

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



**Андрієнко Данило Сергійович**

УДК 621.365.6

**АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД УЗГОДЖЕНОГО ОБЕРТАННЯ З  
ІМПУЛЬСНО-СТРУМОВИМ ОБМЕЖЕННЯМ В КОЛІ ЕЛЕКТРИЧНО  
ПОВ'ЯЗАНИХ РОТОРНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ**

Спеціальність 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи»

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрах електропостачання промислових підприємств та електричних та електронних апаратів Національного університету «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Наукові керівники: кандидат технічних наук, доцент  
**Коцур Михайло Ігорович**, Національний університет «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри електричних та електронних апаратів

кандидат технічних наук, професор  
**Метельський Володимир Петрович**, Національний університет «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри електропостачання промислових підприємств

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Толочко Ольга Іванівна**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

кандидат технічних наук, доцент  
**Шамардіна Віра Миколаївна**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем

Захист відбудеться «13» травня 2021 р. о 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: ауд. 102, корпус № 1, просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, Дніпропетровська обл., 49005.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19.

Автореферат розісланий «13» квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради  
Д.08.080.07, к.т.н., доцент



І. М. Удовик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Експлуатаційна надійність та термін служби мостових підйомних кранів, які мають найбільш широке поширення, суттєво залежить від багатодвигунного електроприводу переміщення мостів і візків.

Переважаюча кількість електроприводів узгодженого обертання механізмів переміщення виконана з використанням асинхронних електродвигунів змінного струму з фазним ротором.

В усіх наявних системах узгодженого обертання є низка недоліків, пов'язаних зі збільшеними втратами електроенергії, значною встановленою потужністю, необхідністю використання датчиків швидкості, відносно високою собівартістю. Існуючі дослідження щодо особливостей роботи електроприводів механізму переміщення крана вказують на різноманітність та стохастичність поведінки його металоконструкції, що є наслідком дії пружних зв'язків і збурюючих моментів, тому під час проектування окремих електроприводів виникають труднощі з урахуванням збурюючих факторів.

Враховуючи вищесказане, виникає проблема створення енергоефективних електроприводів узгодженого обертання, в яких силова схема має властивості самосинхронізації, що дозволило б компенсувати збурення, які не враховані при побудові системи керування електроприводом.

Як показують дослідження, таким вимогам найбільше задовольняють системи електроприводу з електрично пов'язаними роторними випрямлячами асинхронних двигунів з фазним ротором, але такі системи електроприводу мають низку недоліків.

Тому подальший розвиток теоретичних засад та дослідження самосинхронізуючих властивостей асинхронних електроприводів узгодженого обертання є актуальним науково-прикладним завданням.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричних та електронних апаратів Національного університету «Запорізька політехніка» у відповідності до тематичного плану наукових досліджень за держбюджетною темою ДБ 03415 «Розроблення та дослідження напівпровідникових перетворювачів для електроприводу за схемою струмопараметричного асинхронно-вентильного каскаду» (номер держреєстрації 0115U002566), а також планів створення електроприводів ТОВ «НДІ «Перетворювач»».

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є подальший розвиток теоретичних засад та дослідження самосинхронізувальних властивостей асинхронних електроприводів узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів за різних збурюючих моментів механізму переміщення мостового крана з відносно малою встановленою потужністю та високими енергетичними показниками.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішено такі завдання:

- аналіз існуючого стану розробок та досліджень електроприводів узгодженого обертання з асинхронними двигунами;

- дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів у системі електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів;

- розроблення математичної та імітаційної моделі електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів для механізму переміщення мостового підйомного крана, що дозволяє оцінити демпфуючі можливості системи електропривода за невизначених збурюючих механічних моментів;

- дослідження самосинхронізувальних властивостей електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів за різних збурюючих моментів механізму переміщення мостового крану;

- розроблення рекомендацій щодо реалізації електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів;

- експериментальна перевірка роботи електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів на макетному зразку.

**Об'єктом дослідження** є електромагнітні та електромеханічні процеси асинхронних електроприводів узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів з рекуперацією енергії ковзання в мережу за допомогою інвертора, що працює з максимальним коефіцієнтом потужності електропривода.

**Предметом дослідження** є самосинхронізувальні властивості асинхронних електроприводів узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі застосовані методи математичного та імітаційного моделювання процесів в усталених та перехідних режимах, у тому числі методи аналізу лінійних кіл з напівпровідниковими елементами та теорії електричних машин для виявлення особливостей комутації роторних випрямлячів, визначення коефіцієнтів підсилення перетворювачів, значення зрівнювального струму у колі роторів асинхронних двигунів, теорії електропривода під час аналізу електромеханічних процесів для визначення синхронізувальних властивостей електроприводів узгодженого обертання.

#### **Наукове положення:**

1. В електроприводах узгодженого обертання на базі асинхронних двигунів з імпульсним обмеженням сумарного струму роторних випрямлячів під час використання одного ключа забезпечується самосинхронізація їх швидкостей при дії збурюючих моментів навантаження, що сприяє зменшенню неузгодженості швидкостей на величину добутку подвійного номінального ковзання та коефіцієнта синхронізації, який повинен бути більшим за одиницю.

2. Електромеханічна стала часу електроприводів узгодженого обертання з імпульсним обмеженням сумарного струму роторних випрямлячів більша за електромеханічну сталу часу асинхронного двигуна на величину добутку подвійного номіна-

льного ковзання і коефіцієнта синхронізації, що суттєво підвищує самосинхронізувальні властивості електроприводів за невизначених збурюючих пружних моментів.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- уперше отримано безрозмірний узагальнений параметр (коефіцієнт) синхронізації  $K_c$ , який залежить від конструктивних особливостей схемного рішення та параметрів електроприводів узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням сумарного струму в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, та дозволяє отримати аналітичні вираження зрівняльного струму між роторами двигунів;

- доведено, що величина неузгодженості швидкостей АДФР у сталому режимі роботи обернено пропорційна добутку номінального ковзання та подвійного коефіцієнта синхронізації ( $2K_c \cdot s_n$ ), значення якого повинно бути більшим за одиницю;

- встановлено, що електромеханічна стала часу взаємопов'язаного асинхронного електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів у  $2K_c \cdot s_n$  разів більша від електромеханічної сталої часу одного асинхронного двигуна, за рахунок чого забезпечуються більш високі демпфуючі властивості електропривода за випадкових (неврахованих) збурюючих моментів;

- отримано подальший розвиток теоретичних засад:

щодо вдосконалення схемного рішення електропривода узгодженого обертання на базі АДФР з імпульсно-струмовим обмеженням сумарного струму в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, який має властивість самосинхронізації за невизначених збурюючих механічних моментів;

щодо аналітичного визначення коефіцієнту підсилення імпульсно-струмового перетворювача в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, за якого забезпечується стабілізація напруги на вході автономного інвертора, або інвертора, керуваного мережею, який працює в режимі рекуперації енергії з максимальним значенням коефіцієнта потужності електропривода.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

- розроблена імітаційна комп'ютерна модель, яка враховує взаємопов'язані електромагнітні й електромеханічні процеси в системі електроприводів узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів та дозволяє встановити ефективні способи та алгоритми керування перетворювачем для отримання найкращих синхронізувальних властивостей АДФР за збереження високого рівня ККД та коефіцієнта потужності взаємопов'язаного електропривода;

- запропонована методика визначення неузгодженості швидкостей АДФР в системі електроприводів узгодженого обертання, яка враховує наявність як статичних, так і динамічних збурюючих моментів, що діють на АДФР, та дозволяє з достатньою похибкою до 6,6% у сталих та до 25,7% у перехідних режимах їх роботи здійснювати оцінку неузгодженості швидкостей АДФР в залежності від паспортних даних та параметрів схеми заміщення АДФР, а також параметрів самої системи взаємопов'язаного електропривода. Запропонована методика може використовуватися в інженерних розрахунках для вибору силового обладнання під час проектування систем узгодженого обертання АДФР;

- проведено порівняльне оцінювання за техніко-економічними та експлуатаційними показниками розробленого електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів та відомими електроприводами узгодженого обертання (частотно-регульованими, з джерелом струму на базі ІЄП). Показано, що завдяки універсальності, малим масо-габаритним показникам і більш високій ефективності системи електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, є конкурентоспроможною альтернативою частотно-регульованому електроприводу;

- запропоновані шляхи поліпшення узгодженості обертання роторів взаємопов'язаних двигунів через незалежне керування ними в системі електропривода узгодженого обертання зі збереженням самосинхронізувальних властивостей та можливістю підвищення коефіцієнта потужності електропривода з використанням АІН з випереджальним кутом керування замість інвертора, керованого мережею, що сприяє підвищенню надійності електропривода.

- запропоноване схемне рішення електропривода узгодженого обертання і схеми його захисту впроваджені у ТОВ НДІ «Перетворювач» в електроприводі обертання типу МПЧ-ТТП-150-380 УХЛ4.2, який призначено для мостового підйомного крана вантажопід'ємністю 60 тонн Алчевського металургійного комбінату.

**Особистий внесок здобувача** полягає в обґрунтуванні наукового завдання, постановці мети і завдання дослідження, формулювання новизни і наукових положень, розробці та створенні математичних моделей, в плануванні та проведенні експериментальних досліджень та обробці їх результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати досліджень доповідалися здобувачем та обговорювалися на 8 конференціях, серед яких: Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика” (м. Одеса, 12-17 вересня 2014р.); I Міжнародна науково-технічна конференція "Електротехнічні та комп'ютерні системи: теорія та практика" ELTECS-2015 (м. Одеса, 15-19 червня 2015р.); II Міжнародна науково-технічна конференція "Електротехнічні та комп'ютерні системи: теорія та практика" ELTECS-2016 (м. Одеса, 26-28 червня 2016р.); XXII Міжнародна науково-технічна конференція «Силова електроніка та енергоефективність» (м. Одеса, 15-19 вересня 2016р.); IEEE: The International Conference on Modern electrical and energy systems, MEES 2017, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, November 15th - 17th, Ukraine, 2017; IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET2018, February 20-24, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018; IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, September 21-25, 2020.

**Публікації.** Матеріали дисертації відображені в 11 публікаціях, зокрема: 2 патенти України; 6 статей у фахових наукових виданнях, що входять до міжнародних НБД; 3 статті в матеріалах міжнародних конференцій (індексуються в НБД Scopus та Web of Science).

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 192

сторінках і містить 144 сторінки основного тексту, 12 таблиць, 55 рисунків, список використаних джерел зі 126 найменувань, 2 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

*У вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, викладено об'єкт і предмет дослідження, наукові положення, наукову і практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок автора в опублікованих результатах досліджень, структура та обсяг роботи.

*У першому розділі* виконано аналіз особливостей роботи найбільш поширеної кінематичної схеми дводвигунних механізмів переміщення підйомних кранів, пов'язаних з наявністю пружних зв'язків між конструкцією та двигунами. Визначено, що найбільш впливові механічні коливання, які піддаються компенсації в системах регульованого електропривода, перебувають у межах 0,37-4,15 Гц. Неузгодженість обертання роторів унаслідок збурюючих моментів призводить до перекосу моста крана і, відповідно, до зношення реборд і головок рейок, що потребує їх ремонту до 2 разів на рік при важких режимах роботи кранів.

Існує ряд модифікацій промислових схем, які покращують роботу електропривода переміщення крана, але не вирішують основних проблем - відсутність самосинхронізації під час дії збурюючих моментів. Серед відносно простих схем - схема узгодженого обертання з електрично пов'язаними роторними випрямлячами зі ступеневим реостатним пуском, яка має властивості самосинхронізації, але не усуває основних недоліків - підвищених енергетичних втрат, коливання пускового моменту.

Указаних недоліків немає у схемі узгодженого обертання з електрично пов'язаними роторними випрямлячами і джерелом струму на базі індуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП) у колі ротора. Схема забезпечує самосинхронізацію, плавний пуск і рекуперацію енергії ковзання в мережу, але має недоліки, які пов'язані зі значною встановленою потужністю обладнання, відносно низьким ККД і неможливістю реалізувати бажані проміжні частоти обертання роторів.

Використання частотно-регульованих електроприводів забезпечує потрібні властивості, але має такі недоліки: значну собівартість, необхідність застосування давачів частоти обертання на валу ротора, що значно ускладнює систему регулювання та налагодження її функціонування.

Розглянуті аналітичні методи аналізу і засоби комп'ютерного імітаційного моделювання електроприводів, а також аналіз галузей застосування систем електропривода з позиції їх техніко-економічних показників.

У результаті аналізу виникає необхідність у розробленні електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, яка має властивості самосинхронізації, відносно малі масо-габаритні показники, низьку собівартість й високі енергетичні показники.

Сформульовані мета і завдання дослідження.

*У другому розділі* проведено аналіз і дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів в системі асинхронного електропривода узгодженого обер-

тання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів. Досліджено особливості електромагнітних процесів у розробленому асинхронному електроприводі з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів та доведено наявність ефекту самосинхронізації (рис. 1).

Принцип роботи схеми полягає в підтримуванні сумарного випрямленого струму роторних випрямлячів В1 і В2 завдяки імпульсному перетворювачу підвищувальної напруги ІППН. Обмеження струму відбувається модуляцією ключа МТ1.

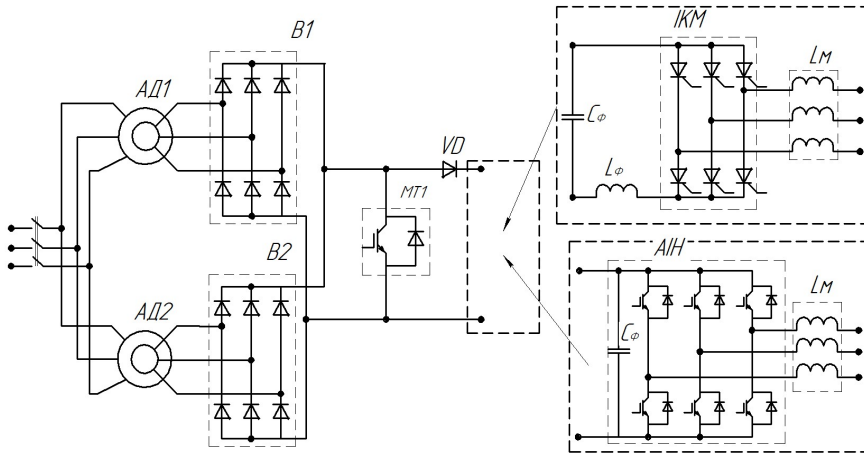


Рисунок 1 - Принципова схема енергозберігаючого електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням

Енергія ковзання ротора та енергія, що була накопичена в обмотках АДФР, заряджають конденсатор  $C_\phi$  ІППН. Напруга конденсатора обмежується внутрішньою ЕРС інвертора керованого мережею (ІКМ) або автономного інвертора напруги (АИИ). Після виходу АДФР на природню характеристику, струм обмеження роторів

АДФР набуває меншого значення за струм уставки. При цьому випрямлячі ротора закорочуються ключем МТ1. Рекуперації енергії в усталеному режимі немає.

Таким чином схема електропривода (рис.1) має позитивні властивості схем з імпульсно-струмовим керуванням та вентильного каскаду, забезпечує самосинхронізувальні властивості, рекуперацію енергії ротора в мережу з постійним кутом випередження ІКМ, що сприяє роботі електроприводу з максимальним постійним коефіцієнтом потужності.

Під час дослідження схеми використовуються такі припущення: потокозчеплення статора незмінне; не враховується падіння напруги на напівпровідникових приладах; комутація в колі ротора визначається параметрами кіл ротора (рис.2) за аналогією випрямлячів, що живляться від трансформатора; середнє значення випрямленого струму постійне; середнє значення напруги ІКМ враховується напругою на конденсаторі  $C_\phi$ ; внутрішнім опором інвертора нехтуємо.

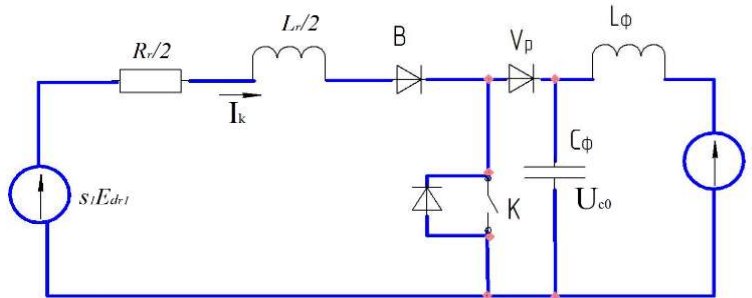


Рисунок 2 - Розрахункова схема заміщення кіл ротора

Для реалізації режиму рекуперації енергії ковзання роторів АДФР необхідно для ІППН забезпечити мінімальний коефіцієнт підсилення напруги:

$$K_{min} = \frac{E_{du}}{E_{dr}} = \frac{K_I}{s}, \quad (1)$$



де  $K_1$  – співвідношення середньої напруги ротора і мережі;  $E_{du}$  – ЕРС інвертора;  $E_{dr}$  – середнє значення випрямленої ЕРС ротора;  $s$  – ковзання ротора АДФР.

Зовнішня характеристика ІППН має вигляд у відносних одиницях:

$$I = s \cdot \frac{K}{K_1} - \frac{K^2 I_{du} R_e}{2E_{du}}, \quad (2)$$

де  $K = \frac{I}{I - \gamma_1}$  коефіцієнт підсилення;  $\gamma_1$  – коефіцієнт щільності ІППН;  $I_{du}$  – середнє значення струму інвертора;  $R_e$  – еквівалентний опір роторного кола, що враховує активний опір проводів;  $E_{du}$  – ЕРС інвертора.

З виразу (2) та балансу потужностей у роторному колі маємо:

$$K_{max} = \frac{s}{R_e^* I_{du}^*}, \quad (3)$$

де  $I_{du}^* = \frac{I_{dH}^*}{I_{dRH}}$  – відносне значення струму інвертора.

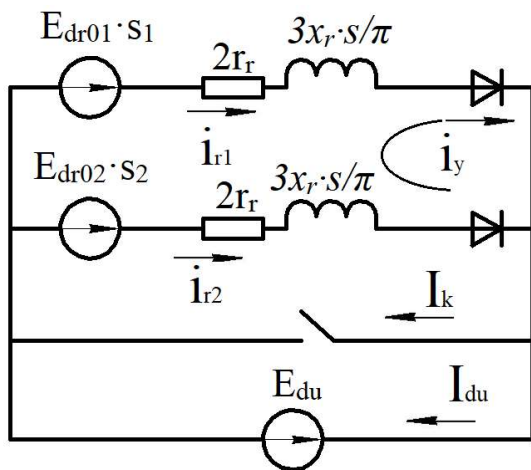


Рисунок 3 - Розрахункова схема роторних кіл у режимах заданого струмообмеження

Аналіз параметрів кранових двигунів типу МТН потужністю 3,5÷125 кВт показує, що при потрібному  $K_{min} = 7,6 \div 30$ ,  $K_{max} = 18 \div 42$ , задовольняється умова рекуперації енергії ковзання в мережу.

Зрівняльний момент при постійному потокозчепленні статора пропорційний середньому значенню зрівняльного струму. Дослідження залежності зрівняльного струму проведено за допомогою розрахункової схеми заміщення (рис 3).

На рис.3 складова  $\frac{3}{\pi} x_r$  враховує комутаційне падіння напруги у мостовій схемі. За

припущення, що параметри системи є постій-

ними, методом контурних струмів знаходимо вираз для середнього зрівняльного струму у відносних одиницях:

$$I_{zp}^* = K_c \cdot (s_2 - s_1) \cdot \left( I_K^* \cdot \frac{3}{2\pi} \text{tg} \varphi_r R_e^* - 1 \right), \quad (4)$$

де  $K_c = \frac{1}{2 \cdot R_e^* \cdot \left( 1 + \frac{3}{2\pi} \cdot s_{cp} \cdot \text{tg} \varphi_r \right)}$  – коефіцієнт синхронізації;  $I_K^* = \frac{I_K}{I_{dRH}}$ ;  $I_K$  – значен-

ня уставки струмообмеження;  $\text{tg} \varphi_r$  – конструктивний параметр обмотки ротора АДФР;  $s_{cp}$  – середнє ковзання між двома АДФР.

На рис.4 наведено граничні значення коефіцієнта підсилення  $K_c$  для двигунів

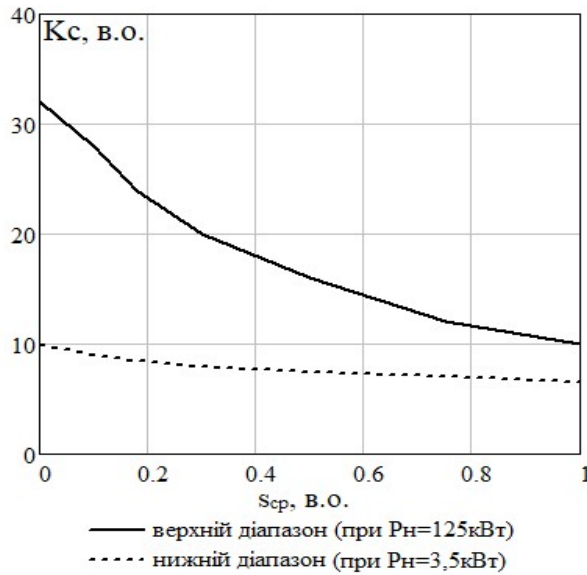


Рисунок 4 - Граничні значення коефіцієнту синхронізації  $K_c$  для двигунів серії МТН

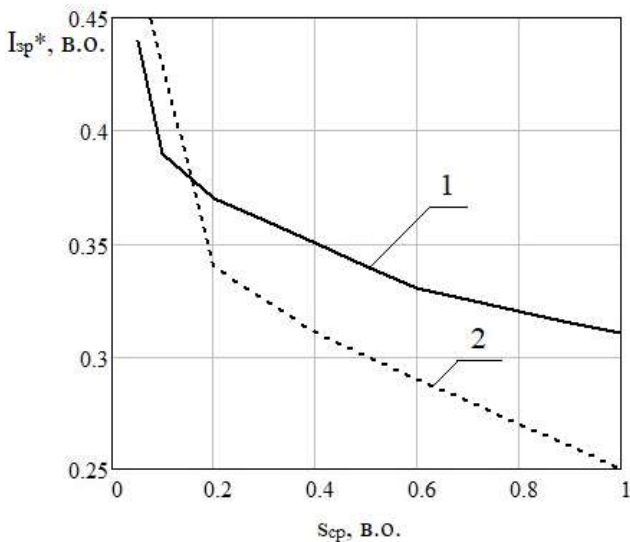


Рисунок 5 - Залежності зрівняльного струму від середнього значення ковзання АДФР серії МТН

серії МТН (діапазон потужностей від 3,5 до 125кВт). Аналіз за рис 4 показує, що двигуни з відносно високою напругою ротора ( $U_{rH} < 250$ В) мають експоненціальну залежність  $K_c = f(s_{cp})$ , мають кращі синхронізувальні властивості в зоні роботи на природній характеристиці, що пояснюється їх відносно малим  $R_e^*$ , де статичний момент двигуна, що працює у важких режимах, знаходиться в межах 30÷70% від його номінального значення.

На рис. 5 наведені залежності зрівняльного струму від середнього значення ковзання АДФР серії МТН при  $I_K^* = 2$  та дії статичних моментів  $M_1 = 0,3M_H$  і  $M_2 = 0,7M_H$  (1 – для МТН = 111-6, при  $s_1 - s_2 = 0,052$ ; 2 – для МТН = 411-6, при  $s_1 - s_2 = 0,012$ ). Зрівняльний струм залежить від параметрів роторних кіл, середнього значення ковзання роторів  $s_{cp}$ , комутаційного падіння напруги випрямлячів (від струму обмеження) та параметрів навантаження, тобто від різниці ковзання роторів.

Синхронізувальний момент для двигунів типу МТН перебуває в діапазоні  $(0,44 \div 0,26)M_H$ , що вказує на високу синхронізувальну властивість системи узгодженого обертання, яке призводить до зменшення різниці ковзання в 2÷2,5 рази у статичному режимі.

Оскільки при струмообмеженні, фазний струм має трапецеїдальну форму, момент початку комутації має упереджуваний зсув на величину кута  $\alpha'$ , що забезпечує покращення коефіцієнта потужності випрямляча. При значеннях ковзань роторів, близьких до номінального, кут комутації  $\gamma \approx 2\alpha'$ , тому коефіцієнт потужності ротора  $\cos \varphi \approx 1$ , що сприяє підвищенню моменту двигуна.

При закороченому роторі струм у фазах практично синусоїдальний. АДФР працюють на природній характеристиці з дещо підвищеним ковзанням, що пов'язано з падінням напруги в діодах випрямляча.

Досліджені аварійні режими при однофазному зриві ІКМ. Запропонована схема захисту інвертора, що містить L-C контур, виконаного на керованому приладі.

*У третьому розділі* проведено дослідження розробленого електропривода узгодженого обертання в усталених і динамічних режимах його роботи та проведена верифікація отриманих у розділі 2 аналітичних результатів з врахуванням впливу пружних зв'язків на синхронізувальні властивості електропривода узгодженого обертання.

На рис. 6 представлена структура схеми імітаційної моделі дослідження електропривода, яка реалізована в MatLAB у структурі Simulink. Візуальна модель АДФР на відміну від стандартної моделі, описує диференціальним рівнянням у двофазній системі координат  $\alpha$ - $\beta$  з синхронною частотою обертання магнітного кола статора, має параметр активного опору в контурі намагнічування статора, що дозволяє більш точно врахувати формування зрівняльного струму за нерівних навантажень АДФР. Механічний пружний зв'язок враховувався відповідно до загальноприйнятої двомасової системи.

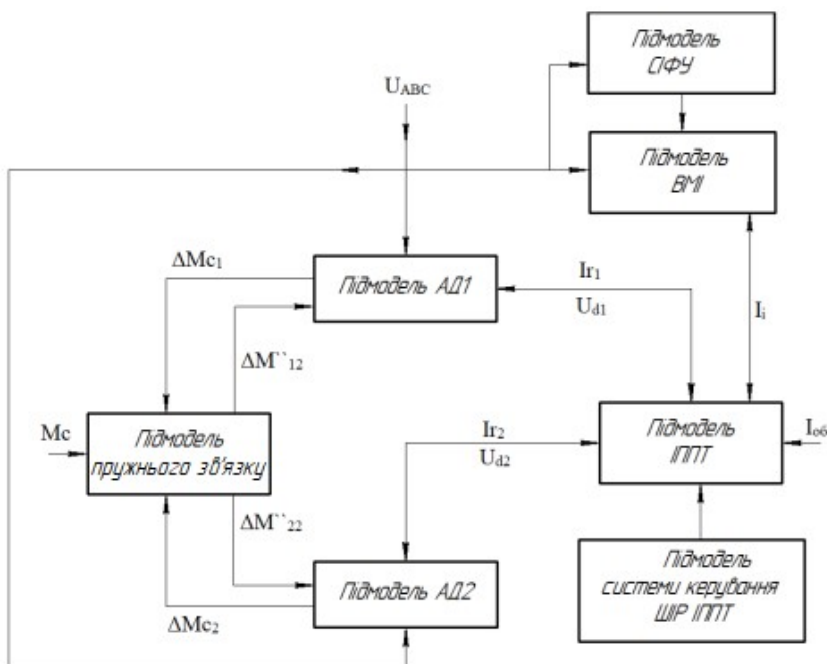


Рисунок 6 - Структура імітаційної моделі електропривода з імпульсно-струмовим керуванням в колі електрично пов'язаних

працюють з ШІР керувального сигналу з фіксованою частотою модуляції; г) з обмеженням сумарного випрямленого струму ротора в межах заданих пульсацій (ШІР зі змінною щільністю керувального сигналу).

Для всіх алгоритмів у зоні ковзання, коли ЕРС ротора не в змозі розвинути заданий струм, ключ МТ1 (рис.1) закорочує випрямлячі. За результатами моделювання встановлено, що найбільш ефективним алгоритмом керування є алгоритм "обме-

прийнятої двомасової системи. До складу моделі входять блоки роторних випрямлячів, перетворювачів ШІН, виконаних за схемою бустера та інвертора, керованого мережею. Синхронізація з мережею виконується блоком СІФУ з постійним кутом упередження  $\beta=30^\circ$ .

Дослідження синхронізувальних властивостей електропривода узгодженого обертання проводилося в режимі пуску з обмеженням випрямленого струму за таких алгоритмів керування: а) за середньою швидкістю обертання роторів АДФР; б) за мінімальною швидкістю обертання одного з АДФР; в) що працюють з ШІР керувального сигналу з фіксованою частотою модуляції; г) з обмеженням сумарного випрямленого струму ротора в межах заданих пульсацій (ШІР зі змінною щільністю керувального сигналу).

ження за сумарним струмом ротора з ШПР" при постійній частоті модуляції в динамічному режимі роботи асинхронного електропривода узгодженого обертання. На відміну від інших алгоритмів керування, він забезпечує найкращі синхронізувальні властивості в процесах розгону АДФР та найменший рівень максимальної неузгодженості швидкостей у динамічному режимі роботи, що становить 3,61%.

Засобами імітаційного моделювання проведені дослідження для двох випадків: без механічного зв'язку і з пружним механічним зв'язком роторів АДФР. Моменти збурення імітують дію пружних зв'язків, що має вираз:

$$\left. \begin{aligned} M &= M_{cp} + \Delta M \cdot \sin \omega_g t; \\ M_{cp} &= \frac{M_1 + M_2}{2}; \\ \omega_g &= 2\pi \cdot f_g; \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

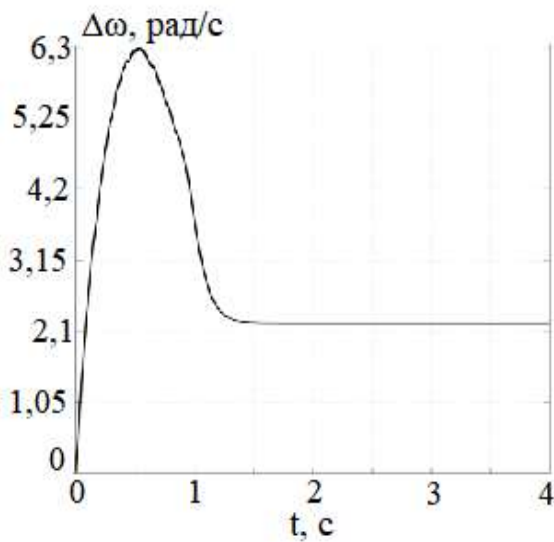


Рисунок 7 - Осцилограма пуску АДРФ типу МТН-111-6

де  $M_{cp}$  - середнє значення статичних моментів двигунів;  $\Delta M$  - амплітуда моменту пружного зв'язку;  $f_g$  - частота впливу моменту пружного зв'язку.

На рис. 7 представлена осцилограма різниці обертання під час пуску АДРФ МТН-111-6 з постійним моментом ( $M_1 = 0,8M_n$ ,  $M_2 = 0,4M_n$ ) без урахування пружного зв'язку під час реалізації алгоритму керування "обмеження за сумарним струмом ротора з ШПР" при постійній частоті модуляції. Для пояснення поведінки електропривода узгодженого обертання розглянуто електромеханічний процес за наступних допущень: під час пуску електромеханічна характеристика має екскаваторну характеристику, коефіцієнт  $K_c$  постійний, середній зрівнювальний момент пропорційний зрівнювальному струму. Рівняння динаміки мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} M_{cp} + M_y &= M_{CT1} - j\omega_0 \frac{ds_1}{dt}; \\ M_{cp} - M_y &= M_{CT2} - j\omega_0 \frac{ds_2}{dt}; \\ M_y &= \frac{M_H}{I_{dH}} I_y = M_n \cdot K_c \cdot (s_1 - s_2); \\ M_{CT1} &= \frac{M_H}{s_H} s_{CT1}; M_{CT2} = \frac{M_H}{s_H} s_{CT2}; \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де  $j$  - момент інерції.

Рішення системи (6) має вигляд:

$$s_1 - s_2 = (s_{CT1} - s_{CT2}) \cdot \left[ \frac{1}{2 \cdot s_H \cdot K_C} + \left( 1 - \frac{1}{2 \cdot s_H \cdot K_C} \right) e^{-\frac{t}{T'_M}} \right], \quad (7)$$

де  $T'_M = T_M \cdot 2 \cdot s_H \cdot K_C$  - електромеханічна постійна електропривода узгодженого обертання.

Згідно з (7) електромеханічна постійна електропривода узгодженого обертання у  $2 \cdot s_H \cdot K_C$  разів більша від природної електромеханічної постійної електропривода з одним двигуном, що сприяє збільшенню демпфуючих властивостей дводвигунного електропривода. За наявності гармонійних змін моменту, вираз (7) набирає вигляд:

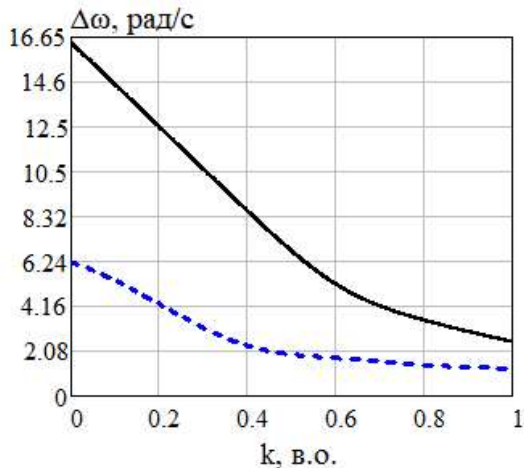
$$s_1 - s_2 = \frac{s_{CT1} - s_{CT2}}{2 \cdot s_H \cdot K_C} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_g \cdot T'_M)^2}} \sin(\omega_g t - \varphi_M) + \dots \right. \\ \left. \dots \left( 1 - \frac{1}{2 \cdot s_H \cdot K_C} - \sin \varphi_M \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_M}} \right], \quad (8)$$

де  $\varphi_M = \arctg(\omega_g T'_M)$

Рівняння (8) свідчить про те, що за відносно низьких частотах збурюючого впливу  $f_g = 0-3$  Гц поведінка електропривода визначається різницею статичних моментів. Завдяки параметру  $\varphi_M$ , вільна складова збурюючих моментів практично не впливає на неузгодженість швидкостей АДФР.

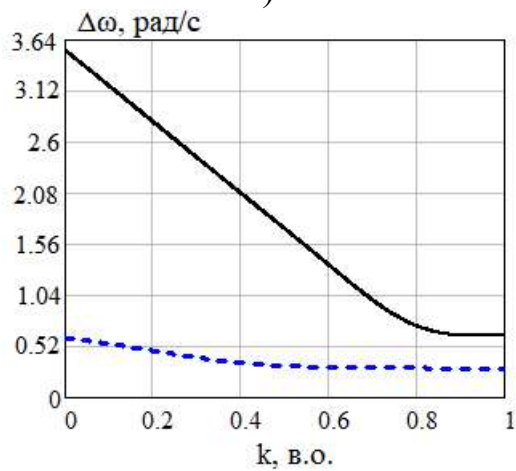
Запропонована методика визначення неузгодженості швидкостей АДФР у системі електропривода узгодженого обертання, яка враховує наявність як статичних, так і динамічних збурюючих моментів, що діють на АДФР, та дозволяє з достатньою точністю до 6,6% у сталих режимах їх роботи, та до 25,7% у перехідних режимах їх роботи виконувати оцінку неузгодженості швидкостей АДФР залежно від паспортних даних та параметрів схеми заміщення АДФР, а також параметрів самої системи електропривода.

Розглянуто ефект узгодженості обертання взаємопов'язаних двигунів у системі електропривода порівняно з їх прямим пуском під час роботи на природній характеристиці АДФР.



— без перетворювача  
 - - - з перетворювачем

а)



— без перетворювача  
 - - - з перетворювачем

б)

Рисунок 8 - Залежність неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнту розташування візка кран-балки:

а) при  $c_{12} = 5 \cdot 10^3$ ;

б) при  $c_{12} = 5 \cdot 10^1$ ;

Дослідження неузгодженості роторів двох взаємопов'язаних АДФР проводилися за різних параметрів пружного зв'язку: коефіцієнта пружності та коефіцієнта розташування візка кран-балки мостового підйомного крана (рис.8). Коефіцієнт розташування візка приймає значення 1, коли візок розташований в центрі кран-балки, тобто відстань візка від правого та лівого краю кран-балки однакова. Зміна значення коефіцієнта розташування від 1 до 0,1 характеризує зміщення візка від центру до одного зі сторін кран-балки.

На рис. 8 наведені результати дослідження у вигляді залежності неузгодженості швидкостей взаємопов'язаних АДФР від коефіцієнта розташування візка кран-балки, за різних значень коефіцієнта пружного зв'язку з моментами опору  $M_{CT1} = M_n$ ,  $M_{CT2} = 0.2 M_n$ . Найменше значення неузгодженості швидкостей взаємопов'язаних АДФР має місце при центральному розташуванні візка на кран-балці. При зміні розташування ліворуч або праворуч на відстань не більше ніж 40% від напівдовжини кран-балки, значення неузгодженості швидкостей під час використання перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням практично не змінюється. При збільшенні відстані розташування візка величина неузгодженості швидкостей взаємопов'язаних АДФР зростає за лінійним законом майже в 3 рази, не залежно від значення коефіцієнта жорсткого зв'язку.

Під час прямого пуску взаємопов'язаних АДФР без застосування перетворювачів при зміні розташування візка від центрального положення, інтенсивність зміни величини неузгодженості швидкостей взаємопов'язаних АДФР зростає та може збільшитись у 5-9 разів залежно від коефіцієнта пружного зв'язку. Таким чином наявність механічного зв'язку сприяє зменшенню неузгодженостей швидкостей взаємопов'язаних АДФР, однак очевидно, що електропривод з імпульсно-струмовим обмеженням має значно меншу неузгодженість. Вона як і за відсутності механічного зв'язку в  $2K_c \cdot s_n$  разів менша ніж під час роботи на природній характеристиці.

У четвертому розділі розглянуті особливості роботи електропривода узгодженого обертання в режимі гальмувань противмиканням. Показано, що практично для всіх типів АДФР для реалізації режиму гальмувань противмиканням необхідно встановлювати додатковий опір для обмеження струмів пов'язаних роторів АДФР, величина якого визначається за виразом:

$$R_n = \frac{\Delta U_d \cdot [2 - s_p) - 0,5]}{I_d} . \quad (9)$$

Для АДФР з напругою до 220В можливе гальмування противмиканням без додаткового резистора.

Показано, що в дводвигуневих електроприводах узгодженого обертання для візків мостових підйомних кранів, які живляться від кранових тролей можливе зменшення діапазону частот обертання, за яких забезпечується рекуперація енергії в мережу. Це зумовлено тим, що для сталевих кранових тролей, які виготовлені з прямокутного профілю, відносно значення еквівалентного опору перетворювача збільшується до 30%, а це призводить до зменшення його коефіцієнта підсилення. Наявність вищих гармонійних складових у фазному струмі викликає збільшення додаткових втрат, що спричиняє зменшення ККД електропривода до 1-2% (для діапазону потужностей 3,5÷36 кВт). Для уникнення цього недоліку було рекомендовано встановити безпотенційні модульні випрямлячі на корпус двигуна або поблизу від нього залежно від конструкції візка. Це дозволяє зменшити втрати в 6,3 рази завдяки передачі енергії на постійному струмі. При встановленні перетворювача на візку струмопровід виконується з троллями змінного струму, як у частотному електроприводі.

Проведено порівняльну оцінку за техніко-економічними та експлуатаційними показниками систем узгодженого обертання на базі частотного електропривода, електропривода з джерелом струму на базі індуктивно-ємнісного перетворювача в колі ротора та розробленого електропривода. Показано, що за встановленою потужністю обладнання, більш високому ККД в сталому режимі, розроблений електропривод для більшості випадків є альтернативним рішенням частотно-регульованого електропривода.

Експериментальна перевірка розробленого електропривода була проведена на реальному перетворювачі типу МПЧ-ТТП-160-380-50УХЛ4, виготовленого ТОВ «НДІ «Перетворювач» для 60-тонного мостового підйомного крана Алчевського металкомбінату у два етапи. На першому етапі проведені на стенді ТОВ «НДІ «Перетворювач». Керування проводилось контролером. Перша позиція контролера відповідала проміжній частоті обертання  $0,1n_n$ . Друга позиція контролера – природній характеристиці взаємопов'язаних АДФР. Для розробленого електропривода застосовувались АДФР типу МТН-412-6, 36 кВт, 955 об./хв. На рис. 9 наведені осцилограми фазного струму на I-й (рис. 9, а) та II-й (рис. 9, б) позиціях контролера (масштаб: 1В – 50А). Осцилограми струму рекуперації – на I-й (рис. 10, а) та II-й (рис. 10, б) позиціях контролера (масштаб: 1В – 50А).

Другий етап перевірки було проведено на мостовому крані 2П 30/5 № 238 ПРАТ «Запоріжжкран» для механізму переміщення мостового підйомного крану.

Встановлено, що втрати активної потужності під час роботи на проміжній частоті обертання зменшуються для цього режиму в 2,14 рази. Повна споживана потужність знижується в 1,17 рази, при зниженому  $\cos\phi$  практично в 2 рази. Останнє пояснюється великим струмом неробочого ходу і наявністю реактивної складової струму в ІКМ в момент рекуперації енергії ковзання в мережу. Під час роботи на II позиції споживана активна потужність зростає за рахунок втрат в єдиному роторному колі з закороченим ключем випрямляча. Споживана реактивна потужність залишається практично

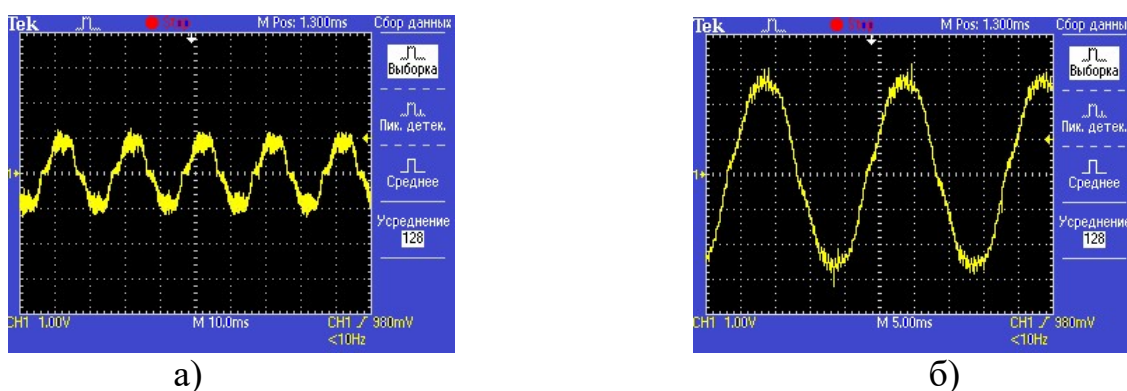


Рисунок 9 – Результати експериментального дослідження у вигляді осцилограм фазного струму ротора АДФР МТН-412-6на I (а) та II (б) позиціях контролера

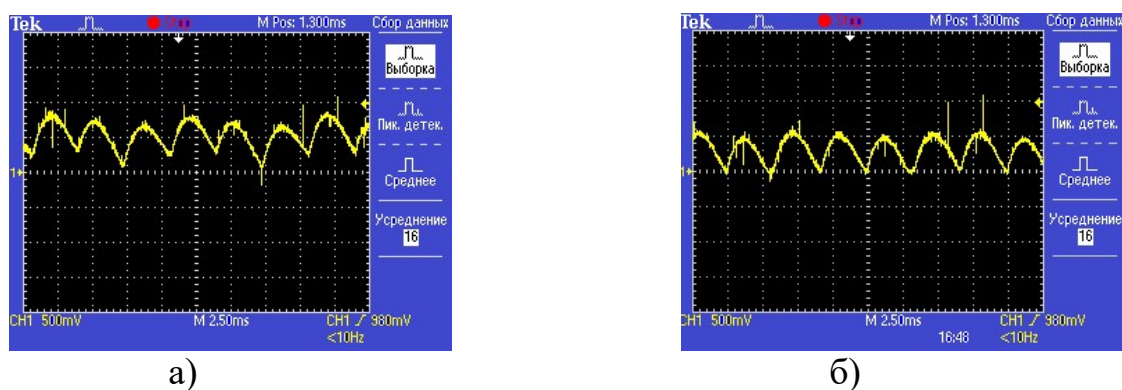


Рисунок 10 – Результати експериментального дослідження у вигляді осцилограм струму рекуперації перетворювача на I (а) та II (б) позиціях контролера

незмінною, так як ІКМ не генерує струм в мережу. Коефіцієнт потужності дещо зростає за рахунок збільшення активних втрат. Під час роботи мостового підйомного крана з електроприводом узгодженого обертання на базі МПЧ-ТТП-160-340-50УХЛ4 відзначається висока плавність ходу, відсутність поштовхів і значне зниження шуму від механічних вібрацій конструкції крана. Відсутність вібрацій моста під час пуску та під час руху відчувається фізично, що відзначено машиністом крана.

Під час дослідження електропривода узгодженого обертання було виявлено низку недоліків схеми електропривода. Першим недоліком є підвищена неузгодженість роторів при пускових і гальмівних режимах. Зменшення неузгодженості швидкостей досягається включенням двох комутаторів. Другим недоліком є відносно низький коефіцієнт потужності. Запропоновано замість ІКМ застосовувати АІН, який



при синхронізації з мережею працює з упереджувальним кутом, що дорівнює  $30^\circ$ . Це дозволяє в усталеному режимі роботи електроприводу підтримувати коефіцієнт потужності на рівні  $\cos\varphi \approx 1$  і частково зменшити споживання реактивної потужності під час пуску.

## ВИСНОВКИ

У дисертації, яка є завершеною науковою роботою, розв'язане важливе науково-прикладне завдання, яке пов'язане з дослідженням і створенням нового виду електроприводу узгодженого обертання на базі АДФР з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, що має властивість самосинхронізації за невизначених механічних впливів, з високими енергетичними і відносно малими масо-габаритними і вартісними показниками порівняно з відомими системами електроприводів узгодженого обертання, та отримані основні результати:.

1. Аналітичний вираз коефіцієнта підсилення електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, при якому забезпечується стабілізація напруги на вході автономного інвертора або інвертора, керованого мережею, який працює в режимі рекуперації енергії з максимальним значенням коефіцієнту потужності електроприводу.

2. Аналітичний вираз для зрівняльного струму між роторами взаємопов'язаних двигунів, що зумовлює появу зрівнювального моменту. Доведено, що величина зрівняльного струму залежить від коефіцієнта синхронізації, кратності уставки струмообмеження електропривода узгодженого обертання, кратності пускового струму, а також різниці ковзань між взаємопов'язаними двигунами. Встановлено, що в пускових режимах роботи електропривода узгодженого обертання величина уставки струмообмеження зменшує залежність від величини зрівняльного струму, що пояснюється впливом комутаційних процесів в роторних випрямлячах. Під час роботи в межах малих значень ковзань взаємопов'язаних АДФР (на природній характеристиці) зрівняльний струм визначається тільки коефіцієнтом синхронізації та різницею ковзань цих АДФР.

3. Встановлено, що найбільш ефективним алгоритмом керування є алгоритм "обмеження за сумарним струмом ротора з ШПР" за постійної частоти модуляції в динамічному режимі роботи асинхронного електропривода узгодженого обертання. На відміну від інших алгоритмів керування, він забезпечує найкращі синхронізуючі властивості в процесах розгону АДФР та найменший рівень максимальної неузгодженості швидкостей у динамічному режимі роботи, що становить 3,61%.

4. Запропонована методика визначення неузгодженості швидкостей АДФР у системі електропривода узгодженого обертання, яка дозволяє врахувати наявність як статичних так і динамічних збурюючих моментів, що діють на пов'язані АДФР та дозволяє з достатньою похибкою до 6,6% у сталих та до 25,7% у перехідних режимах їх роботи виконувати оцінку неузгодженості швидкостей АДФР залежно від їх паспортних даних та параметрів схеми заміщення, а також від параметрів самої системи електропривода.

5. Встановлено, що за наявності пружних зв'язків між електроприводами механізму переміщення мостового підйомного крана, неузгодженість частот обертання АДФР істотно менша (в 8-10 разів), ніж у електроприводів узгодженого обертання без урахування механічного зв'язку між їх валами, та в 2-3 рази менша, ніж при роботі електропривода на природній характеристиці. Показано, що для двигунів серії МТН в діапазоні потужностей 3,2-125 кВт (при ПВ=25%) неузгодженість швидкостей у сталому режимі зменшується, а електромеханічна стала часу електропривода зростає у 2,3-2,94 рази, що підтверджує високі самосинхронізувальні і демпфуючі властивості електропривода узгодженого обертання.

6. Доведено, що врахування струмообмежувального резистора дозволяє усунути негативні ефекти, що тривають у перехідних процесах у момент реверсу за реалізації режиму противмикання, а також зменшити рівень неузгодженості швидкостей АДФР у системі електропривода з 4,5% до 0,89%.

7. Показано, що завдяки універсальності, малим масо-габаритним показникам і більш високій ефективності системи електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів є конкурентоспроможною альтернативою частотно-регульованому електроприводу.

8. Запропоноване схемне рішення і результати дослідження електропривода узгодженого обертання і схеми його захисту використані ТОВ «НДІ «Перетворювач» в електроприводі обертання типу МПЧ-ТТП-150-380 УХЛ4.2, який призначено для мостового підйомного крана вантажопід'ємністю 60т Алчевського металургійного комбінату.

9. Проведені експериментальні дослідження електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів типу МПЧ-ТТП-150-380 УХЛ4.2 на стендах ТОВ «НДІ «Перетворювач» та ПРАТ «Запоріжжкран» підтверджують працездатність і ефективність запропонованого технічного рішення та достовірність отриманих теоретичних досліджень.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у провідних фахових періодичних виданнях, включених до переліку МОН України:*

1. Андриенко П. Д. Энергоэффективное торможение противовключением электроприводов на базе асинхронных двигателей с фазным ротором [Текст] / П. Д. Андриенко, Д. С. Андриенко, М. И. Коцур, С. В. Калюжный // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014, – №15(91). – С. 89 – 91 (*індексована Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.*).

2. Kotsur M. Impulse-controlled system for matched rotation of induction motors [Text] / M. Kotsur, P. Andrienko, O. Bliznyakov, A. Andrienko, D. Andrienko // Electro-technic and Computer Systems – 2015. - № 19 (95). – С. 14 – 17 (*індексована Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.*).

3. Коцур, М. И. Определение оптимальной частоты коммутации вентилях преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада [Текст] / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. А. Андриенко, Д. С. Андриенко // *Електротехніка та електроенергетика* – 2016. – №1 – С. 5 – 11 (*індексована Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.*).

4. Андриенко П.Д. Электромагнитная совместимость систем питания кранов с частотно-регулируемым приводом [Текст] / П.Д. Андриенко, О.В. Немыкина Д.С. Андриенко // *Електротехніка та електромеханіка*. – 2016. - №4(2). - С. 109-112 (*індексована Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.*).

5. Коцур, М. И. Регулируемый асинхронный электропривод с улучшенными характеристиками [Текст] / М. И. Коцур, А. А. Андриенко, Д. С. Андриенко, О. В. Немыкина // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2016. – №22(98) – С. 74 – 78 (*індексована Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.*).

6. Андриенко П.Д. Энергоэффективный крановый электропривод [Текст] / П.Д. Андриенко, А.А. Андриенко Д.С. Андриенко В. П. Метельський, О.В. Немыкина, // *Вісник НТУ "ХПІ"*. - 2017. - №27(1249). - С. 254-257 (*індексована Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.*).

*Патенти України:*

7. Пат. Україна, 112044, МПК H02P5/74 (2006.01). Двродвигуновий електропривід імпульсного регулювання асинхронних двигунів з фазними роторами [Електронний ресурс] / М. І. Коцур, П. Д. Андрієнко, Д. О. Кулагін, І. М. Коцур, Д. С. Андрієнко, А. А. Андрієнко; заявн. та патентовласник Запорізький національний технічний університет; заявл. 27.10.2015; опубл. 11.07.2016, Бюл. №13 – Режим доступу: [http:// www.uipv.org](http://www.uipv.org).

8. Пат. Україна, 105994, МПК H02P5/74 (2006.01). Двродвигуновий електропривід імпульсного регулювання узгодженого обертання асинхронних двигунів з фазними роторами [Електронний ресурс] / М. І. Коцур, П. Д. Андрієнко, Д. О. Кулагін, І. М. Коцур, Д. С. Андрієнко, А. А. Андрієнко; заявн. та патентовласник Запорізький національний технічний університет; заявл. 27.10.2015; опубл. 11.04.2016, Бюл. №7 – Режим доступу: [http:// www.uipv.org](http://www.uipv.org)

*Статті у матеріалах міжнародних конференцій, занесених до міжнародних наукометричних баз даних:*

9. Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors [Text] / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, D. Andrienko // *IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), February 20-24, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 304-307 DOI:10.1109/TCSET.2018.8336208 (Scopus, Web of Science)*

10. Kotsur, M. I. Increasing of Thermal Reliability of a Regulated Induction Motor in Non-Standard Cycle Time Conditions [Text] / M. I. Kotsur, I.M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, D. Andrienko // *IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), November 15th - 17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 2017, pp. 88-91. DOI:10.1109/MEES.2017.8248960 (Scopus, Web of Science)*.

11. Andrienko, P. Synchronizing Properties of Impulse-Current Controlled Electric Drive of Coordinated Rotation in the Circuit of Electrically Coupled Rectifiers of the Rotor, [Text] / P. Andrienko, D. Andrienko, A. Andrienko, O. Nemykina, O. Blyzniakov //2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-5, DOI: [10.1109/PAEP49887.2020.9240846](https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240846) (*Scopus, Web of Science*).

### **Внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві:**

У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, особисто дисертанту належить: [1] імітаційна модель дводвигунного електропривода; [2] методика визначення оптимальної частоти модуляції силового ключа для підвищення енергетичних показників електропривода; [3] порівняльний аналіз неузгодженостей швидкостей АДФР з та без електропривода узгодженого обертання під час їх роботи на природній характеристиці; [4] дослідження електромагнітної сумісності систем живлення підйомних кранів з частотно-регульованим приводом на змінному струмі; [5] дослідження неузгодженості швидкостей АДФР в системі електропривода узгодженого обертання з урахуванням впливу збурюючих моментів; [6] порівняльний аналіз енергетичних показників електропривода з імпульсно-струмовим перетворювачем та перетворювачем частоти під час роботи електропривода в динамічному режимі; [7] запропоновано поліпшити синхронізувальні властивості за рахунок струмообмеження сумарного випрямленого струму роторів двигунів; [8] запропоновано застосування спільного інвертора, який працює з високим коефіцієнтом потужності, який, крім того, виконує функцію компенсатора реактивної потужності під час роботи електроприводу на природній характеристиці; [9] дослідження ефективності обмеження неузгодженостей швидкостей АДФР в системі електропривода узгодженого обертання щодо покращення їх теплового навантаження та надійності роботи в умовах частих пусків та гальмувань; [10] дослідження електромагнітної сумісності електропривода узгодженого обертання з мережею живлення кранового обладнання; [11] отримано коефіцієнт синхронізації, який залежить від конструктивних особливостей схемного рішення та параметрів електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням сумарного струму в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, та дозволяє отримати аналітичні вирази зрівняльного струму між роторами двигунів.

### **АНОТАЦІЯ**

**Андрієнко Д.С. Асинхронний електропривід узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. Національний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, 2021.

У дисертаційній роботі розв'язане науково-прикладне завдання, яке пов'язане з дослідженням та створенням нового виду електропривода узгодженого обертання

на базі асинхронних двигунів з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, що має властивості самосинхронізації за незначених механічних впливів з високими енергетичними і відносно малими масогабаритними і вартісними показниками порівняно з відомими системами електроприводів узгодженого обертання.

Отримано безрозмірний узагальнений параметр (коефіцієнт) синхронізації, який залежить від конструктивних особливостей схемного рішення, параметрів роторного кола АДФР та співвідношення статичних моментів асинхронного електропривода узгодженого обертання та аналітичні вирази для визначення зрівняльного струму моменту між роторами двигунів. Визначені параметри електричної схеми інвертора керованого мережею перетворювача узгодженого обертання в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, при яких забезпечується надійна робота інвертора та його захист від аварійних струмів.

Розроблена імітаційна комп'ютерна модель, яка враховує взаємопов'язані електромагнітні й електромеханічні процеси в системі електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів та дозволяє встановити ефективні способи та алгоритми керування перетворювачем для отримання найкращих синхронізуючих властивостей АДФР за збереження високого рівня ККД та коефіцієнта потужності електроприводу.

Отримані аналітичні співвідношення електромеханічного процесу в електроприводі узгодженого обертання, завдяки яким встановлено, що неузгодженість у сталому режимі зворотно пропорційна добутку коефіцієнта синхронізації та номінального ковзання двигуна, а електромеханічна постійна часу пропорційна цьому добутку. Запропонована методика визначення неузгодженості швидкостей АДФР у системі електропривода узгодженого обертання, яка враховує наявність як статичних та і динамічних збурюючих високочастотних моментів, що діють на АДФР, та дозволяє з достатньою похибкою до 6,6% у сталих, та до 25,7% у перехідних режимах їх роботи виконувати оцінку неузгодженості швидкостей АДФР залежно від паспортних даних та параметрів схеми заміщення АДФР.

Проведені експериментальні дослідження підтверджують працездатність і ефективність запропонованого технічного рішення асинхронного електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів.

**Ключові слова:** перетворювач, асинхронний двигун, синхронізація, неузгодженість швидкостей, керування, ковзання, випрямляч, інвертор.

## ABSTRACT

**Andrienko D.S. Asynchronous electric drive of mismatched rotation with pulse-current limitation in the circuit of electrically coupled rotor rectifiers – Qualifying scientific work as a manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.09.03 – electrical complexes and systems. National University «Dnipro Polytechnic», Dnipro, 2021.

In the dissertation work, a scientific and practical problem was solved related to the study and creation of a new type of electric drive of coordinated rotation based on asynchronous motors with pulse-current limitation with electrically connected rectifiers in phase rotors, which have self-synchronization properties under uncertain types of mechanical effects with high energy and relatively small weight, dimension and cost indicators in comparison with known systems of electric drives of mismatched rotation.

A dimensionless generalized parameter (coefficient) of synchronization is obtained, which depends on the design features of the circuit solution, the parameters of the rotor circuit of the asynchronous motor with wound rotor (AMWR) and the ratio of the static moments of an asynchronous electric drive of matched rotation and analytical expressions for determining the equalizing torque and current between the rotors of the motors. The parameters of the electrical circuit of the inverter of a network-controlled converter of mismatched rotation with electrically connected rectifiers in the rotor circuit have been determined, at which reliable operation of the inverter and its protection from emergency currents are ensured.

A simulation computer model has been developed that takes into account the inter-related electromagnetic and electromechanical processes in the electric drive system of mismatched rotation with pulse-current limitation in the circuit of electrically connected rotor rectifiers, and allows to establish effective methods and methods for controlling the converter to obtain the best synchronizing properties of the AMPR while maintaining a high level of efficiency and drive power factor.

Analytical ratios of the electromechanical process in an electric drive of mismatched rotation were obtained due to which it was found that the inconsistency in the steady state is inversely proportional to the product of the synchronization coefficient and the nominal slip of the motor, and the electromechanical time constant is proportional to this product. A method is proposed for determining the speed mismatch of AMPR in the system of an electric drive of mismatched rotation, which takes into account the presence of both static and dynamic disturbing high-frequency moments acting on the AMPR. This allows, with sufficient accuracy up to 6.6% in constant, and up to 25.7% in transient modes of their operation, to assess the inconsistency of the AMPR speeds depending on the passport data and parameters of the AMPR equivalent circuit.

The conducted experimental studies confirm the operability and efficiency of the proposed technical solution for an asynchronous electric drive with a pulse-current limitation in the circuit of electrically connected rotor rectifiers.

**Key words:** converter, asynchronous motor, synchronization, speed inconsistency, control, slip, rectifier, inverter.