**Інститут електродинаміки**

**Національної академії наук України**

**на здобуття премії Президента України**

**для молодих вчених 2015 року**

**РЕФЕРАТ:**

**Нові засоби підвищення якості керування електромеханічними об'єктами**

**Авторський колектив:**

1. **Бур’ян Сергій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” (м. Київ);**
2. **ДОРОШЕНКО Андрій Леонідович – аспірант, провідний інженер відділу перетворення та стабілізації електромагнітних процесів Інституту електродинаміки НАН України (м. Київ);**
3. **ТРЕТЯК Михайло Вікторович – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу стабілізації параметрів електромагнітної енергії Інституту електродинаміки НАН України (м. Київ);**
4. **ПРИЙМАК Максим Васильович – інженер першої категорії відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України (м. Київ).**

**Київ – 2015**

Електромеханічні системи автоматичного керування (ЕМСАК) є основою сучасної промисловості. Тому дослідження енергоефективних режимів роботи і методів керування електродвигуном та електроприводом в цілому є актуальним завданням. Сучасна промисловість потребує використання високодинамічних електроприводів на всіх етапах виробництва, що обумовлено необхідною високою якістю кінцевого продукту. Тому значні зусилля наукової спільноти приділяються питанням розвитку теорії та практичного застосування високоефективних електромеханічних систем (ЕМС) в усіх сферах діяльності людини. Широке розповсюдження ЕМС обумовлене тим, що 2/3 електричної енергії яка виробляється в світі перетворюється за допомогою різних видів електроприводів в енергію механічного руху робочих машин, механізмів, технологічних комплексів, тощо.

Комплексна проблема побудови енергоефективних ЕМСАК передбачає як оптимізацію функціонування всієї системи, так і її окремих складових. На сьогодні можуть бути визначені наступні основні шляхи підвищення енергоефективності ЕМСАК:

1. Підвищення енергоефективності керування координатами технологічних об'єктів, наприклад, для турбомеханізмів ресурс енергозбереження досягає 70%.

2. Рекуперація (накопичення) енергії в системах з інтенсивними розгонами і гальмуваннями. При живленні від мережі перетворювач повинен мати можливість рекуперації, тобто мати структуру з керованим вхідним випрямлячем або бути матричним. Така конфігурація також вирішує проблему синусоїдальності вхідних струмів з мінімізацією їх гармонічного складу і підтримки нульової реактивної потужності на вході. У транспортних системах з живленням від контактної мережі обов'язкова рекуперація в гальмівних режимах. В автономних об'єктах – накопичення енергії за допомогою системи KERS.

3. Якщо технологічно цілі керування досягаються при обмеженому діапазоні регулювання швидкості (± 20-30% від синхронної), то енергетично і економічно ефективним є використання векторно-керованої машини подвійного живлення з двонаправленим перетворювачем частоти в колі ротора. У такій системі: потужність перетворювача пропорційна частоті ковзання, тобто становить 20-30% від номінальної; у рушійному режимі потужність ковзання рекуперується в мережу; вхідний струм статора, що ввімкнений в мережу, синусоїдальний з малою кількістю вищих гармонік; коефіцієнт потужності статора близький до одиниці або регульований. У системах генерування енергії, наприклад вітрогенераторах, така система дозволяє здійснювати відбір потужності при змінній швидкості первинного двигуна (турбіни), що дає можливість підвищити віддачу турбіни по потужності до 10% і більше.

4. У асинхронному електроприводі тип керування суттєво впливає на енергетичну ефективність процесу електромеханічного перетворення енергії. Так, при векторному керуванні втрати в машині менші, ніж при частотному. В номінальному режимі різниця може становити 10-15% залежно від потужності двигуна. При зниженні швидкості різниця збільшується.

5. У системах з тривалим частковим навантаженням, наприклад в транспортних, використання енергоефективних алгоритмів з регулюванням потоку у функції навантаження (оптимізація активних втрат, максимізація співвідношення момент/струм) знижує втрати в машині в 2-3 рази при малих навантаженнях.

6. Враховуючи величезний потенціал підвищення енергоефективності електроприводів промислового та непромислового призначення існує усталена тенденція до переходу від електроприводу асинхронного до синхронного на основі високоенергетичних постійних магнітів.

Таким чином, в роботі вирішуються науково-технічні проблеми, пов’язані з оптимізацією та пошуком нових алгоритмів керування електромеханічними системами у складі складних технологічних об’єктів.

**Метою наукової роботи** є розробка та дослідження: складних електромеханічних систем багатоагрегатних насосних комплексів; енергоефективних методів керування машиною подвійного живлення з матричним перетворювачем частоти; підвищення ефективності електромобілів та транспортних засобів за рахунок розробки нових алгоритмів керування потоками енергії; підходів до проектування електричних машин з постійними магнітами у складі електромехатронних систем.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає у наступному:

* розроблено нові математичні моделі насосних комплексів для послідовного, паралельного та змішаного типу з’єднань агрегатів, що у порівнянні з відомими моделями враховують зміну у часі ККД кожного насосу у системі;
* на основі інтелектуальних нейронних мереж побудовані оцінювачі ККД насосів, які за даними давачів продуктивності та напору поточної робочої точки визначають ККД, базуючись на каталожних характеристиках агрегатів, за якими була навчена нейронна мережа;
* розроблено енергоефективні закони керування для послідовного, паралельного та змішаного типів з’єднань насосів, що забезпечують поступовий перехід робочої точки системи в окіл з максимальним ККД насосу за рахунок зміни частоти обертання привідного асинхронного двигуна;
* для послідовного та паралельного типу з’єднань насосів аналітично визначено умови, при яких робоча точка може потрапити в окіл максимального ККД, та показано межі стійкої роботи системи в залежності від поточної робочої точки, параметрів гідравлічної мережі та насосу;
* розроблено та досліджено алгоритми векторного керування машиною подвійного живлення, що забезпечили роздільне керування електромагнітним моментом та головним магнітним потоком електричної машини як по колу статора, так і по колу ротора;
* розроблено та досліджено алгоритми формування векторної ШІМ для перетворювачів частоти з безпосереднім перетворенням енергії і реалізовано на експериментальному зразку матричного перетворювача у складі електромеханічної системи з машиною подвійного живлення;
* розроблено нову узагальнюючу модель електромеханічної трансмісії з накопичувачем енергії, яка враховує електродинамічні процеси, що протікають при різних навантаженнях в системі енергоживлення транспортного засобу;
* розроблено імітаційні моделі послідовної та паралельної гібридних систем живлення транспортних засобів, що дозволяє проводити дослідження динамічних енергетичних процесів в широкому діапазоні експлуатаційних режимів та часу;
* розроблено імітаційну модель системи керування транспортним засобом з системою бортового повороту, що дає можливість досліджувати реакції транспортного засобу на керуючий орган;
* розроблено інноваційні системи збудження на основі постійних магнітів та феромагнітних концентраторів магнітних потоків спеціальної форми, що забезпечують значне підвищення величини щільності магнітної енергії в області енергоперетворення для електричних машин зубцево-пазової конфігурації;
* обґрунтовано принципи побудови магнітних систем електричних машин з постійними магнітами та зубцево-пазовою конфігурацією статора, що забезпечують максимальне значення середнього електромагнітного моменту шляхом використання концентраторів магнітного поля;
* розроблено способи мінімізації пульсацій електромагнітного моменту в зубцево-пазових структурах за рахунок оптимізації конфігурації магнітної системи та феромагнітних концентраторів магнітного потоку;
* розроблено математичну модель та експериментальний стенд електричної машини з постійними магнітами, що дозволило провести ряд теоретичних та практичних досліджень, розбіжність яких не перевищує допустимих при інженерних розрахунках.

**Практична значимість** одержаних результатів полягає в наступному:

* розроблені закони дозволять провести модернізацію існуючих багатоагрегатних насосних установок з метою підвищення їх енергоефективності;
* розроблені підходи до оцінювання технологічних координат насосу можуть використовуватися для широко поширених систем стабілізації напору чи витрат з метою зменшення капіталовкладень та підвищення надійності;
* розроблені математичні моделі відцентрових насосних установок з приводними асинхронними двигунами та оцінювачі координат системи можливо інкорпорувати в системи автоматизованого проектування систем водопостачання для підвищення точності розрахунків;
* порівняння можливих підходів до формування структури силової частини роторної ланки машини подвійного живлення показало, що двоступеневі матричні перетворювачі частоти можуть задовольнити вимоги, які пред'являються до перетворювачів частоти в якості джерел живлення як з боку ротора, так і з боку статора;
* експериментальні дослідження підтвердили, що розроблений алгоритм керування машиною подвійного живлення з матричним перетворювачем гарантує точне відстеження заданого моменту при одночасному забезпеченні одиничного коефіцієнта потужності статорної ланки;
* запропоновані технічні рішення по керуванню машини подвійного живлення на основі цифрового сигнального процесора придатні для практичного застосування в різних системах генерування електроенергії, які працюють на промислову мережу при змінній швидкості обертання валу генератора;
* застосування розробленої системи стабілізації швидкості руху електротранспортного засобу підвищує загальну ергономіку і знижує навантаження на оператора;
* розроблена система моніторингу та реєстрації електромагнітних, механічних і теплових параметрів автономного електротранспортного засобу дозволяє виконувати вимірювання під час руху;
* розроблено рекомендації щодо енергоефективного використання послідовної та паралельної гібридних трансмісій для транспортних засобів різних класів при різних режимах руху;
* результати досліджень знайшли застосування при розробці макетного зразка багатоцільової малогабаритної транспортної платформи з автономним електроприводом;
* розроблено математичні моделі, які реалізують вибір оптимальної геометрії магнітної системи електричних машин з постійними магнітами і зубцево-пазовим статором за одним із критеріїв: мінімуму маси, мінімуму вартості, максимуму електромагнітного моменту;
* розроблено рекомендації щодо удосконалення процесу проектування нових конструкцій електричних машин з постійними магнітами;
* теоретично та експериментально обґрунтовано вибір технічних рішень щодо розробки нових структур магнітних систем електричних машин з постійними магнітами і зубцево-пазовим статором зі зменшеним рівнем пульсацій електромагнітного моменту;
* нові технічні рішення (патенти на корисну модель №69243, № 94119, патент на винахід № 101885) використано при розробці принципово нового регулятора напруги силових трансформаторів під навантаженням (РПН), що дало змогу значно спростити конструкцію привода РПН в цілому та можливість дистанційного контролю стану виконання перемикання РПН за положенням, швидкістю, часом, струмом, напругою;
* нові технічні рішення, що отримані при дослідженні електричної машини з постійними магнітами, використано при створенні спеціального привода для двоколонного рентген-апарату.

**Інша інформація, що характеризує роботу**

Авторським колективом за темою роботи опубліковано 45 статей у науково – фахових виданнях і збірниках праць, матеріали роботи увійшли до складу 2-х кандидатських дисертацій. Результати досліджень та основні теоретичні положення по темі роботи доповідались на науково міжнародних конференціях та науково – технічних семінарах: XV міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу» 15-20 вересня 2008 року, Крим; XVII міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу» 20-25 вересня 2010 року, Крим; XVIIІ міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу» 15-19 вересня 2011 року, Одеса; VI міжнародній науково-технічній конференції «Керування режимами роботи об’єктів електричних та електромеханічних систем», 21-25 травня, 2013 р., Донецьк; XХ міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу» 16-21 вересня 2013 року, Крим; на факультетських конференціях та наукових семінарах кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ «КПІ» (2009-2014 р.); VIII, IX, Х, ХІ та ХІІ Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів 2010, 2011, 2012, 2013 та 2014 роках відповідно, Кременчук; ХІ-ій міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва» (Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, м. Харків, 2012 р.); ХХ-ій міжнародній науково-технічній конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» (Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», смт. Глеваха, 2012 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних систем» (СевНТУ м. Севастополь 2010, 2012 та 2013 рр.) та ін.

**Порівняння з кращими вітчизняними та зарубіжними аналогами**

Серед вітчизняних та зарубіжних виробників приводів регулювання напруги під навантаженням (РПН) силових трансформаторів можна виділити: ПАТ «Запорізький трансформаторний завод» (Україна) випускає приводи РПН марки ПДП-5С, ПДП-4У; компанія MR (Німеччина) випускає приводи ED100, ED200, ED200L; компанія HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO (Болгарія) – MZ4.1, MZ4.4; компанія ABB (Швейцарія) – BUE, BUE2; китайський привод РПН СМА7, СМА9.

В існуючих приводах РПН в якості привідного двигуна використовується асинхронна машина. За умовами функціонування привід РПН повинен забезпечувати поворот валу на певну кількість обертів. Це забезпечується за рахунок використання в приводі РПН додаткових електромеханічних пристроїв з великою кількістю взаємодіючих між собою деталей, що обладнані індикаторами, втулками, пружинами, защіпками, хвостовиками, зубцями. В процесі роботи всі ці елементи швидко спрацьовуються, внаслідок чого привід не забезпечує точності позиціювання під навантаженням та плавності обертання ротора двигуна. Наявність великої кількості взаємодіючих між собою деталей вимагає високої точності виконання та значних витрат при виготовленні такого приводу.

Відділ електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України розробив та виготовив принципово новий привод РПН на основі електромеханічного перетворювача з постійними магнітами (ЕП-ПМ). В новому приводі РПН вал ЕП-ПМ безпосередньо з'єднано з валом перемикача РПН, що дозволяє значно спростити конструкцію привода РПН в цілому. Система керування ЕП-ПМ містить зворотній зв'язок за положенням та швидкістю, що дозволяє підвищити точність відпрацювання завдання і тим самим підвищити надійність роботи привода РПН. Таким чином, принципово новий привод РПН на базі ЕП-ПМ не має аналогів ні в Україні ні за її межами.

**Впровадження наукової праці.**

Результати роботи включені в навчальний процес НТУУ «КПІ» в якості експериментальної лабораторної установки, що використовується при проведенні лабораторних робіт по дисциплінам «Електромеханічні системи автоматизації загальнопромислових механізмів» та «Електропостачання та енергозбереження в електромеханічних установках» при проведенні науково-дослідної роботи студентів та аспірантів кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу.

Дослідження за темою роботи виконувались в Інституті електродинаміки НАН України відповідно до планів НДР НАН України: "Дослідити засоби покращення якості керування матричними перетворювачами" (шифр 1.7.3.243, "Сигнал-2", затверджено постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 22.02.2005р., протокол №4, № ДР 0105U002313); "Розробка та дослідження засобів підвищення якості електроенергії на вході і виході напівпровідникових перетворювачів частоти, напруги і струму в умовах несиметрії та несинусоїдальності напруг мережі живлення" ("Модулятор", затверджено постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 06.10.2009р., протокол №13, № ДР 0109U006757); "Дослідити електромагнітні процеси та розробити алгоритми адаптивного керування системами з регуляторами напруги, струму, частоти і потужності, орієнтованими на застосування в нових електротехнологіях" ("База-П4", затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 23.01.2007р., протокол №1, № ДР 0107U001690); "Розробити принципи та критерії оптимального керування джерелами живлення електромагнітних сепараторів, спеціальних трансформаторів, індукторів в технологіях термічної обробки матеріалів, створити на їх основі системи адаптивного керування" ("База-П5", затверджено постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 6.10.2009р., протокол №13, № ДР 0109U006889); «Розвиток теорії побудови і розробка методів і засобів підвищення ефективності систем електропостачання автономних об’єктів з джерелами живлення обмеженої потужності і енергоємності» («Параметр-3», затверджено постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 23.01.2007р., протокол №1, № ДР 0107U002367); «Розвиток теоретичних основ створення високоефективних комбінованих систем електроживлення на основі акумуляторних батарей та мотор-генераторів для екологічно чистих транспортних засобів» («Параметр-4», затверджено постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 27.09.2011р., протокол №12, № ДР 0111U009253); «Дослідження електромагнітних процесів, розробка математичних моделей та методів розрахунку електромеханотронних перетворювачів енергії з постійними магнітами та концентрацією магнітного поля» («ДИСК-ПМ» №ДП0109U006756 на 2010-2014 рр); «Комплексне дослідження процесів, проектування і оптимізація магнітних систем і алгоритмів керування електромеханотронних перетворювачів енергії з постійними магнітами» («МАГНІТ» на 2015-2019 рр.); «Розробка засобів покращення технічних характеристик електроенергетичного обладнання на основі оптимізації електромеханічних, електромагнітних і теплових процесів» («Обєкт 2», затверджено постановою Бюро ВФТПЕ НАН України, протокол №14 від 28.09.2012).

Результати досліджень за темою роботи проходили в рамках держбюджетних тем на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електропроводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: «Основи теорії високоефективних систем автоматичного керування складними технологічними об’єктами з векторно-керованими асинхронними двигунами» (№2937, номер державної реєстрації 0106U002145); «Основи теорії адаптивних електромеханічних систем автоматичного керування з векторно-керованими електродвигунами змінного струму в умовах неповної інформації» (№2217, номер державної реєстрації 0109U001826).

**Економічна ефективність**

Результати науково дослідної роботи «Електромеханічні системи з підвищеною енергетичною ефективністю для складних технологічних об’єктів» можуть бути використані для досягнення економічного ефекту за рахунок зменшення енергоспоживання. Так, лише застосування електродвигунів з високим ККД, до яких відносять електричні машини з постійними магнітами, в порівнянні з серійним асинхронним електродвигуном серії 4А потужністю 110 кВт дає економію близько 55,36 тис. грн. в рік. Згідно довідки про економічну ефективність впровадження енергоефективних методів керування електромеханічними системами, створених при виконанні наукової роботи, в регульованих електроприводах турбомеханізмів сумарною потужності близько 1,2 МВт очікувана економія складатиме близько 1,25 млн. грн. в рік.

**Висновки**

Таким чином, результати наукової роботи «Електромеханічні системи з підвищеною енергетичною ефективністю для складних технологічних об’єктів» охоплюють теоретичні дослідження в області автоматичного керування електромеханічними системами промислових установок та електротранспорту, а також проектуванні нових конструкцій електричних машин з постійними магнітами у складі електромехатронних систем та знаходять практичне застосування в галузях водопостачання і водовідведення, альтернативних відновлювальних джерел електричної енергії та машинобудуванні. Наукова цінність та практична значимість результатів досліджень обговорювались на міжнародних науково – технічних конференціях та отримала високу оцінку.

**Підписи:**

Бур’ян С.О. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Дорошенко А.Л. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Третяк М.В. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Приймак М.В. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_