

ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КУЛАКОВ ПАВЛО ІГОРОВИЧ

УДК 621.3:658.562

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ
ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОЇ СИСТЕМИ З
ГАЗОМАГНІТНИМ ПІДВІСОМ**

Спеціальність 05.11.13 - прилади і методи контролю

**Автореферат дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук**

Вінниця - 1999

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому державному технічному університеті Міністерства освіти України

Науковий керівник
фесор

доктор технічних наук, про-

фесор
Поджаренко Володимир Олександрович,
Вінницький державний технічний університет,
завідувач кафедри «Метрологія та
промислова автоматика»

Офіційні опоненти :

доктор технічних наук, професор,
Скрипник Юрій Олексійович, Держа-
вна академія легкої промисловості України,
завідувач кафедри «Автомати-
зації та
комп'ютерних систем»

кандидат технічних наук, старший науко-
вий
співробітник Тимошенко Едуард Валенти-
нович,
науково-виробнича корпорація «Київсь-
кий

інститут автоматика» Міністерства промислової
політики України, провідний науковий співробітник

Провідна установа : Державний університет «Львівська політехніка», кафедра
«Інформаційно-вимірювальної техніки», Міністерства освіти України, м. Львів

Захист відбудеться «___» _____ 1999 р. о _____ годині на засідан-
ні спеціалізованої вченої ради Д05.052.02 у Вінницькому державному технічно-
му університеті за адресою 286021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького державного техні-
чного університету.

Автореферат розісланий «___» _____ 1999 р.

Вчений секретар

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Актуальність теми. Проведення випробувань електричних машин (ЕМ) необхідно на усіх етапах їх виготовлення та використання. В теперішній час, завдяки досягненням мікропроцесорної та вимірювальної техніки, стало можливим використовувати автоматичні пристрої та системи різного рівня інтелекту для контролю різноманітних характеристик ЕМ як в процесі їх виготовлення, так і під час експлуатації. Підвищення продуктивності праці шляхом вдосконалення пристроїв контролю та нових ефективних методів контролю є важливим та актуальним завданням. В останній час все більшого розповсюдження набувають ЕМ з безконтактним підвісом ротору, а особливо з газоманітним підвісом. Такі двигуни використовуються в текстильній промисловості (прядильні, крутильні механізми, веретена), хімічній промисловості (розпилювачі), медицині (апарати для створення штучної атмосфери соляних печер) та інш. Для контролю їх характеристик застосовуються традиційні пристрої, що не завжди забезпечують максимальну ефективність, швидкодію, достовірність контролю.

Важливими характеристиками роторної системи ЕМ, контроль яких входить до більшості програм їх випробувань, є кутова швидкість та момент інерції. Вимірювальний контроль кутової швидкості в динамічному режимі високо оборотних ЕМ, до яких відносяться ЕМ з газоманітним підвісом, за допомогою традиційних частотних тахометричних перетворювачів (ТП) ускладнено необхідністю вимірювання малих часових інтервалів, низькою точністю вимірювання малих відхилень кутової швидкості, складністю оптимізації параметрів ТП для мінімізації похибки її вимірювання.

Вимірювальний контроль моменту інерції при використанні традиційних методів є трудомістким процесом, який в багатьох випадках потребує розбирання ЕМ. Окрім того традиційні методи не дозволяють контролювати приведений момент інерції, який відрізняється від головного внаслідок наявності радіального зміщення ротору під час обертання. Останнє є особливо актуальним для безконтактних ЕМ. Тому автоматизація та зменшення трудомісткості контролю моменту інерції роторної системи та створення пристроїв його контролю з покращеними метрологічними характеристиками є важливим та актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з тематичним планом виконання НДДКР у Вінницькому державному технічному університеті, зокрема з держбюджетною роботою № 42-Д-173, номер держреєстрації 0197U012881.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка пристрою контролю характеристик роторної системи з газоманітним підвісом на основі ТП «кут повороту - напруга» з покращеними метрологічними характеристиками. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Встановити зв'язок амплітуди крутильних коливань ротора з його приведеним моментом інерції, розробити спосіб контролю моменту інерції заснований на визначенні амплітуди крутильних коливань ротора.

2. Розробити первинні ТП «кут повороту-напруга», алгоритми обробки їх вихідних сигналів для контролю кутової швидкості та моменту інерції.

3. Знайти закони розподілу похибок вимірювання кутової швидкості та моменту інерції за допомогою розроблених ТП, розрахувати достовірність контролю цих характеристик.

4. Визначити умови оптимальної розрізнявальної здатності ТП за кутом повороту та оптимального часу аналого-цифрового перетворення вихідних сигналів ТП з метою підвищення достовірності контролю кутової швидкості.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі отримані наступні наукові результати :

1. Досліджено математичну модель об'єкту контролю та отримано аналітичну залежність, що зв'язує момент інерції з значенням амплітуди крутильних коливань ротора, що дало змогу реалізувати спосіб контролю моменту інерції більш високої швидкодії у порівнянні з відомими;

2. Теоретично обґрунтована форма прорізи модулятора, використання якої в ТП «кут повороту - напруга» дозволяє розширити діапазон вимірювального контролю кутової швидкості;

3. Розроблено математичні моделі тахометричних перетворювачів «кут повороту - напруга», алгоритми обробки їх вихідних сигналів для визначення амплітуди крутильних коливань, кутової швидкості, моменту інерції;

4. Вперше визначено умови оптимальної розрізнявальної здатності за кутом повороту та оптимального часу аналого-цифрового перетворення вихідного сигналу запропонованих ТП з метою підвищення достовірності контролю кутової швидкості;

5. Вперше знайдено закони розподілу похибок вимірювання кутової швидкості та моменту інерції для розроблених ТП, розраховано показники достовірності контролю.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення роботи полягає у розробці та впровадженні пристрою контролю та вимірювання кутової швидкості та моменту інерції розглянутого об'єкту, його практичній реалізації. Розроблені в дисертації апаратні та програмні засоби та методики можуть бути застосовані і при контролі характеристик інших типів ЕМ, що значно розширює можливості практичного застосування роботи. Отримані наукові результати впроваджені на підприємстві «Паллар» (м. Вінниця), що підтверджується відповідними актами.

Апробація результатів. Основні положення та результати виконаних в дисертації досліджень доповідалися та обговорювалися на міжнародних та регіональних конференціях:

1. Інтелектуалізований сенсор кутової швидкості - на міжнародному симпозіумі “Наука и предпринимательство” (Вінниця-Львів, 1996 р.).

2. Новый датчик угловой скорости для динамических измерений - на 3-тій українській конференції з автоматичного керування “Автоматика - 96” (Севастополь, 1996 р.).
3. Устройство для динамических измерений угловой скорости - на науково-технічній конференції з міжнародною участю “Приладобудування - 96” (Судак, 1996 р.).
4. Информационно-измерительная система параметров электромеханических преобразователей энергии - на 1-му Міжнародному молодіжному форумі “Електроніка и молодежь в XXI веке” (Харків, 1997 р.).
5. Информационно-измерительная система параметров электродвигателей - на міжнародному симпозиумі “Наука и предпринимательство” (Вінниця-Львів, 1997 р.).
6. До питання вимірювання кутової швидкості у перехідних режимах електродвигунів малої потужності - на 1-ій науково-практичній конференції “Современная контрольно-испытательная техника промышленных изделий и их сертификация” (Мукачево, 1997 р.).
7. Датчик угловой скорости и углового ускорения - на другій міжнародній науково-технічній конференції “Unconventional electromechanical and electrotechnical systems”, Schecin, Poland, 1996
8. Сучасний стан та перспективи розвитку цифрових тахометрів - на четвертій міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління в технічних системах» (Вінниця), 1997 р.).
9. К вопросу измерения угловой скорости в динамическом режиме - на II Молодіжному форумі “Електроніка и молодежь в XXI веке”, (Харьков, 1998 р.).

Результати роботи доповідались на семінарах кафедри «Метрології та промислової автоматики» Вінницького державного технічного університету та науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області.

Публікації. Основний зміст роботи опублікований у 14 друкованих працях, в тому числі 3 статтях у наукових журналах, 4 статтях у збірках праць науково-технічних конференцій різного рівню, 2 патентах України на винахід, 5 тезах доповідей на науково-технічних конференціях різного рівню.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, основних висновків по роботі, списку літературних джерел (133 бібліографічних посилання), 14 додатків. Загальний обсяг роботи складає 182 сторінки, з яких основний зміст викладений на 127 сторінках друкованого тексту, 10 таблиць, 53 рисунки.

Автор вважає своїм приємним обов'язком виразити подяку науковому керівнику, доктору технічних наук, професору Поджаренко В.О., та доктору технічних наук, доценту Михалевичу В.М., за допомогу у виконанні досліджень, обговоренні та оформленні результатів дисертаційної роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика дисертації, обґрунтована актуальність теми, сформульована мета роботи, дана характеристика наукової новизни роботи та її практичного значення.

У першому розділі наводиться аналіз особливостей ЕМ з безконтактним підвісом ротору, обирається об'єкт контролю. Аналізується сучасний стан засобів контролю параметрів ЕМ, наводиться їх класифікація, за допомогою якісного критерію визначається напрямок розробки засобів контролю кутової швидкості та моменту інерції обраного об'єкту. Сформульовані мета та задачі досліджень.

У другому розділі досліджено систему рівнянь (1), що описує умови усталеного зазору при обертанні конічного ротору синхронної гістерезисної ЕМ з газоманітним підвісом.

$$\left. \begin{aligned} N_{\xi} - (F_{\xi} + G) &= 0 \\ N_{\eta} - F_{\eta} &= 0 \\ N_{\zeta} - F_{\zeta} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

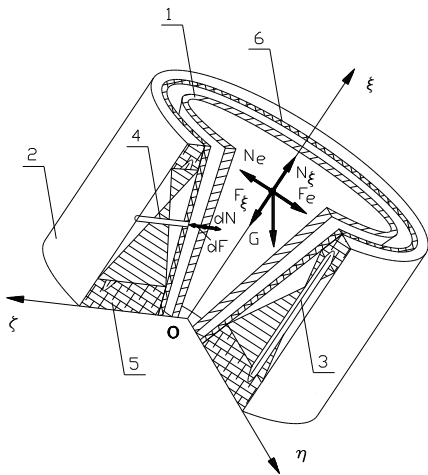


Рис. 1. Конічна роторна система з газоманітним підвісом. 1 - конічний ротор; 2 - статор; 3 - обмотка статора; 4 - живильники-дроселі подачі газу; 5 - наповнювач з немагнітного матеріалу; 6 - шар з немагнітного матеріалу.

де N_{ξ} , N_{η} , N_{ζ} - проекції підйомної газової сили на вісі ξ , η , ζ нерухокої декартової системи координат, вісь ξ якої співпадає з віссю симетрії ротора (рис. 1); F_{ξ} , F_{η} , F_{ζ} - проекції сили електромагнітного тяжіння ротора до статора; G - сила ваги ротора.

В результаті дослідження встановлено, що при наявності на статорі шару немагнітного матеріалу, зазор між статором та ротором має одне стійке положення.

Здійснено розв'язок відомої системи диференціальних рівнянь, що описують рух конічного ротора у газоманітному підвісі. На основі результатів розв'язку досліджено процес виникнення крутильних коливань ротору та отримано аналітичний вираз, що зв'язує його момент інерції з амплітудою крутильних коливань.

$$J_{Gz} = \frac{me^2}{4A_{\phi}}, \quad (2)$$

де J_{Gz} - момент інерції конічного ротора відносно осі обертання; m - маса ротора; e - радіальне зміщення ротора; A_{ϕ} - амплітуда крутильних коливань ротора.

Радіальне зміщення ротора відбувається за рахунок наявності ексцентриситету мас, та визначається виразом

$$e = \varepsilon \left(1 + \frac{\omega^2}{\sqrt{(\Omega_p^2 - \omega^2)^2 + 4\delta_e^2 \omega^2}} \right) \text{sign}(\Omega_p^2 - \omega^2), \quad (3)$$

де ε - ексцентриситет маси ротора, що визначається у процесі його балансування; ω - кутова швидкість; δ_e - коефіцієнт демпфування; Ω_p - резонансна частота роторної системи.

В усталеному режимі роботи об'єкту контролю радіальне зміщення приблизно дорівнює ексцентриситету мас, який є його паспортними даними.

Згідно з теоремою Гюйгенса-Штейнера, приведений момент інерції ротора відносно осі симетрії

$$J = me^2 \left(1 + \frac{1}{4A_\phi} \right). \quad (4)$$

Вираз (4) дає змогу реалізувати спосіб вимірювального контролю моменту інерції ротора, заснований на вимірюванні амплітуди крутильних коливань, який має більш високу швидкодію у порівнянні з відомими.

У третьому розділі розроблено три ТП «кут повороту-напруга» та їх математичні моделі. Принцип дії розроблених ТП заснований на модуляції світлового потоку змінною площиною, яка утворюється при перекритті прозорих елементів модулятора та діафрагми. Якщо знехтувати частотними та шумовими властивостями елементної бази фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач, його вихідна напруга в залежності від площі фоточутливого шару фотодіоду, що опромінюється, визначається виразом

$$U_\phi = \frac{IS_{10}R_{33}}{r^2} S, \quad (5)$$

де S_{10} - інтегральна струмова чутливість фотодіоду при немодульованому опроміненні; I - сила світла; r - відстань від джерела світла до поверхні, що освітлюється; R_{33} - опір в колі зворотного зв'язку; S - площа фоточутливого шару фотодіоду, що опромінюється. При забезпеченні лінійної залежності площі фоточутливого шару фотодіоду, що опромінюється, від кута повороту, вихідна напруга фотоприймача також лінійно залежить від нього.

Перший розроблений ТП - ТП з зменшенням похибки, що зумовлена частотними властивостями фотоприймачів, має у своєму складі модулятор, який має прорізи у вигляді кутових секторів однакового розміру, причому кут між секторами дорівнює куту секторів. Прорізи діафрагми, яка розташована попереду двох фотоприймачів, що входять до складу ТП і рознесені між собою відносно центру модулятора на кут в півтора рази більший кута секторів, мають таку ж форму, як і прорізи модулятора. При обертанні модулятора, площа фоточутливого шару одного з фотоприймачів, що опромінюється, змінюється за трикутним законом, який описується виразом

$$S_1(\varphi) = \begin{cases} (\varphi - n\alpha) \frac{R_1^2 - R_2^2}{2}, & \varphi \in [n\alpha, (n+1)\alpha), \quad n = 0, 2, 4, \dots \\ -(\varphi - n\alpha) \frac{R_1^2 - R_2^2}{2} + (R_1^2 - R_2^2)\alpha, & \varphi \in [(n+1)\alpha, (n+2)\alpha) \end{cases}, \quad (6)$$

де α - кут прорізі модулятора; φ - кут повороту валу об'єкту контролю (рад); R_1 , R_2 - відповідно більший та менший радіус кола, що обмежує прорізь діафрагми. Залежність площі fotocутливого шару, що освітлюється, від кута повороту для іншого фотоприймача, зсунута по осі абсцис на 1.5α по відношенню до (6). У відповідності з (5) та (6), вихідна напруга кожного з фотоприймачів ТП є лінійною функцією кута повороту. Кутова швидкість прямо пропорційна першій похідній вихідного сигналу ТП. Викривлення вихідного сигналу, що зумовлені частотними властивостями фотоприймачів, найбільш за все проявляються біля максимумів та мінімумів їх вихідної напруги. Для зменшення цієї похибки у розробленому ТП використовується логічна схема, яка керує аналоговим мультиплексором, і до виходу ТП під'єднується вихідний сигнал того фотоприймача, вихідний сигнал якого не знаходиться біля свого максимуму чи мінімуму. Рівняння перетворення цього ТП визначається виразом

$$U_1 = \begin{cases} S_{10}R_{33} \frac{I}{r^2} (\varphi + \alpha(1/2 - n)) \frac{R_1^2 - R_2^2}{2}, \varphi \in [n\alpha, (n+1)\alpha], t \in [t_n, t_{n+1}] \\ S_{10}R_{33} \frac{I}{r^2} (\varphi - n\alpha) \frac{R_1^2 - R_2^2}{2}, \varphi \in [n\alpha, (n+1)\alpha], t \in [t_{n+1}, t_{n+2}] \\ S_{10}R_{33} \frac{I}{r^2} \left(-(\varphi + \alpha(1/2 - n)) \frac{R_1^2 - R_2^2}{2} + (R_1^2 - R_2^2)\alpha \right), \varphi \in [(n+1)\alpha, (n+2)\alpha], t \in [t_{n+2}, t_{n+3}] \\ S_{10}R_{33} \frac{I}{r^2} \left(-(\varphi - n\alpha) \frac{R_1^2 - R_2^2}{2} + (R_1^2 - R_2^2)\alpha \right), \varphi \in [(n+1)\alpha, (n+2)\alpha], t \in [t_{n+3}, t_{n+4}] \end{cases}, \quad n = 0, 2, 4, \dots \quad (7)$$

де $t_n, t_{n+1}, t_{n+2}, t_{n+3}, t_{n+4}$ - моменти часу, в які відбувається комутація.

Цей ТП має високу чутливість за кутом повороту, тому як вихідний сигнал одного фотоприймача змінюється від свого мінімального до максимального значення при обертанні на порівняно невеликий кут α . Це зумовлює можливість його використання для вимірювання амплітуди крутильних коливань. Внаслідок високої частоти вихідного сигналу ТП має погані частотні властивості. Окрім того, при використанні цього ТП, алгоритм визначення початкового та поточного кутового положення, напрямку обертання досить складний.

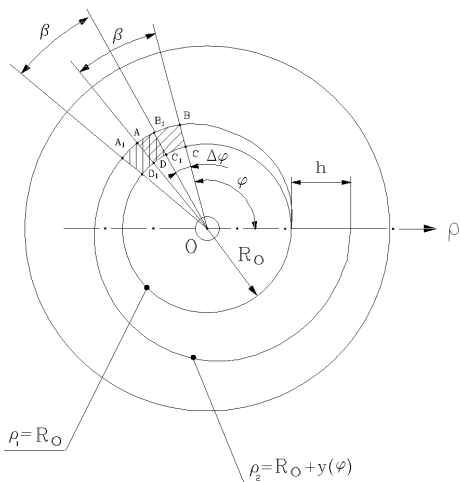


Рис. 2. Модулятор ТП з низькочастотним вихідним сигналом.

Вільний від цих недоліків розроблений ТП з низькочастотним вихідним сигналом. Його модулятор (рис. 2) має прорізь, яка обмежена кривими, рівняння яких у полярних координатах, полюс яких співпадає з центром модулятора, мають вигляд

$$\rho_1(\varphi) = R_0, \quad (8)$$

$$\rho_2(\varphi) = \sqrt{R_0^2 + \frac{h(2R_0 + h)}{2\pi} \varphi}, \quad (9)$$

де h - максимальна висота прорізі модулятора; R_0 - радіус кола, що обмежує прорізь модулятора. Форма прорізі діафрагми, що розташована перед fotocутливим шаром фотодіоду, обмежена двома промінями, кут між якими β і які починаються в центрі модуля-

тора. У цьому випадку, залежність площі fotocутливого шару фотодіоду, що освітлюється через перехрестя прорізів модулятора та діафрагми, описується виразом

$$S_2(\varphi) = \begin{cases} \frac{h(2R_0 + h)}{2\pi} \left(\frac{\beta}{2} \varphi + \frac{\beta^2}{4} \right), & \varphi \in [0, 2\pi - \beta) \\ \frac{h(2R_0 + h)}{2\pi} \left(-\frac{2\pi - \beta}{2} \varphi + \frac{(2\pi - \beta)^2}{4} + \pi^2 \right), & \varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi) \end{cases}, \quad (10)$$

При використанні вище вказаної прорізі, за рахунок зменшення частоти вихідного сигналу ТП, розширюється діапазон вимірювального контролю кутової швидкості. Рівняння перетворення ТП з низькочастотним вихідним сигналом

$$U_2 = \begin{cases} S_{10} R_{33} \frac{I}{r^2} \frac{h(2R_0 + h)}{2\pi} \left(\frac{\beta}{2} \varphi + \frac{\beta^2}{4} \right), & \varphi \in [0, 2\pi - \beta) \\ S_{10} R_{33} \frac{I}{r^2} \frac{h(2R_0 + h)}{2\pi} \left(-\frac{(2\pi - \beta)}{2} \varphi + \frac{(2\pi - \beta)^2}{4} + \pi^2 \right), & \varphi \in [2\pi - \beta, 2\pi) \end{cases}. \quad (11)$$

Третій розроблений ТП - ТП з низькочастотним вихідним сигналом та зменшенням похибки, що зумовлена частотними властивостями фотоприймачів відрізняється від вище описаного тим, що до його складу уведено фотоприймач, зсунутий відносно першого на 180° відносно центру модулятора. Аналоговий мультіплексор, який керується логічною схемою, підключає до виходу ТП вихідний сигнал того фотоприймача, який не знаходиться біля свого максимуму чи мінімуму. Його рівняння перетворення

$$U_3(t) = \begin{cases} S_{10} R_{33} \frac{I}{r^2} \frac{h(2R_0 + h)}{2\pi} \left(\frac{\beta}{2} \varphi + \frac{\beta^2}{4} \right), & t \in [t_n, t_{n+1}) \\ S_{10} R_{33} \frac{I}{r^2} \frac{h(2R_0 + h)}{2\pi} \left(\frac{\beta}{2} (\varphi + \pi) + \frac{\beta^2}{4} \right), & t \in [t_{n+1}, t_{n+2}) \end{cases}, \quad (12)$$

де t_n, t_{n+1}, t_{n+2} - моменти часу, в які відбувається комутація. У другий та третій ТП уведено допоміжні фотоприймачі, які є детекторами заднього фронту вихідної напруги основних фотоприймачів, що необхідно для подальшої обробки вихідного сигналу ТП.

Математична модель фотоприймача, що входить до складу будь-якого з розроблених ТП, в динамічному режимі об'єкту контролю визначається виразом

$$\dot{U}_\Phi(\Omega) = \dot{K}_s(\Omega) \dot{S}(\Omega) \left(1 - \frac{I_s e_e \dot{Z}_{EH}(\Omega)}{K_0 R_{BX} R_{33} kT (I_s e_e \dot{Z}_{EH}(\Omega) / kT - 1)} \right) + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_{ш}, \quad (13)$$

де U_{3M} - напруга зміщення нуля операційного підсилювача; ΔI - різниця вхідних струмів операційного підсилювача; $\dot{U}_{ш}$ - напруга шуму на виході фотоприймача; C_{BX} - вхідна ємність операційного підсилювача; R_{BX} - вхідний опір операційного підсилювача; \dot{Z}_{EH} - еквівалентний опір навантаження фотодіоду; I_s - темновий струм фотодіоду; T - абсолютна температура; k - постійна Больцмана; e_e - заряд електрону; Ω - циклічна частота потоку опромінення; $\dot{S}(\Omega)$ - комплексна амплітуда площі, що опромінюється; K_0 - коефіцієнт передачі операційного підсилювача на нульовій частоті;

$$\dot{K}_s(\Omega) = \frac{S_{10}}{1 + j\Omega\tau_{VD}} \cdot \frac{IK_0 R_{BX} R_{33}}{r^2} \cdot \left(K_0 R_{BX} + R_{33} + R_{BX} - \frac{\Omega^2}{\Omega_{ГР}^2} R_{BX} R_{33} (C_{BX} - C_{33}) + j\Omega \left(\frac{R_{33} + R_{BX}}{\Omega_{ГР}} + R_{BX} R_{33} (C_{BX} + C_{33} (K_0 + 1)) \right) \right), \quad (14)$$

де τ_{VD} - постійна часу фотодіоду; C_{33} - паразитна ємність кола зворотного зв'язку.

Математична модель фотоприймача в усталеному режимі роботи об'єкту контролю

$$\dot{U}_\Phi(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \dot{K}_s(m\Omega) (S_{Am} \cos(m\Omega t) + jS_{Bm} \sin(m\Omega t)) \cdot \left(1 - \frac{I_s e_c \dot{Z}_{EH}(m\Omega)}{K_0 R_{BX} R_{33} kT (I_s e_c \dot{Z}_{EH}(m\Omega) / kT - 1)} \right)^+ + U_0 + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_{ш}$$

де S_{Am} , S_{Bm} - коефіцієнти ряду Фур'є, у який розкладається залежність площі фоточутливого шару фотодіоду, що освітлюється; U_0 - постійна складова вихідної напруги фотоприймача.

Вирази (6), (10) у поєднанні з (13) або (15) дозволяють проводити математичне моделювання вихідного розроблених ТП в динамічному та усталеному режимах роботи об'єкту контролю з урахуванням частотних та шумових властивостей елементної бази, визначити рівні вихідних сигналів фотоприймачів, при яких необхідна комутація їх вихідних сигналів.

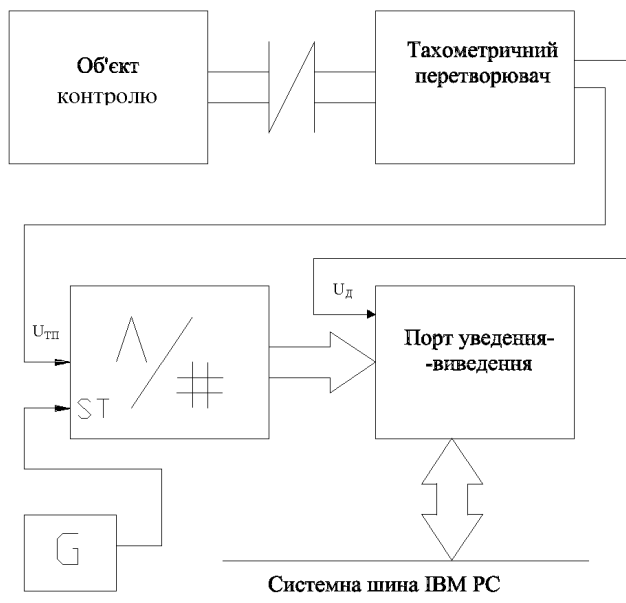


Рис. 3 Структурна схема пристрою контролю характеристик роторної системи з газоманітним підвісом.

Структурна схема пристрою контролю характеристик конічної роторної системи з газоманітним підвісом наведено на рис. 3. Вал об'єкту контролю за допомогою муфти спряження з'єднується з валом ТП. Вихідна напруга ТП $U_{ТП}$ подається на вхід АЦП, який запускається імпульсами високо стабільного керованого генератора, частота якого відома з високою точністю. По закінченню перетворення код, відповідний миттєвому значенню вихідного сигналу ТП, за сигналом готовності АЦП, передається через порт введення-виведення та системну шину IBM PC до оперативної пам'яті, де знаходиться до обчислення контролюємих параметрів. Через порт введення-виведення передається вихідна напруга U_d допоміжних фотоприймачів ТП, яка має рівень логічної одиниці під час дії заднього фронту основного фотоприймача. Це необхідно для обчислення кута повороту та кутової швидкості.

При обчисленні швидкісних діаграм, механічних характеристик, кутового прискорення використовується апроксимація кубічними сплайнами значень вибірок вихідного сигналу ТП. Для усіх ТП кутова швидкість прямо пропорційна

першій похідній вихідного сигналу та визначається шляхом цифрового диференціювання сигналу ТП.

У випадку контролю невисоких кутових швидкостей більш раціонально використання цифрових ТП, інформативним параметром яких є період вихідного

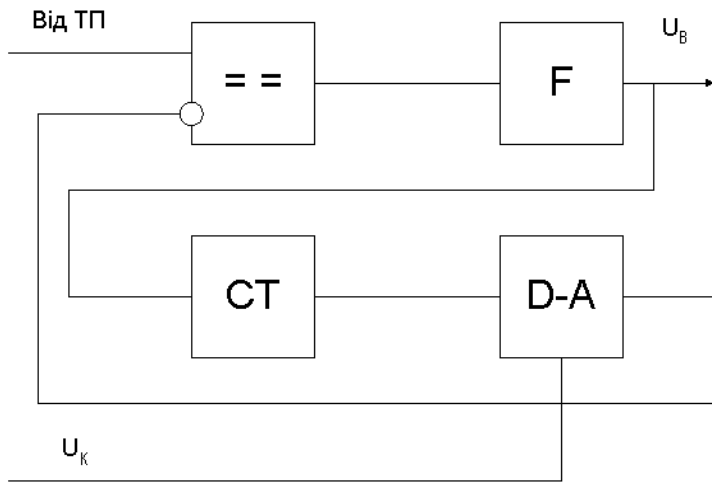


Рис. 4. Структурна схема частотного перетворювача.

сигналу. Для визначення кутової швидкості пристрій контролю працює за алгоритмом періодоміру. Для кожного значення кутової швидкості існує оптимальна розрізнявальна здатність цифрового ТП за кутом повороту, при якій середньоквадратична похибка мінімальна. У дисертаційній роботі розроблено перетворювач в частоту інформативного параметру вихідного сигналу ТП з низькочастотним вихідним сигналом з можливістю

зміни розрізнявальної здатності, структурну схему якого наведено на рис. 4. Його реалізовано на основі компаратора напруг ($=$), в коло зворотного зв'язку якого ввімкнено лічильник імпульсів (СТ) та ЦАП (D-A). Формувач (F) призначений для формування каліброваних за тривалістю та амплітудою вихідних імпульсів. Керування розрізнявальною здатністю відбувається шляхом зміни опорної напруги ЦАП. Розрізнявальна здатність за кутом повороту визначається виразом

$$\varphi_0 = \frac{2r^2 R_{3.3.ЦАП}}{S_{10} R_{33} R_C I_a \beta} U_K, \quad (16)$$

де φ_0 -розрізнявальна здатність за кутом повороту; $R_{3.3.ЦАП}$ -опір в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача, що входить до складу ЦАП; U_K -опорна напруга ЦАП; R_C -опір струмозадаючого резистора молодшого розряду ЦАП.

Встановлення оптимальної розрізнявальної здатності дозволяє мінімізувати середньоквадратичну похибку вимірювання кутової швидкості і тим самим підвищити достовірність контролю цієї характеристики.

Для визначення амплітуди крутильних коливань з метою подальшого контролю приведенного моменту інерції ротора розроблено алгоритм, який полягає у наступному. Середнє значення кутової швидкості визначається виразом

$$\omega_c = \frac{1}{nT_B} \sum_{i=0}^n (\varphi(t_i) - \varphi(t_i - T_B)), \quad (17)$$

де n - кількість визначених значень кутової швидкості; T_B - крок дискретизації; $\varphi(t_i)$, $\varphi(t_i - T_B)$ - значення кута повороту валу об'єкта контролю в моменти часу

$t_i, t_i - T_B$. Залежність кута повороту від часу в усталеному режимі роботи об'єкту контролю має вигляд

$$\varphi(t) = \omega_c t + \varphi_K(t), \quad (18)$$

де $\varphi_K(t)$ - складова, що зумовлена крутильними коливаннями ротора. Значення відхилень залежності кута повороту в часі від лінійної знаходяться за виразом

$$A_{\varphi_i}(t_i) = \varphi(t_i) - \omega_c t_i. \quad (19)$$

Амплітуда крутильних коливань визначається як середнє арифметичне модулів максимумів та мінімумів інтерполяційного сплайну, який проводиться через значення $A_{\varphi_i}(t_i)$

$$A_{\varphi} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{K_{\max}} \sum_{i=1}^{K_{\max}} \max P_{A\varphi}(t) + \frac{1}{K_{\min}} \sum_{i=1}^{K_{\min}} |\min P_{A\varphi}(t)| \right), \quad (20)$$

$P_{A\varphi}(t)$ - інтерполяційний сплайн; K_{\max}, K_{\min} - кількість максимумів та мінімумів інтерполяційного сплайну. Завдання знаходження максимумів та мінімумів інтерполяційного сплайну легко розв'язується відомими методами. Момент інерції визначається за виразом (4).

У четвертому розділі проведено математичне моделювання похибки первинного перетворення, що зумовлена частотними властивостями фотоприймачів, які входять до складу ТП, проаналізовано похибки вимірювання кута повороту, кутової швидкості, моменту інерції, чисельними методами знайдено їх закони розподілу, розраховано залежності показників достовірності контролю кутової швидкості від рівня завад у вихідному сигналі ТП та моменту інерції від середньоквадратичної похибки його вимірювання.

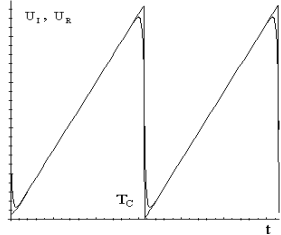
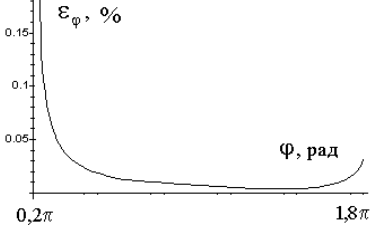
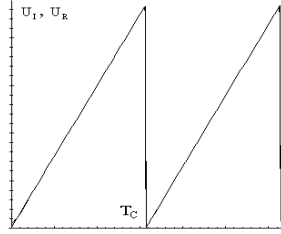
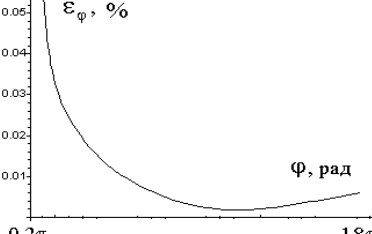
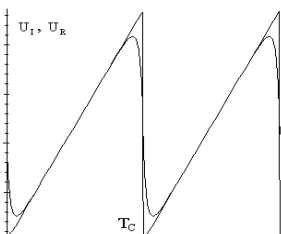
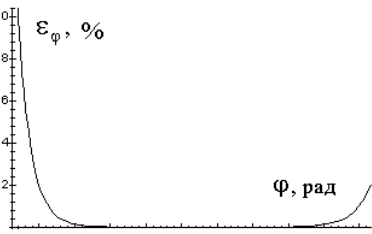
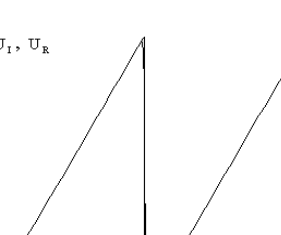
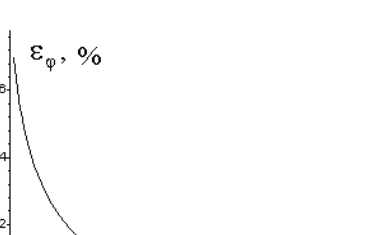
Результати математичного моделювання похибки первинного перетворення, що зумовлена частотними властивостями елементної бази, на який побудовано ТП, та вихідного сигналу ТП, при різних значеннях кутової швидкості та сталої часу фотодіоду для ТП з низькочастотним вихідним сигналом наведено у таблиці 1. Похибка первинного перетворення визначається за виразом

$$\varepsilon_{\varphi} = \left| \frac{U_I - U_R}{U_I} \right| \cdot 100\%, \quad (21)$$

де ε_{φ} - відносна похибка первинного перетворення, що зумовлена паразитними параметрами елементної бази фотоприймача; U_I - вихідна напруга ТП без урахування паразитних параметрів елементної бази; U_R - вихідна напруга ТП, отримана в результаті моделювання.

При моделюванні похибки первинного перетворення, що зумовлена паразитними параметрами елементної бази, закон зміни площі фоточутливого шару фотоприймача ТП з низькочастотним вихідним сигналом розкладався в ряд Фур'є на 1400 складових, що дало змогу отримати похибку апроксимації 0.004 %. В результаті встановлено, що при використанні фотодіоду з сталою часу 10^{-5} с відносна похибка первинного перетворення «кут повороту - напруга», що зумовлена частотними властивостями фотоприймачів не перевищує 0.06 % при кутовій швидкості 2500 рад/с (≈ 24000 об/хв).

Таблиця 1. Результати математичного моделювання похибки первинного перетворення, що зумовлена паразитними параметрами елементної бази фотоприймача для ТП з низькочастотним вихідним сигналом

ω , рад/с	τ_{VD} , с	Часові діаграми вихідного сигналу ТП	Графік $\varepsilon_{\varphi}(\varphi)$, %
1000	10^{-4}		
1000	10^{-5}		
2500	10^{-4}		
2500	10^{-5}		

Похибка вимірювання кута повороту при використанні розробленого ТП з низькочастотним вихідним сигналом має дві складових : складова, що зумовлена квантуванням вихідного сигналу за допомогою АЦП, має прямокутний закон розподілу

$$p(\delta_D) = \frac{2^n}{2\pi - \beta}, \quad \delta_D \in \left[-\frac{2\pi - \beta}{2^{n+1}}, \frac{2\pi - \beta}{2^{n+1}} \right], \quad (22)$$

де δ_D - абсолютна похибка вимірювання кута повороту, що зумовлена квантуванням сигналу ТП; n - кількість розрядів АЦП. Складова, що зумовлена випад-

ковими завадами у вихідному сигналі ТП. Її закон розподілу прийнято за нормальний, з нульовим математичним очікуванням

$$p(\delta_U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_U} \exp\left(-\frac{\delta_U^2}{2\sigma_U^2}\right), \quad (23)$$

де δ_U - абсолютна похибка вимірювання кута повороту, що зумовлена випадковими завадами у вихідному сигналі ТП; σ_U - середньоквадратичне значення цієї похибки. Закон розподілу загальної похибки вимірювання кута повороту визначається як композиція законів розподілу її складових, його графіки при різній розрядності АЦП наведено на рис. 5.

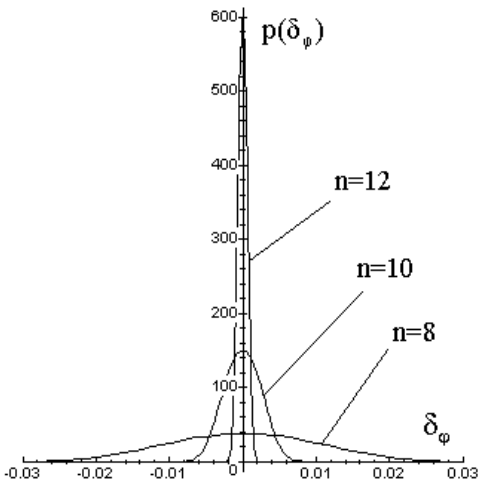


Рис. 5. Закони розподілу похибки вимірювання кута повороту.

Похибка вимірювання миттєвої кутової швидкості має три складових: методична похибка цифрового диференціювання. Її закон розподілу наближується до дискретного двомодального, який визначається виразом

$$p(\delta_{\omega M}) = \frac{1}{2} \delta\left(\delta_{\omega M} - \frac{T_B}{2} |\varepsilon_{MAX}|\right) + \frac{1}{2} \delta\left(\delta_{\omega M} + \frac{T_B}{2} |\varepsilon_{MAX}|\right), \quad (24)$$

де $\delta_{\omega M}$ - складова абсолютної методичної похибки вимірювання кутової швидкості; T_B - час диференціювання; ε_{MAX} - максимальне значення другої похідної вихідного сигналу ТП. Складова, що зумовлена квантуванням вихідного сигналу ТП, має трикутний закон розподілу

$$p(\delta_{\omega D}) = \frac{2^n T_B}{2\pi - \beta} \left(1 - \frac{2^n T_B}{2\pi - \beta} |\delta_{\omega D}|\right), \quad \delta_{\omega D} \in \left[-\frac{2\pi - \beta}{2^n T_B}, \frac{2\pi - \beta}{2^n T_B}\right], \quad (25)$$

де $\delta_{\omega D}$ - складова абсолютної похибки вимірювання кутової швидкості, що зумовлена квантуванням сигналу ТП. Складова, що зумовлена випадковими завадами у вихідному сигналі ТП. Її закон розподілу прийнято за нормальний

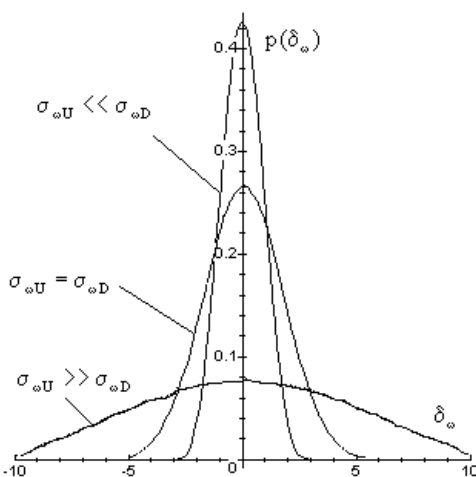


Рис. 6. Закони розподілу абсолютної похибки вимірювання кутової швидкості.

$$p(\delta_{\omega U}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\omega U}} \exp\left(-\frac{\delta_{\omega U}^2}{2\sigma_{\omega U}^2}\right), \quad (26)$$

де $\delta_{\omega U}$ - складова абсолютної похибки вимірювання кутової швидкості, що зумовлена випадковими завадами у вихідному сигналі ТП; $\sigma_{\omega U}$ - середньоквадратичне значення цієї складової.

Закон розподілу загальної похибки вимірювання кутової швидкості знайдено як композицію законів розподілу її складових чисельними методами. Графіки цього закону розподілу, при різних співвідношеннях між середньоквадратичними значеннями складової, що зумовлена випадковими завадами у вихідному сигналі ТП, та складової, що зумовлена квантуванням, наведено на рис.6. Серед-

ньоквадратичне значення загальної похибки вимірювання кутової швидкості визначається співвідношенням

$$\sigma_{\omega} = \sqrt{\left(\frac{T_B |\varepsilon_{MAX}|}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi - \beta}{\sqrt{6} 2^n T_B}\right)^2 + 2\left(\frac{\sigma_U}{T_B}\right)^2}. \quad (27)$$

Вираз (23) має мінімум по аргументу T_B , при якому середньоквадратичне значення похибки вимірювання кутової швидкості мінімальне. Оптимальний крок квантування визначається виразом

$$T_{B \text{ OPT}} = \frac{\sqrt[4]{8\sigma_U^2 + \frac{2}{3}\left(\frac{2\pi - \beta}{2^n}\right)^2}}{\sqrt{|\varepsilon_{MAX}|}}. \quad (28)$$

Оптимальна розрізнявальна здатність за кутом повороту перетворювача в частоту інформативного параметру вихідного сигналу ТП

$$\Phi_{0 \text{ opt}} = \frac{(2\pi - \beta)\omega^4 \sqrt{\omega^2 + 6\Delta\phi_0^2 f_0^2}}{\pi^4 \sqrt{6} \sqrt{2\varepsilon_{MAX}} f_0}. \quad (29)$$

Похибка вимірювання моменту інерції залежить від багатьох факторів, серед яких важко виділити домінуючий, тому закон її розподілу прийнято за нормальний.

Сумісний закон розподілу центрованого значення кутової швидкості, при нормальному законі його розподілу, та похибки вимірювання, при умові їх незалежності, визначається виразом

$$p(\bar{\omega}, \delta_{\omega}) = p(\bar{\omega}) \cdot p(\delta_{\omega}) = p(\bar{\omega}) \cdot (p(\delta_{\omega M}) * p(\delta_{\omega D}) * p(\delta_{\omega U})) = \frac{2^{n-1} T_B}{(2\pi - \beta) 2\pi \sigma_{\omega} \sigma_{\omega U}} \cdot \exp\left[-\frac{\bar{\omega}^2}{2\sigma_{\omega}^2}\right] \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\frac{2\pi - \beta}{2^n T_B}}^{\frac{2\pi - \beta}{2^n T_B}} \left(1 - \frac{2^n T_B |\delta_{\omega D}|}{2\pi - \beta}\right) \cdot \left(\delta\left((\delta_{\omega M} - \delta_{\omega D}) - \frac{T_B |\varepsilon_{MAX}|}{2}\right) + \delta\left((\delta_{\omega M} + \delta_{\omega D}) + \frac{T_B |\varepsilon_{MAX}|}{2}\right)\right) d\delta_{\omega D} \times \exp\left(-\frac{(\delta_{\omega U} - \delta_{\omega M})^2}{2\sigma_{\omega U}^2}\right) d\delta_{\omega M}, \quad (30)$$

де $\bar{\omega}$ - центроване значення кутової швидкості; δ_{ω} - абсолютна похибка вимірювання кутової швидкості. Сумісний закон розподілу центрованого значення моменту інерції та похибки його вимірювання, при умові нормальних законів розподілу

$$p(\Delta J, \delta_J) = p(\delta_J) \cdot p(\Delta J) = \frac{1}{2\pi \sigma_J \sigma_{\Delta J}} \exp\left(-\frac{\Delta J^2}{2\sigma_{\Delta J}^2} - \frac{\delta_J^2}{2\sigma_J^2}\right), \quad (31)$$

де ΔJ - абсолютне відхилення центрованого значення моменту інерції; $\sigma_{\Delta J}$ - середньоквадратичне значення абсолютного відхилення моменту інерції; δ_J - абсолютна похибка вимірювання моменту інерції; σ_J - середньоквадратичне значення цієї похибки. У роботі розраховано залежності показників достовірності контролю кутової швидкості від параметру $\mu = \sigma_{\omega U} / \sigma_{\omega D}$, який визначає співвідношення між середньоквадратичним значенням складової, що зумовлена завадами у вихідному сигналі ТП, та складової, що зумовлена квантуванням, та показників достовірності контролю моменту інерції в залежності від відносного середньоквадратичного значення похибки його вимірювання ε_J . Їх графіки наведено відповідно на рис. 7 та рис. 8.

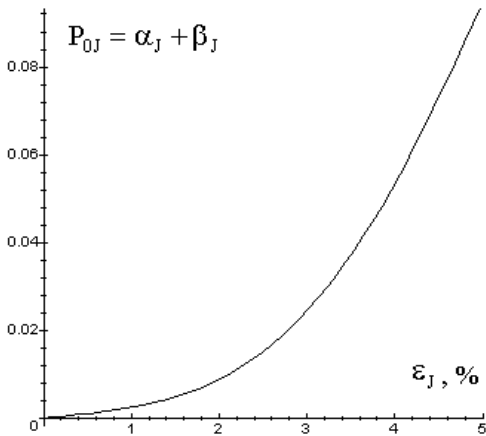


Рис.8. Залежність ймовірності прийняття помилкового рішення при контролі моменту інерції від ϵ_J .

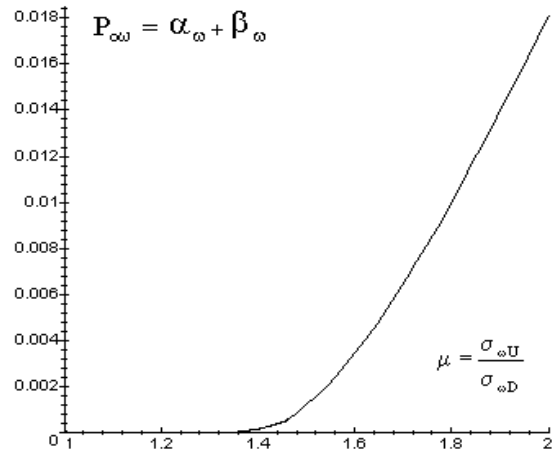


Рис. 7. Залежність ймовірності прийняття помилкового рішення при контролі кутової швидкості від μ .

У п'ятому розділі розроблено схеми електричні принципові та конструктивні креслення трьох типів ТП та блоку спряження з персональною ЕОМ; розроблено програмне забезпечення, що здійснює обробку даних : апроксимацію сплайнами, диференціювання сплайн-функції, обчислення швидкісних діаграм, механічних характеристик об'єкту контролю; розроблена методика інженерного проектування пристрою контролю характеристик роторної системи з газомагнітним підвісом; проведено експериментальне дослідження крутильних коливань ротору об'єкту контролю, швидкісних діаграм, механічних характеристик. За результатами експерименту встановлено, що при оптимальному кроці квантування вихідного сигналу ТП відносна середньоквадратична похибка вимірювання кутової швидкості 2400 рад/с складає 0.2 %, а загальна ймовірність помилки контролю кутової швидкості складає 0.0002, загальна ймовірність помилки контролю моменту інерції ротору складає 0.015, середньоквадратичне значення похибки його вимірювання складає 2.4 %.

У додатках наведено конструктивні креслення розроблених тахометричних перетворювачів, їх електричні принципові схеми, схему блоку спряження з ПЕОМ, програми моделювання частотних властивостей ТП, програми розрахунку показників достовірності контролю кутової швидкості та моменту інерції, лістинг основної програми, під управлінням якої працює пристрій, процедури сплайн-апроксимації та диференціювання апроксимуючої сплайн-функції.

ВИСНОВКИ

Основні наукові і практичні результати роботи полягають у наступному :

1. Досліджена математична модель газомагнітного підвісу кінцевого ротору. Проаналізовано стійкість кінцевого ротора у газомагнітному підвісі. В результаті аналізу встановлено, що кінцевий ротор у газомагнітному підвісі має одне стійке становище;

2. Шляхом розв'язку відомої системи диференційних рівнянь роторної системи знайдено рівняння крутильних коливань ротора, доведено зв'язок амплітуди крутильних коливань ротора та його приведенного моменту інерції, що дало можливість реалізувати спосіб контролю моменту інерції більш високої швидкодії у порівнянні з відомими;
3. Розроблено три тахометричних перетворювача «кут повороту - напруга» різного функціонального призначення, їх математичні моделі, що враховують паразитні параметри елементної бази. Проаналізовано частотні властивості розроблених тахометричних перетворювачів;
4. Розроблено частотний перетворювач вихідного сигналу створеного ТП з можливістю зміни розрізняювальної здатності за кутом повороту, що дозволяє мінімізувати похибку вимірювання кутової швидкості і відповідно підвищити достовірність контролю;
5. Отримано закони розподілу похибок вимірювання характеристик, які контролюються, при використанні розроблених тахометричних перетворювачів, що дало можливість розрахувати достовірність контролю;
6. Отримано аналітичні вирази для оптимального часу цифрового диференціювання, що дає змогу значно зменшити похибку вимірювання кутової швидкості та підвищити достовірність контролю;
7. Розроблена методика інженерного проектування пристроїв контролю характеристик конічної роторної системи у газомагнітному підвісі;
8. Розроблено та реалізовано пристрій контролю характеристик конічної роторної системи з газомагнітним підвісом, програмне забезпечення, під управлінням якого працює пристрій;

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Поджаренко В.О., Михалевич В.М., Кулаков П.І. До питання вибору форми модулятора тахометричного перетворювача // Вісник Вінницького політехнічного інституту.-1998.- №1.-С.12-18.
2. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Поджаренко А.В. Цифровий тахометричний перетворювач із змінною розрізняювальною здатністю // Вимірювальна техніка та метрологія-1998.-№.53.-С.84-90.
3. Поджаренко В.О., Кулаков П.І., Поджаренко А.В., Шаргородський С.А., Почверук Є.В. Пристрій для вимірювання і контролю кутової швидкості та кута повороту // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах - 1998. - №2. - С. 45-50.
4. Кулаков П.И., Поджаренко В.А. Датчик угловой скорости и углового ускорения // Proceeding of the second international scientific and technical conference "Unconventional electromechanical and electrotechnical systems". - Schecin, Poland. - 1996. - V. 2. - P. 489-494.
5. Поджаренко В.О., Кулаков П.І. Сучасний стан та перспективи розвитку цифрових тахометрів // Контроль і управління в технічних системах : Книга за мате-

ріалами четвертої міжнародної науково-технічної конференції. - Вінниця : міністерство освіти України, Вінницький державний технічний університет, 1997. - С. 49-55.

6. Поджаренко В.О., Кулаков П.І, В.М.Михалевич. До питання вимірювання кутової швидкості у перехідних режимах електродвигунів малої потужності // Труды I научно практической конференции «Современная контрольно-испытательная техника промышленных изделий и их сертификация». - Київ. - 1997. - С. 132-135.

7. Кулаков П.І. Математична модель фотоелектричного перетворювача площнапруга на основі пари фотодіод-операційний підсилювач // Матеріали п'ятої міжнародної НТК «Контроль і управління у складних системах». - Вінниця. - 1999. - Том 2., С. 228 - 233.

8. Патент №22701А. Україна, G01P3/44. Аналоговый датчик угловой скорости. / Поджаренко В.А., Михалевич В.М., Кулаков П.І., Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко А.В. (Україна). - 10 с. ил.: Оpubл. 30.06.98., Бюл. №3

9. Патент №17753 Україна, G01P3/44. Датчик кутової швидкості. / Кулаков П.І., Поджаренко В.А., Гоменюк А.С., Кухарчук В.В., Поджаренко А.В. (Україна) . - 14 с. ил.: Оpubл. 31.10.97, Бюл. №5.

10. Кулаков П.І., Поджаренко А.В. Интеллектуализованный сенсор кутової швидкості. // Матеріали міжнародного симпозиума “Наука и предпринимательство”. - Винница-Львов. - 1996. - С. 175.

11. Кулаков П.І., Поджаренко В.А. Новый датчик угловой скорости для динамических измерений // Матеріали 3-тої української конференції з автоматичного керування “Автоматика - 96”. - Севастополь. - 1996. - С. 44-45.

12. В.А.Поджаренко, Кулаков П.І., А.І.Колесник. Устройство для динамических измерений угловой скорости // Матеріали научно-технической конференции “Приборостроение - 96”. - Судак. - 1996. - С.7.

13. Кулаков П.І. Информационно-измерительная система параметров электро-механических преобразователей энергии // Матеріали 1- го Международного молодежного форума “Электроника и молодежь в XXI веке”. - Харьков. - 1997. - С. 127.

14. Кулаков П.І. Информационно-измерительная система параметров электродвигателей // Матеріали симпозиума “Наука и предпринимательство”.- Винница-Львов.-1997.-С. 114.

Особистий внесок в роботах, опублікованих у співавторстві:

[1, 6] - здобувачем запропоновано підхід до покращення частотних властивостей існуючих ТП «кут повороту-напруга», отримано рівняння перетворення ТП з новою формою прорізи модулятора; [2], [3] - здійснено виведення основних аналітичних співвідношень, розроблено відповідні алгоритми; [4] - запропоновано структурну схему та алгоритм обробки вихідного сигналу ТП; [5] - здійснено огляд останніх розробок в області цифрової тахометрії; [8], [9] - розроблено структурні схеми та алгоритми роботи ТП; [10], [11], [12] - запропоновано алгоритм роботи ТП.

АНОТАЦІЯ

Кулаков П.І. Розробка та дослідження пристрою контролю характеристик роторної системи з газоманітним підвісом. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 - прилади і методи контролю. - Вінницький державний технічний університет, Вінниця, 1999.

Дисертація присвячена розробці та дослідженню пристрою контролю характеристик конічної роторної системи в газоманітному підвісі синхронної гістерезисної електричної машини. У роботі проаналізовано математичну модель конічної роторної системи в газоманітному підвісі, досліджена стійкість системи. Досліджено процес виникнення крутильних коливань, встановлені аналітичні співвідношення, що дозволяють реалізувати спосіб вимірювання і контролю моменту інерції, побудований на вимірюванні амплітуди крутильних коливань, який має більш високу швидкодію у порівнянні з відомими. Запропоновані нові тахометричні перетворювачі «кут повороту-напруга», перетворювач кутової швидкості у частоту, який дозволяє змінювати розрізнявальну здатність за кутом повороту з метою мінімізації похибки вимірювання кутової швидкості та підвищення достовірності її контролю. Розроблено математичні моделі тахометричних перетворювачів. Запропонована структурна схема пристрою контролю кутової швидкості та моменту інерції, розроблено алгоритми його роботи. Проаналізовано похибки вимірювання кутової швидкості при використанні розроблених тахометричних перетворювачів, отримано закони розподілу похибки вимірювання при різних рівнях завад, розрахована вірогідність контролю кутової швидкості та моменту інерції. Отримані аналітичні вирази для оптимального кроку дискретизації при контролі кутової швидкості за допомогою розроблених тахометричних перетворювачів. Розроблена методика інженерного проектування пристрою та проведено експериментальні дослідження об'єкту контролю.

Ключові слова : газоманітний підвіс, конічний ротор, кутова швидкість, момент інерції, контроль характеристик, електрична машина.

Кулаков П.И. Разработка и исследование устройства контроля характеристик роторной системы с газо-магнитным подвесом. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - устройства и методы контроля. - Винницкий государственный технический университет, Винница, 1999.

Диссертация посвящена разработке и исследованию устройства контроля характеристик конической роторной системы в газо-магнитном подвесе синхронной гистерезисной электрической машины. В работе проанализирована математическая модель конической роторной системы в газо-магнитном подвесе, исследована устойчивость системы. Исследован процесс возникновения крутильных колебаний, установлены аналитические соотношения, позволяющие ре-

лизовать способ измерения и контроля момента инерции, основанный на измерении амплитуды крутильных колебаний, который имеет более высокое быстродействие в сравнении с известными. Предложены новые тахометрические преобразователи «угол поворота - напряжение», преобразователь угловой скорости в частоту, который позволяет изменять разрешающую способность по углу поворота с целью минимизации погрешности измерения угловой скорости и повышения достоверности ее контроля. Разработаны математические модели тахометрических преобразователей. Предложена структурная схема устройства контроля угловой скорости и момента инерции, разработан алгоритм его работы. Проанализированы погрешности измерения угловой скорости при использовании разработанных тахометрических преобразователей, получены законы распределения погрешности при разных уровнях помех, рассчитаны показатели достоверности контроля угловой скорости и момента инерции. Получены аналитические выражения для оптимального шага дискретизации при контроле угловой скорости при использовании разработанных тахометрических преобразователей. Разработана методика инженерного проектирования устройства и проведены экспериментальные исследования объекта контроля.

Ключевые слова : газо-магнитный подвес, конический ротор, угловая скорость, момент инерции, контроль характеристик, электрическая машина.

Kulakov P.I. Development and research of a device of verifying of performances of a rotor system with a gas-magnetic hanger. - Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of technical science on a speciality 05.11.13 - device and methods of verifying. - Vinnitsa state technical university, Vinnitsa, 1999.

The thesis is devoted to development and research of a device of verifying of performances of a conic rotor system in gas-magnetic hanger of the synchronous hysteresis electrical machine. In work the mathematical model of a conic rotor system in gas-magnetic hanger is analysed, the forces, operating on a curl are investigated. The research of a stability of a system is carried out at presence on a stator the stratum of a unmagnetized material and at its lack. In work the process of origin of rotating oscillations of a curl in gas-magnetic hanger is investigated, by a solution of a system of the differential equations the equation of rotating oscillations of a curl is obtained, the association is established which connects amplitude of rotating oscillations of a curl to its reduced moment of inertia, that has enabled to realize a mode of its verifying of higher speed, on a comparison with known. Three are developed of a tachometer converter "an angle of a turn - voltage", the principle of which operation is based on modulation uniform of a light stream hitting on a photosensitive stratum of the photoreceiver based on a pair the photo diode - operational amplifier, with the help of which it is possible: a measurement of an angular velocity by digital derivation of an output signal with uniform by a pitch; a measurement of an initial angular position; to simplify the definition of direction of rotation; their mathematical models are developed which take into account influence of parasitic parameters of element basis. In work the structure scheme of a device of verifying based on a developed of

tachometer converters, algorithm of verifying of an angular velocity, moment of inertia, algorithm of a measurement of the speed diagrams and mechanical performances is offered. The frequency converter of an information parameter of an output signal developed tachometer converter with a possibility of a modification of a resolving power on an angle of a turn is offered, that allows by set of an optimum resolving power to minimize a mean-square deviation value of an error of verifying of an angular velocity and thus to raise reliability of its verifying. The analytical expressions of an association of a resolving power from controlling voltage and optimum resolving power from parameters of rotation are obtained. The analytical expression for an optimum pitch of digital derivation is obtained at verifying an angular velocity, that allows to minimize an error of its measurement and by that to raise reliability of verifying. The frequency properties developed of tachometer converters are investigated at various values of a constant of time of photo diodes, the maximum values of angular velocities are established, at which the error of primary transformation stipulated by frequency properties of photoreceivers is small. The component errors of a measurement of an angular velocity and moment of inertia with the help of developed of tachometer converters are analysed. The numerical methods design compositions of their laws of distribution, the indexes of reliability of verifying of an angular velocity - error of the first and second sort, in an association from a level of parasites in an output signal of a tachometer converter are designed. The indexes of reliability of verifying of a moment of inertia in an association from mean-square deviation of an error of his measurement are designed. The experimental researches of a device of verifying are carried out, the technique of its engineering projection is developed. The designer documentation and schematic diagrams of tachometer converters, block of interface with the personal computer, soft is developed.

Key words: gas-magnetic hanger, conic curl, angular velocity, moment of inertia, verifying of performances, electrical machine.