot \left[1 - \frac{D_T}{D_{cp}} \cdot \cos(b) \right] \cdot z \cdot \frac{t}{2} \right) \right|, \quad (1)$$

де a – максимальне зміщення внутрішнього кільця підшипника; ω – кутова швидкість ротора; D_T – діаметр тіла кочення; D_{cp} – середній діаметр підшипника; b – кут контакту; z – кількість тіл кочення.

Для перетворення віброметричних параметрів РС (його механічних коливань) у частоту обертання вала, виміряні віброприскорення, за допомогою п'єзоелектричного акселерометра по осям абсцис $X(t)$ і ординат $Y(t)$ (рис. 1) піддаються кореляції в результаті чого утворюється взаємо-кореляційна функція (ВКФ), що виражає ступінь кореляції між двома вібросигналами (ВС) в залежності від їх взаємного зсуву в часовій області.

Час, при якому досягається максимум ВКФ відображає час затримки між двома вимірними ВС, за допомогою якого визначається частота обертання вала РС. Математичний опис моделі утворення ВКФ між двома вимірними ВС має вигляд

$$R_{XY}(T) = \sum_{v=1}^n S_{X_v} \cdot S_{Y_v} \cdot \cos(\Psi_v - v \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot T), \quad (2)$$

де S_{X_v} і S_{Y_v} – середньо квадратичні значення вимірних ВС $X(t)$ та $Y(t)$; Ψ_v – фазовий зсув між v -ми гармоніками досліджуваних сигналів, $\pi/2$; v – номер виміряного вхідного сигналу; f_0 – частота слідування вхідних тактових імпульсів; T – час затримки між ВС $X(t)$ та $Y(t)$; n – кількість вимірних параметрів (вибірка).

Рис. 1. Конструктивна схема реалізації методу вимірювання частоти обертання вала РС за його віброметричними параметрами

В результаті моделювання ВС на різних частотах, отримано характеристики ВКФ, за допомогою рівняння (2), які представлені на рис. 2. Час досягнення максимуму ВКФ розраховується за допомогою невластного інтегралу від нормованої ВКФ у вигляді

$$T = \frac{1}{n} \int_0^{t_a} \frac{R_{XY}(T)}{S_X \cdot S_Y} dT. \quad (3)$$

Розрахувавши час досягнення максимуму за рівнянням (3) кожної із отриманих на різних частотах обертання ВКФ отримано такі числові значення: $T_1=94,24\text{мс}$; $T_2=70,83\text{мс}$; $T_3=28,73\text{мс}$; $T_4=3,48\text{мс}$. При відомому куті ($\Delta\varphi = \pi/2$) між осями X та Y за якими здійснюється вимірювання вібрації РС, і розрахованих інтервалах затримки T, кутову швидкість ротора щ можна визначити як: $\omega_0 \approx \Delta\varphi/T = \pi/(2 \cdot T)$, тоді частота обертання N_0 буде дорівнювати: $N = 60 \cdot \omega/(2\pi) = 60/(4 \cdot T)$. Підставивши визначені інтервали затримок T в рівняння визначення частоти обертання, отримаємо виміряні частоти обертання РС, які відповідно дорівнюють: $N_1=159\text{об/хв}$; $N_2=212\text{об/хв}$; $N_3=522\text{об/хв}$; $N_4=4310\text{об/хв}$.

Рис. 2. Характеристики утворених ВКФ між зміщеними в часовій області ВС

Таким чином, розроблена модель перетворення віброметричних параметрів у частоту обертання вала свідчить про те, що за допомогою ВС, які вимірюються по двом осям, шляхом утворення ВКФ та подальшому знаходженні часу досягнення максимуму можна адекватно визначати частоту обертання вала. Це дозволяє одночасно з вимірюванням частоти обертання здійснювати автоматичний контроль вібраційного стану РС та проводити ремонт РС за фактичною потребою.

Оскільки технологічний процес обдирки алмазі пов'язаний з підвищеними вимогами до точності обробки виробів та їх якості, то виникає проблема побудови та моделювання систем автоматичного контролю параметрів РС. Суть цієї проблеми полягає в автоматичному контролі параметрів РС, між якими закріплено алмаз, який, за технологією, необхідно обробляти при синхронній роботі РС на високих кутових швидкостях. При роботі РС між ними виникає несинхронність обертання, за рахунок різних властивостей механізмів, неідеальності виготовлення електричних і механічних елементів.

При розробці моделі системи автоматичного контролю несинхронності обертання РС їх доцільно розглядати у вигляді передатних функцій, використання яких дозволяє розглядати перехідні процеси при відхиленнях від початкових координат РС. Було знайдено передатну функцію електромагнітної частини РС, яка має вигляд

$$W_{e\ddot{e}}(p) = \frac{\frac{3}{2} p_n k_1^2 \frac{U_{1\alpha}^2}{\Omega_1 R_2'} (T_{\ddot{e}e} p + 1) - M_{\text{поч}} \frac{S}{S_{e\ddot{o}}^2} (T_{\ddot{e}e} p + 2)}{(T_{\ddot{e}e} p + 1)^2 + \left(\frac{S}{S_{e\ddot{o}}}\right)^2}, \quad (4)$$

де p_n - кількість пар полюсів; k_1 - коефіцієнт електромагнітного зв'язку статора; R_2' - активний опір обмоток статора; Ω_1 - кутова частота напруги статора РС; $U_{1\alpha}$ - напруга статора; $S = \frac{\omega_1 - p_n \omega}{\omega_1}$ -

ковзання РС; ω_1 - кутова частота напруги статора; $S_{e\ddot{o}} = \frac{R_2'}{L_2'' \Omega_1}$ - критичне ковзання РС; L_2'' - пов-

на індуктивність статора; $T_{\ddot{e}e} = \frac{L_2''}{R_2}$ - електромагнітна постійна часу РС; $M_{\text{поч}}$ - електромагнітний

момент РС.

А передатну функцію механічної частини РС записано у вигляді

$$W_M(p) = \frac{\frac{3}{2} p_n^2 \cdot k_1^2 \cdot U_{1\alpha}^2}{J \cdot \Omega_1^2 \cdot R_2' \cdot p}, \quad (5)$$

де J – момент інерції РС.

Також було знайдено передатну функцію первинного вимірювального віброперетворювача, за допомогою яких вимірюються частоти обертання головної та допоміжної РС, яка має вигляд

$$W_A(p) = \frac{\hat{E}_{Ai}}{m} \cdot \frac{1}{p^2 + 2hp + h_k^2}, \quad (6)$$

де $K_{ВП}$ – коефіцієнт віброперетворення; m – маса сенсора; $h = c/2m$ – коефіцієнт демпфірування; $h_{\text{ед}} = \sqrt{k/m}$ – критичне значення коефіцієнту демпфірування.

Для зміни частот обертання асинхронних РС використано передатну функцію ПД-регулятора, яка має вигляд

$$W_e(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} + \frac{T_d p}{1 + T_\phi p}\right), \quad (7)$$

де T_i – постійна часу інтегрування; T_d – постійна часу диференціювання; K_p – пропорційний коефіцієнт; T_ϕ – величина періоду квантування.

Отже, для дослідження параметрів, що суттєво впливають на несинхронність обертання РС була розроблена модель системи автоматичного контролю несинхронності обертання РС на основі виразів (1) – (7).

Отримані результати комп'ютерного моделювання в математичному пакеті MATLAB з розширенням SIMULINK розробленої моделі зображені на рис. 3. Вони свідчать про те, що в розробленій системі відбувається автоматичний контроль несинхронності обертання РС, тобто допоміжна РС₂ постійно підстроюється під головну РС₁. Як видно з рис. 3, б під час відхилення від номінальних значень, в сторону збільшення, несинхронність обертання РС в динамічному режимі збільшується приблизно до 15 об/хв, а по закінченню перехідного процесу до 3 об/хв., що майже в 3 рази більше ніж при автоматичному контролі несинхронності обертання РС на номінальних параметрах (рис. 3, а).

Рис. 3. Процес автоматичного контролю несинхронності обертання РС: а) – при номінальних параметрах РС; б) – при відхиленні електромагнітних та механічних параметрів РС

На основі проведеного моделювання роботи системи автоматичного контролю параметрів РС встановлено такі основні особливості: ІВС дозволяє проводити автоматичний контроль несинхронності обертання РС в широкому діапазоні – від 0 до 4500 об/хв, з достатньо високою точністю; на несинхронність обертання РС значною мірою впливають електромагнітні і механічні (момент опору та момент інерції) параметри РС відхилення яких призводить до зниження якості обробки сировини та зношення механізмів в процесі подальшої експлуатації.

Для підвищення точності синхронізації частот обертання РС було розроблено адаптивну систему автоматичного контролю параметрів РС, в якій на відміну від попередньої запропоновано блок адаптивної синхронізації, до складу якого входить еталонна модель ПД-регулятора, блоки фільтрації нижніх та верхніх частот і регулятор контуру самонастройки, який виконано у вигляді інтегратора з передатним коефіцієнтом k_i . Передатні функції фільтрів нижніх $W_{\text{фнч}}(p)$ та верхніх $W_{\text{фвч}}(p)$ частот мають вигляд

$$W_{\text{фнч}}(p) = \frac{1}{p/(2 \cdot \pi \cdot f) + 1}; \quad W_{\text{фвч}}(p) = \frac{p/(2 \cdot \pi \cdot f_i)}{p/(2 \cdot \pi \cdot f_i) + 1}, \quad (8)$$

де f_b і f_n – максимальна і мінімальна частоти обертання РС.

Результати роботи розробленої в математичному пакеті MATLAB з розширенням SIMULINK адаптивної системи автоматичного контролю представлено характеристиками зміни несинхронності обертання РС на рис. 4.

Як видно з отриманих характеристик (рис. 4), несинхронність обертання РС при використанні адаптивної системи автоматичного контролю значно зменшилась в порівнянні з несинхронністю обертання, що зображена на рис. 3. Після закінчення перехідного процесу несинхронність обертання РС практично прямує до нуля навіть при такому ж як і на рис. 3, б відхиленні електромагнітних та механічних параметрів від допустимих меж (рис. 4, б), а при розгоні РС – несинхрон-

ність обертання зменшилась несуттєво. Проведені дослідження показали, що розроблена адаптивна система дозволяє синхронізувати частоти обертання РС в динамічному режимі з абсолютною похибкою 14 об/хв. Отримані результати (рис. 4) свідчать про те, що несинхронність обертання РС можна адаптувати за 0,3 с.

Рис. 4. Процес автоматичного контролю несинхронності обертання РС з використанням адаптивного алгоритму: а) – при номінальних параметрах РС; б) – при відхиленні електромагнітних та механічних параметрів РС від норм

Отже, проведенні дослідження показали, що використання розробленої адаптивної системи автоматичного контролю параметрів РС дозволяє підвищити точність синхронізації частот обертання РС у 1.5ч2 рази, що наглядно видно із отриманих на рис. 3 та рис. 4 характеристик роботи моделей.

У *третьому розділі* розроблено методи автоматичного контролю електромеханічних та віброметричних параметрів РС, що побудовані на основі функцій чутливостей, струмі статора і логарифмічного декременту затухання ВС.

В результаті проведеного аналізу та моделювання роботи ІВС встановлено, що на несинхронність обертання РС значною мірою впливають механічні параметри, зміна яких в першу чергу відображається на вібрації РС. Поява дефекту в механічній частині характеризується періодичною зміною моменту опору M_0 . Зміна електромагнітного моменту $M(t)$ при відомому моменті опору $M_0(t)$ може бути визначена на основі рівняння руху механічної системи $M(t) = M_0(t) + J d\omega_r(t)/dt$.

Автором розроблено метод функцій чутливості для автоматичного контролю механічних параметрів РС, який відрізняється тим, що він дозволяє контролювати механічні параметри (J та M_0) РС в режимі самогальмування на основі інформації про частоту обертання вала. Рівняння руху РС у режимі самогальмування (електромагнітний момент дорівнює нулю) запишемо у вигляді

$$J d\omega_r(t)/dt = -\omega_r \left\{ \dot{I}_i + (M_{0i} - \dot{I}_i) (\omega_r / \omega_0)^2 \right\}, \quad (9)$$

де ω_r – кутова швидкість обертання ротора; J – момент інерції ротора; M_n – пусковий момент РС; M_{0n} – момент опору при номінальному навантаженні; ω_0 – кутова швидкість при якій починається процес самогальмування.

Для реалізації методу використано функції чутливостей, які мають вигляд

$$\frac{\partial U(t)}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial W} U(t) + \frac{\partial F}{\partial A}, \quad (10)$$

де W – вектор стану параметрів, які контролюються; F – вектор правої частини досліджуваного рівняння; A – вектор зовнішніх дестабілізуючих факторів; U – матриця функцій чутливостей.

Наведемо вихідну математичну модель самогальмування РС у формі $\partial W / \partial t = F(W, A, t)$, а механічні параметри РС запишемо у вигляді вектора $A = (J; M_{0i}; M_n)^T$. Виконавши необхідні математичні перетворення, було знайдено частинні похідні $\partial F / \partial W$ та $\partial F / \partial A$, і підставивши їх у формулу (10) отримаємо аналітичний розв'язок функцій чутливостей при початковій умові $U(t_0) = \omega_0$:

$$u_{11}(t) = \frac{M_n (3\omega_r^2 \omega_0 - \omega_0^3) - 3M_{0i} \omega_r^2 \omega_0 + \omega_r^3 - \omega_r \omega_0^2}{M_n (3\omega_r^2 - \omega_0^2) - 3M_{0i} \omega_r^2} \cdot e^{\left(\frac{(-M_n \omega_0^2 - 3M_{0i} \omega_r^2 + 3M_n \omega_r^2)t}{J\omega_0^2} \right)} - \frac{\omega_r (-\omega_0^2 + \omega_r^2)}{M_n (3\omega_r^2 - \omega_0^2) - 3M_{0i} \omega_r^2}; \quad (11)$$

$$u_{12}(t) = \frac{\omega_r^3}{M_n (3\omega_r^2 - \omega_0^3) - 3M_{0i} \omega_r^2} + \frac{M_n (3\omega_r^2 \omega_0 - \omega_0^3) - 3M_{0i} \omega_r^2 \omega_0 - \omega_r^3}{M_n (3\omega_r^2 - \omega_0^3) - 3M_{0i} \omega_r^2} \cdot e^{\left(\frac{(-M_n \omega_0^2 - 3M_{0i} \omega_r^2 + 3M_n \omega_r^2)t}{J\omega_0^2} \right)}; \quad (12)$$

$$u_{13}(t) = \frac{\omega_r (M_n (\omega_r^2 - \omega_0^2) - M_{0i} \omega_r^2)}{J(M_n (3\omega_r^2 - \omega_0^3) - 3M_{0i} \omega_r^2)} - \frac{[M_n (\omega_r^3 + J\omega_0^3 - 3J\omega_r^2 \omega_0 - \omega_r \omega_0^2) + M_{0i} (3J\omega_r^2 \omega_0 - \omega_r^3)]}{J(M_n (3\omega_r^2 - \omega_0^3) - 3M_{0i} \omega_r^2)} \cdot e^{\left(\frac{(-M_n \omega_0^2 - 3M_{0i} \omega_r^2 + 3M_n \omega_r^2)t}{J\omega_0^2} \right)}. \quad (13)$$

Тоді задача автоматичного контролю моменту опору зведеться до знаходження невідомого вектора A при вимірюванні вектора W

$$W(t) = W^i(t) + u(t)q, \quad (14)$$

де $W^h(t)$ – номінальний рух РС при номінальних значеннях параметрів вектора A^h , який визначається з виразу: $\frac{\partial W^i}{\partial t} = F(W^i, A^i, t)$, при $W^i(t_0) = \omega_0$; $u(t)$ – функції чутливостей координати $W(t)$ до зміни параметрів вектора A ; q – вектор відхилень механічних параметрів при появі дестабілізуючих факторів.

Номінальне значення кутової швидкості є розв'язком рівняння (9) при номінальних значеннях механічних параметрів і визначається як

$$\omega_r^i(t) = \omega_0 \sqrt{M_n \left(M_n - M_{0f} + M_{0f} e^{\left(\frac{2M_f}{J}t\right)} \right)} / \left(M_n - M_{0f} + M_{0f} e^{\left(\frac{2M_f}{J}t\right)} \right). \quad (15)$$

Вектор відхилень механічних параметрів визначається через квадратичний критерій розподілу

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^l \left(\sum_{m=1}^r u_{ij}(t) u_{im}(t) \right) q_j = \sum_{i=1}^s \sum_{m=1}^r (W_i(t) - W_i^i(t)) \cdot u_{im}(t), \quad (16)$$

де l – кількість параметрів вектора A ; $m=1, 2, \dots, l$; s – кількість параметрів, що необхідна для знаходження компонент вектора q .

Розв'язавши систему рівнянь (16) відносно вектора q при відомих номінальних механічних параметрах РС, дійсні значення механічних параметрів знаходяться з виразу: $A = A^h \pm q$.

Таким чином, за допомогою розробленого методу функцій чутливості можна досить швидко оцінити стан механічних параметрів РС, так як під час контролю визначається лише вектор відхилень та величина на яку відхиляються механічні параметри від номінальних значень.

Метод автоматичного контролю за струмом статора відрізняється використанням процедури фільтрації складових струму статора з частотами, що відділяються від основної частоти на якій обертається вал РС.

При появі дефекту або порушенні центрування вала, момент опору, який діє на вал РС, періодично змінюється з частотою, що пропорційна частоті обертання вала. Періодична зміна моменту опору викликає появу в струмі статора РС складових з частотою, які також пропорційні частоті обертання вала. Відділення цих складових від складових струму основної частоти дозволяє виявити дефекти в механічній частині. Зв'язок складових струму статора із характером дії на ротор при появі дефектів і синусоїдальній напрузі живлення можна задати виразом

$$i_1 = I_{0m} \sin(\omega_1 t - \psi) + \frac{U_{1m} s_0}{R_2} \sin(\omega_1 t) + \frac{U_{1m} s_0}{2R_2} [\cos(\beta \cdot t) - \cos(\gamma \cdot t)], \quad (17)$$

де I_{0m} і ψ – амплітуда і фаза струму намагнічування; ω_1 – основна частота обертання вала; U_{1m} – амплітуда напруги живлення; s_0 – ковзання; R_2' – опір обмоток статора; $\beta = \omega_1 - \alpha$; $\gamma = \omega_1 + \alpha$ – складові частоти струму статора; α – частота періодичної складової моменту опору.

Оцінити діапазон зміни складових струму статора при появі дефекту можна обмежившись зміною ковзання від 0,001 до 0,1 за формулою

$$\beta = \omega_1 / 2\pi (1 + (s_0 - 1) / p_n); \quad \gamma = \omega_1 / 2\pi (1 + (1 - s_0) / p_n). \quad (18)$$

Для РС 4А46 із синхронною швидкістю 3000 об/хв можливі наступні діапазони зміни складових частоти: $\beta = 0,545$ Гц, $\gamma = 99,5495$ Гц. Відхилення від цих значень частот від можливих діапазонів їх зміни характеризує появу дефекту в механічній частині. При нормальних експлуатаційних режимах момент опору не залежить від кута повороту вала і не містить змінної складової моменту. Тому ковзання періодично не змінюється і в струмі статора відсутні складові з частотами, що відрізняються від частоти обертання вала ω_1 . При появі дефекту момент опору стає залежним від кута повороту вала. Відповідно, ковзання пов'язане з обертовим моментом залежністю $s_a / s_0 = M_a / M_0 \sqrt{1 + (\alpha T_n)^2}$ періодично змінюється з частотою, що пропорційна частоті обертання вала. Періодична зміна ковзання викликає періодичну зміну еквівалентного вхідного електричного опору статора. Зміна цього опору, в свою чергу, викликає зміну струму статора і якщо рівень сигналу перевищує заданий поріг спрацювання (18), то формується сигнал за яким система автоматичного контролю перенастроює струм статора іншої РС на величину відхилення.

Результати досліджень показали, що запропонований метод дозволяє виявити дефекти в механічній частині РС шляхом частотної фільтрації окремих складових струму статора за яким здійснювати перенастройку системи чи зупинити її у разі значного відхилення від меж допуску.

Метод автоматичного контролю вібраційних параметрів РС за ЛДЗ вібросигналу відрізняється тим, що інформативними ознаками є не енергетичні характеристики ВС, а авто-кореляційна функція (АКФ) вібраційного процесу, яка більш наочно відображає зміну технічного стану РС при явищах зносу, в результаті чого зростає роль шумової компоненти, що відображається на вигляді АКФ (зменшується період затухаючих коливань). Оскільки саме знос є первинною причиною дефектів, то використання АКФ дозволяє адекватно оцінити стан РС. За інформативний параметр було прийнято ЛДЗ АКФ ВС, який описується рівнянням

$$\alpha = \ln[R(t)/R(t + T)] = \beta \cdot T, \quad (19)$$

де $R(t) = R(0)e^{-bt}$ – амплітуда затухаючих коливань; T – період затухаючих коливань; b – коефіцієнт затухання.

АКФ вібрації РС, що експлуатувались 1 і 8 місяців зображені на рис. 5. Як видно із отриманих характеристик, АКФ має вигляд затухаючих модульованих коливань, причому характер модуляції та ступінь затухання змінюються з напрацюванням РС. Для АКФ (рис. 5, б) затухання є помітно більшими (АКФ різко спадає до 0.2 – 0.3 від початкового значення), що свідчить про значний знос РС.

Рис. 5. АКФ вібраційного процесу РС, що експлуатувалась на протязі: одного місяця - а) та восьми місяців – б)

Оскільки для сигналу такої форми досить складно визначити період затухаючих коливань, то при розробці програмного забезпечення було використано алгоритм визначення ЛДЗ, що передбачає знаходження спадаючої послідовності максимумів АКФ з наступною апроксимацією цієї послідовності показниковою функцією: $ae^{(-bt)} + c$. Значення ЛДЗ приймається рівним коефіцієнту b , що відповідає коефіцієнту затухання в у формулі (19), і знаходиться шляхом оцінки параметрів відповідної лінійної регресії за методом найменших квадратів.

У зв'язку із нестационарністю ВС як значення, так і ступінь інформативності ЛДЗ змінюються на протязі періоду роботи РС. Тому доцільно обчислювати АКФ і ЛДЗ не для всієї реалізації, а для окремих інтервалів (розгону та гальмування). Розраховані значення ЛДЗ зношеної РС, яка працювала 8 місяців при пуску склало $\alpha_p = 1.652$, а при гальмуванні – $\alpha_a = 2.149$. Для отримання єдиного інформативного параметру И, який враховує показники ЛДЗ при розгоні і гальмуванні, прийнято таке відношення $\Theta = \alpha_p \cdot 100\% / \alpha_a = 1.652 \cdot 100\% / 2.149 \approx 77\%$.

Таким чином, автоматичний контроль вібраційних параметрів РС за ЛДЗ можна проводити за параметром И, який є відношенням ЛДЗ АКФ на інтервалах розгону та зупинки РС. Дана ознака адекватно відображає вібраційний стан РС і дозволяє оцінити ступінь зносу підшипникових вузлів. Запропонована оцінка ступіні зносу підтверджена експериментальними дослідженнями, які наведені на рис. 6.

Рис. 6. Зміна технічного стану РС з часом їх напрацювання

Як видно із рис. 6, із збільшенням часу напрацювання РС значення ступіні зносу зростає незалежно від різновидності значень ЛДЗ при розгоні та гальмуванні. Причому, допоміжна РС зношується швидше ніж головна – це пояснюється тим, що вона постійно підстроюється під головну, і є доказом працездатності адаптивного алгоритму автоматичного контролю.

Четвертий розділ присвячено розробці структурної і алгоритмічної організації ВК системи автоматичного контролю параметрів РС, що побудовані на основі розроблених моделей та методів, і дослідженню метрологічних характеристик ВК ІВС та оцінюванню вірогідність прийняття вірного рішення.

За базову обрана структура ІВС, що містить чотири ВК для здійснення вимірювань механічних коливань (рис. 7). Вона реалізована на сучасній елементній базі і складається із акселеромет-

рів, підсилювачів заряду, смугових фільтрів, масштабних перетворювачів (МП), сигнального процесора ADSP21990, послідовного інтерфейсу RS-232 та частотних регуляторів (ЧР).

Рис. 7. Структурна схема ІВС для автоматичного контролю параметрів РС

Здійснено аналіз похибок вимірювання механічних коливань, що вносяться структурними ланками ВК, а саме: похибка п'єзоелектричного акселерометра; похибка підсилювача заряду; похибка обумовлена нелінійністю смугового фільтра; похибка квантування АЦП.

Оцінено динамічні метрологічні характеристики п'єзоелектричного акселерометра, який описано диференціальним рівнянням другого порядку. Визначено тривалість перехідних процесів акселерометра, побудовано перехідну та імпульсну характеристики. Знайдено вирази для амплітудно- і фазочастотних характеристик акселерометра, які мають вигляд

$$A(\omega) = \frac{K_{AI}}{m\sqrt{\omega^4 + 4h^2\omega^2 - 2h_k^2\omega^2 + h_k^4}}; \Phi(\omega) = \arctg\left(\frac{h\omega}{\omega^2 - h_k^2}\right), \quad (20)$$

а також показано характер зміни амплітудно- і фазочастотних характеристик, з яких встановлено, що резонанс і зміна фази відбуваються на частоті рівній 1 кГц.

Знайдено вирази для абсолютної і відносної динамічних похибок

$$\Delta_{\ddot{a}}(t) = L^{-1}[\delta_{\ddot{a}}(s) \cdot X_s(s)], \quad \delta_{\ddot{a}}(t) = \frac{h_k^2 \left(e^{[-h+\sqrt{h^2-h_k^2}]t} - e^{[-h-\sqrt{h^2-h_k^2}]t} \right)}{2\sqrt{h^2-h_k^2}} - \text{Dirac}(t). \quad (21)$$

Встановлено, що відносна динамічна похибка не перевищує 0,55 %.

Проаналізовано статичні метрологічні характеристики ВК, знайдено вирази для адитивної і мультиплікативної складових похибок, номінальної функції перетворення та похибок нелінійності, виведено рівняння перетворення розробленого ВК вібрації, який описано формулою

$$N_x = \frac{k_n^3 \cdot K_{10} \cdot I_0 \cdot K_n \cdot B^{m-1} \cdot X_s^3 \cdot k^3}{6 \cdot (1 + K_{33} \cdot K_{10} \cdot k_n \cdot I_0)^4 \cdot m_s^3 \cdot [(1 + 1/K \cdot (1 + C_t/C_f)) \cdot C_f]^3}, \quad (22)$$

де K_{33} – коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку ПФ; K_{10} – коефіцієнт передачі кола каскадів підсилювача, які слідує за його диференційним каскадом; I_0 – струм спокою диференційного каскаду; k_n – параметр нелінійності, який визначається властивостями вольт-амперних характеристик транзисторів; K_n – коефіцієнт підсилення МП; C_f – ємність кола зворотного зв'язку підсилювача заряду із коефіцієнтом підсилення K ; $C_t = C_a + C_c + C_p$ – загальна вхідна ємність підсилювача заряду; m_s – маса акселерометра; B – основа системи числення; m – розрядність АЦП; k – коефіцієнт жорсткості; X_s – механічні коливання РС.

Знайдено помилки першого і другого роду, за якими визначено ймовірності прийняття помилкового рішення при автоматичному контролі несинхронності обертання, моменту опору та вібраційних параметрів РС, експериментальні значення яких представлені на рис. 8. Здійснено оцінювання загальної вірогідності прийняття вірного рішення спроектованої ІВС, числове значення якої склало 0.98.

Рис. 8. Ймовірності прийняття помилкового рішення при автоматичному контролі: а) – несинхронності обертання РС та б) – вібраційних параметрів РС

У н'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень роботи розробленої ІВС для автоматичного контролю параметрів РС та розраховано похибки вимірювань.

На основі розробленої апаратно-програмної реалізації було проведено експериментальні дослідження перетворення віброметричних параметрів у частоту обертання вала. Отримані за виміряними ВС ВКФ на максимальних частотах обертання РС представлені на рис. 9. Як видно із експериментальних характеристик інтервали досягнення максимуму ВКФ складають $T_r=3,49$ мс (рис. 9, а) і $T_d=3,47$ мс (рис. 9, б), а розраховані частоти обертання РС відповідно дорівнюють $N_r=4298$ об/хв і $N_d=4322$ об/хв.

Рис. 9. Експериментальні характеристики ВКФ: а) – головної РС, б) – допоміжної РС на максимальних частотах обертання

Таким чином, максимальна експериментальна зведена похибка вимірювання частоти обертання вала склала $\gamma_{\text{адн}} \approx 0.55\%$. Також встановлено, що похибка, яка характеризує розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень знаходиться в межах 0,5...4%. Це дає можливість зробити висновок про високу збіжність проведених результатів досліджень.

Експериментальні дослідження несинхронності обертання РС в робочому діапазоні частот від 0 до 4300 об/хв представлено на рис. 10.

Рис. 10. Експериментальні дослідження несинхронності обертання РС

В ході експериментів було досліджено похибки ВК вібрації, і встановлено, що сумарна відносна похибка вимірювань складає $\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{\lambda_{0i}}^2 + \delta_{i_{II}}^2 + \delta_{i_{IO}}^2 + \gamma_{Q_{ca}}^2 + \delta_{II}^2} \approx 0,6\%$.

Проведені багаторазові спостереження несинхронності обертання РС показали, що абсолютна похибка не перевищує 20 об/хв, тому можна вважати, що експериментальна зведена похибка несинхронності обертання РС в робочому діапазоні частот не перевищує $\gamma_{ca} = 0,5\%$.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена наукова проблема, яка полягає у обґрунтуванні і розробці методу вимірювання частот обертання РС та методів автоматичного контролю електромеханічних і віброметричних параметрів РС, які здатні забезпечити підвищений рівень вірогідності. Зокрема, отримано такі результати:

1. Обґрунтовано вибір і досліджено роботу математичної моделі методу перетворення віброметричних параметрів у частоту обертання вала та ІВС для автоматичного контролю параметрів РС на основі яких встановлено параметри, що суттєво впливають на несинхронність обертання РС.

2. Вперше розроблено модель системи автоматичного контролю параметрів РС, яка відрізняється тим, що в ній запропоновано адаптивний алгоритм синхронізації частот обертання РС, який дозволяє підвищити точність синхронізації в 1.5 - 2 рази.

3. Розроблено нові методи одночасного автоматичного контролю параметрів РС за струмом статора, за функціями чутливості та за логарифмічним декрементом затухання АКФ ВС, які на відміну від існуючих дозволяють проводити комплексний контроль електромеханічних і віброметричних параметрів, що сприяє підвищенню вірогідності автоматичного контролю. На основі розроблених методів побудовано структурну схему ІВС із покращеними метрологічними характеристиками.

4. Розроблено метрологічні математичні моделі для оцінювання динамічних метрологічних характеристик ВП вібрації та статичних метрологічних характеристик ВК вібрації. Це дозволяє розробляти ВК вібрації з наперед заданими нормованими метрологічними характеристиками.

5. Знайдено помилки першого і другого роду кожного із параметрів, що контролюються, а також розраховано загальну вірогідність автоматичного контролю ІВС, яка склала 0,98. В ході експериментів було досліджено сумарну відносну похибку вимірювань, яка не перевищує 0,6 %.

6. Проведено багаторазові вимірювання несинхронності обертання РС на різних частотах обертання, які показали, що максимальна абсолютна похибка складає 20 об/хв, а зведена похибка несинхронності обертання РС в робочому діапазоні частот не перевищує 0,5 %.

7. Розроблені експериментальні зразки ІВС для автоматичного контролю параметрів РС впроваджені на Вінницькому заводі „Кристал” та на Ямпільському приладобудівному заводі, використання яких підтвердило ефективність запропонованих методів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Поджаренко В., Васілевський О., Кучерук В., Ігнатенко О. Визначення частоти обертання електромеханічних систем за допомогою вібраційних сигналів // Вимірювальна техніка та метрологія (Державний університет „Львівська політехніка”). – Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2003. – № 63. – С. 161 – 166.

2. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Васілевський О.М., Марущак В.Ю. Математичне моделювання системи адаптивного керування з синхронізацією частот обертання асинхронних двигунів // Вісник Державного університету „Львівська політехніка”. Серія: Автоматика, вимірювання та керування. – Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2003. – № 475. – С. 77 – 82.

3. Васілевський О.М., Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю. Метод функцій чутливості для формування діагностичних ознак технічного стану електромеханічних систем // Відбір і обробка інформації (Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України). – Львів: ТЗОВ „Простір М”, 2004. – № 21(97). – С. 33 - 39.

4. Поджаренко В.О., Васілевський О.М. Діагностика технічного стану електромеханічних систем за логарифмічним декрементом затухання // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – № 88. – С. 138 – 144.

5. Поджаренко В.О., Васілевський О.М., Кучерук В.Ю. Оброблення вібросигналів в цифрових вимірювальних пристроях для визначення частоти обертання електромеханічних систем // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. - № 5. – С. 5-9.

6. Васілевський О.М. Діагностика технічного стану електромеханічних систем за струмом статора // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2004. – № 2 (9). – С. 33 – 36.

7. Поджаренко В.О., Васілевський О.М., Севастьянов В.М. Оцінка статичних метрологічних характеристик вимірювальних каналів вібрації // Український метрологічний журнал. – 2005. – № 2. – С. 60 – 65.

8. Поджаренко В.О., Васілевський О.М., Івахова Л.І. Аналіз похибок вимірювального каналу вібрації // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4. – Ч. 1., Т. 1. (68). – С. 118 - 122.

9. Патент 67650А UA, МКІ 7 G01P 3/04. Пристрій контролю несинхронності обертання електромеханічних систем / В.О. Поджаренко; О.М. Васілевський; В.Ю. Кучерук; О.В. Кабанова. – № 2003119837; заявл. 03.11.2003; опубл. 15.06.2004, Бюл. № 6. – 3 с.

10. Васілевський О.М. Інформаційно-вимірювальна система для автоматичного контролю несинхронності обертання та вібродіагностики електромеханічних систем // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – Донецьк: Норд Комп'ютер, 2005. – № 1. – С. 29 – 32.

11. Патент 9733 UA, МКІ 7 G01P 3/04. Пристрій для вимірювання частоти обертання вала і діагностування електромеханічних систем / О.М. Васілевський; В.О. Поджаренко. – № u 2005 02685; заявл. 24.03.2005; опубл. 17.10.2005. Бюл. № 10. – 1 с.

АНОТАЦІЯ

Васілевський О.М. Інформаційно-вимірювальна система для автоматичного контролю параметрів роторних систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.16 – інформаційно-вимірювальні системи. – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, 2005.

Дисертація присвячена розробці та дослідженню ІВС для автоматичного контролю параметрів РС, яка здатна забезпечити підвищений рівень вірогідності прийняття вірного рішення. Розроблено метод вимірювання частоти обертання вала за допомогою віброметричних параметрів та створено модель системи автоматичного контролю несинхронності обертання РС на основі якої

розроблено адаптивний алгоритм автоматичного контролю параметрів РС, який дозволяє підвищити точність синхронізації частот обертання у 1,5 – 2 рази.

Розроблено методи автоматичного контролю механічних та вібраційних параметрів, комплексне використання яких сприяє зниженню ймовірності прийняття помилкового рішення. На основі розроблених методів побудовано апаратно-програмну реалізацію ІВС для автоматичного контролю параметрів РС.

Проведено оцінювання динамічних метрологічних характеристик акселерометра та статичних метрологічних характеристик ВК. Знайдено помилки автоматичного контролю параметрів першого та другого роду і вірогідності прийняття вірного рішення, на основі яких оцінено загальну вірогідність автоматичного контролю, яка складає 0,98.

Проведено експериментальні дослідження, які підтверджують адекватність розробленої теорії і ефективність запропонованих методів.

Ключові слова: система автоматичного контролю, вібраційний сигнал, взаємореляційна функція, несинхронність обертання, момент опору, акселерометр, вимірювальний канал вібрації, роторна система, метрологічні характеристики, похибки вимірювань.

АННОТАЦІЯ

Василевский А.Н. Информационно-измерительная система для автоматического контроля параметров роторных систем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 – информационно-измерительные системы. – Винницкий национальный технический университет, г. Винница, 2005.

Диссертация посвящена разработке и исследованию информационно-измерительной системе для автоматического контроля параметров роторных систем, которая позволяет обеспечить повышенный уровень вероятности принятия правильного решения, за счет комплексного использования информации об электромеханических и виброметрических параметрах. Разработан метод измерения частоты вращения вала с использованием вибрационных параметров, которые получают при помощи закрепленных на основании РС акселерометров. Они измеряют вибрацию по двум осям, в результате чего создается ВКФ, максимум которой соответствует времени задержки между измеряемыми ВС. Зная угол расположения осей, по которым измеряются механические колебания и время задержки, круговая частота определяется отношением угла к времени задержки. Создано модель системы автоматического контроля асинхронности вращения РС на основании которой предложен адаптивный алгоритм автоматического контроля параметров РС, который позволяет подстраивать систему при отклонении механических параметров от номинальных значений. Проведенные исследования показали, что разработанная система позволяет не только адаптировать отклонения механических параметров, но повысить точность синхронизации частот вращения в 1,5 – 2 раза. Также установлено, что на асинхронность вращения РС в значительной мере влияют механические параметры, изменения которых сразу же отображаются на вибрации РС. Контроль механических и виброметрических параметров позволит определить возникающие дефекты на ранней стадии, что дает возможность проводить ремонты по фактической потребности.

Разработан метод автоматического контроля механических параметров за функциями чувствительности, который позволяет проводить автоматический контроль момента сопротивления при торможении РС. Метод автоматического контроля момента сопротивления за током статора РС, который отличается использованием процедуры фильтрации составляющих частот тока статора, что возникают при изменении момента сопротивления. А так же разработан метод автоматического контроля вибрационных параметров РС с помощью логарифмического декремента затухания, который отличается тем, что информационными сигналами есть не энергетические характеристики вибросигнала, а автокорреляционная функция, которая более наочно отображает изменение технического состояния РС. Показано, что комплексное использование разработанных методов позволяет снизить вероятности принятия ошибочного решения. На основе разработанных методов

построена аппаратно-программная реализация ИИС для автоматического контроля параметров РС. Проанализированы погрешности измерений, которые вносятся структурными ланками ИК и установлено, что суммарная относительная погрешность измерений не превышает 0,6%.

Осуществлено оценивание динамических метрологических характеристик акселерометра и статических метрологических характеристик ИК на основании, которого установлено, что относительная динамическая погрешность не превышает 0,55%, а АЧХ и ФЧХ есть линейными в промежуток до 1 кГц. Погрешность нелинейности приблизительно равна 1 %.

На основании разработанной системы автоматического контроля параметров РС исследовано ошибки первого и второго рода та вероятность принятия верного решения по каждому из разработанных методов, на основании которых оцененно общую вероятность автоматического контроля, которая равна 0,98.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность разработанной теории и эффективность предложенных методов, которые внедрены в производство на Винницком заводе “Кристалл” и ОАО “Ямпольский приборостроительный завод”.

Ключевые слова: система автоматического контроля, вибрационный сигнал, взаимно-корреляционная функция, асинхронность вращения, момент сопротивления, акселерометр, измерительный канал вибрации, роторная система, метрологические характеристики, погрешности измерений.

ABSTRACT

Vasilevskiy O.M. Informational-Measuring System for the Automatic Control of Parameters Rotor Systems.– Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by specialty 05.11.16 - Informational-Measuring Systems. – Vinnitsa National Technical University, Vinnytsia, 2005.

The dissertation is devoted to development and research of information-measuring system for the automatic control of parameters rotor systems, which capable to provide the raised level of reliability of acceptance of the true decision. The method of measurement of frequency of rotation of a shaft by means of vibrating parameters is developed and the model of system of the automatic control difference rotations rotor systems on the basis of which is created is developed adaptive algorithm of the automatic control of parameters rotor systems which allows to raise accuracy of synchronization of frequencies rotation in 1,5-2 times.

Methods of the automatic control of mechanical and vibrating parameters which complex use allows to lower probabilities of acceptance of the erroneous decision are developed. On the basis of the developed methods hardware-software realization of information-measuring system for the automatic control of parameters rotor systems is constructed.

It is analysed dynamic metrological characteristics akselerometr and static metrological characteristics of measuring channels. Mistakes of the first both second sort and reliability acceptance of the true decision on the basis of which the general reliability of the automatic control which makes 0,98 is estimated are found.

Experimental researches which confirm adequacy of the developed theory and efficiency of the offered methods are lead.

Key words: System of the automatic control, vibrating signal, cross-correlation function, difference of rotation, moment of resistance, accelerometer, measuring channel of vibration, rotor systems, metrological characteristics, measuring error.

Підписано до друку 30.11.2005 р. Формат 29.7×42 j
Наклад 100 прим. Зам. № 2005-193
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 58-01-59