

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ВЕДМІЦЬКИЙ ЮРІЙ ГРИГОРОВИЧ

УДК 621.3:658.562

**КОНТРОЛЬ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ТА СИСТЕМ НА ОСНОВІ
УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ АНАЛОГІЙ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2013

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кухарчук Василь Васильович,
Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Садовой Олександр Валентинович,
Дніпродзержинський державний технічний університет, завідувач кафедри електротехніки та електромеханіки;

доктор технічних наук, професор
Квасніков Володимир Павлович
Національний авіаційний університет, м. Київ, завідувач кафедри інформаційних технологій.

Захист відбудеться “26” квітня 2013 р. о 10⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210, ГНК.

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

Автореферат розісланий 22 березня 2013 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Необхідність побудови систем контролю моменту інерції зумовлена областю прояву та ступенем впливу на рух інертності обертових мас, мірою якої і слугує даний параметр. Найбільш критично вплив моменту інерції виявляє себе в фізично та структурно складних і неоднорідних технічних системах, до яких належить переважна більшість електротехнічних установок, комплексів і систем з обертальною та складною формами руху. Оскільки момент інерції визначає характер руху системи і водночас залежить від цього руху, інформація про нього є важливою, а сам технічний параметр – надзвичайно інформативним. Відсутність або неточність інформації щодо значення моменту інерції технічної системи через невизначеність диференціальних рівнянь руху суттєво ускладнює або і унеможлиблює вирішення цілого ряду важливих науково-технічних та прикладних задач. За зазначених умов найбільш уразливими є нестационарні і нелінійні електромеханічні, робототехнічні і мехатронні системи з великим числом ступенів вільності. Наприклад, під час руху промислових маніпуляторів і роботів, систем позиціонування та стеження (комплексів радіолокаційного дозору і наведення, РЛС, астрономічних інструментів), підйомально-транспортних машин (підйомних кранів, вантажних та вантажно-пасажирських підйомачів і транспортерів, прокатних станів), землерийних машин (одноківшових і роторних екскаваторів тощо) їх власний або приведений момент інерції в активній частині багатовимірною робочого простору може змінюватися від кількох до десятків разів. Актуальним є і контроль моменту інерції стаціонарних електротехнічних систем, де зміна цього параметру не передбачена алгоритмом функціонування. Для таких систем суттєві зміни в значеннях моменту інерції свідчать про виникнення аварійної ситуації, яка вимагає щонайшвидшого реагування та запобігання її розвитку. І хоча на сьогодні розроблено чимало методів і засобів ідентифікації, вимірювання і контролю моменту інерції, проте переважна більшість з них (понад 97%) є руйнівними і потребує попередніх часткової або повної деактивації та демонтажу технічної системи. Ті ж, що залишаються, мають низькі метрологічні характеристики або обмежену область застосування. Для більшості з названих електротехнічних комплексів та систем проведення демонтажних робіт задля контролю моменту інерції через конструкційні і функціональні особливості будови є або занадто складним, тривалим і економічно не вигідним, або неможливим взагалі. Тому для них вже сьогодні існує нагальна потреба в розробці нових високоякісних неруйнівних методів і засобів контролю моменту інерції. Водночас вихідний базис теорії контролю моменту інерції виявляє свою слабкість і внаслідок відсутності в ньому окремих базисних елементів, зокрема узагальнених відносно числа ступенів вільності математичної, структурної та електричних моделей систем контролю моменту інерції, принципово не здатен ефективно розв'язувати ні виявлену задачу, ні задачі, які її супроводжують. Через це дослідження власне процесу контролю моменту інерції електротехнічних комплексів та систем з великим і наперед невизначеним числом ступенів вільності їхніх рухомих частин є домінуючою науково-практичною задачею, затребуваність у вирішенні якої зумовлена і її узагальненим характером, і актуальністю підпорядкованих до неї декомпозиційних задач.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Матеріали дослідження, які покладено в основу дисертаційної роботи, відповідають тематичним планам НДР Вінницького національного технічного університету та планам держбюджетних НДР МОН (МОНМС) України на 2002-2004 рр. (тема «Розробка енергозберігаючих методів сертифікаційних випробувань моментних характеристик електричних машин» за № ДР 0102U002255), на 2005-2007 рр. (тема «Розробка оптико-електронних вимірювальних перетворювачів параметрів обертального руху» за № ДР 0105U002433) і на 2012-2013 рр. (тема «Нові методи та засоби вимірювання механічних фізичних величин на основі вдосконаленої теорії електродинамічних аналогій» за № ДР 0112U001370).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка на основі удосконалення теорії електродинамічних аналогій нових методів і засобів неруйнівного контролю моменту інерції електромеханічних систем з обертальною і складною формами руху.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано такі задачі:

- узагальнення основних операцій контролю моменту інерції електротехнічних комплексів та систем з наперед невизначеним числом ступенів вільності;
- математична ідентифікація засобів контролю моменту інерції, що передбачає побудову узагальненої математичної моделі процесу первинного перетворення моменту інерції на основі рівнянь Лагранжа II роду;
- електрична ідентифікація і моделювання засобів контролю моменту інерції, що потребує розробки тотожних рівнянням Лагранжа II роду і рівнянням Лагранжа-Максвелла електричних кіл-аналогів з довільним числом ступенів вільності і побудови на цій основі узагальнених електричних моделей процесу контролю моменту інерції;
- формалізація процесів математичної і електричної ідентифікації на основі лагранжевого формалізму і гіпотетико-дедуктивного підходу;
- створення нових методів і засобів неруйнівного контролю моменту інерції електротехнічних комплексів та систем з покращеними статичними та динамічними метрологічними характеристиками.

Об'єктом дослідження є процес контролю моменту інерції електротехнічних комплексів та систем з великим і наперед невизначеним числом ступенів вільності їхніх рухомих частин.

Предмет дослідження. Методи і засоби контролю моменту інерції тіл обертання електротехнічних комплексів та систем.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети і розв'язання окресленого кола задач основними методами дослідження є: математичні методи класичного аналізу і фізичні методи аналітичної механіки – для математичної ідентифікації узагальненої системи контролю моменту інерції на основі лагранжевого формалізму; методи теорії електромагнітного поля, теоретичної електротехніки, теорії електродинамічних аналогій – для побудови узагальнених електричних кіл-аналогів динамічних систем з довільним числом ступенів вільності та електричної ідентифікації і моделювання на їх основі систем контролю моменту інерції; методи експериментальної інформатики – для розробки та дослідження нових методів і засобів неруйнівного контролю моменту інерції електротехнічних комплексів і систем з обертальною та складною формами руху.

Наукові положення, які винесено на захист

1) Узагальненість рівнянь Лагранжа-Максвелла і Лагранжа II роду зумовлює побудову рівносильних цим рівнянням електричних кіл з довільним, наперед невизначеним, числом ступенів вільності, які здатні слугувати узагальненими аналогами для неперервних у часі динамічних систем із зосередженими параметрами.

2) Динамічний характер процесу перетворення моменту інерції в інші фізичні величини створює можливість побудови абстрагованої динамічної системи, яка за числом ступенів вільності буде узагальненою формою відносно всіх відомих і можливих систем перетворення моменту інерції.

Наукова новизна отриманих результатів

1) Вперше в теорії електродинамічних аналогій виявлено і обґрунтовано принцип та розкрито закономірності топологічної будови узагальнених електричних кіл з довільним числом ступенів вільності, які є тотожними рівнянням Лагранжа-Максвелла та Лагранжа II роду, що створило можливість розробки електричних моделей для складних за топологічною структурою та змішаних за фізичною природою електротехнічних динамічних систем на основі єдиного формалізованого за Лагранжем гіпотетико-дедуктивного підходу.

2) Вперше побудовано узагальнені математичну і дві, дуальні одна до одної, електричні моделі основних операцій контролю моменту інерції, що дозволило розробити

формалізований дедуктивний метод математичної і електричної ідентифікації та моделювання засобів контролю моменту інерції електротехнічних комплексів і систем шляхом варіації їх числа ступенів вільності.

3) Отримала подальший розвиток теорія контролю моменту інерції електротехнічних комплексів і систем, де на основі єдиного формалізованого підходу розроблено ряд нових методів контролю моменту інерції 1-го, 2-го і 3-го порядків, які від відомих відрізняються тим, що зорієнтовані на неруйнівну форму контролю і забезпечують високу точність ідентифікації моменту інерції.

4) Вдосконалено оптико-електронний засіб контролю моменту інерції, який від відомих відрізняється вперше синтезованою формою кривої профілю просторово-оптичного модулятора, що дозволило забезпечити лінійність статичної характеристики в широкому діапазоні перетворення моменту інерції.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані узагальнені електричні кола-аналоги динамічних систем з довільним числом ступенів вільності та виявлені закономірності їх топологічної будови дозволяють на основі єдиного підходу розв'язувати задачі електричного моделювання електромеханічних та інших електротехнічних систем змішаної фізичної природи зі складною архітектурою із застосуванням для цього всіх можливостей апарату теоретичної і загальної електротехніки. Зокрема у такий спосіб побудовано електричні аналоги двох принципово різних електромеханічних систем – мікроелектромеханічного акселерометра ADXLxxx (Analog Devices) і шнекового дифузійного апарата. Застосування до обох методу еквівалентних перетворень дозволило дослідити інерційні властивості рухомих частин їхніх прототипів і тим самим зменшити динамічну похибку вимірювання віброзміщень у першому випадку та виявити причини втрати системою стійкості і оцінити її границі у другому.

На основі розробленої математичної моделі, яка описує процес просторово-оптичної модуляції, синтезовано форму кривої профілю просторово-оптичного модулятора з лінійною функцією перетворення і розраховано його геометричні та конструкційні параметри. Отримана у такий спосіб нова форма профілю поверхні модулятора дозволила побудувати сенсор для визначення моменту інерції в широкому діапазоні зміни його значень.

Розроблено структурну схему і алгоритм роботи засобу контролю моменту інерції в мікропроцесорному виконанні, який дозволив на основі оптико-електронного сенсора реалізувати запропоновані методи неруйнівного контролю моменту інерції (часовий і амплітудний методи, метод двох резонансів тощо).

В програмному середовищі MatLAB, його додатку Simulink та пакеті SimPowerSystems створено комп'ютерну модель системи контролю моменту інерції ротора двигуна постійного струму, на базі якої проведено ряд числових експериментів з вимірювального контролю моменту інерції відомими і новими методами. Порівняльним аналізом результатів фізичного і математичного моделювання доведено адекватність останніх.

Практичні результати дисертаційних досліджень впроваджено у виробництво на об'єктах ПАТ Дністровської ГАЕС, що дозволило підвищити надійність функціонування гідроагрегатів та гідрогенераторів Дністровської ГЕС-2. Теоретичні результати роботи використовуються в навчальному процесі, що покращує якість викладання дисциплін електротехнічного спрямування. Окремі матеріали використано під час написання (у співавторстві) підручників і навчальних посібників для студентів ВНЗ з грифом МОН України. Обидва впровадження підтверджено відповідними актами від 15.05.2012 р. та 10.05.2012 р.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення, які складають суть роботи, розроблено та обґрунтовано здобувачем особисто [1-31]. Автор самостійно сформулював задачі дослідження, розробив наукові положення і отримав результати, виконавши теоретичну і практичну частини дисертаційної роботи. Зокрема в спільних роботах [2-6, 9, 12, 23, 27, 28] автором розкрито практичне значення і висвітлено області застосування узагальнених

електричних кіл-аналогів неперервних у часі динамічних систем з довільним числом ступенів вільності, в роботах [18, 19] розкрито неоднозначний характер зміни моменту інерції внаслідок деформації тіл обертання, в роботах [7-13, 23, 27] розроблено концепцію узагальненого первинного перетворення моменту інерції електротехнічних систем, в роботах [12-14, 22, 24, 25, 31] запропоновано і описано нові неруйнівні методи контролю моменту інерції, а в роботах [15-17, 20, 21, 29, 30] розроблено їх технічне забезпечення для оптико-електронних засобів контролю.

Апробація результатів. Викладений в дисертаційній роботі матеріал пройшов апробацію на 8 наукових конференціях і семінарах: VI, VIII, IX міжнародних конференціях «Контроль і управління в складних системах» (Вінниця, ВНТУ, 2001-2008 рр.); X науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (Хмельницький, 2003 р.); XIII міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика-2006» (Вінниця, ВНТУ, 2006 р.); науковому семінарі «Проблеми і перспективи енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств» (Луцьк, ЛНТУ, 2009 р.); II міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робото технічні комплекси (ІРТК-2009)» (Київ, 2009 р.); I міжнародній науковій конференції пам'яті професора В. Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (Вінниця, ВНТУ, 2011 р.).

Публікації. Під час і за результатами досліджень автором опубліковано 31 наукову роботу, з яких 21 статтю наведено в фахових виданнях, 8 публікацій – в збірках тез науково-технічних конференцій, 1 – в науково-виробничому журналі. Отримано 1 патент України на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 260 сторінок друкованого тексту і містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних бібліографічних джерел і вісімнадцять додатків. Основну частину викладено на 150 сторінках (без урахування 24 повносторінкових рисунків і таблиць). Список використаних джерел складається з 285 найменувань і займає 28 сторінок. Дисертація містить 57 рисунків і 19 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і задачі дослідження, висвітлено наукову новизну отриманих результатів, показано їх практичне значення та рівень апробації, встановлено особистий внесок автора з посиланнями на його публікації.

В першому розділі розкрито сучасний стан теорії контролю моменту інерції електротехнічних комплексів і систем з обертальною та складною формами руху, у зв'язку з чим обґрунтовано необхідність, окреслено область, виявлено задачі і сформовано основні напрямки дослідження. Для цього: 1) проаналізовано значення і вплив моменту інерції на роботу електротехнічних установок, комплексів та систем. Показано, що момент інерції є важливим динамічним параметром. Водночас встановлено недостатньо адекватне відображення його значення в довідниках і технічних умовах; 2) проведено огляд і систематизацію відомих методів і засобів контролю моменту інерції, здійснено їх порівняльний аналіз. Встановлено, що на сьогодні основними методами контролю моменту інерції є експериментальні методи, які переважно орієнтовані на руйнівну форму контролю, що для більшості електротехнічних систем з економічних і технічних причин є неприйнятним. Інші ж методи (методи допоміжного маятника, крутильних коливань, самогальмування, прямий метод) не забезпечують необхідної точності під час визначення моменту інерції; 3) з позицій теорії множин і відношень доведена невідповідність між емпіричною і теоретичною основами теорії контролю моменту інерції. Показано, що задача розробки нових методів і засобів неруйнівного контролю є окремим проявом цієї наукової

задачі і потребує попереднього створення додаткових базисних елементів в теорії контролю; 4) розкрито і сформовано коло істотних задач, які пов'язані з першою і породжені проблемою невідповідності; 5) для розв'язування виявлених задач за основу обрано гіпотетико-дедуктивний підхід.

В другому розділі закладено, розроблено і розвинуто окремі базисні елементи теорії контролю моменту інерції електротехнічних комплексів і систем з обертальною та складною формами руху. Для цього введено нове теоретичне поняття – система узагальненого перетворювача моменту інерції.

Узагальненим перетворювачем моменту інерції (УПМІ) будемо називати абстраговану систему первинного перетворення моменту інерції з довільним числом ступенів вільності, що реалізує операцію перетворення моменту інерції в математично з ним пов'язану та наперед за видом не визначену механічну фізичну величину (геометричну, кінематичну чи динамічну) або їх сукупність. За вказаними ознаками УПМІ є узагальненою формою відносно відомих і можливих у майбутньому перетворювачів моменту інерції і відображається в них за окремих умов.

Структурну схему системи УПМІ показано на рис. 1. Ця система складається з двох взаємодіючих частин (підсистем): 1) самого об'єкта контролю моменту інерції (підсистема А), який за природою є або механічною, або електромеханічною системою з невідомим моментом інерції J_{OB} , що слугує за вхідну

величину; 2) деякої додаткової суто механічної системи з наперед заданими властивостями, характеристиками і в'язями (підсистема В), що певним наперед заданим чином зв'язана з об'єктом контролю і створює для нього поле активних сил, спонукаючи до руху, та поле реакції в'язей, обмежуючи цей рух. Отже, як і підсистема А, підсистема В визначає стан перетворювача і впливає на систему рівнянь руху.

Математичні моделі системи УПМІ розроблено в рівняннях Лагранжа II роду за допомогою варіаційних принципів аналітичної механіки, зокрема принципів Даламбера і Даламбера-Лагранжа, на основі класичного підходу. Результат математичного дослідження отримано як систему диференціальних рівнянь 2-го порядку, складених відносно узагальнених координат q_1, \dots, q_n та швидкостей $\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n$. За складного руху об'єкта контролю рівняннями системи УПМІ є:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_s} T_A(J_{OB}) + \frac{d}{dt} \frac{\partial T_B}{\partial \dot{q}_s} - \left(\frac{\partial}{\partial q_s} T_A(J_{OB}) + \frac{\partial T_B}{\partial q_s} \right) = Q_s^{(A)} + Q_s^{(B)}, \quad s = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

де n – число ступенів вільності системи УПМІ; T_A і T_B – кінетичні енергії підсистем А і В; $Q_s^{(A)}$ і $Q_s^{(B)}$ – узагальнені сили різної фізичної природи.

У випадку суто обертального руху механічної системи УПМІ диференціальні рівняння (1) набувають вигляду

$$\begin{cases} (J_{OB} + m_A l^2) \ddot{q}_1 = M_A - \frac{\partial \Pi}{\partial q_1} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_1}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T_B}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T_B}{\partial q_s} = Q_s - \frac{\partial \Pi}{\partial q_s} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_s}, \quad s = 2, 3, \dots, n, \end{cases} \quad (2)$$

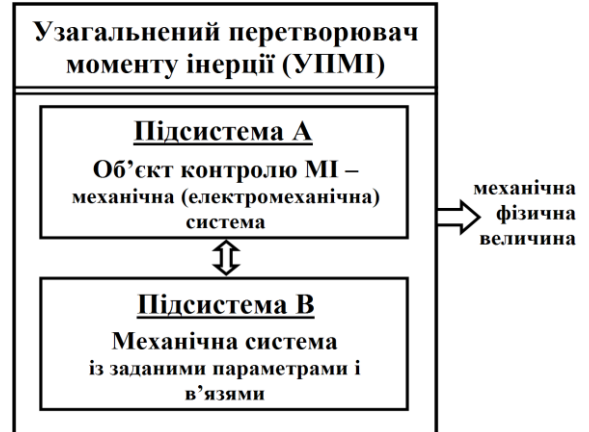


Рисунок 1 – Структурна схема системи УПМІ

а для електромеханічної системи –

$$\begin{cases} (J_{OB} + m_A l^2) \ddot{q}_1 = M_A^{(m)} + M_A^{(e)} - \frac{\partial \Pi}{\partial q_1} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_1}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T_B}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T_B}{\partial q_s} = Q_s - \frac{\partial \Pi}{\partial q_s} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_s}, \quad s = 2, 3, \dots, n; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial W_A^{(m)}}{\partial i_s} - \frac{\partial W_A^{(m)}}{\partial q_s^{(e)}} = e_s - \frac{\partial W_A^{(e)}}{\partial q_s^{(e)}} - \frac{\partial \Phi_A^{(e)}}{\partial i_s}, \quad s = n+1, n+2, \dots, k, \end{cases} \quad (3)$$

де Π – потенціальна енергія системи УПМІ; Φ і $\Phi_A^{(e)}$ – механічна і електрична дисипативні функції Релея; $(k-n)$ – число ступенів вільності електромагнітної частини системи УПМІ; $q_s^{(e)}$ і $i_s = \dot{q}_s^{(e)}$ – узагальнені електричні координати і їх швидкості; $W_A^{(m)}$ – енергія магнітного поля підсистеми А; $W_A^{(e)}$ – енергія її електричного поля; $M_A^{(m)}$ – головний момент механічних сил підсистеми А; $M_A^{(e)}$ – обертальний момент, що створюється внаслідок дії на підсистему А електромагнітних сил; e_s – контурні е.р.с. (зовнішні джерела енергії).

Математичні моделі системи УПМІ (1)-(3) є узагальненими математичними моделями процесу первинного перетворення моменту інерції електротехнічних комплексів та систем і відображають його основні властивості.

Введення і математичний аналіз системи УПМІ дозволили звести всі відомі та можливі методи і засоби контролю моменту інерції до ієрархічної єдності, утворивши багаторівневу структурну форму з ознаками підпорядкування об'єктів нижнього рівня об'єктам верхнього, з послідовним сходженням до самої системи УПМІ.

В третьому розділі для розв'язання задачі електричної ідентифікації і моделювання засобів контролю моменту інерції електротехнічних комплексів та систем розроблено, строго математично обґрунтовано і введено (у зв'язку з відсутністю) у вихідний базис теорії електродинамічних аналогій узагальнені структурну і електричні кола-аналогії неперервних у часі динамічних систем з довільним n числом ступенів вільності однорідної або змішаної фізичної природи, які за логічною силою є тотожними рівнянням Лагранжа II роду та рівнянням Лагранжа-Максвелла.

Узагальнену електричну схему аналогії типу “сила-напруга” можна отримати за допомогою рівнянь Лагранжа-Максвелла в першій системі аналогій

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial W_m}{\partial i_s} + \frac{\partial W_e}{\partial q_s^{(e)}} + \frac{\partial \Phi_e}{\partial i_s} = e_s, \quad s = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

де $i_s = \dot{q}_s^{(e)}$ – контурні струми кола (узагальнені швидкості); e_s – контурні е.р.с. (узагальнені

сили); $W_m = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \sum_{p=1}^n (\pm) L_{sp} i_s i_p = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n L_{ss} i_s^2 + \sum_{s=1}^n \sum_{p=s+1}^n (\pm) L_{sp} i_s i_p$ – енергія магнітного поля

електричної системи; $W_e = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \sum_{p=1}^n (\pm) \frac{1}{C_{sp}} q_s^{(e)} q_p^{(e)} = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \frac{1}{C_{ss}} q_s^{(e)2} + \sum_{s=1}^n \sum_{p=s+1}^n (\pm) \frac{1}{C_{sp}} q_s^{(e)} q_p^{(e)}$ –

енергія її електричного поля; $\Phi_e = \frac{1}{2} \times \sum_{s=1}^n \sum_{p=1}^n (\pm) R_{sp} i_s i_p = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n R_{ss} i_s^2 + \sum_{s=1}^n \sum_{p=s+1}^n (\pm) R_{sp} i_s i_p$ –

електрична дисипативна функція Релея; L_{sp} , C_{sp} , R_{sp} – власні і спільні індуктивності, ємності та активні опори незалежних контурів.

Для лінеаризованої системи рівняння (4) можна подати як

$$\begin{cases} \left(L_1 \frac{d i_1}{d t} + \frac{q_1^{(e)}}{C_1} + R_1 i_1 \right) + \sum_{s=2}^n \left(L_{1s} \frac{d}{d t} (i_1 \pm i_s) + \frac{q_1^{(e)} \pm q_s^{(e)}}{C_{1s}} + R_{1s} (i_1 \pm i_s) \right) = e_1; \\ \dots; \\ \left(L_n \frac{d i_n}{d t} + \frac{q_n^{(e)}}{C_n} + R_n i_n \right) + \sum_{s=1}^{n-1} \left(L_{ns} \frac{d}{d t} (i_n \pm i_s) + \frac{q_n^{(e)} \pm q_s^{(e)}}{C_{ns}} + R_{ns} (i_n \pm i_s) \right) = e_n. \end{cases} \quad (5)$$

Кожне з рівнянь (5) є другим законом Кірхгофа, складеним окремо для кожного з n незалежних контурів. Вони мають однакову структуру і в такому вигляді водночас і розв'язують задачу поділу системи-аналога на типові елементарні ланки, і дозволяють виявити склад та архітектуру як кожної ланки окремо, так і електричної системи в цілому. На рис. 2, а наведено фрагмент узагальненої електричної схеми, яка відповідає рівнянням руху (5) і є аналогом динамічної системи з довільним числом n ступенів вільності в першій системі динамічних аналогій.

Узагальнену електричну схему аналогії типу «сила-струм» отримано за допомогою рівнянь Лагранжа-Максвелла в другій системі аналогій

$$\frac{d}{d t} \frac{\partial W_e}{\partial \varphi_s} + \frac{\partial W_m}{\partial \psi_s} + \frac{\partial \Phi_e}{\partial \varphi_s} = J_s, \quad s = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

де $\varphi_s = \dot{\psi}_s$ – вузлові потенціали кола (узагальнені швидкості); J_s – вузлові струми

(узагальнені сили); $W_e = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \sum_{p=1}^n (\pm) C_{sp} \varphi_s \varphi_p = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n C_{ss} \varphi_s^2 - \sum_{s=1}^n \sum_{p=s+1}^n C_{sp} \varphi_s \varphi_p$ – енергія

електричного поля системи; $W_m = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \sum_{p=1}^n (\pm) \frac{1}{L_{sp}} \psi_s \psi_p = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \frac{1}{L_{ss}} \psi_s^2 - \sum_{s=1}^n \sum_{p=s+1}^n \frac{1}{L_{sp}} \psi_s \psi_p$ –

енергія її магнітного поля; $\Phi_e = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \sum_{p=1}^n (\pm) \frac{1}{R_{sp}} \varphi_s \varphi_p = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n \frac{1}{R_{ss}} \varphi_s^2 - \sum_{s=1}^n \sum_{p=s+1}^n \frac{1}{R_{sp}} \varphi_s \varphi_p$ –

електрична дисипативна функція; L_{sp} , C_{sp} , R_{sp} – власні та спільні вузлові індуктивності, ємності та активні опори.

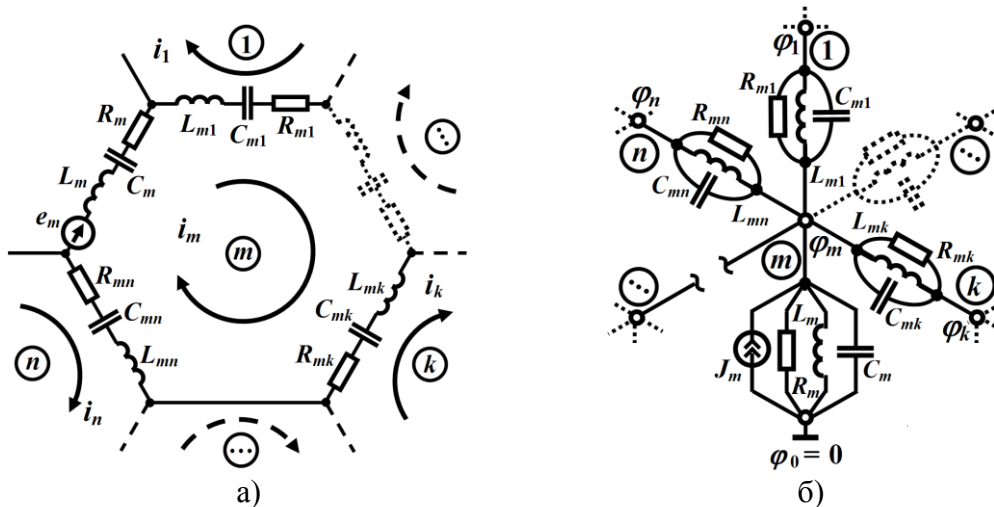


Рисунок 2 – Типові елементарні ланки і узагальнені електричні схеми-аналоги першої («сила-напруга») та другої («сила-струм») систем динамічних аналогій

Для лінеаризованої системи рівняння (6) можна записати у вигляді

$$\left\{ \begin{aligned} & \left(C_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + \frac{\Psi_1}{L_1} + \frac{\varphi_1}{R_1} \right) + \sum_{s=2}^n \left(C_{1s} \frac{d}{dt}(\varphi_1 - \varphi_s) + \frac{\Psi_1 - \Psi_s}{L_{1s}} + \frac{\varphi_1 - \varphi_s}{R_{1s}} \right) = J_1; \\ & \dots, \\ & \left(C_n \frac{d\varphi_n}{dt} + \frac{\Psi_n}{L_n} + \frac{\varphi_n}{R_n} \right) + \sum_{s=1}^{n-1} \left(C_{ns} \frac{d}{dt}(\varphi_n - \varphi_s) + \frac{\Psi_n - \Psi_s}{L_{ns}} + \frac{\varphi_n - \varphi_s}{R_{ns}} \right) = J_n. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Диференціальні рівняння руху (7) в такому вигляді також розв'язують задачу поділу електричної системи-аналога на типові елементарні ланки і водночас виявляють склад і архітектуру будови як кожної з цих ланок, так і електричної системи в цілому. Це зумовлено тим, що кожне з рівнянь (7) є першим законом Кірхгофа, складеним окремо для кожного (за виключенням нульового) з $n-1$ вузлів електричного кола. На рис. 2, б наведено фрагмент узагальненої електричної схеми, яка відповідає рівнянням руху (7).

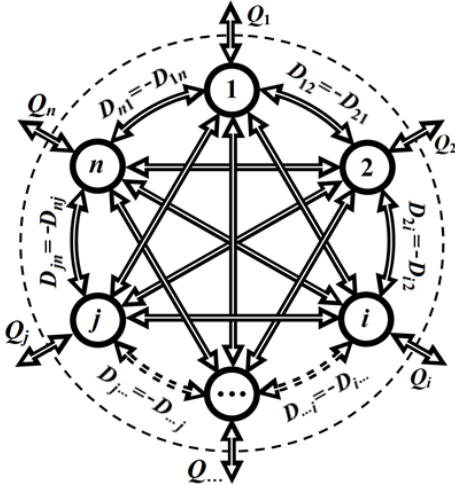


Рисунок 3 – Узагальнена структурна схема електричної динамічної системи з довільним числом ступенів вільності

Дослідження структури рівнянь (4)-(7) і аналіз топологічної будови узагальнених електричних схем-аналогів (рис. 2) дозволяють сформуванню узагальненої структурної схеми електричної системи (рис. 3), яка є аналогом неперервної у часі динамічної системи з довільним числом n ступенів вільності. В ній відображено загальну архітектуру і поле узагальнених сил, в якому перебуває або може перебувати кожна з типових елементарних ланок системи.

На основі удосконаленої теорії електродинамічних аналогій та узагальнених математичних моделей системи УПМІ (1)-(3) розроблено і побудовано дві (дуальні одна до одної) електричні моделі процесу первинного перетворення моменту інерції. Їх схеми за спрощених зв'язків наведено на рис. 4.

$$\left\{ \begin{aligned} (L_{OB} + L) \ddot{q}_1^{(e)} &= e_1 - \frac{\partial W_e}{\partial q_1^{(e)}} - \frac{\partial \Phi_e}{\partial i_1}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial W_M}{\partial i_s} &= e_s - \frac{\partial W_e}{\partial q_s^{(e)}} - \frac{\partial \Phi_e}{\partial i_s}, s = 2, \dots, n \end{aligned} \right. \quad \text{та} \quad \left\{ \begin{aligned} (C_{OB} + C) \ddot{\psi}_1 &= J_1 - \frac{\partial W_M}{\partial \psi_1} - \frac{\partial \Phi_e}{\partial \varphi_1}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial W_e}{\partial \varphi_s} &= J_s - \frac{\partial W_M}{\partial \psi_s} - \frac{\partial \Phi_e}{\partial \varphi_s}, s = 2, \dots, n, \end{aligned} \right.$$

де, відповідно (2), для першої електричної моделі аналогом моменту інерції J_{OB} об'єкта контролю слугує індуктивність L_{OB} , а для другої моделі – ємність C_{OB} .

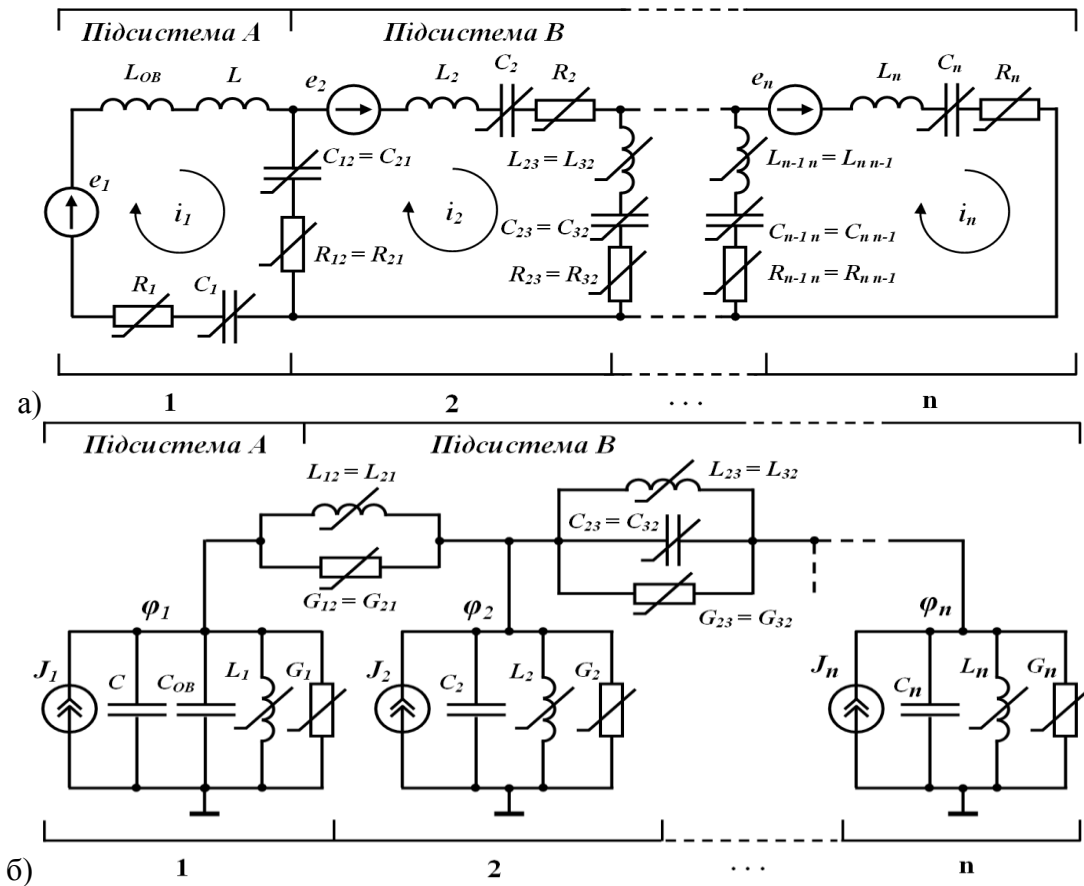
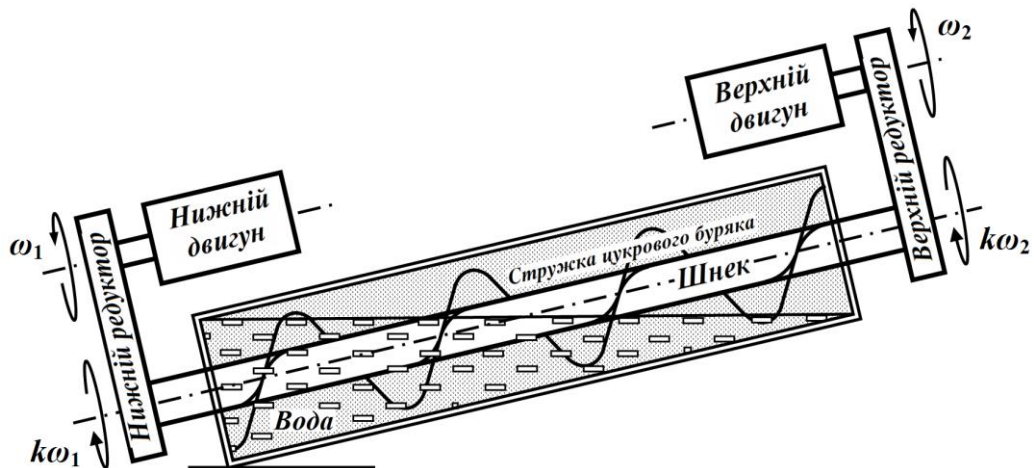


Рисунок 4 – Перша і друга електричні моделі системи УПМІ

Рівняння руху моделей представлено рівняннями Лагранжа-Максвелла:

Отримані результати дозволяють проводити теоретичні та експериментальні дослідження відомих і можливих методів і засобів контролю моменту інерції електротехнічних комплексів та систем з обертальною і складною формами руху, застосовуючи для цього всі аналітичні та експериментальні можливості апарату теоретичної і загальної електротехніки.

Для прикладу на рис. 5 наведено електричну модель механічної частини дифузійного апарату, який є однією з ланок переробки цукрових буряків на цукрових заводах і використовується для екстракції соку з бурякової стружки. Цю



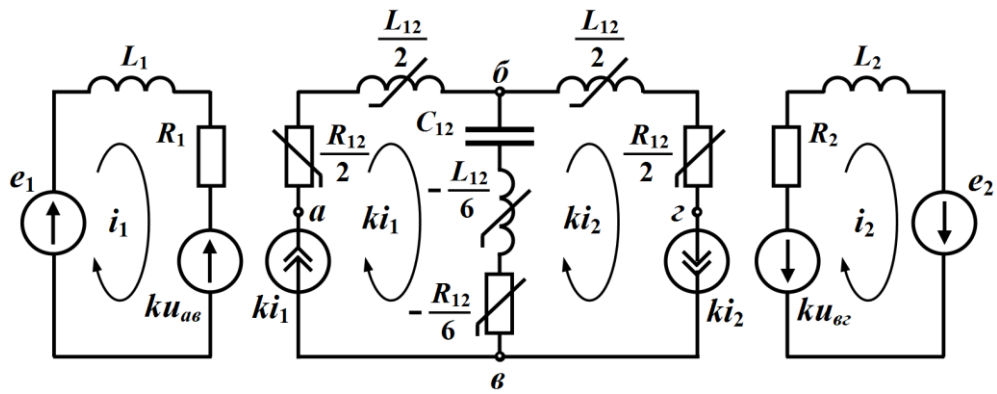


Рисунок 5 – Технологічна схема шнекового дифузійного апарата та його електричний аналог в першій системі електродинамічних аналогій

електричну модель, яку побудовано на основі узагальненої схеми-аналога в першій системі електродинамічних аналогій (рис. 2, а), розроблено для електричної ідентифікації засобу контролю моменту інерції шнекового дифузійного апарата і використано для визначення області стійкості (за Ляпуновим) електромеханічної системи у зв'язку з виявленою проблемою втрати стійкості системи за окремих умов внаслідок зміни приведенного моменту інерції.

Розроблені узагальнені схеми-аналоги можна використовувати і для електричної ідентифікації мікроелектромеханічних систем, як це було зроблено у відношенні ємнісного акселерометра ADXLxxx компанії Analog Devices (рис. 6) з метою уточнення інерційних властивостей сенсора.

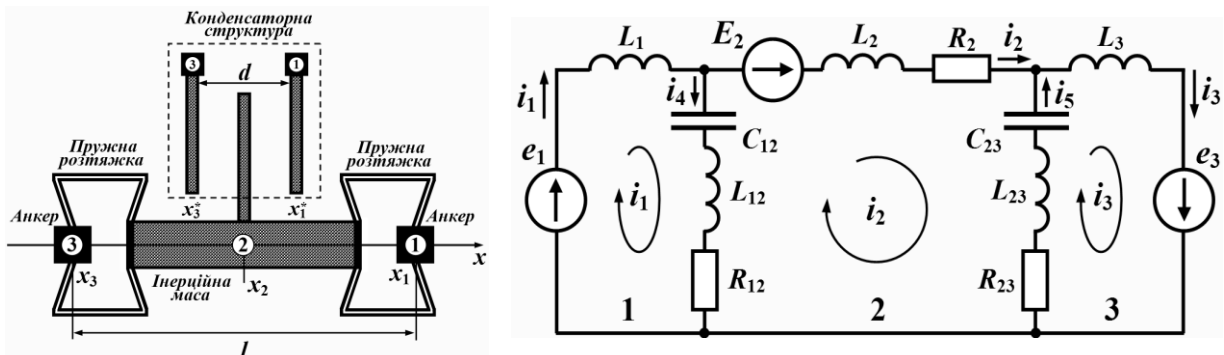


Рисунок 6 – Технологічна схема ланки мікроелектромеханічного акселерометра ADXLxxx (Analog Devices) і її електричний аналог (в першій системі аналогій)

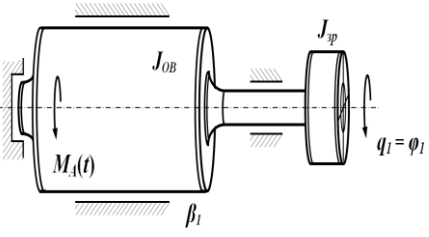
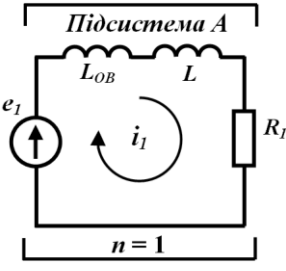
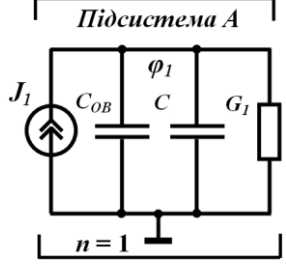
Узагальнені структурна і електричні схеми-аналоги з довільним числом ступенів вільності (рис. 3 і рис. 2) мають потужні потенційні можливості і здатні за схожої ідеалізації замінювати суто електричними системами електротехнічні (та інші) системи змішаної фізичної природи (механічної, електромагнітної, термодинамічної, гідро- та газодинамічної тощо) зі складною архітектурою.

В четвертому розділі на основі системи УПІМІ, її узагальнених математичної і електричних моделей розв'язано задачу формалізації математичної і електричної ідентифікації засобів контролю моменту інерції. У зв'язку з цим, розроблено і застосовано формалізований гіпотетико-дедуктивний метод, який на основі лагранжевого формалізму та дедуктивного підходу у спосіб варіації числа ступенів вільності дозволив за єдиними

правилами, сукупністю і послідовністю типових дій відобразити узагальнені математичну і електричні моделі системи УПМІ в адекватні математичні і електричні моделі систем окремих перетворювачів моменту інерції з наступним формуванням або рівняння перетворення під час розробки методу контролю, або побудови математичної моделі для засобу контролю моменту інерції.

Попередньо отримані результати закладають єдину теоретичну базу для вирішення практичної задачі – розробки нових методів і засобів неруйнівного контролю моменту інерції електротехнічних комплексів і систем, яку на цій основі і розв'язано. Зокрема розроблено, наведено і описано понад два десятки нових методів неруйнівного контролю, реалізованих на основі первинних перетворювачів 1-го (часовий метод, амплітудний метод, метод рівних інтервалів, фазовий метод та ін.), 2-го (частотний метод, резонансний метод, комплексний метод та ін.) і 3-го (метод двох резонансів) порядків. Всі нові методи систематизовано, як це показано на прикладі методів 1-го порядку в табл. 1.

Таблиця 1 – Нові методи контролю моменту інерції та їх систематизація на основі системи УПМІ

Первинні перетворювачі МІ з одним ступенем вільності		
Перетворювачі 1-го порядку		
Математична модель	1-ша електрична модель	2-га електрична модель
в рівняннях Лагранжа II роду: $(J_{OB} + J_{зр}) \ddot{q}_1 = M_A - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_1}$	в рівняннях Лагранжа-Максвелла: $(L_{OB} + L_{зр}) \ddot{q}_1^{(e)} = e_1 - \frac{\partial \Phi_e}{\partial \dot{q}_1^{(e)}}$	$(C_{OB} + C_{зр}) \ddot{\psi}_1 = J_1 - \frac{\partial \Phi_e}{\partial \dot{\psi}_1}$
лінеаризована: $(J_{OB} + J_{зр}) \dot{q}_1 + \beta_1 q_1 = M_A$	лінеаризована: $(L_{OB} + L_{зр}) \dot{q}_1^{(e)} + R_1 q_1^{(e)} = e_1$	лінеаризована: $(C_{OB} + C_{зр}) \dot{\psi}_1 + G_1 \psi_1 = J_1$
		
Нові методи контролю МІ 1-го порядку		
Назва методу		Рівняння перетворення
Методи самогальмування		
1. Часовий метод (запатентований) 2. ...		$J_{OB} = J_{зр} \frac{t_2}{t_1 - t_2}$
Методи вимушених коливань		
11. ... 12. Амплітудний метод		$J_{OB} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{M_m^2}{\omega_m^2} - \frac{M_n^2}{\omega_n^2}}$

В п'ятому розділі розглянуто і розв'язано дві взаємопов'язані задачі теорії контролю моменту інерції електротехнічних комплексів і систем. Перша з них – це розробка на основі системи УПМІ узагальненого засобу контролю моменту інерції, формування його структурної

схеми і побудова математичної моделі. Розв'язання цієї задачі є водночас і логічним продовженням розвитку розроблених попередніх теоретичних положень, і їх логічним завершенням.

Практична перевірка введених теоретичних засад стала змістом другої задачі, внаслідок розв'язування якої розроблено новий оптико-електронний засіб контролю моменту інерції і на основі системи УПМІ сформовано його структурну схему (рис. 8), побудовано електричну модель перетворювального каналу (рис. 9), а також математичні моделі як окремих ланок, так і системи в цілому

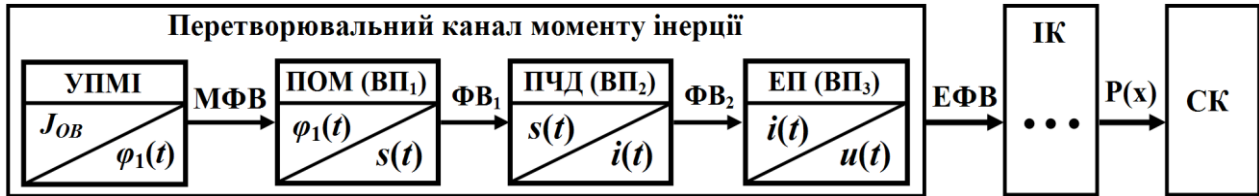


Рисунок 8 – Структурна схема оптико-електронного засобу контролю МІ

$$\left\{ \begin{aligned} (J_{OB} + J_{ном}) \ddot{\varphi}_1 &= M_A - \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_1} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}_1}, \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T_B}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T_B}{\partial q_s} = Q_s - \frac{\partial \Pi}{\partial q_s} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_s}, \quad s = 2, 3, \dots, n; \\ s(\varphi_1) &= 2 \left[L - \rho(\varphi_1) \right] \frac{\rho(\varphi_1) \rho'(\varphi_1)}{\rho^2(\varphi_1) - \rho'^2(\varphi_1)}, \quad \varphi_1 \in [0; 2\pi]; \\ i(s) &= k_2 \left(1 - e^{-\frac{1}{s(t-s)R_0C_0 - D/2} \int \frac{ds}{s}} \right) s; \quad u(i) = k_3 i; \quad u^*(u) = k_0 u_0 u; \\ N_J &= D_2 \left\{ D_1 \left\{ \pm \Delta U \sum_{j=0}^{\infty} 1 \left(\left| \int_{-\infty}^{+\infty} u^* \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(t - k\Delta t) dt \right| - j\Delta U \right) \right\} \right\}; \\ (x \in \{0,1\}) &\Rightarrow ((N_J > N_{min}) \wedge (N_J < N_{max})) \Leftrightarrow (x = 1); \\ P(x) &= (\forall x((x = 1) \Leftrightarrow (OK \text{ відповідає нормі}))). \end{aligned} \right.$$

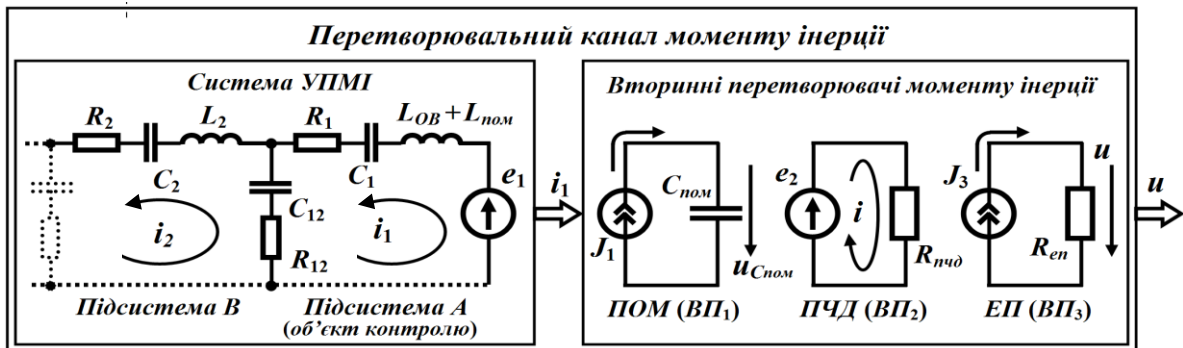


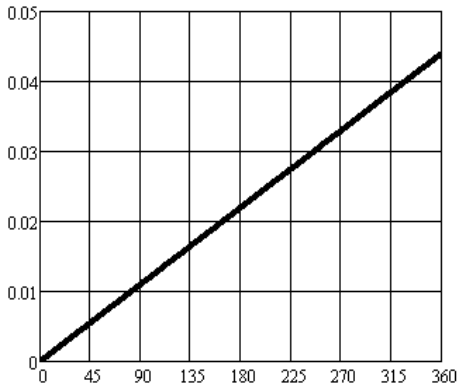
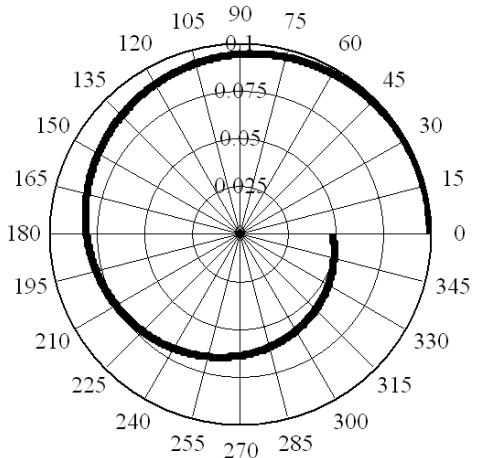
Рисунок 9 – Електрична модель перетворювального каналу лінеаризованого оптико-електронного засобу контролю моменту інерції

Під час розробки оптико-електронного засобу контролю моменту інерції отримано узагальнену математичну модель просторово-оптичної модуляції

$$s(\varphi_1) = 2[L - \rho(\varphi_1)] \frac{\rho(\varphi_1)\rho'(\varphi_1)}{\rho^2(\varphi_1) - \rho'^2(\varphi_1)}, \quad \varphi_1 \in [0; 2\pi], \quad (8)$$

яка дозволила розв'язати не тільки задачу аналізу просторово-оптичної модуляції на відомих видах кривих (Архімедова спіраль, спіралі Галілея та Фермі, логарифмічна спіраль), але вперше сформулювати і вирішити зворотню задачу – задачу синтезу, де у спосіб розв'язування диференціального рівняння (8) отримано таку форму кривої профілю просторово-оптичного модулятора (табл. 2), яка забезпечила лінійність статичної характеристики в широкому діапазоні перетворення моменту інерції. В (8) φ_1 – кутова координата чутливого елемента (об'єкта контролю), $\rho(\varphi_1)$ – функція кривої його профілю в полярній системі координат, $s(\varphi_1)$ – лінійна координата енергетичного центру світлової плями віддзеркаленого променя на поверхні позиційно-чутливого детектора.

Таблиця 2 – Синтез кривої з лінійною функцією перетворення

Функція перетворення $s(\varphi_1)$	Назва та графік синтезованої кривої $\rho(\varphi_1)$
<p style="text-align: center;">$s(\varphi_1) = a\varphi_1 + b,$ де $a = 0,007$ м, $b = 0$ м, $L = 0,17$ м.</p> 	<p style="text-align: center;"><u>Лінійна спіраль</u></p> 

На підставі проведених числових експериментів дано статистичну оцінку методичної точності вимірювання і достовірності контролю моменту інерції одного з відомих і ряду нових методів 1-го порядку. Порівняльний аналіз дозволив виявити перевагу нових методів за такими показниками як оцінка середньоарифметичного значення відносної похибки (від 0,15% до 0,41%), її стандартна і розширена невизначеності типу А (від 0,011% до 0,031% для розширеної невизначеності з коефіцієнтом охоплення $k_r = 2,008$ та ймовірністю охоплення $P = 0,95$), а також – достовірність контролю ($W = 0,996$) та помилки I-го ($\ll 0,074$) і II роду ($\sim 0,004$). За швидкодією нові методи не поступаються відомим.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано ряд актуальних і взаємопов'язаних науково-практичних задач, серед яких: задача дослідження процесу контролю моменту інерції електротехнічних комплексів та систем з великим і наперед невизначеним числом ступенів

вільності та задача удосконалення теорії електродинамічних аналогій з метою електричного моделювання останніх задля розробки на цій основі нових методів і засобів неруйнівного контролю моменту інерції електромеханічних систем з обертальною і складною формами руху.

1. Вперше виявлено принцип та розкрито закономірності топологічної будови електричних кіл, узагальнених за ознакою числа ступенів вільності системи. Розроблено їх структурну і електричні схеми, які є тотожними рівнянням Лагранжа-Максвелла і Лагранжа II роду. Це створює можливість розв'язування на основі єдиного формалізованого дедуктивного підходу задач електричного моделювання електротехнічних систем складної архітектури та змішаної фізичної природи (механічної, електромагнітної, термодинамічної тощо).

2. Запропоновано і розроблено нове поняття – узагальнений перетворювач моменту інерції (УПМІ). Математичний аналіз системи УПМІ дозволив:

- побудувати на основі варіаційних принципів аналітичної механіки узагальнену математичну модель процесу первинного перетворення моменту інерції в формі рівнянь Лагранжа II роду та виявити його загальні закономірності;

- звести математичні моделі первинного перетворення відомих і можливих засобів і методів контролю моменту інерції до ієрархічної єдності, утворивши багаторівневу структурну форму з ознаками підпорядкування об'єктів нижнього рівня об'єктам верхнього, з послідовним сходженням до самої системи УПМІ;

- розв'язати задачу математичної ідентифікації відомих і можливих засобів і методів контролю моменту інерції електротехнічних комплексів та систем.

3. На основі узагальнених електричних кіл-аналогів та системи УПМІ розроблено першу і другу узагальнені електричні моделі процесу первинного перетворення моменту інерції та отримані їх рівняння руху в формі рівнянь Лагранжа-Максвелла. Це дозволило:

- розв'язати задачу електричної ідентифікації і електричного моделювання відомих та можливих засобів і методів контролю моменту інерції електротехнічних комплексів і систем;

- сформулювати і розв'язати задачу формалізації процесів математичної і електричної ідентифікації засобів і методів контролю моменту інерції на основі лагранжевого формалізму та дедуктивного підходу шляхом варіації числа ступенів вільності системи;

- розробити і описати за допомогою єдиного формалізованого підходу ряд нових методів неруйнівного контролю моменту інерції 1-го, 2-го і 3-го порядків, які порівняно з відомими мають кращі показники якості контролю, зокрема – точність вимірювання моменту інерції та достовірність його контролю.

4. Вперше сформульовано і розв'язано задачу синтезу форми кривої профілю просторово-оптичного модулятора. Це дозволило удосконалити оптико-електронний засіб контролю моменту інерції і забезпечити лінійність статичної характеристики в широкому діапазоні перетворення моменту інерції.

5. На основі розроблених узагальнених електричних кіл-аналогів та на базі створеної узагальненої математичної моделі процесу просторово-оптичної модуляції вдосконалено сенсор віброзміщень та сенсор кутового положення ротора, які, як основні складові автоматизованих систем вібромоніторингу і контролю температури, на підставі договірних зобов'язань з Дністровською ГАЕС впроваджено у виробництво, що дозволило підвищити надійність роботи гідроагрегатів та гідрогенераторів ГА-1, ГА-2, ГА-3 Дністровської ГЕС-2.

6. Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі, що підвищує якість викладання дисциплін електротехнічного спрямування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ведміцький Ю. Г. Узагальнені електричні схеми-аналоги неперервних динамічних систем довільного порядку / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України. – 2010. – Випуск 2. – С. 63 – 69.

2. Ведміцький Ю. Г. Елементи теорії електродинамічного моделювання вимірювального перетворення і контролю моменту інерції. Проблематика, динамічні аналогії та принцип дуальності / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №5 (80). – С. 25 – 30.
3. Кухарчук В. В. Теорія динамічних аналогій в перетворенні моменту інерції тіл обертання та електричні моделі існуючих і можливих вимірювальних перетворювачів / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – №4 Ч. 1 Т. 1 (68). – С. 122 – 128.
4. Кухарчук В. В. Математична і електричні моделі перетворювача моменту інерції тіл обертання з двома ступенями вільності / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – №1(5). – С.8 –14.
5. Ведміцький Ю. Г. Математична і електричні моделі механічної частини шнекових дифузійних апаратів / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, А. М. Коваль // Вісник Інженерної академії України. – 2010. – Випуск 1. – С. 155 – 160.
6. Кухарчук В. В. Уточнені математична та електрична моделі мікромеханічних ємнісних акселерометрів / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, В. Г. Мадьяров // Вісник Інженерної академії України. – 2009. – Випуск 2. – С. 121 – 125.
7. Ведміцький Ю. Г. Рівняння Лагранжа як основа теорії перетворювачів моменту інерції // Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2005. – №3 (32). – С. 89 – 91.
8. Ведміцький Ю. Г. Узагальнений перетворювач моменту інерції / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Випуск 3/2008 (50) Частина 1. – С. 113 – 118.
9. Ведміцький Ю. Г. Узагальнений перетворювач моменту інерції та теореми взаємодії / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, В. В. Богачук // Вісник Інженерної академії України. – 2009. – Випуск 1. – С. 112 – 115.
10. Ведміцький Ю. Г. Загальні закономірності процесу вимірювального перетворення моменту інерції / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України. – 2009. – Випуск 2. – С. 67 – 71.
11. Vedmitskiy Yu. G. System of generalized converter of inertia moment, its characteristics and properties [Electronic publishing] / Yu. G. Vedmitskiy // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – №3. – РР. 1 – 8. – Access mode: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2009-3/2009-3_en.files/en/09ygvcap_en.pdf.
12. Ведміцький Ю. Г. Вимірювальне перетворення і контроль моменту інерції механічних та електромеханічних систем в процесі їх експлуатації. Теорія і практика / Ю. Г. Ведміцький // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – №4(113). – С. 47 – 55.
13. Ведміцький Ю. Г. До питання розв'язку проблеми систематизації математичних моделей і методів перетворення моменту інерції. Огляд та перспектива / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2006. – Випуск 3/2006 (38), Частина 1. – С. 130 – 133.
14. Ведміцький Ю. Г. Метод двох резонансів / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, В. В. Богачук // Вісник Інженерної академії України. – 2009. – Випуск 1. – С. 108 – 111.
15. Кухарчук В. В. Уточнені математичні і електричні моделі позиційно-чутливих детекторів / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький // Вісник Інженерної академії України. – 2010. – Випуск 2. – С. 116 – 120.
16. Кухарчук В. В. Архімедова спіраль в просторово-оптичному перетворенні кутової швидкості та моменту інерції тіл обертання / В. В. Кухарчук, М. Й. Білинська, Ю. Г. Ведміцький // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2005. – №1 (9). – С. 164 – 168.

17. Ведміцький Ю. Г. Узагальнена математична модель просторово-оптичного перетворення кутової швидкості та моменту інерції в задачах аналізу і синтезу / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №4 (73). – С. 7 – 14.
18. Ведміцький Ю. Г. Момент інерції деформованого циліндра / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №2(89). – С. 25 – 33.
19. Ведміцький Ю. Г. Вплив повільних деформацій на момент інерції механічних та електромеханічних систем / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2007. – Випуск 3/2007 (44) Частина 1. – С. 148 – 152.
20. Кухарчук В. В. Вимірювальний канал частоти з нормованими метрологічними характеристиками. Стационарний режим / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, В. Г. Мадьяров // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – №6. – С. 5 – 9.
21. Кухарчук В. В. Вимірювальний канал частоти з нормованими метрологічними характеристиками. Динамічний режим / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький, В. Г. Мадьяров // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – №1. – С. 5 – 8.
22. Ведміцький Ю. Г. Перетворювач моменту інерції з двома та більше ступенями вільності. Метод двох резонансів / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, В. В. Богачук // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2009) : II міжнар. наук.-практ. конф., 25-28 травня 2009 р. : тези доп. – Київ, 2009. – С. 292 – 294. – (К.: НАУ, 2009. – 366 с.).
23. Ведміцький Ю. Г. Узагальнений перетворювач моменту інерції. Теореми взаємодії / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, В. В. Богачук // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2009) : II міжнар. наук.-практ. конф., 25-28 травня 2009 р., Київ : тези доп., 2009. – С. 342-344. – К.: НАУ, 2009. – 366 с.
24. Кухарчук В. В. Нові методи вимірювання моменту інерції в задачах автоматичного управління технічними системами / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький // XIII міжн. конф. з автоматичного управління (Автоматика-2006), 25-28 вересня 2006 р. : тези доп. – Вінниця, 2006. – С. 173.
25. Кухарчук В. В. Нові методи вимірювання моменту інерції в задачах автоматичного управління технічними системами / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький // Матеріали XIII міжнар. конф. з автоматичного управління (Автоматика-2006), м. Вінниця, 25-28 вересня 2006 р. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – С. 162 – 166.
26. Ведміцький Ю. Г. Система узагальненого перетворювача моменту інерції, його ознаки та властивості [Електронний ресурс] / Ю. Г. Ведміцький // IX міжн. конф. “Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2008), 21-24 жовтня 2008 р. : тези доп. – Вінниця, 2008. – С. 2. – Режим доступу до збірки: http://www.vstu.edu.ua/mccs2008/materials/subsection_2.1.pdf.
27. Ведміцький Ю. Г. Математична і електричні моделі вимірювальних перетворювачів моменту інерції в узагальнених координатах / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // “Проблеми і перспективи енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств” : наук. семінар, 4-5 травня 2009 р. : тези доп. – Луцьк-Шацькі озера, ЛНТУ. – 2009. – С. 42 – 47.
28. Кухарчук В. В. Математична і електричні моделі перетворювача моменту інерції тіл обертання з двома ступенями вільності / В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький // VIII міжн. конф. “Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2005), 24-27 жовтня 2005 р. : тези доп. – Вінниця, 2005 р., С. 69. – (Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 305 с.).
29. Ведміцький Ю. Г. Узагальнені структурна схема та математична модель засобів контролю моменту інерції / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // I міжнар. наук. конф. пам’яті професора Володимира Поджаренка «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2011)», 18-20 жовтня 2011 р. : тези доп. – Вінниця, ВНТУ. – 2011. – С. 164.

30. Ведміцький Ю. Г. Аналіз просторово-оптичної модуляції на відомих видах кривих в перетворенні кутової швидкості та моменту інерції / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2007. – Вип. 1/2007 (1). – С. 32-35. – (Кременчук : КДПУ, 2007. – 72 с.).

31. Пат. 27658 Україна, МПК G 01 L 3/10. Спосіб вимірювання моменту інерції ротора електричних машин / Ведміцький Ю. Г., Кухарчук В. В.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – №u200707208; заявл. 26.06.07; опубл. 12.11.07, Бюл. №18. – 8 с.

АНОТАЦІЯ

Ведміцький Ю. Г. Контроль моменту інерції електротехнічних комплексів та систем на основі удосконаленої теорії електродинамічних аналогій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2012.

В дисертаційній роботі започатковано нові та розвинуто відомі основи двох теорій – теорії електродинамічних (електромеханічних) аналогій та теорії контролю моменту інерції. Вихідний базис теорії електродинамічних аналогій вперше доповнено узагальненими електричними колами-аналогами неперервних у часі динамічних систем з довільним числом ступенів вільності, які є рівносильними (тотожними) рівнянням Лагранжа II роду та рівнянням Лагранжа-Максвелла, а в вихідний базис теорії контролю введено принципово нове теоретичне поняття – узагальнений перетворювач моменту інерції (УПМІ). Завдяки поєднанню та розвитку цих базисних елементів частково розв’язана задача неруйнівного контролю моменту інерції електротехнічних установок, комплексів і систем з обертальною і складною формами руху, яка через значимість параметру має важливе значення як для процесу виробництва технічних систем, так і їх безаварійної та енергоефективної експлуатації в промисловості, енергетиці та на транспорті.

Ключові слова: узагальнені електричні схеми-аналоги, динамічні аналогії, контроль моменту інерції, узагальнений перетворювач моменту інерції, електротехнічні комплекси та системи, рівняння Лагранжа II роду та Лагранжа-Максвелла.

АННОТАЦИЯ

Ведмицкий Ю. Г. Контроль момента инерции электротехнических комплексов и систем на основе усовершенствованной теории электродинамических аналогий. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2012.

В диссертационной работе введены новые и развиты известные основы двух теорий – теории электродинамических (электромеханических) аналогий и теории контроля момента инерции. Исходный базис теории электродинамических аналогий впервые дополнен обобщенными электрическими цепями-аналогами непрерывных во времени динамических систем с произвольным числом степеней свободы, которые равносильны (тождественны) уравнениям Лагранжа II рода и уравнениям Лагранжа-Максвелла, а в исходный базис теории контроля момента инерции введено принципиально новое понятие – обобщенный преобразователь момента инерции (ОПМИ). Благодаря совмещению и развитию этих базисных элементов удалось частично решить задачу неразрушительного контроля момента инерции электротехнических комплексов и систем с вращательной и сложной формами движения, которая из-за значимости параметра имеет важное значение как для процесса

производства этих технических систем, так и их безаварийной и энергоэффективной эксплуатации в промышленности, энергетике и на транспорте.

Таким образом, в ходе исследований проведено обобщение процесса первичного преобразования момента инерции электротехнических комплексов и систем и на этой основе разработано его математическую модель в форме уравнений Лагранжа II рода, что позволило математически идентифицировать известные и возможные методы и средства контроля момента инерции. В то же время, введение и построение обобщенных электрических схем-аналогов непрерывных динамических систем с произвольным числом степеней свободы, а система ОПМИ именно такой и есть, создали возможность разработки двух дуальных электрических моделей первичного преобразования момента инерции на основе уравнений Лагранжа-Максвелла и электрической идентификации известных и возможных методов и средств контроля момента инерции. Одновременно с этим, созданные обобщенные математическая и электрические модели системы ОПМИ обнаружили возможность благодаря лагранжевому формализму сформулировать и решить задачу формализации математической и электрической идентификации методов и средств контроля момента инерции на основе гипотетико-дедуктивного подхода. Полученные результаты заложили единую теоретическую базу для последующего решения практической задачи – разработки новых методов и средств неразрушающего контроля момента инерции электротехнических комплексов и систем, которая на этих засадах и была частично решена. В частности создано и описано ряд новых методов контроля момента инерции 1-го, 2-го и 3-го порядков, а также усовершенствовано оптико-электронное средство контроля момента инерции, которые одновременно реализуют неразрушающую форму контроля и в сравнении с известными имеют более лучшие показатели качества контроля как за точностью измерения, так и достоверностью и быстродействием процедуры контроля.

Основные положения диссертационной работы прошли проверку во время их публичного обсуждения на международных и региональных научных конференциях, во время экспериментальных исследований, а также при выполнении ряда научно-исследовательских работ и внедрены в производство. В частности, на основе разработанных обобщенных электрических схем-аналогов и на базе полученной обобщенной математической модели процесса пространственно-оптической модуляции усовершенствованы сенсор виброперемещений и сенсор углового положения ротора, которые, как основные составляющие автоматизированных систем вибромониторинга и контроля температуры, на основании договорных обязательств с Днестровской ГАЭС внедрены в производство, что привело к повышению надежности работы гидроагрегатов и гидрогенераторов ГА-1, ГА-2, ГА-3 Днестровской ГЭС-2.

Материалы диссертации используются в учебном процессе на кафедре теоретической электротехники и электрических измерений Винницкого национального технического университета при преподавании ряда дисциплин.

Ключевые слова: обобщенные электрические схемы-аналоги, динамические аналогии, контроль момента инерции, обобщенный преобразователь момента инерции, электротехнические комплексы и системы, уравнения Лагранжа II рода и уравнения Лагранжа-Максвелла.

SUMMARY

Vedmitsky Y. G. Moment of inertia control of electrical complexes and systems based on advanced theory of electrodynamic analogies. Manuscript.

Candidate of technical sciences thesis, specialty 05.09.03 – Electrical complexes and systems. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2012.

Bases of two well-known theories, new and advanced, are given in the theses: electrodynamic theory of analogy and inertia control theory. Initial basis of electrodynamic theory of analogy is supplemented with generalized circuit-analogs of time-continuous dynamical systems with an arbitrary number of degrees of freedom which are identical to Lagrange equation and Lagrange-Maxwell equation. A completely new concept was introduced into the original basis of moment of inertia control theory – generalized converter of inertia (GCI). Due to a combination and development of these basic elements it was possible to partially solve the problem of non-destructive control of inertia in electrical complexes and systems with complex shapes and rotational motion, which due to the significance of the parameter are important both for the production process of technical systems and for their failure-free and energy efficient operation in industry, power sector and transportation.

Key words: generalized circuit-analogs, dynamic analogies, moment of inertia control, generalized converter of inertia, electrical complexes and systems, Lagrange and Lagrange-Maxwell equations.

Підписано до друку 14.03.2013 р. Формат 29.7x42 ¼

Наклад 120 прим. Зам. №2013-037

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59