

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

КАЛЮЖНИЙ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.313 + 621.314

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ УЗГОДЖЕНОГО ОБЕРТАННЯ  
З ЖИВЛЕННЯМ ВІД СТРУМОПАРАМЕТРИЧНОГО  
ВЕНТИЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем в Донбаському державному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (м. Алчевськ)

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Шевченко Іван Степанович**,  
Донбаський державний технічний університет,  
професор кафедри автоматизованих  
електромеханічних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Садовой Олександр Валентинович**,  
Дніпродзержинський державний технічний  
університет, проректор з наукової роботи,  
завідувач кафедри електромеханіки

кандидат технічних наук, доцент  
**Худяєв Олександр Андрійович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
доцент кафедри автоматизованих  
електромеханічних систем

Захист відбудеться « 01 » листопада 2012 р. о 16<sup>25</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України за адресою: Україна (61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, електрокорпус).

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « 29 » вересня 2012 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О. В. Осичев

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Автоматизований електропривод (ЕП) міцно й повсюдно ввійшов в інфраструктуру сучасного суспільства та знайшов використання буквально у всіх сферах матеріального виробництва. У ряді випадків між окремими механізмами однієї й тієї ж машини, які вимагають узгодженого руху, але розташовані на значній відстані, важко здійснити механічний зв'язок через необхідність збільшення діаметру і довжини з'єднувальних валів, зростання числа опорних підшипників і т. і. Замість громіздкої механічної передачі може бути використана електрична передача для узгодженого обертання окремих механізмів. Системи узгодженого обертання багато-двигунних електроприводів будують, в основному, на базі асинхронних двигунів (АД) і, значно рідше, на базі двигунів постійного струму.

З розвитком силової перетворювальної техніки почали застосовуватися взаємозв'язані електромеханічні системи (ЕМС) з індивідуальним живленням двигунів і зворотними зв'язками за швидкістю та іншими координатами приводів. Індивідуальне живлення двигунів, по-перше, погіршує масо-габаритні показники установки та різко знижує надійність. По-друге, в таких системах регулювання швидкості електроприводів здійснюють, як правило, у функції підтримання сталості вихідної потужності окремо взятого перетворювача. При цьому виникають на валу кожного, індивідуально керованого, двигуна чималі синхронізуючі моменти, які при обмеженій швидкодії контурів регулювання швидкості (через високі значення приведених моментів інерції) можуть призводити навіть до додаткового зносу механічного обладнання, наприклад, зубців передач, реборд коліс і головок рейок підкранових колій мостових і козлових кранів. Вирішення вказаних задач визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем в Донбаському державному технічному університеті (ДонДТУ) у рамках держбюджетних НДР МОНмолодьспорту України на тему «Розробка високоефективних джерел струму, електромагнітно сумісних з мережею та навантаженням, для електроприводів і систем живлення індукційних установок» (№ ДР 0107U001477) та «Дослідження та розробка перетворювачів електричної енергії на базі параметричних джерел струму» (№ ДР 0108U001536), в яких здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення експлуатаційних і енергетичних показників взаємозв'язаних електромеханічних систем узгодженого обертання змінного й постійного струму шляхом використання нових властивостей приводу при живленні двигунів від джерел струму.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

1. Розробити нові перспективні структури взаємозв'язаних ЕМС узгодженого обертання змінного і постійного струму на базі *струмопараметричного вентильного перетворювача (СПВП)*.

2. Провести теоретичні та експериментальні дослідження енергетичних режимів і електромагнітних процесів в автоматизованому електроприводі узгодженого обертання, а також безпосередньо в *СПВП*.

3. Розробити методикку розрахунку й вибору елементів перетворювачів, що живлять електроприводи узгодженого обертання змінного і постійного струму.

*Об'єктом досліджень* є процеси електромеханічного перетворення енергії у взаємозв'язаному ЕП узгодженого обертання постійного й змінного струму.

*Предмет досліджень* – регульовальні і енергетичні характеристики у взаємозв'язаному електроприводі (ВЗЕП) на базі джерел струму та особливості взаємодії електромагнітних і механічних процесів таких електроприводів.

**Методи дослідження.** При вирішенні поставлених завдань використовувалися загальні методи математичного аналізу (формування математичних моделей елементів та електроприводу в цілому), матричного (опис електромагнітних процесів в перетворювачах) та операційного (аналіз динамічних властивостей дводвигунного електроприводу з пружними зв'язками) числення, методи теорії електромеханічного перетворення енергії (побудова кругових діаграм, розрахунок механічних, енергетичних і регульовальних характеристик), математичне і фізичне моделювання (перевірка результатів досліджень).

**Наукова новизна одержаних результатів.** Проведені в дисертаційній роботі дослідження базуються на наукових положеннях, що робота приводу стає мало чутливою до збурюючих факторів (люфти, пружні зв'язки, тощо) при застосуванні "струмової" системи живлення якоря (ротора), яка дозволяє розірвати внутрішній негативний зворотний зв'язок щодо ЕРС якоря (ротора). Це дозволяє управляти електромагнітним моментом двигуна поза зв'язком його зі швидкістю.

Новизна одержаних наукових результатів полягає в наступному:

1. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що для ВЗЕП узгодженого обертання необхідно мати систему живлення від джерела струму (ДС). "Струмова" система живлення декількох двигунів, з'єднаних паралельно, різко послаблює обмін енергіями безпосередньо між машинами, а підсилює перерозподіл між машинами енергії перетворювача та мережі. Тому живлення якорів двигунів постійного струму ВЗЕП рекомендується здійснювати від одного *СПВП*, а для ВЗЕП узгодженого обертання змінного струму на базі АД з фазним ротором - від перетворювача *струмопараметричного асинхронно-вентильного каскаду (СПАВК)*.

2. Одержала подальший розвиток теорія електромеханічного перетворення енергії в ЕП, що живляться від ДС – отримані характеристики, що дозволяють дати якісні й кількісні оцінки струмів і напруг на елементах силової схеми таких ЕП.

3. Вперше отримані рівняння механічних характеристик ВЗЕП постійного струму на базі ДС. Удосконалено метод кругових діаграм для розрахунку механічних характеристик електроприводу за системою *СПАВК*.

4. Вперше доведено, що АД в системі *СПАВК* здатний працювати як машина подвійного живлення. При цьому на ділянці стабілізації моменту він працює в режимі *синхронізованого асинхронного електродвигуна*. Ділянка механічної характеристики, де забезпечується синхронізація обертання ротора двигуна з магнітним полем статора, може бути використана для узгодження обертання декількох двигунів. Паралельне вмикання роторних обмоток АД дозволяє одержувати високий рівень синхронізуючого моменту незалежно від швидкості ротора.

5. Аналітично доведено та підтверджено моделюванням значне підвищення частотних властивостей по каналу збурення взаємозв'язаних (електрично і механічно)

ЕП з "струмовою" системою живлення, що дозволяє подавити коливальні процеси і знизити пружні моменти в передачах, які об'єднують вали двигунів. Це є основним чинником, що зменшує знос механічного обладнання машин і механізмів.

**Практичне значення одержаних результатів.** В різних галузях промисловості матеріали дисертаційної роботи можуть бути використані для побудови взаємозв'язаних багатодвигунних ЕМС узгодженого обертання змінного й постійного струмів, що мають підвищені динамічні й енергетичні показники. Результати наукових досліджень, синтезовані алгоритми та структури, оригінальні рішення функціональних і принципівих схем, моделі багатодвигунних ВЗЕП рекомендуються при проектуванні систем управління і силових схем перетворювачів, призначених для живлення різних ЕМС узгодженого обертання, наприклад, в галузі важкої промисловості, для ЕП механізмів переміщення мостових, козлових і порталних кранів.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в 2004 р. при реконструкції ЕП переміщення мостового крана № 15, що працює на ділянці завантаження у вагони готових листів прокатного стану «3000» ПАТ "Алчевський металургійний комбінат". Двигунний ЕП, розроблений відповідно до патенту на винахід [15], працює по сьогоднішній день в умовах безперервного металургійного виробництва.

Для зазначеного металургійного комбінату також розроблений і виготовлений в 2008 р. перетворювач для реконструкції ЕП механізму переміщення козлового рудно-грейферного крана № 7 доменного цеху (власна вага крана без вантажу 834 т, проліт 87 м, на ремонтній та вільній опорах крана встановлено по чотири електродвигуни потужністю 18 кВт кожний). При реконструкції ЕП цього крана повністю виключені 8 роторних панелей із загальною кількістю релейно-контакторної апаратури - більше 4-х десятків.

Розроблено та впроваджено у виробництво перетворювач для почергового рівноприскореного (плавного) пуску асинхронного ЕП трьох молоткових дробарок типу «ДМ 1500 x 1500», встановлених в вуглепідготовчому цеху ВПЦ-2 ПАТ "Алчевський коксохімічний завод" і забезпечених двигунами з фазним ротором типу АОК 99/45-6, 630 кВт, 1000<sup>об/хв</sup>, статор 6,3 кВ, 74 А, ротор 840 В, 460 А. Перетворювач виконаний відповідно до патенту на винахід [19] дозволяє, поряд із забезпеченням плавного пуску дробарок, підвищувати коефіцієнт потужності асинхронних електродвигунів при роботі в усталеному режимі.

Методика розрахунків розроблених в дисертаційній роботі струмопараметричних перетворювачів для живлення взаємозв'язаних ЕП використовується в навчальному процесі ДонДТУ при вивченні студентами курсів «Системи управління електроприводами», «Електропривод та електрообладнання гірничих машин», а також у курсовому і дипломному проектуванні.

**Особистий внесок здобувача.** Здобувач самостійно виконав аналіз існуючих підходів при побудові взаємозв'язаних електроприводів, сформулював наукові положення і результати, виконав теоретичну частину роботи, брав безпосередню участь у проведенні експериментальних досліджень в лабораторіях ДонДТУ, а також на об'єктах замовника при впровадженні дослідно-промислових зразків взаємозв'язаних кранових електроприводів. Постановка задач досліджень і аналіз отриманих результатів виконувалися здобувачем спільно з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на щорічних семінарах наукової ради НАН України "Динаміка автоматизованих електромеханічних систем", що діють при кафедрі автоматизованих електромеханічних систем ДонДТУ (м. Алчевськ, 2007 – 2011 р.р.), а також на Міжнародних науково-технічних конференціях: "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика" (смт. Миколаївка, 2008 р. і м. Алушта, 2009 – 2010 р.р.); "Електромеханічні системи. Методи моделювання і оптимізації" (м. Кременчук, 2008 – 2009 р.р.); "Проблеми енергозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика" (м. Кременчук, 2010 р.). В повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на науковому семінарі кафедри електромеханіки Дніпродзержинського ДТУ (м. Дніпродзержинськ, 2011 р.).

**Публікації.** Результати дисертації викладені в 22 наукових працях, у тому числі 14 статей у наукових фахових виданнях України та Росії, 8 патентів України.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації становить 272 сторінки, з них: 45 рисунків по тексту; 69 рисунків та 2 таблиці на 43 окремих сторінках; 1 таблиця по тексту; 110 найменувань використаних джерел на 12 сторінках; 7 додатків на 54 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовано мету і задачі наукового дослідження, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладена наукова новизна, практичне значення і реалізація результатів дисертаційних досліджень, наведено дані про їх апробації та впровадження у виробництво.

В першому розділі проведено аналітичний огляд існуючих напрямків розвитку взаємозв'язаних ЕМС змінного і постійного струму відповідно до хронології їх розробки. Показані, з посиланнями на джерела, переваги і недоліки кожного з напрямів й сфери застосування в промисловості. Окремо відзначено, що для успішного функціонування взаємозв'язаних через механічне обладнання ЕМС, необхідно будувати такі системи, як самоналагоджувальні. З теорії автоматичного управління відомо, що зазначені системи можуть бути побудовані при одночасній наявності наступних двох факторів: перше - при високих частотних властивостях окремих ЕП щодо зовнішніх і внутрішніх збурень та друге - при дуже малих коефіцієнтах електромеханічного зв'язку між ними. Такими властивостями наділені системи ЕП, що живляться від джерел струму (ДС). Виходячи з цього, була поставлена мета і задачі наукового дослідження.

В другому розділі проведено теоретичні дослідження особливостей, статичних і динамічних властивостей параметричних джерел струму (ПДС) при різному навантаженні. Особливий клас ПДС складають електромагнітні перетворювачі напруги змінного струму незмінної амплітуди і частоти в стабільний змінний струм тієї ж частоти з використанням явища резонансу напруги або струму. Це так звані індуктивно-ємнісні перетворювачі (ІСП), які мають досить істотну перевагу – коефіцієнт потужності близький до одиниці при добрих масогабаритних показниках та високій надійності.

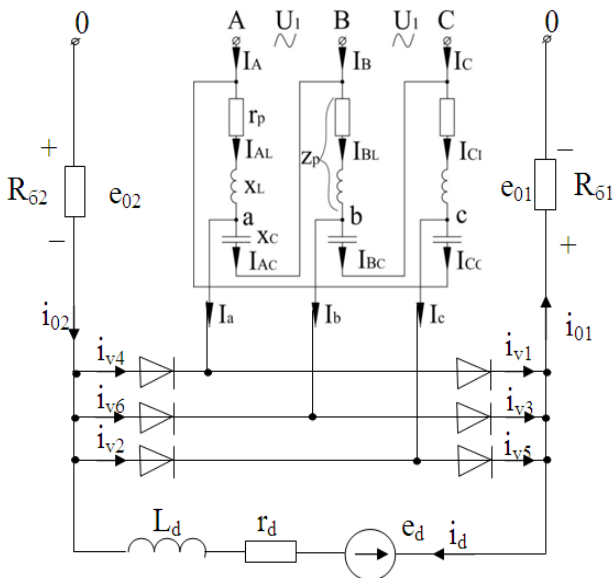


Рис. 1. Принципова схема джерела струму на базі ІЄП

енергії коливаль. Природно, що інтенсивність загасання перехідної функції пропорційна величині потужності, яка відбирається. Неідеальність реактора, з одного боку, забезпечує загасання коливаль вихідного струму, але з іншого - появу статичної похибки. Розлад резонансу в ІЄП через зміни параметрів  $x_L, x_C$  викликає появу статичної похибки в стабілізації вихідного струму. На якість перехідних процесів 10% зміна їх значень, практично, не впливає. Те ж відзначається і при "плаванні" частоти мережі живлення в таких же межах. При активному навантаженні, або роботі на якор двигуна, всі перехідні процеси за збуренням закінчуються протягом одного періоду напруги, вхідні струми при цьому співпадають з відповідними мережевими напругами, тобто ДС на базі ІЄП електромагнітно сумісне з мережею. При активно-індуктивному навантаженні всі процеси закінчуються протягом 1,5 – 2 періодів, а ІЄП генерує в мережу реактивну потужність ємнісного характеру. Далі в роботі джерело струму виду ІЄП, що виконане на пасивних елементах з протилежним характером реактивних провідностей, має більш загальну назву – *параметричне джерело струму (ПДС)*, а перетворювач з його використанням – *струмопараметричний вентильний перетворювач (СПВП)*.

СПВП є пристроєм, заснованим на спільному використанні ПДС і напівпровідникових силових вентильних комплектів (ВК). Завдяки застосуванню ПДС у складі перетворювача, стабілізувати випрямлений струм можна не за рахунок дії на кут управління вентилів, а за рахунок природних електромагнітних процесів, що протікають в електричних мережах із зворотно протилежним характером реактивних провідностей. Це дає можливість отримати: постійний високий коефіцієнт зсуву, близький до одиниці у всьому діапазоні регулювання; порівняно малі спотворення споживаного струму з мережі (в гірших режимах діюче значення струму перевищує першу гармоніку всього на 5% за рахунок непарних канонічних гармонік); сприятливі умови роботи вентилів (відсутність стрибків струму і напруги, малі значення їх похідних); можливість спільної роботи групи СПВП на загальне навантаження.

Основна (базова) схема СПВП для ЕП постійного струму представлена на рис. 2. На схемі прийняті позначення: ПДС – параметричне джерело струму;  $T_p$  –

Серед безлічі схемних рішень ІЄП найбільше застосування отримала схема Штейнметца (рис. 1). В роботі показано, що джерело постійного струму на її базі з достатньою точністю підтримує значення вихідного струму, особливо, якщо врахувати можливість регулювання та стабілізації на різних рівнях цього струму шунтуванням навантаження швидкодіючим ключовим елементом, наприклад, IGBT-транзистором, керованим релейним регулятором струму або широтно-імпульсним модулятором.

Динамічні властивості ІЄП досліджені за перехідними характеристиками при використанні схемо-технічного моделювання пакета *MATLAB*. При к.з. навантаження ідеальний ІЄП є консервативною ланкою, оскільки відсутнє поглинання

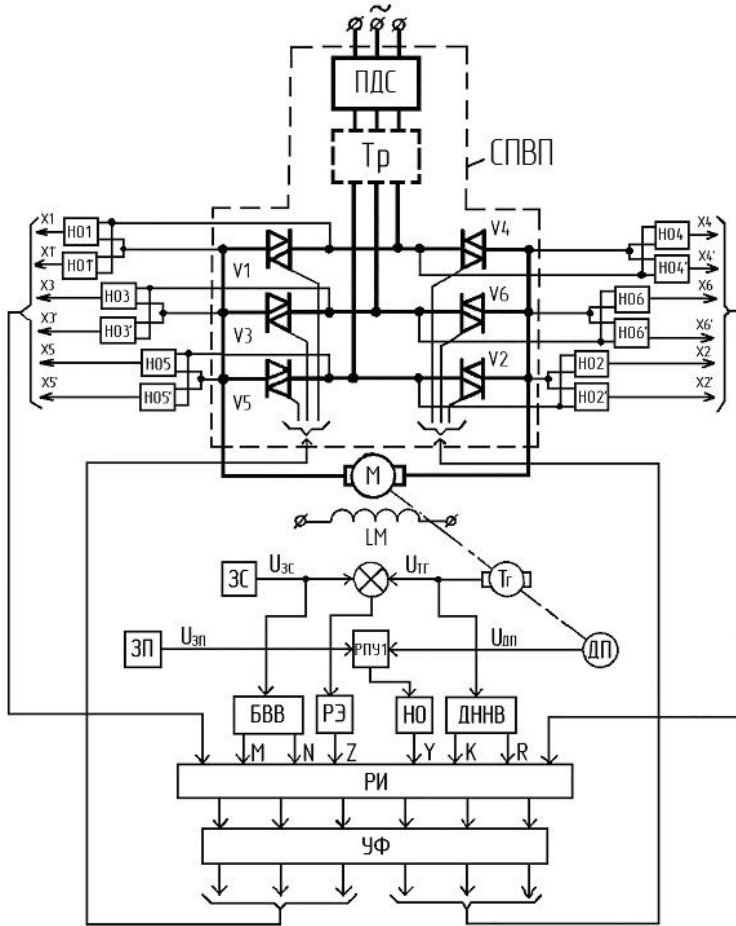


Рис. 2. Структурна схема ЕП з живленням від СПВП

Дослідження енергетичних режимів роботи ЕП виконано при живленні його від однофазного реверсивного СПВП (рис. 3), як найбільш показові. За допомогою еквівалентної схеми заміщення, складеної при певних припущеннях для половини періоду напруги живлення, були виведені рівняння для струмів і напруг, що діють на різних елементах схеми, залежно від ЕРС якоря ( $E_0$ ) машини при наступних чотирьох режимах роботи:

- режим навантаження – машина постійного струму, працює двигуном, коли  $E_0$  спрямована зустрічно струму якоря ( $i_a$ );
- режим короткого замикання ПДС – струм в якорі відсутній ( $i_a = 0$ ), а тому електромагнітний момент двигуна дорівнює нулю;
- режим противмикання – для машини постійного струму гальмівний режим, при якому струм якоря ( $i_a$ ) реверсують вентиляною схемою і він співпадає за напрямком з  $E_0$ ;

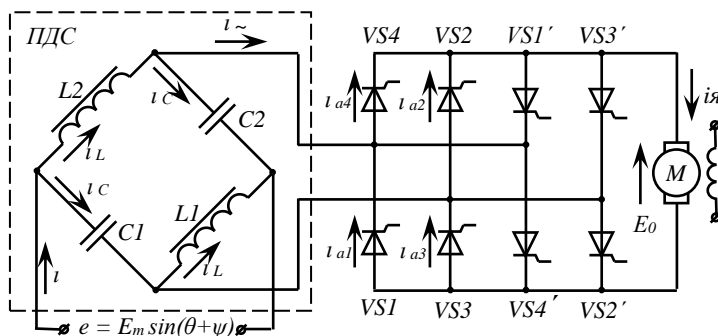


Рис. 3. Принципова схема ЕП з однофазним СПВП

трансформатор;  $HO1 \div HO6$  - нуль-органи анодної напруги вентилів;  $ЗС$  – задатчик швидкості;  $ТГ$  – тахогенератор;  $ЗП$  - задатчик положення;  $ДП$  - датчик положення;  $РПУ$  - регульований пороговий пристрій;  $БВВ$  - блок вводу-виводу;  $РЭ$  - релейний елемент;  $ДННВ$  - датчик наявності та напрямку обертання двигуна;  $РИ$  - розподільник імпульсів;  $УФ$  - блоки формування імпульсів управління тиристорами;  $LM$  - обмотка збудження.

В дисертації теоретично обгрунтовано можливість роботи СПВП на навантаження, що містить активний елемент – ЕРС, тобто на якір електродвигуна постійного струму; визначені енергетичні режими роботи СПВП та ЕП; розраховані інтегральні характеристики струмів і напруг для навантаження (двигуна), вентиляно-тиристорної схеми перетворювача та мостового ПДС в залежності від величини ЕРС якоря.

при якому струм якоря ( $i_a$ ) реверсують вентиляною схемою і він співпадає за напрямком з  $E_0$ ;

– інверторний режим роботи СПВП – режим рекуперативного гальмування машини, при якому струм якоря також співпадає за напрямком з  $E_0$ , але управління вентилями СПВП здійснюється так, щоб не порушувалася умова їх при-



родної комутації та виключалося, тим самим, коротке замикання ПДС і якоря машини.

Кінцеві формули у відносних одиницях ( $U_{\bar{o}} = E$ ;  $R_{\bar{o}} = \omega_0 L$ ;  $I_{\bar{o}} = I_{\text{я}}$ ) для напруг і струмів при роботі ЕП з СПВП в режимі навантаження мають вид:

$$u_L^* = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[ \cos \nu_0 - \left( \frac{\pi^2}{8} R_{\text{я}}^* + \frac{\pi^3}{16\sqrt{2}} E_0^* - \frac{\pi}{2} + \nu_0 \right) \sin \nu_0 \right]; \quad (1) \quad u_C^* = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[ \left( \frac{\pi^2}{8} R_{\text{я}}^* + \frac{\pi^3}{16\sqrt{2}} E_0^* - \frac{\pi}{2} + \nu_0 \right) \sin \nu_0 + \cos \nu_0 \right]; \quad (2)$$

$$u_{\sim}^* = \sqrt{2} \left( \frac{\pi^2}{8} R_{\text{я}}^* + \frac{\pi^3}{16\sqrt{2}} E_0^* - \frac{\pi}{2} + \nu_0 \right) \sin \nu_0; \quad (3) \quad i_L^* = \frac{2}{\pi} \left[ \left( \frac{\pi^2}{8} R_{\text{я}}^* + \frac{\pi^3}{16\sqrt{2}} E_0^* - \frac{\pi}{2} + \nu_0 \right) \cos \nu_0 + \frac{\pi}{2} \right]; \quad (4)$$

$$i_C^* = \frac{2 \cos \nu_0}{\pi} \left( \frac{\pi^2}{8} R_{\text{я}}^* + \frac{\pi^3}{16\sqrt{2}} E_0^* - \frac{\pi}{2} + \nu_0 \right); \quad (5) \quad i^* = \frac{4}{\pi} \left[ \left( \frac{\pi^2}{8} R_{\text{я}}^* + \frac{\pi^3}{16\sqrt{2}} E_0^* - \frac{\pi}{2} + \nu_0 \right) \cos \nu_0 + \frac{\pi}{4} \right]. \quad (6)$$

З використанням інтегралу для обчислення діючого значення величин, розраховані інтегральні характеристики (рис. 4) напруг і струмів на елементах приводу в залежності від ЕРС якоря, а при незмінному струмі збудження двигуна – від швидкості обертання. Аналогічне здійснено для трьох інших зазначених вище режимів роботи ЕП.

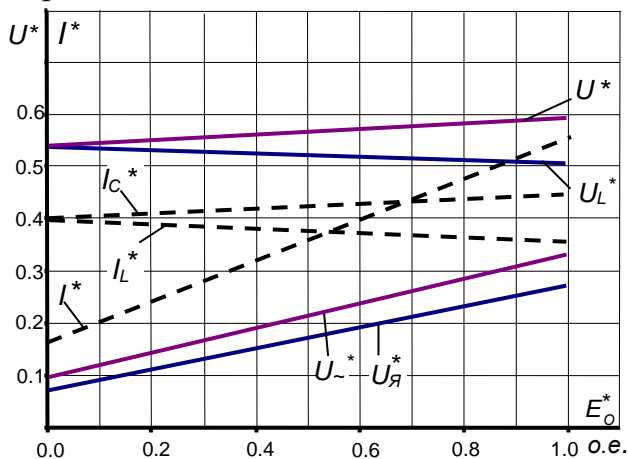


Рис. 4. Інтегральні характеристики для режиму навантаження ЕП

Встановлена оригінальна особливість гальмівного режиму противмикання при живленні ЕП постійного струму від СПВП. У цьому режимі СПВП споживає з мережі стільки енергії, скільки її бракує машині, щоб забезпечити гальмування зі струмом в якорі, рівним струму двигунного режиму при однаковій динаміці розгону та гальмування. Указаний режим гальмування є більш економічним, ніж при живленні від мережі напруги.

Відзначено, що режим противмикання може бути нормальним, якщо ЕРС якоря машини менше суми падінь напруг в якорному ланцюзі і у вентилях перетворювача, або аварійним - якщо ЕРС більше суми зазначених напруг. В останньому випадку, ПДС починає працювати в режимі к.з., а машина - переходить в режим динамічного гальмування, коли для обмеження струму якоря необхідно вводити в якорний ланцюг додатковий опір.

Встановлено, що робота ЕП в режимі рекуперативного гальмування двигуна при інверторному режимі СПВП має принципові відмінності від режиму інвертування традиційного ТП з живленням від джерела напруги. Відмінності полягають у тому, що протягом кожного півперіоду напруги мережі живлення в СПВП при комутації тиристорів обов'язково існує двонаправлене перетікання енергії: від машини в мережу змінної напруги та назад. Запропоновано алгоритм управління вентилями для забезпечення інверторного режиму й отриманні регульовальні та зовнішні характеристики при різних кутах інвертування  $\beta$  перетворювача.

Для ЕП змінного струму з живленням від ПДС в роботі пропонується використання ЕП за системою *струмопараметричний асинхронно-вентильний каскад (СПАВК)*, що є поєднанням СПВП, виконаного за найпростішою схемою з некерованим випрямлячем на виході ПДС, і традиційного АВК [3, 18, 22]. На рис. 5,а представлена структурна однолінійна схема ЕП за системою СПАВК. При роботі машини змінного струму в системі СПАВК, роторна обмотка машини отримує живлення від нерегульованого СПВП (ПДС з ВК2 на виході), який здійснює постачання трьох її фаз стабілізованим постійним струмом  $I_d$ , комутованим діодами роторного вентильного комплекту ВК1 у функції кута повороту обмотки ротора. При цьому, ВК1 працює в режимі інвертора, веденого машиною, і формує струми фаз ротора. Роторний вентильний комплект складається з некерованих вентилів – діодів, комутація яких може вестися тільки за допомогою роторної ЕРС машини і довільно задаватися не може. Орієнтацію вектора індукції ротора з вектором індукції статора асинхронна машина виконує самостійно, автоматично підлаштовуючи частоту комутації вентилів (ділянка *d-c* на рис. 5,б). При виході на природну механічну характеристику порушується комутація діодів ВК1, три фази роторної обмотки виявляються закороченими, що виводить машину з режиму подвійного живлення й переводить у режим роботи звичайного короткозамкненого АД (ділянка *c-a*).

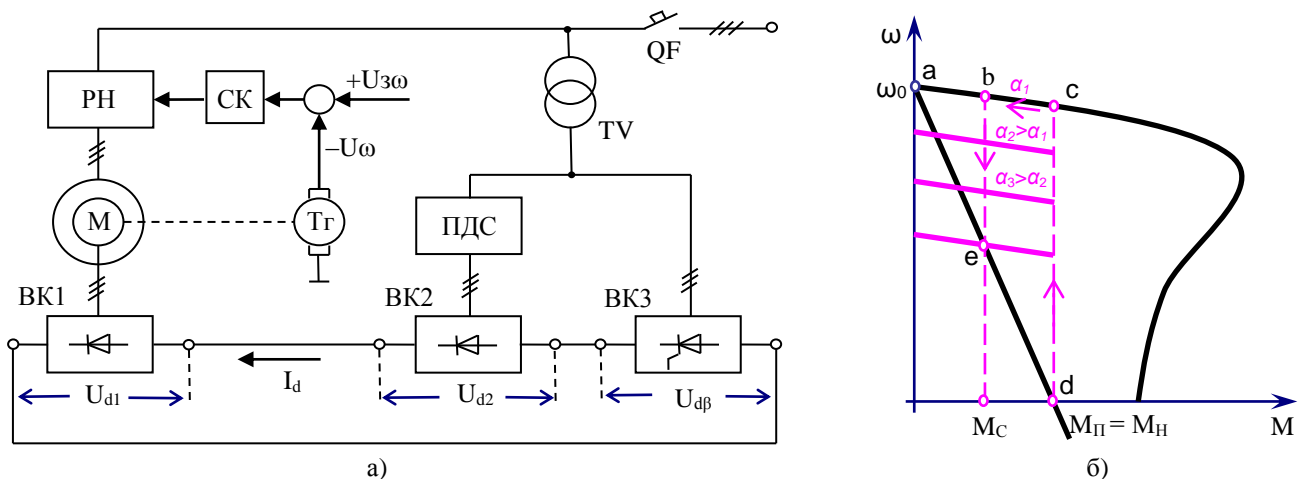


Рис. 5. Структурна схема (а) та характеристики (б) ЕП за системою СПАВК

Електропривод за системою СПАВК в порівнянні з традиційним АВК має підвищену переважувальну здатність і надійність через повне усунення передумов для "зриву" інвертування ВК3, оскільки формування рівноприскореної динаміки приводу забезпечується без впливу на систему управління інвертором.

**В третьому розділі** проведена оцінка статичних і динамічних властивостей механічно взаємозв'язаних ЕП узгодженого обертання (наприклад, двохдвигунного ЕП шахтної підйомної установки або механізму повороту екскаватора) з живленням від СПВП [9; 20], який виступає в якості джерела струму (ДС), порівняно з живленням від ТП, який працює в традиційному режимі джерела напруги (ДН).

Зараз у промисловості широко застосовується для ВЗЕП послідовне з'єднання двигунів (рис. 6,а), що дозволяє отримати однакове середнє статичне навантаження кожного валопровода, проте миттєві динамічні значення навантажень можуть відрізнятися істотно. Збільшення числа пружно зв'язаних мас і викликане цим ускладнення структури ЕМС (особливо при кількості двигунів більше двох), створюють сприятли-

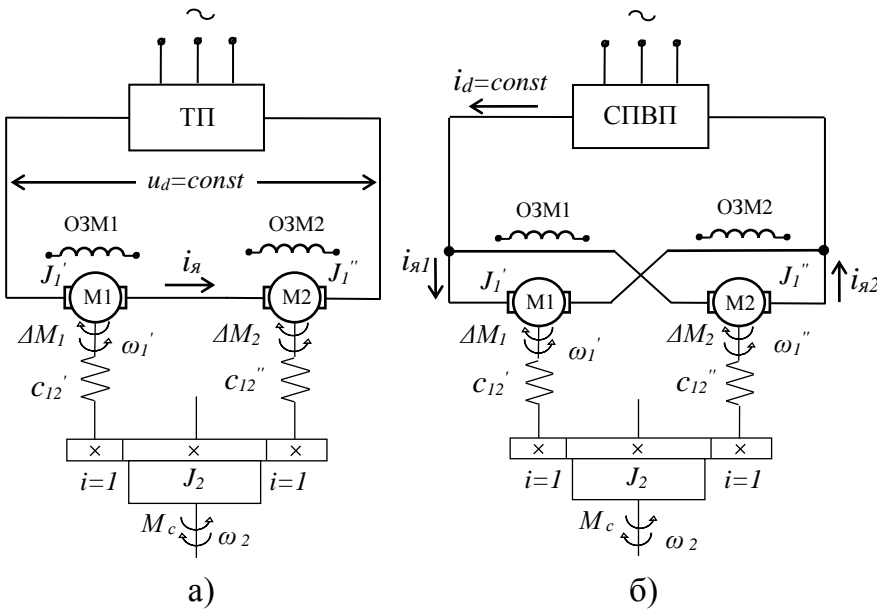


Рис. 6. Структурні схеми ВЗЕП з живленням від джерела напруги (а) і від джерела струму (б)

Вихідна система диференціальних рівнянь (при нехтуванні індуктивністю якірних кіл двигунів через великі по напрузі форсуючі можливості СПВП) має вид:

У наведеній системі (7) ÷ (13) прийнято такі позначення:  $i_{я1}, i_{я2}$  – струми якоря першого  $M1$  і другого  $M2$  двигунів;  $c', c''$  – коефіцієнти ЕРС (моменту);  $R_1, R_2$  – сумарні опори якірних кіл (без урахування опору перетворювачів);  $c'_{12}, c''_{12}$  – коефіцієнти жорсткості валопроводів;  $J_1', J_1'', J_2$  – приведені моменти інерції валопроводів (якір двигуна, з'єднувальна муфта, проміжний вал) та робочого механізму;  $M'_{12}, M''_{12}$  – пружні моменти в валопроводах;  $M$  – електромагнітний момент;

$\left. \begin{aligned} \Delta M_1 &= \Delta M_1(t) \\ \Delta M_2 &= \Delta M_2(t) \end{aligned} \right\}$  – збурюючі механічні дії на кожному валопроводі, що обумовлені, в

основному, механічними факторами: похибки виготовлення зубчастих коліс у редукторах; несоосність валів при з'єднанні їх муфтами; жорсткість і нерівномірність змащення поверхонь, що труться та ін.; для кранових приводів в цей перелік необхідно також включити: похибки обробки реборд коліс та встановлення підкранових рейок; нерівномірний знос бочок коліс, що котяться по рейкам; а також головне – зміна навантаження на двигуни правої і лівої сторін крана залежно від положення візка з вантажем, при його розгойдуванні у момент транспортування;

$M_c = M_c(t)$  – приведений момент навантаження;  $I_d = I_d(t)$  – вихідний струм СПВП (у випадку регульованого перетворювача).

Невідомі змінні системи рівнянь (7) ÷ (13):

$\varphi_1', \varphi_1'', \varphi_2$  – кути повороту валів двигунів та робочого органу механізму;

ві умови для розвитку пружних механічних коливань. Коливання пружно зв'язаних мас завжди викликають додаткові динамічні навантаження в передачах, які при несприятливих умовах можуть досягати небезпечних значень.

При живленні приводу не від ДН, а від ДС, в якості якого використовується СПВП, маємо суттєві особливості динаміки ВЗЕП постійного струму, які можна встановити на основі розгляду двомасової ЕМС (рис. 6,б).

$$\left\{ \begin{aligned} i_{я1} + i_{я2} &= i_d = const = I_d, & (7) \\ c' \cdot \omega_1' + i_{я1} \cdot R_1 &= c'' \cdot \omega_1'' + i_{я2} \cdot R_2, & (8) \\ c' \cdot i_{я1} - M'_{12} - \Delta M_1 &= J_1' \cdot \frac{d\omega_1'}{dt}, & (9) \\ c'' \cdot i_{я2} - M''_{12} - \Delta M_2 &= J_1'' \cdot \frac{d\omega_1''}{dt}, & (10) \\ M'_{12} + M''_{12} - M_c &= J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt}, & (11) \\ M'_{12} &= c'_{12}(\varphi_1' - \varphi_2), & (12) \\ M''_{12} &= c''_{12}(\varphi_1'' - \varphi_2). & (13) \end{aligned} \right.$$

$\omega_1' = d\phi_1'/dt$ ,  $\omega_1'' = d\phi_1''/dt$ ,  $\omega_2 = d\phi_2/dt$  – швидкості обертання;

Після перетворень рівнянь (7) ÷ (13) отримані диференціальні рівняння пружних моментів у валопроводах:

$$\begin{cases} \frac{d^2 M'_{12}}{dt^2} + M'_{12} \left[ \frac{c'_{12}}{J'_1} + \frac{c'_{12}}{J_2} \right] + M''_{12} \left[ \frac{c'_{12}}{J_2} \right] - \frac{c'_{12}}{J'_1} \cdot M = -\frac{c'_{12}}{J'_1} \Delta M_1 + \frac{c'_{12}}{J_2} \cdot M_c, \\ \frac{d^2 M''_{12}}{dt^2} + M'_{12} \left[ \frac{c''_{12}}{J_2} \right] + M''_{12} \left[ \frac{c''_{12}}{J'_1} + \frac{c''_{12}}{J_2} \right] + M \left[ \frac{c''_{12}}{J'_1} \cdot a \right] = \frac{c''_{12}}{J'_1} \cdot M_0 - \frac{c''_{12}}{J'_1} \cdot \Delta M_2 + \frac{c''_{12}}{J_2} \cdot M_c, \\ M'_{12} \left( -\frac{c'}{J'_1} \right) + M''_{12} \left( \frac{c''}{J'_1} \right) + M \left( \frac{c'}{J'_1} + \frac{c''}{J'_1} \cdot a \right) + k_1 \cdot \frac{dM}{dt} = \frac{c'}{J'_1} \cdot \Delta M_1 + \frac{c''}{J'_1} (M_0 - \Delta M_2) + \frac{dk_2}{dt}. \end{cases} \quad (14)$$

Після переходу до рівнянь у зображеннях при нульових початкових умовах, використовуючи формули і властивості операційного обчислення, одержимо:

$$\begin{cases} M'_{12}(p)(p^2 + \alpha_1 + \beta_1) + M''_{12}(p) \cdot \beta_1 - M(p) \cdot \alpha_1 = -\alpha_1 \cdot \Delta M_1(p) + \beta_1 \cdot M_c(p), \\ M'_{12}(p) \cdot \beta_2 + M''_{12}(p)(p^2 + \alpha_2 + \beta_2) + M(p) \cdot \alpha_2 \cdot a = \\ = \alpha_2 (M_0(p) - \Delta M_2(p)) + \beta_2 \cdot M_c(p), \\ M'_{12}(p) \cdot (-\gamma_1) + M''_{12}(p) \cdot \gamma_2 + M(p) \cdot (\gamma_1 + \gamma_2 \cdot a + k_1 \cdot p) = \\ = \gamma_1 \cdot \Delta M_1(p) + \gamma_2 (M_0(p) - \Delta M_2(p)) + p \cdot k_2(p), \end{cases} \quad (15)$$

де:  $\alpha_1 = \frac{c'_{12}}{J'_1}$ ,  $\beta_1 = \frac{c'_{12}}{J_2}$ ,  $\alpha_2 = \frac{c''_{12}}{J'_1}$ ,  $\beta_2 = \frac{c''_{12}}{J_2}$ ,  $\gamma_1 = \frac{c'}{J'_1}$ ,  $\gamma_2 = \frac{c''}{J'_1}$ ,  $k_1 = \frac{2R_{\text{я}}}{c'}$ ,  $k_2 = R_{\text{я}} \cdot I_d$ .

Аналіз коренів характеристичного рівняння системи (15) показує:

а) функція  $M(t)$  не містить незгасаючих коливань, оскільки наявність однакових множників  $p(p^2 + \alpha + 2\beta)$  у чисельнику і знаменнику цієї функції привела до їх скорочення в  $M(p)$ , а інші корені  $p_4$  та  $p_5$  характеристичного рівняння мають негативні дійсні частини, що забезпечує за допомогою множника  $e^{-\gamma \cdot t / k_1}$  затухаючий характер коливань в  $M(t)$ ;

б) функція  $M_{12}(t)$  містить незатухаючі коливання, через чисто уявні корені  $p_{2,3} = \pm i \cdot \sqrt{\alpha + 2\beta}$  у знаменнику  $M_{12}(p)$ . Дослідження підкорінного виразу  $\alpha + 2\beta = c_{12}/J_1 + 2c_{12}/J_2$  вказує на те, що оскільки  $\Omega_0 = \sqrt{c_{12}/J_1}$  – частота вільних коливань кожного валопроводу при нерухомому механізмі, а  $\Omega_1 = \sqrt{c_{12}/J_2}$  – частота вільних коливань вихідного валопроводу, то загальна частота незгасаючих коливань  $M_{12}(t)$  буде складати:  $\Omega = \sqrt{\alpha + 2\beta} = \sqrt{\Omega_0^2 + 2\Omega_1^2}$ . При порівнянні з подібними частотами при послідовному з'єднанні якірних обмоток двигунів і живленні від ДН (рис. 6,а), має місце збільшення частоти вільних коливань у  $\sqrt{1 + 2(\Omega_1/\Omega_0)^2}$  раз. Пояснюється це тим, що, при наявності збурень в одному з валопроводів, виникає перетікання струму ДС в якірну обмотку цього двигуна з одночасним відбором його у другого двигуна (сумарний струм ДС стабільний). В результаті, другий валопровід у своїй поведінці

йде назустріч першому, допомагаючи йому перебороти збурення. Це вказує на можливість одержання кращих динамічних властивостей ВЗЕП при живленні від ДС у порівнянні з подібними, але при живленні від ДН. Тобто ЕП може відпрацювати більш "дрібні" збурення зі сторони механічного обладнання, що зменшує зусилля в передачах та знос обладнання.

У четвертому розділі проведено теоретичні дослідження ВЗЕП змінного струму узгодженого обертання з живленням за системою СПАВК, яка розроблена за участю здобувача та відноситься до розряду так званих вентильно-каскадних схем, де здійснюється подвійне живлення електричної машини змінного струму [14;16;17]. На рис. 7 надані механічні характеристики (МХ) ЕП за системою СПАВК, розраховані з використанням модифікованого методу кругових діаграм. Побудовані МХ для конкретного значення струму ПДС, що відповідає номінальному пусковому моменту двигуна та при різних значеннях відносного опору  $R_d^* = R_d'/R_{p,n}$ . Зі збільшенням опору МХ приводу при  $M_n$  значно більше наближаються до повністю вертикальної (моментної) лінії. При відключеному ПДС МХ набувають вигляду, як показано дрібним пунктиром. Працюючи в системі СПАВК, при подвійному живленні: зі сторони статора – напругою сталої частоти, а зі сторони ротора – від ДС у вигляді СПВП, АД поєднує в собі властивості синхронної (ділянка  $d-c$  на рис. 5,б) та асинхронної (ділянка  $c-a$ ) машин. При роботі АД на ділянці  $d-c$  діоди роторного перетворювача ВК1 (рис. 5,а) комутуються лінійними ЕРС роторних обмоток, що наведені рухомим магнітним потоком, створеним статорними обмотками, та проти-ЕРС  $U_{ab}$  інвертора ВК3 (або падінням напруги випрямленого струму ПДС на резисторі  $R_d$ , який може бути ввімкнений замість ВК3). Струми роторних обмоток співпадають за фазою з відповідними фазними ЕРС, а їх величина визначається випрямленим струмом  $I_d$  та не залежить від ковзання ротора відносно поля статора. Електромагнітний момент при цьому визначається стабільними величинами магнітного потоку статора і струму ДС (штрихова лінія  $d-c$  на рис. 5,б), тобто електрична машина подвійного живлення в системі ЕП СПАВК працює як синхронізована асинхронна машина. В точці "с" величина ЕРС ротора недостатня для закривання

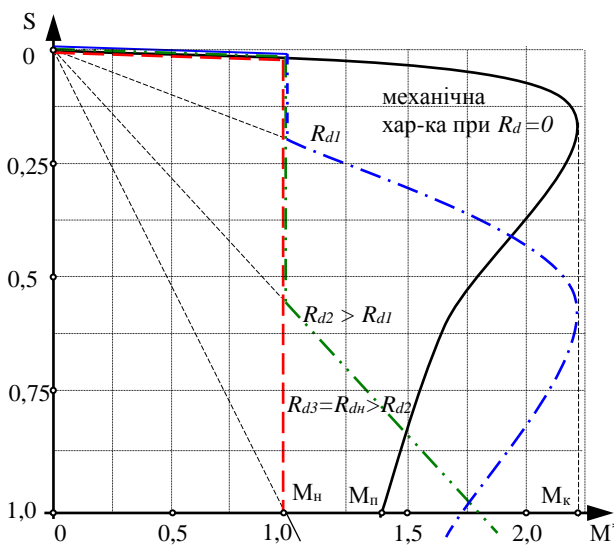


Рис. 7. Механічні характеристики ЕП за системою СПАВК

діодів, і вони стають постійно відкритими струмом  $I_d$ . В указаній точці двигун працює як асинхронний з к.з. ротором. Точка "d" може займати будь-яке положення на лінії "d-c". Чим більша величина  $R_d$ , тим нижче знаходиться точка "d" на характеристиці. При недостатній величині  $R_d$ , АД переходить на реостатну характеристику (штрих-пунктирні лінії на рис. 7).

Розроблено математичні моделі регульованих ВЗЕП за системою СПАВК з використанням керованих ДС в роторних ланцюгах двигунів, що дозволяють аналізувати динамічні режими ЕП та отримувати рівняння для їх МХ. Використання СПАВК для ВЗЕП (рис. 8)

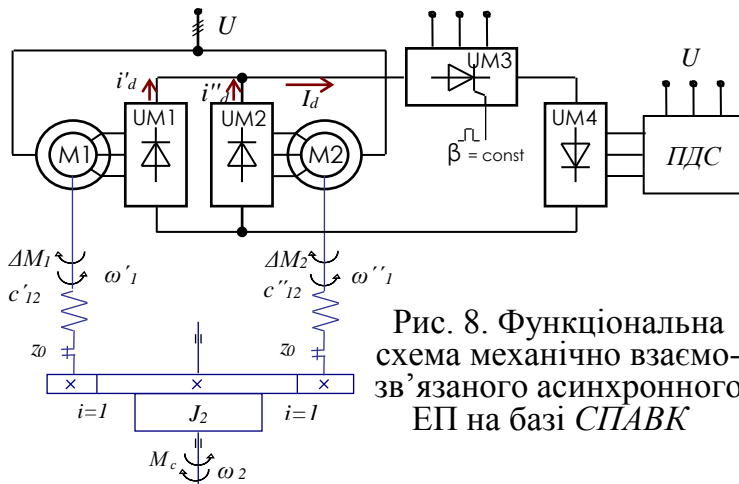


Рис. 8. Функціональна схема механічно взаємозв'язаного асинхронного ЕП на базі СПАВК

ПДС перетікає в роторні кола машини М1, зменшуючи його в машині М2, яка при цьому також сповільнюється – розгойдування коливань в обох валопроводах не виникає.

На базі СПАВК реалізовано і досліджено систему синхронного обертання АД, що з'єднані роторними обмотками паралельно. На відміну від традиційного вмикання цих обмоток на спільний реостат, АД через спільний діодний випрямляч ввімкнені в коло постійного струму ПДС. У цьому випадку зрівняльний струм між машинами формується не векторною сумою роторних ЕРС, а стороннім джерелом. Тому величина синхронізуючого моменту не залежить від ковзання роторів, а визначається тільки величиною струму ПДС.

У додатках наведені результати експериментальних досліджень ЕП на базі ДС в лабораторії ДонДТУ; розрахунок коефіцієнтів електромеханічного зв'язку і пружних моментів валопроводів ВЗЕП в середовищі *MathCad*; опис ЕП узгодженого обертання механізму переміщення мостового та козлового рудно-грейферного крана ПАТ "Алчевський металургійний комбінат"; технічна документація на перетворювач для почергового рівноприскореного (плавного) пуску асинхронного ЕП трьох молоткових дробарок ПАТ "Алчевський коксохімічний завод"; акти дослідно-промислового впровадження систем ЕП.

дозволяє одержати такі ж результати, як і з машинами постійного струму, котрі розглянуто в третьому розділі. Моделювання в *Matlab/SimPowerSystems* (рис. 9) показало, що при виникненні збурення на першому з валопроводів, перший двигун починає просторово відставати від другого. Це призводить до відставання у часі його роторної ЕРС, яка закриває діоди випрямляча UM1 пізніше, ніж закриваються діоди UM2. Більша частина струму

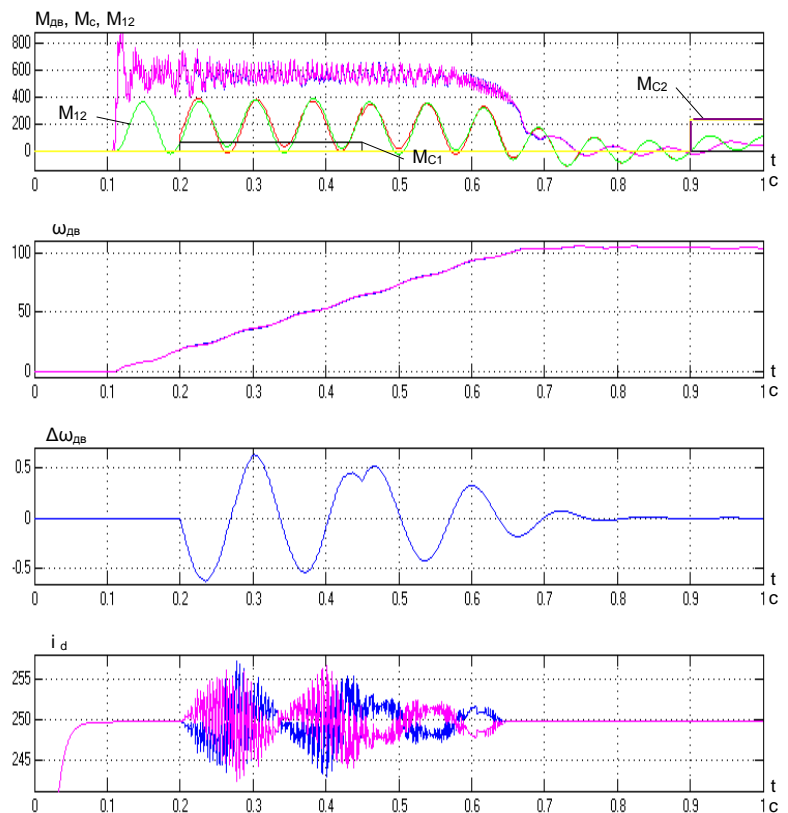


Рис. 9. Перехідні процеси моментів ( $M_{дв}$ ) і швидкостей двигунів ( $\omega_{дв}$ ), пружних моментів ( $M_{12}$ ), розбаланс швидкостей ( $\Delta\omega$ ) та випрямлені струми роторних вентильних комплектів ( $i_d$ ) взаємозв'язаного ЕП змінного струму

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-прикладна задача, що присвячена розвитку теорії і практичній реалізації взаємозв'язаних ЕМС узгодженого обертання змінного і постійного струмів, які одержують живлення не від традиційних джерел напруги, а від джерел струму. Найбільш істотні наукові результати, висновки і рекомендації полягають у наступному.

1. Для взаємозв'язаних ЕП узгодженого обертання постійного струму живлення якорів двигунів запропоновано здійснювати від одного *струмопараметричного вентильного перетворювача (СПВП)*, а для електроприводів змінного струму на базі - двигунів з фазним ротором – від перетворювача за схемою *струмопараметричного асинхронно-вентильного каскаду (СПАВК)*.

2. Теоретичні дослідження ПДС, виконаних на базі LC-елементів показали, що вони повністю задовольняють вимогам за швидкодією, діапазоном регулювання вихідного струму (не менше 10-15) і точністю його стабілізації (відносна похибка на нижньому рівні діапазону регулювання – не більше 10%). Побудова взаємозв'язаних ЕП узгодженого обертання із живленням від таких ПДС, в плані формування рівноприскореної динаміки, зниження експлуатаційних і поліпшення енергетичних показників, надійності і стійкості управління має досить просту реалізацію для промислового використання.

3. Одержала подальший розвиток теорія роботи керованого вентиального електроприводу, що живиться від СПВП. Досліджено всі можливі енергетичні режими роботи ЕП постійного струму із живленням від СПВП і виявлено особливості режиму противмикання і рекуперативного гальмування, які необхідно враховувати при організації роботи як одиночного, так і багатодвигунного ВЗЕП.

Установлено, що ЕП із живленням від нерегульованого СПВП, в режимі противмикання споживає з мережі меншу кількість енергії на величину, яку генерує машина, у порівнянні з таким же режимом при живленні двигуна від мережі постійної напруги. Також установлено, що при рекуперативному гальмуванні електроприводу СПВП працює в інверторному режимі, котрий принципово відрізняється від інверторного режиму традиційного тиристорного перетворювача напруги. Для реалізації указаних режимів запропоновані алгоритми управління вентилями СПВП і отримані регульовальні та зовнішні характеристики.

4. Досліджена робота асинхронного ЕП за системою СПАВК та показано, що діодний вентильний комплект, підключений до ротору електродвигуна, може працювати в двох режимах: традиційному - випрямному, а також у новому режимі – інвертора, веденого машиною. Досліджено також два режими роботи діодного вентиального комплекту, зв'язаного з виходом ПДС: традиційний випрямний (навантажувальний для ПДС), а також режим роботи з кутами провідності вентилів понад 120 ел. град. (режим короткого замикання ПДС).

5. Встановлено, що електродвигун у складі системи приводу СПАВК може працювати як *синхронізована асинхронна машина* подвійного живлення, яка формує динамічні режими за рахунок енергії мережі змінного струму, що надходить в статорні обмотки, а також енергії ПДС, інвертованої перетворювачем «веденим» роторними ЕРС. Крім того, машина може працювати як асинхронна з к.з. ротором, споживаючи тільки енергію з мережі, коли діоди роторного вентиального комплекту повністю відкриті струмом ПДС.

6. Аналітично доведено, що виконані на базі ДС (система ДС-Д) взаємозв'язані через механічне обладнання ЕМС з пружними зв'язками мають більш високі електромеханічні частотні властивості (частота коливань збільшується в  $\sqrt{1+2(\Omega_1/\Omega_0)^2}$  раз), у порівнянні з такими ж, але на базі джерел напруги (система ДН-Д). Завдяки цьому, система ДС-Д при розподіленні динамічного навантаження між двигунами здатна досить швидко відпрацьовувати збурення, що виникають у кінематичному ланцюзі, зменшуючи амплітуду коливань моментів у пружних елементах передач, чим подовжує термін їх служби.

7. Дослідження впливу коефіцієнта електромеханічного зв'язку при живленні від ДС на амплітуду коливань моментів в пружних елементах ВЗЕП показали: по-перше, значне послаблення (на 20–40 %) цього коефіцієнта в області істотних для механіки частот (до 40 Гц); по-друге, як слідство, зменшення амплітуди коливань пружних моментів в декілька разів. Це суттєво зменшує зусилля в кінематичних ланцюгах і подовжує термін придатності останніх.

8. Запропоновано нову систему узгодженого обертання декількох двигунів постійного струму, не зв'язаних механічно, яка названа *струмопараметричний вал*. Розроблені для неї структурна схема та цифрова модель дозволили дослідити всі можливі режими роботи та отримати кількісні характеристики. Отримані рівняння для механічних характеристик такого ЕП і вираз для розрахунків похибки неузгодженості швидкостей двигунів.

9. Одержала подальший розвиток теорія роботи машин подвійного живлення на базі *СПАВК*. Доведено, що при живленні АД з боку ротора від *ПДС* фази роторного струму стабілізуються відносно своєї мінливої ЕРС, а це забезпечує жорсткий зв'язок між величиною струму і моментом. Розроблено математичні і цифрові моделі регульованих ЕП за системою *СПАВК* з використанням керованих ДС в роторних ланцюгах двигунів; запропоновані удосконалені кругові діаграми для розрахунку механічних характеристик для такої системи приводу.

10. Доведено принципову можливість побудови регульованого асинхронного ЕП за системою *СПАВК* з отриманням рушійних і гальмівних режимів роботи при управлінні ДС в роторі. Використання ДС в роторних ланцюгах АД дозволяє будувати системи синхронного обертання з дуже високими синхронізуючими властивостями в усьому діапазоні зміни швидкості, залежними тільки від величини струму ДС.

11. Результати роботи впроваджені в ПАТ "Алчевський металургійний комбінат" та ПАТ "Алчевський коксохімічний завод", в навчальному процесі кафедри автоматизованих електромеханічних систем і кафедри гірничої енергомеханіки та обладнання Донбаського державного технічного університету.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Калюжный С. В. Регулируемый асинхронный электропривод с источником тока в роторной цепи / И. С. Шевченко, И. А. Карпук, В. В. Калюжный, С. В. Калюжный, Ю. П. Самчелев // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук : КДПУ. – 2005. – Вип. 3 (32). – С. 197–200.

*Здобувачем розроблено математичний опис асинхронної машини і вентиляного перетворювача.*



2. Калюжный С. В. Реконструкция электроприводов передвижения мостовых и козловых кранов / И. А. Бондарь, А. А. Меделяев, В. М. Мишура, А. А. Филонец, В. В. Калюжный, С. В. Калюжный, И. С. Шевченко // *Металл и литье Украины*. – Киев : Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины. – 2006. – № 2. – С. 16–18.

*Здобувач брав участь у конструюванні взаємозв'язаного ЕП механізму пересування мостового крана та підготовки його опису.*

3. Калюжный С. В. Электропривод по системе токопараметрический асинхронно-вентильный каскад / В. В. Калюжный, С. В. Калюжный // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2008. – Вип. 30. – С. 201–203.

*Здобувач запропонував використання системи СПАВК для живлення взаємозв'язаного ЕП.*

4. Калюжный С. В. Регульовані взаємопов'язані асинхронні електроприводи / І. А. Карпук, Д. І. Морозов, С. В. Калюжный, Н. І. Андреева // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2008. – Вип. 30. – С. 238–239.

*Здобувач запропонував принцип побудови регульованого асинхронного ЕП, що реверсується за ротором.*

5. Калюжный С. В. Вибір математичної моделі асинхронної машини для дослідження процесів у взаємозв'язаних роторними колами електроприводах / С. В. Калюжный, І. А. Карпук, Д. І. Морозов // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. – Кременчук : КДПУ. – 2008. – Ч.2, Вип. 4 (51). – С. 132–134.

*Здобувачем розроблена математична модель взаємозв'язаного ЕП в середовищі MatLab / Simulink, брав участь у моделюванні і аналізував отримані результати.*

6. Калюжный С. В. Асинхронный электропривод механизма подъема с источником тока в роторной цепи / И. А. Карпук, С. В. Калюжный, Ю. П. Самчелев, Ю. В. Скурятин // *Електроінформ*. – Львів : ЕКОінформ. – 2009. – Тематичний вип. – С. 170–172.

*Здобувач брав участь у створенні лабораторного стенду механізму підйому з ПДС в роторному ланцюзі та зробив його опис.*

7. Калюжный С. В. Снижение энергетических и эксплуатационных расходов стационарных установок / И. В. Волков, В. В. Калюжный, В. Н. Окалелов, С. В. Калюжный, А. М. Ященко, В. А. Корсун // *Уголь Украины*. – Київ : Логос. – 2010. – № 3. – С. 10–12.

*Здобувач зібрав лабораторний стенд вентиляційної установки з ЕП по системі СПАВК і описав його в статті.*

8. Калюжный С. В. Регулируемый источник тока для электроприводов / И. С. Шевченко, Д. И. Морозов, Н. И. Андреева, С. В. Калюжный // *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*. – Кременчук : КДУ. – 2010. – Ч.1, Вип. 3(62). – С. 53–56.

*Здобувач запропонував принципи керування джерелом струму.*

9. Калюжный С. В. Взаимосвязанный электропривод согласованного вращения с питанием от токопараметрического вентильного преобразователя / С. В. Калюжный // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2010. – Вип. 28. – С. 192–196.

10. Калюжный С. В. Статические свойства источников тока на базе индуктивно-емкостного преобразователя / Д. И. Морозов, А. А. Сопов, Н. И. Андреева, С. В. Калюжный // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевськ : ДонДТУ. – 2010. – Вип. 32. – С. 366–375.

*Здобувачем розроблено математичний опис та аналіз отриманих результатів.*

11. Калюжный С. В. Динамические свойства источников тока на базе индуктивно-емкостного преобразователя / Д. И. Морозов, А. А. Сопов, Н. И. Андреева, С. В. Калюжный // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевськ : ДонДТУ. – 2010. – Вип. 32. – С. 376–385.

*Здобувачем зроблено комп'ютерне моделювання в середовищі MatLab / Simulink та аналіз отриманих результатів.*

12. Калюжный С. В. Взаємозв'язаний електропривод на базі джерела струму / Н. І. Андреева, В. Г. Дрючин, С. В. Калюжный, Ю. П. Самчелеев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевськ : ДонДТУ. – 2011. – Вип. 34. – С. 371–376.

*Здобувачем запропоновано основні принципи реалізації взаємозв'язаного ЕП змінного струму.*

13. Калюжный С. В. Двухдвигательный электропривод подъемной машины с согласованием вращения роторов и системой плавного пуска и торможения / С. В. Калюжный, В. В. Калюжный, А. Н. Коваль, Н. А. Чехлатый В. М., Иваночко // Проблемы эксплуатации оборудования шахтных стационарных установок. – Донецьк : ПАТ "НДІ ГМ ім. М. М. Федорова". – 2010 – 2011. – Вип. 104 – 105. – С. 240–252.

*Здобувач запропонував використання системи СПАВК для живлення взаємозв'язаного ЕП.*

14. Калюжный С. В. Преобразователь токопараметрического асинхронно-вентильного каскада / И. В. Волков, В. В. Калюжный, С. В. Калюжный // Электричество. – Москва : МЭИ. – 2009. – № 11. – С. 57–61.

*Здобувач показав, що шестипульсний діодний вентильний комплект перетворювача, пов'язаний з ротором електродвигуна, може працювати в двох режимах: традиційному – випрямному, а також у новому режимі – інвертування веденого машиною.*

15. Пат. 40046А Україна, МПК 6 H02M5/45. Струмопараметричний перетворювач частоти / Калюжный В. В., Калюжный С. В.; заявник і власник Калюжный Володимир Владиславович, Калюжный Сергій Володимирович. – № 99041827; заявл. 01.04.1999; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6.

*Здобувачем було запропоновано застосування в схемі дванадцятипульсного ПДС.*

16. Пат. 44951А Україна, МПК 6 H02P7/74. Асинхронний електропривод з синхронним обертанням роторів / Волков І. В., Ісаков В. М., Калюжный В. В., Калюжный С. В., Шевченко І. С.; заявник та власник Волков Ігор Володимирович, Ісаков Володимир Миколайович, Калюжный Володимир Владиславович, Калюжный Сергій Володимирович, Шевченко Іван Степанович. – № 99020594; заявл. 02.02.1999; опубл. 15.03.2002, Бюл. № 3.

*Здобувач запропонував ввести ПДС в ЕП.*

17. Пат. 83629 С2 Україна, МПК (2006) H02P 5/74. Регульований асинхронний електропривод з синхронним обертанням роторів / Калюжный В. В., Калюжный С. В., Шевченко І. С.; заявник та власник Калюжный Володимир Владисла-

вович, Калюжний Сергій Володимирович, Шевченко Іван Степанович. – № 20041210488 ; заявл. 20.12.2004 ; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15.

*Здобувач запропонував застосувати регулятор змінної напруги в статорних ланцюгах двигунів для регулювання швидкості приводу.*

18. Пат. 86106 С2 Україна, МПК (2009) H02P 7/18, H02P 29/00. Струмопараметричний асинхронно-вентильний каскад / Калюжний В. В., Іваночко В. М., Калюжний С. В., Лисенко К. В. ; заявник та власник Калюжний Володимир Владиславович, Іваночко Василь Михайлович, Калюжний Сергій Володимирович, Лисенко Катерина Володимирівна. – № а200704855 ; заявл. 03.05.2007 ; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.

*Здобувачем було запропоновано застосування в схемі ПДС, для досягнення мети винаходу.*

19. Пат. 41219 U Україна, МПК (2009) H02P 7/00. Багатодвигунний електропривод з люфтами та пружно з'єднаними розподіленими механічними параметрами / Калюжний С. В., Самойленко С. М. ; заявник та власник Калюжний Сергій Володимирович, Самойленко Сергій Миколайович. – № u200814513 ; заявл. 16.12.2008 ; опубл. 12.05.2009, Бюл. № 9.

*Здобувачем здійснено введення в формулу винаходу регулятора змінного струму об'єднаних статорами двигунів.*

20. Пат. 42963 U Україна, МПК (2009) H02P 7/00. Струмопараметричний вал / Калюжний С. В. ; заявник Калюжний Сергій Володимирович ; власник Донбаський державний технічний університет. – № u200902347 ; заявл. 16.03.2009 ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14.

21. Пат. 89030 С2 Україна, МПК (2009) H02P 23/00. Пристрій для рівноприскореного пуску і підвищення коефіцієнтів корисної дії та потужності багатодвигунних асинхронних електромеханічних систем / Калюжний В. В., Калюжний С. В., Скорих І. М. ; заявник та власник Калюжний Володимир Владиславович, Калюжний Сергій Володимирович, Скорих Іван Митрофанович. – № а200601409 ; заявл. 13.02.2006 ; опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24.

*Здобувачем було запропоновано застосування в схемі винаходу ПДС.*

22. Пат. 91338 С2 Україна, МПК (2009) H02M 5/00, H02P 23/00, H02P 5/00. Перетворювач струмопараметричний асинхронно-вентильного каскада / Калюжний В. В., Калюжний С. В. ; заявник та власник Калюжний Володимир Владиславович, Калюжний Сергій Володимирович. – № а200613697 ; заявл. 25.12.2006 ; опубл. 26.07.2010, Бюл. № 14.

*Здобувачем введено в систему керування перетворювачем сигналу зворотнього зв'язку по швидкості двигуна.*

## АНОТАЦІЇ

**Калюжний С. В. Електромеханічні системи узгодженого обертання з живленням від струмопараметричного вентильного перетворювача.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2012 р.

Дисертація присвячена розробці взаємозв'язаних електромеханічних систем (ЕМС) узгодженого обертання постійного та змінного струму з живленням від перетворювачів зі "струмовими" зовнішніми характеристиками.

В результаті аналізу й порівняння різних варіантів побудови взаємозв'язаних ЕМС узгодженого обертання, найбільш раціональним визнаний варіант, коли два чи більше двигунів постійного струму одержують живлення від струмопараметричного вентильного перетворювача (СПВП), що є пристроєм, заснованим на спільному використанні параметричного джерела струму (ПДС) з двома реверсивними тиристорними шестипульсними вентильними комплектами на виході. Взаємозв'язані ЕМС узгодженого обертання на базі асинхронних двигунів з фазним ротором пропонується будувати з використанням перетворювача струмопараметричного асинхронно-вентильного каскаду (СПАВК), котрий є поєднанням традиційного АВК та СПВП в ланцюзі постійного струму.

Доведена принципова можливість побудови регульованого асинхронного ЕП за системою СПАВК з отриманням рухових і гальмівних режимів роботи при керованому джерелі струму в роторі. Розроблені математичні і цифрові моделі регульованих ЕП за системою СПАВК; запропоновані вдосконалені кругові діаграми для розрахунку механічних характеристик такої системи приводу

У дисертації розглянуті енергетичні режими роботи ЕМС при живленні від указаних перетворювачів, наводиться методика розрахунку механічних характеристик, а також дослідно-промислові варіанти використання.

*Ключові слова:* електромеханічна система взаємозв'язана, узгоджене обертання, вентильний перетворювач, параметричне джерело струму, асинхронно-вентильний каскад.

**Kaluigniy S. V. "Electromechanical systems of the concerted rotation with the power of the current-parametric valve transformer". Manuscript.**

Dissertation on gaining of scientific degree of candidate of engineering sciences on speciality 05.09.03 – electrotechnical equipment and systems. – NTU "Kharkov polytechnic institute", Kharkov, 2012.

Dissertation is devoted to the development of interrelated electromechanical systems (EMS) concerted rotation of AC and DC powered from the transducers with current external characteristics.

As a result of analysis and comparison of different variants of interrelated the EMS concerted rotation, a variant is acknowledged most rational, when two or more engines of direct current powered by a current-parametric valve transformer (CPVT), that is the device based on the common use of parametric source of current (PSC) with the output of two reversible thyristor rectifier six sets of pulsed.

Interrelated EMS the concerted rotation on the base of asynchronous engines with a phase rotor it is proposed to build with using the transformer of current-parametric asynchronous valve cascade (CPAVC) which is combination of traditional AVC and CPVT in the circuit of direct current.

In dissertation examined the energy profiles of EMC power from the above transformer, the method of calculation of mechanical descriptions and also pointed experimental-industrial variants of the use.

*Keywords:* electromechanical system interrelated, concerted rotation, transformer, parametric source of current, asynchronous-valve cascade.

**Калюжный С. В. Электромеханические системы согласованного вращения с питанием от токопараметрического вентильного преобразователя.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2012.

Диссертация посвящена разработке взаимосвязанных электромеханических систем (ЭМС) согласованного вращения постоянного и переменного тока с питанием от преобразователей с токовыми внешними характеристиками. В результате анализа и сравнения различных вариантов построения взаимосвязанных ЭМС согласованного вращения, наиболее рациональным признан вариант, когда два и более двигателей постоянного тока получают питание от токопараметрического вентильного преобразователя (*ТПВП*), который является устройством, основанным на совместном использовании параметрического источника тока (*ПИТ*) с двумя реверсивными тиристорными шестипульсными вентильными комплектами на выходе. Взаимосвязанные ЭМС согласованного вращения на базе асинхронных двигателей с фазным ротором предлагается строить с использованием преобразователя токопараметрического асинхронно-вентильного каскада (*ТПАВК*), который является сочетанием традиционного *АВК* и *ТПВП* в цепи постоянного тока.

Указанные преобразователи формируют без каких-либо обратных связей "моментные" приводные механические характеристики, которые позволяют любой взаимосвязанной ЭМС самостоятельно подстраиваться под внешние возмущения, изменяющиеся по непредсказуемым законам, в плане минимизации износа механического оборудования. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что "токовая" система питания нескольких двигателей, соединенных параллельно, резко уменьшает обмен энергиями между якорями (роторами) машин, но форсирует перераспределение энергии между ними, получаемой непосредственно от "токового" преобразователя. При этом снижается, так называемая, электромеханическая жесткость взаимосвязанной ЭМС, последняя становится более мягкой и податливой для согласования скоростей отдельных приводов.

Проведенные в работе исследования взаимосвязанной через механическое оборудование двухмассовой ЭМС с питанием от *ТПВП* показали: во-первых, значительные послабления (на 20-40 %) коэффициента электромеханической связи в области существенных для механики частот (до 40 Гц); во-вторых, как следствие, уменьшение в несколько раз амплитуды колебаний упругих моментов в кинематической цепи приводов, что существенно уменьшает усилия в механических узлах механизма и продлевает ресурс их эксплуатации.

При питании взаимосвязанных ЭМС согласованного вращения переменного тока от преобразователя *ТПАВК* получены аналогичные результаты. Доказана принципиальная возможность построения регулируемого асинхронного ЭП по системе *ТПАВК* с получением двигательных и тормозных режимов работы при управляемом источнике тока в роторе, а также показано, что при пофазном объединении роторных цепей АД, возможно построение системы синхронного вращения с очень высокими синхронизирующими свойствами во всем диапазоне изменения скорости. Разработаны математические и цифровые модели регулируемых ЭП по системе *ТПАВК*; предложены усовершенствованные круговые диаграммы для расчета механических характеристик для такой системы привода.

В диссертации рассмотрены энергетические режимы работы электроприводов при питании от указанных выше преобразователей, приводятся опытно-промышленные варианты применения и акты внедрения на механизме перемещения мостового крана, подтверждающие, что за шесть лет эксплуатации износ механического оборудования ходовой части крана уменьшился не менее, чем в два раза.

*Ключевые слова:* электромеханическая система взаимосвязанная, согласованное вращение, преобразователь, параметрический источник тока, асинхронно-вентильный каскад.



---

Підп. до друку 31.08.2012. Формат 60x90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офс.  
Друк RISO. Ум. друк. арк. 0,9 Зам. № 274. Наклад 100 пр.

Видавництво не несе відповідальності за зміст матеріалу, наданого автором до друку.

Видавець та виготівник:

Донбаський державний технічний університет  
94204, Луганська обл., м. Алчевськ, пр. Леніна, 16.  
(ТВО "Ладо", ауд. 2113, т/факс 2-02-59)

E-mail: [info@dmmi.edu.ua](mailto:info@dmmi.edu.ua) Web-site: <http://www.dmmi.edu.ua>  
Свідоцтво Держкомтелерадіо серія ДК, № 2010 від 12.11.2004