

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

АНДРІЄНКО ДАНИЛО СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.365.6

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідеї, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Д.С. Андрієнко

Науковий керівник Коцур Михайло Ігорович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних та електронних апаратів НУ "Запорізька політехніка"

Науковий керівник Метельський Володимир Петрович, професор, кандидат технічних наук, Запорізький національний технічний університет

Запоріжжя, 2020

## 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 (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи (141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) – Національний університет "Запорізька політехніка", Запоріжжя, 2020.

У дисертаційній роботі розв'язано науково-прикладну задачу, яка пов'язана з дослідженням та створенням електроприводів узгодженого обертання на базі асинхронних двигунів з імпульсно-струмовим обмеженням з електрично пов'язаними фазними роторними випрямлячами, які мають властивості самосинхронізації при невизначених видах механічних впливах з високими енергетичними і відносно малими масогабаритними і вартісними показниками в порівнянні з відомими системами електроприводів узгодженого обертання.

Отримано аналітичний вираз коефіцієнту підсилення імпульсно-струмового перетворювача в колі ротора з електрично пов'язаними роторними випрямлячами, при якому забезпечується стабілізація напруги на вході інвертора керованого мережею, працюючого в режимі безперервної рекуперації з постійним кутом інвертування.

Отримано безрозмірний узагальнений параметр (коефіцієнт) синхронізації  $K_c$ , 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.

Визначені параметри електричної схеми інвертора керованого мережею перетворювача узгодженого обертання з електрично пов'язаними випрямлячами

в колі ротора, 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 електроприводу 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 при збереженні високого рівня ККД та коефіцієнту потужності електроприводу.

Отриманні 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 в системі електроприводу узгодженого обертання, яка враховує наявність як статичних, так і динамічних збуджуючих високочастотних моментів, що діють на пов'язані АДФР, та дозволяє з достатньою похибкою до 6,6% в сталих, та до 25,7% у перехідних режимах їх роботи виконувати оцінку неузгодженості швидкостей пов'язаних АДФР в залежності від їх паспортних даних та параметрів схеми заміщення.

Розглянуто особливості реалізації режиму гальмування противмиканням електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів. Показана необхідність у застосуванні в схемі електроприводу узгодженого обертання струмообмежуючого резистора для обмеження роторних струмів в момент реверсу та в процесі гальмування. Розглянуті особливості застосування електроприводу узгодженого обертання для механізму переміщення візка мостового крана. Показана доцільність установки випрямляча (перетворювача)

електроприводу на візку, що дозволяє збільшити коефіцієнт посилення імпульсно-струмового перетворювача та підвищити ККД електроприводу.

Проведена порівняльна оцінка за техніко-економічними та експлуатаційними показниками електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів з сучасними електроприводами узгодженого обертання (частотно-регульований та індуктивно-ємнісний перетворювачі), яка підтверджує доцільність використання розробленого електроприводу.

Показані шляхи поліпшення узгодженості обертання ротора двигунів шляхом незалежного імпульсно-струмового обмеження в колі з електрично пов'язаними роторними випрямлячами АДФР в системі електроприводу зі збереженням самосинхронізуючих властивостей, та можливістю підвищення коефіцієнта потужності електроприводу з використанням АІН з випереджаючим кутом керування, замість інвертора керованого мережею, що сприяє підвищенню надійності електроприводу.

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

Запропоноване схемне рішення електроприводу узгодженого обертання і схеми його захисту використані ТОВ НДІ «Перетворювач» в електроприводі обертання типу МПЧ-ТТП-150-380 УХЛ4.2, який призначено для мостового крана вантажопідйомністю 60т. Алчевського металургійного комбінату.

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

Список публікацій за темою дисертації:

*Патенти України:*

1. Пат. Україна, 112044, МПК Н02Р5/74 (2006.01). Дводвигуновий 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).

2. Пат. Україна, 105994, МПК Н02Р5/74 (2006.01). Дводвигуновий 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 провідних фахових періодичних виданнях, включених до переліку МОН України:*

3. 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.

4. Kotsur M. Impulse-controlled system for matched rotation of induction motors [Text] / M. Kotsur, P. Andrienko, O. Bliznyakov, A. Andrienko, D. Andrienko // *Electrotechnic and Computer Systems* – 2015. - № 19 (95). – С. 14 – 17.

5. Коцур, М. И. Определение оптимальной частоты коммутации вентиля 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.

6. 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.

7. Коцур, М. И. Регулируемый асинхронный электропривод с улучшенными характеристиками [Текст] / М. И. Коцур, А. А. Андриенко, Д. С.

Андриенко, О. В. Немыкина // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2016. – №22(98) – С. 74 – 78.

8. 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.

*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](https://doi.org/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](https://doi.org/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*).

## ЗМІСТ

	С.
Зміст.....	7
Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	10
Вступ.....	11
1 Сучасний стан систем електроприводів узгодженого обертання механізмів переміщення кранів.....	24
1.1 Кінематичні особливості роботи механізмів переміщення мостових кранів.....	25
1.2 Огляд існуючих систем електроприводів узгодженого обертання.....	28
1.3 Висновки до першого розділу і постановка задачі досліджень.....	43
2 Дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів в системі електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів.....	46
2.1 Особливості функціонування електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням.....	46
2.2 Визначення коефіцієнта посилення імпульсного перетворювача в роторному колі АДФР.....	49
2.3 Статичні синхронізуючі моменти електроприводу узгодженого обертання.....	55
2.4 Особливості роботи роторних випрямлячів.....	68
2.5 Дослідження особливостей роботи інвертора керованого мережею в аварійних режимах в вентильному каскаді з імпульсно-струмовим обмеженням.....	74
2.6 Висновки до другого розділу.....	82
3 Дослідження синхронізуючих властивостей системи електроприводу	

узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням засобами імітаційного моделювання.....	85
3.1 Математична та імітаційна моделі дослідження узгодженого обертання асинхронного електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням.....	86
3.1.1 Імітаційна реалізація математичної підмоделі асинхронного двигуна.....	87
3.1.2 Імітаційна реалізація математичної підмоделі механічного пружного зв'язку.....	93
3.1.3. Імітаційна реалізація підмоделі перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів.....	95
3.1.4. Реалізація алгоритмів керування перетворювачем для узгодження частоти обертання асинхронного електроприводу...	100
3.1.5 Реалізація імітаційної підмоделі інвертора керованого мережею.....	105
3.2 Дослідження ефективності алгоритмів керування електроприводу узгодженого обертання.....	107
3.3 Аналітичне дослідження неузгодженості швидкості двигунів при дії статичних та динамічних моментів навантаження.....	117
3.4 Дослідження неузгодженості швидкостей АДФР в сталих режимах роботи з врахуванням пружного зв'язку.....	122
3.5 Висновки до третього розділу.....	129
4 Розробка рекомендацій щодо реалізації електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів .....	132
4.1 Реалізація режимів гальмування в електроприводі узгодженого обертання.....	132
4.2. Особливості роботи електроприводу узгодженого обертання	141



механізму переміщення візка.....	
4.3. Порівняльна оцінка техніко-економічних та експлуатаційних показників електроприводів узгодженого обертання.....	143
4.4 Експериментальні дослідження електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів.....	151
4.5 Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності електроприводу узгодженого обертання.....	160
4.6. Висновки до четвертого розділу.....	162
Висновки.....	165
Перелік джерел посилання.....	168
Додаток А Протокол випробувань.....	182
Додаток Б Акти впровадження.....	187

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

АДФР	асинхронний двигун з фазним ротором
ІЄП	індуктивно – ємнісний перетворювач
АДФР	асинхронний двигун з фазним ротором
АДКЗ	асинхронний двигун з короткозамкненим ротором
ЕРС	електрорушійна сила
СІФК	система імпульсно-фазового керування
АВК	асинхронно-вентильний каскад
ІППН	імпульсний перетворювач підвищувальної напруги
ШІР	широтно-імпульсний регулятор
ІКМ	інвертор керований мережею
АН	автономний інвертор напруги
ЧРП	частотно-регульований перетворювач

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Наряду з модернізованими електроприводами мостових кранів в Україні, ще є велика маса електроприводів зі струмовим реостатним регулюванням В якості приводного двигуна в основному використовуються асинхронні двигуни з фазним ротором (АДФР) [1]. Вказані електроприводи мають суттєві недоліки, які пов'язані з відсутність плавного регулювання швидкості та пульсуючим моментом при пуску [2]. Ці недоліки, з урахуванням пружних зв'язків металоконструкції кранів, викликають різноманітні динамічні збурення в конструкціях кранів, що призводить до скорочення їх служби експлуатації [3].

Серед різноманітності конструкцій і призначення кранів, найбільш поширеними являються мостові підйомні крани машинобудівних, металургійних та інших підприємств.

З точки зору найбільшого впливу на строки служби мають електроприводи переміщення мостових підйомних кранів з багатодвигунним електроприводом [4]. Вказані вище недоліки електроприводів з релейно-контакторним керуванням призводять до зносу реборд ходових колісних пар, підкранових шляхів, металоконструкцій мосту, збільшення енергоємності.

Усунення вказаних недоліків відбувається шляхом створення електроприводів узгодженого обертання які повинні мати рівномірне прискорення, можливість реалізації достатньо жорстких проміжних частот обертання, відносно низьку вартість та енергоємність.

Створення та дослідження електроприводів узгодженого обертання двигунів переміщення кранів присвячено багато робіт закордонних та вітчизняних вчених в тому числі Герасим'як Р.П., Бажутін Д.В., Толочко О.І. Бушер В.В., Лещеев В.А., Тіщенко В.В., Шамардина В.І., Калюжний С.В., Волков І.В., Ісааков В.Н., Лімонов Л.Г., Гаркушин А.В., Макурін М.В., Шевченко І. С., Паліс С.Ф., Яуре А.Г., Певзнер Е.М., Дорофеев А.А. та ін.

На даний час створено значну кількість електроприводів, в тому числі:

- релейно-контакторне керування з дроселем та резистором в колі ротора АДФР [5];
- електропривод з електрично пов'язаними роторними випрямлячами, працюючого на резистивне навантаження або з індуктивно-ємнісним перетворювачем (ІЄП) [6, 7, 8, 9, 10];
- частотне регулювання асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором (АДКР) та давачами частоти обертання ротора і перекошу мостів крану [11 - 15].

У всіх існуючих системах узгодженого обертання існують окремі недоліки, які пов'язані зі збільшеними втратами електроенергії, значною встановленою потужністю, необхідністю використання давачів швидкості, та відносно високою собівартістю [16, 17]. Існуючі дослідження щодо збурюючих факторів металоконструкції кранів, при роботі електроприводів переміщення, вказують на різноманітність та стохастичність їх поведінки, як самої конструкції, так і їх збурюючих моментів [18-22]. Тому при проектуванні окремих електроприводів виникають труднощі щодо їх врахування.

Враховуюче вищесказане, виникає проблема щодо створення енергоефективних електроприводів узгодженого обертання, в яких силова схема має властивості самосинхронізації. Це дозволить компенсувати збурення, які не враховані при побудові системи керування електроприводом.

Як показують дослідження, таким вимогам задовольняють схеми з електрично пов'язаними роторними випрямлячами АДФР [7].

Тому, удосконалення вказаних схем, з точки зору зменшення електричних втрат, встановленої потужності та собівартості є актуальним науково-практичним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**  
Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричних і електронних апаратів Національного університету «Запорізька політехніка» у відповідності до тематичного плану наукових досліджень за держбюджетною темою ДБ 03415

«Розробка та дослідження напівпровідникових перетворювачів для електроприводу за схемою струмопараметричного асинхронно-вентильного каскаду», (номер держреєстрації 0115U002566), а також планів ТОВ «НДІ Перетворювач» по створенню електроприводів.

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

Відповідно до зазначеної мети, у дисертаційній роботі вирішені наступні завдання:

- аналіз існуючого стану розробок та досліджень електроприводів узгодженого обертання з асинхронними двигунами;
- дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів в системі електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів;
- розробка математичної та імітаційної моделі електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів для механізму переміщення мостового крану, що дозволяє оцінити демпфуючі можливості системи електроприводу при невизначених збурюючих механічних моментах;
- дослідження самосинхронізуючих властивостей електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів за різних збурюючих моментів механізму переміщення мостового підйомного крану;
- розробка рекомендацій щодо реалізації електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів;

- експериментальна перевірка роботи електроприводу 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, працюючого з максимальним коефіцієнтом потужності електроприводу.

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

**Методи дослідження.** В 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 електроприводу під час аналізу електромеханічних процесів для визначення синхронізувальних властивостей електроприводу узгодженого обертання.

#### **Основні наукові положення, які виносяться на захист.**

1. В електроприводах узгодженого обертання на базі асинхронних двигунів з імпульсним обмеженням сумарного струму роторних випрямлячів, при використанні 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 імпульсно-струмовим обмеженням сумарного струму роторних випрямлячів більша за електромеханічну постійну часу асинхронного двигуна на величину добутку подвійного номінального ковзання і коефіцієнта синхронізації, що

суттєво підвищує самосинхронізувальні властивості електроприводів при невизначених збурюючих пружних моментів.

**Наукова новизна, яка виносяться на захист:**

- 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 в сталому режимі роботи обернено пропорційна добутку номінального ковзання та подвійного коефіцієнта синхронізації ( $2K_c \cdot s_H$ ), значення якого повинно бути більшим за одиницю;

- встановлено, що електромеханічна стала часу асинхронного електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів в  $2K_c \cdot s_H$  разів більша електромеханічної сталої часу 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 електроприводу 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, при якому забезпечується стабілізація напруги на вході автономного інвертора, або інвертора, керованого мережею, який працює в режимі рекуперації енергії з максимальним значенням коефіцієнта потужності електропривода.

**Практична цінність роботи:**

- 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 електроприводу;

- 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% в сталих, та до 25,7% у перехідних режимах їх роботи виконувати 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;

- проведена 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 керованою 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 вантажопідйомністю 60т. Алчевського металургійного комбінату.

**Особистий вклад здобувача.** Дисертаційна робота є результатом самостійної роботи автора. Всі наукові результати отримані здобувачем самостійно. В друкованих працях, опублікованих у співавторстві, особисто дисертанту належить: [61] запропоновано поліпшити синхронізувальні властивості за рахунок струмообмеження сумарного випрямленого струму роторів двигунів; [62] запропоновано застосування спільного інвертора; працюючого с високим коефіцієнтом потужності, який крім того виконує функцію компенсатора реактивної потужності при роботі електропривода на природній характеристиці; [68] імітаційна модель дводвигунного електропривода; [77] методика щодо визначення оптимальної частоти модуляції силового ключа електропривода для підвищення енергетичних показників електропривода; [93] порівняльний аналіз неузгодженостей швидкостей АДФР з та без електроприводу узгодженого обертання при їх роботи на природній характеристиці; [94] дослідження неузгодженості швидкостей АДФР в системі електроприводу узгодженого обертання з урахуванням впливу збурюючих моментів; [111] порівняльний аналіз енергетичних показників електропривода з імпульсно-струмовим перетворювачем та перетворювачем частоти при роботі електропривода в динамічному режимі роботи; [112] дослідження ефективності обмеження неузгодженостей швидкостей АДФР в системі електроприводу узгодженого обертання щодо покращення їх теплового навантаження та надійності роботи в умовах частих пусків та гальмувань; [113] дослідження електромагнітної сумісності електропривода узгодженого обертання з живлячою

мережею кранового обладнання; [114] 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; [126] дослідження електромагнітної сумісності систем живлення кранів з частотно-регульованим електроприводом на змінному струмі.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати досліджень доповідалися здобувачем та обговорювались на 8 конференціях, серед них: 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 у 11 публікаціях, зокрема: 2 патентна України; 6 статей у фахових наукових виданнях, що входять до міжнародних НБД; 3 статті у матеріалах міжнародних конференцій (індексуються в НБД Scopus та Web of Science).

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку джерел посилання зі 126 найменувань.

**Зміст роботи:** у вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, викладно об'єкт і предмет дослідження, наукові положення, наукову і практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок автора в результатах публікацій, структура та обсяг роботи.

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

Наряду з широким використанням ЧРП, існує ряд модифікацій промислових схем, які застосовуються в колах ротора взаємопов'язаних АДФР, та покращують роботу електропривода переміщення крану, але не вирішують основні проблеми - відсутність самосинхронізації при дії збурюючих моментів. Серед відносно простих схем - схема узгодженого обертання з електрично пов'язаними випрямлячами в колі ротора зі ступеневим реостатним пуском, яка має властивості самосинхронізації, але не усуває основні недоліки - підвищення енергетичних втрат, коливання пускового моменту, механічного зносу конструкційних елементів крану.

В результаті аналізу виникає необхідність в дослідженні електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, який має властивості самосинхронізації, високі енергетичні показники, та міг би забезпечити зменшену встановлену потужність, масо-габаритні та вартісні показники у порівнянні з ЧРП.

**В другому розділі** проведено аналіз і дослідження електромагнітних процесів в системі асинхронного електропривода узгодженого обертання з

імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів. Досліджено особливості електромагнітних процесів в розробленій за участю автора схеми узгодженого дводвигунного асинхронного електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, який має ефект самосинхронізації. Отримано аналітичні співвідношення коефіцієнтів підсилення імпульсного перетворювача підсилюючого типу в колі ротора з електрично пов'язаними роторами, при яких забезпечується стабілізація напруги на вході інвертора керованого мережею, який працює у режимі рекуперації з постійним мінімальним кутом інвертування.

Було встановлено, що при реальних параметрах роторних кіл кранових двигунів забезпечується потрібний коефіцієнт підсилення в усіх режимах роботи електропривода узгодженого обертання з рекуперацією енергії в мережу. Отримані аналітичні вирази для зрівняльного струму між роторами двигунів, який визначає зрівняльний момент. Доведено, що величина зрівняльного струму залежить від узагальненого параметру (коефіцієнту)  $K_c$ , різниці ковзань та кратності струмообмеження  $I_k^*$ , який впливає на падіння напруги, що обумовлено комутацією випрямлячів. Величина зрівняльного моменту знаходиться в межах  $(0,26 \div 0,44)M_n$  для АДФР серії МТН. При роботі в зоні малих ковзань, коли двигун працює з закороченими роторними випрямлячами (на природній характеристиці), зрівняльний струм визначається тільки коефіцієнтом  $K_c$  і різницею ковзань, що принципово відрізняється від схеми асинхронно-вентильного каскаду. Визначені параметри електричної схеми інвертора керованого мережею зі штучною комутацією його вентилів, що застосовується в електроприводі узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, при яких забезпечується надійна робота інвертора та його захист від зриву.

**В третьому розділі** проведено дослідження синхронізувальних властивостей систем узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів засобами імітаційного моделювання в усталених і динамічних режимах його роботи з врахуванням

впливу пружних зв'язків. Розроблена імітаційна комп'ютерна модель, яка враховує взаємопов'язані електромагнітні й електромеханічні процеси в системі електроприводу 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 при збереженні високого рівня ККД та коефіцієнту потужності електроприводу.

За допомогою імітаційного моделювання проведено дослідження синхронізуючих властивостей електроприводу узгодженого обертання проводилось в режимах пуску з обмеженням випрямленого струму роторів при різних алгоритмах керування і перериванням роботи силового ключа: "обмеження за середньою швидкістю", "обмеження за мінімальною швидкістю", "обмеження за сумарним струмом без ШПР", "обмеження за сумарним струмом з ШПР". Дослідження проводились для двох випадків: без механічного зв'язку і з пружним механічним зв'язком роторів АДФР. За результатами моделювання встановлено, що найбільш ефективним алгоритмом керування є алгоритм "обмеження за сумарним струмом ротора з ШПР" при постійній частоті модуляції в динамічному режимі роботи асинхронного електропривода узгодженого обертання. На відміну від інших алгоритмах керування, він забезпечує найкращі синхронізувальні властивості в процесах розгону АДФР, та найменший рівень максимальної неузгодженості швидкостей в динамічному режимі роботи, що становить 3,61%. Запропонована методика визначення неузгодженості швидкостей АДФР в системі електроприводу узгодженого обертання, яка враховує наявність як статичних, так і динамічних збурюючих моментів, що діють на АДФР, та дозволяє з достатньою точністю до 6,6% в сталих режимах їх роботи, та до 25,7% у перехідних режимах їх роботи виконувати оцінку неузгодженості швидкостей АДФР в залежності від паспортних даних та параметрів схеми заміщення АДФР, а також параметрів самої системи електроприводу. Запропонована методика може використовуватись в інженерних розрахунках для вибору силового обладнання при проектуванні систем

узгодженого обертання АДФР. За результатами моделювання встановлено, що при наявності пружних зав'язків між електроприводами механізму переміщення мостового підйомного крану, неузгодженість частот обертання взаємопов'язаних АДФР істотно менше (в 8-10 разів), ніж у електроприводів узгодженого обертання без урахування механічного зв'язку між їх валами, та в 2-3 рази менше, ніж при роботі електропривода на природній характеристиці, що дозволяє стверджувати про наявність в асинхронному електроприводі з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів самосинхронізувальних властивостей. Показано, що в межах зміни коефіцієнта жорсткості  $C_{12}=0\div 10^3$ , неузгодженість швидкостей АДФР в системі електроприводу в 2 рази менша, у порівнянні з їх роботою без електроприводу на природній характеристиці, та у 4,5 рази менша за зміною коефіцієнта жорсткості в межах  $C_{12}=10^3\div 5\cdot 10^3$ .

**У четвертому розділі** розглянуті особливості роботи електропривода узгодженого обертання в режимі гальмування противмиканням, особливості роботи електропривода переміщення візка мостового підйомного крану, розроблені рекомендації по покращенню пускових і енергетичних характеристик електропривода. Наведені результати електромеханічної перевірки розробленої схеми і зроблено порівняння з найбільш відомими схемами електроприводів узгодженого обертання.

Показано, що практично для всіх типів кранових двигунів з фазним ротором для реалізації гальмування противмиканням необхідно встановлювати додатковий резистор для обмеження струмів ротора.

Проведено порівняльне оцінювання за техніко-економічними та експлуатаційними показниками систем узгодженого обертання на базі частотного та запропонованого електроприводів. Показано, що розроблений електропривод узгодженого обертання за встановленою потужністю обладнання, кількістю керованих напівпровідникових приборів (IGBT модулів), рівню ККД в

сталому режимі має найбільш привабливі експлуатаційні, енергетичні та вартісні показники.

Експериментальна перевірка досліджуваного електроприводу була проведена на реальному перетворювачі типу МПЧ-ТТП-160-380-50УХЛ4, виготовленого ТОВ НДІ «Перетворювач» для 60-тонного мостового підйомного крану Алчевського меткомбінату на стенді виробника та на мостовому крані 2П 30/5 ПАТ "Запоріжкран", що підтвердило обґрунтованість прийнятих практичних рекомендацій щодо розробки та експлуатації дводвигунного електропривода.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ УЗГОДЖЕНОГО ОБЕРТАННЯ МЕХАНІЗМІВ ПЕРЕМІЩЕННЯ КРАНІВ

В даний час проведені численні дослідження електроприводів механізмів переміщення кранів, які дозволяють сформулювати загальні вимоги до них [7, 23-25].

Такі електроприводи повинні забезпечувати:

- допустимі за технологічними умовами прискорення і гальмування;
- недопущення розгойдування вантажу;
- можливість регулювання швидкості переміщення в необхідному діапазоні;
- недопущення пробуксовування і юза ходових коліс;
- забезпечувати мінімальні динамічні зусилля в елементах металоконструкції при переміщенні вантажу.

В залежності від режиму роботи крана необхідно вибирати електроприводи, що забезпечують оптимальне співвідношення "ціна-якість".

За всю історію розвитку електротехніки з'явилася досить велика кількість схемних рішень електроприводів узгодженого обертання, ряд з яких стандартизовані [26-30]. З огляду на відносно великі терміни служби кранів, в експлуатації знаходиться значна кількість кранів зі схемами електроприводів, які в даний момент не задовольняють зростаючим вимогам, як за продуктивністю, енергоспоживанню, так і за динамічними властивостями.

Безперервний розвиток силової та інформаційної електроніки відкрило нові можливості в реалізації електроприводів узгодженого обертання, що дозволяє здійснити практично будь-які вимоги споживача з точки зору їх споживчих властивостей.

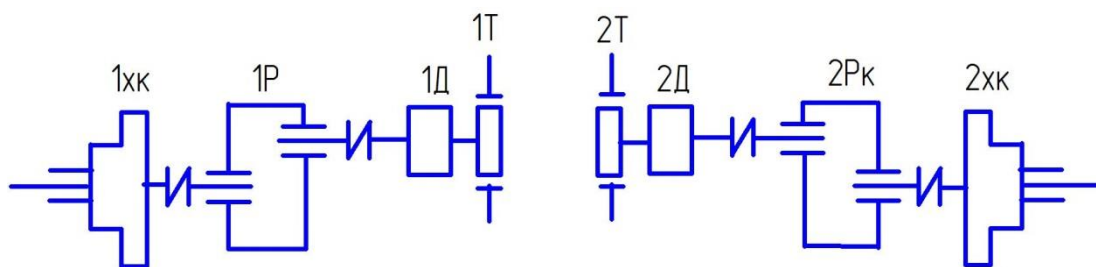
Це потребує проведення аналізу досліджень в частині поведінки елементів конструкцій мостових кранів і електромеханічних процесів в електроприводах узгодженого обертання механізмів переміщення.



## 1.1 Кінематичні особливості роботи механізмів переміщення мостових кранів

Для мостових кранів, що мають досить велику довжину моста, як правило, використовується роздільне керування двигунами ходових коліс. Співвідношення між провідними і підтримуючими колесами - не менше 50% [23].

На рис.1.1 представлена кінематична схема двохдвигунного електроприводу переміщення.



1хк, 2 хк - ходові колеса;  
 1Р, 2Р. 1Д, 2Д - редуктори і приводні двигуни;  
 1Т, 2Т - електромеханічні гальма.

Рисунок 1.1. - Кінематична схема двохдвигунного механізму переміщення

Електроприводи механізмів переміщення відрізняються реактивним моментом опору, що для механізмів переміщення моста у кранів з вантажністю  $Q < 50$  т при переміщенні без вантажу становить  $60 \div 75\%$  від моментів опору при переміщенні моста з вантажем [7]. У кранів з вантажністю  $Q > 75$  т момент опору з та без вантажу приблизно  $50\%$  [7].

Основною вимогою до механізму переміщення є точна зупинка. Необхідна точність  $5-10$  мм забезпечується за номінальною швидкістю  $0,4 \div 0,5$  м/хв. При швидкості переміщення моста  $30 \div 40$  м/хв потрібний діапазон регулювання до

70:1 [23, 7]. Різкий перехід на номінальну швидкість викликає коливання вантажу, тому потрібна висока плавність пусків і гальмувань.

Механізми переміщення мають великий приведений момент інерції, тому, для виключення значних динамічних моментів у металоконструкції механізмів, в електроприводі має бути обмежено прискорення. Підвищений момент інерції з обмеженим прискоренням призводить до підвищених пускових втрат, тому статичний момент не повинен перевищувати 50% від номінального моменту двигуна [7]. У зв'язку з цим, статичний момент без вантажу становитиме 30÷35% від номінального моменту двигуна.

В реальних умовах при русі моста крана по підкрановим рейкам відбувається його поперечне зміщення, а також поворот відносно підкранової колії. Це призводить до тертя реборд коліс об колію, і відповідно призводить до появи додаткових механічних збурень.

Перекося моста крана в значній мірі залежить від прискорень, що виникають при поздовжньому і поперечному переміщенні інерційних мас моста і переміщуваного вантажу, а також від жорсткості механічних характеристик металоконструкції балок моста [7, 24].

Зусилля тертя реборд коліс об рейки можуть бути значно зменшені змазуванням реборд коліс, або застосуванням коліс конічного профілю, однак в цілому проблема перекося може бути усунена тільки синхронізацією обертання коліс (електродвигунів) [24].

Процеси виникнення динамічних навантажень в конструкції крана досить складні. В [25] розглянуто модель сьомі-масової електромеханічної системи механізму переміщення крана, при жорсткому підвісі вантажу. На прикладі 100-тонного крана наведено, що найбільш явно проявляються коливання підвішеного вантажу з  $\omega = 1,25$  рад/с, піддатливість поперечної балки з  $\omega = 6$  рад/с, піддатливість поздовжніх балок з  $\omega = 40$  рад/с. Це дозволяє зробити висновок про можливість дослідження цих видів коливань на простих дво-масових моделях. Те ж саме було відзначено і в роботі [28]. В [29] відзначено також, що для врахування впливу переміщуваного візка з гнучким підвісом є необхідність у

застосуванні трьох-масової схеми заміщення. Показано, що при переміщенні вантажу виникають коливання з частотою  $4,25 \div 1,18 \text{ Гц}$  і  $0,37 \div 1,18 \text{ Гц}$ .

Перекус моста крана визначається не тільки особливостями кінематичної схеми, але і механічними характеристиками двигунів, а також схем узгодженого обертання, в яких зміна параметрів призводить до нерівномірності частоти обертання двигунів і, отже, до перекосів моста крана.

Таким чином, сукупність технологічних навантажень при повторно-короткочасних режимах, а також нерівномірність частоти обертання роторів двигунів, пульсації моменту, особливості схемних рішень щодо регулювання електроприводами, наявність пружних зв'язків моста і візків крана, коливання моментів, викликані коливаннями вантажу і нерівностями підкранової колії. Це призводять до виникнення в елементах конструкції значних динамічних моментів, що призводять до перекосу конструкції моста, зносу реборд коліс і підкранових колій, скорочення їх терміну служби і збільшення експлуатаційних витрат, особливо це стосується ходових коліс і підкранових колій, ремонт яких походить від одного до двох разів на рік для важких режимів роботи [24].

Усунення значних динамічних навантажень досягається шляхом дотримання ряду вимог до параметрів системи електроприводу узгодженого обертання в частині плавності ходу, контролю прискорень в режимі пуску і гальмування.

Визначення вищезазначених причин, що впливають на нерівномірність ходу, є актуальним і складним завданням, вимагає установлення додаткових датчиків: частоти обертання, перекосу кранів відносно підкранових колій [24]. Разом з тим врахування всіх факторів, що впливають на виникнення перекосу моста крана і динамічних навантажень, що виникають в ньому, є неможливим. Тому пошук технічних рішень реалізації електромеханічних систем узгодженого обертання двигунів, що мають внутрішні властивості самовирівнювання частот обертання двигунів при дії неврахованих факторів, є актуальним завданням [9].

## 1.2 Огляд існуючих систем електроприводів узгодженого обертання

Практика реалізації електроприводів механізмів переміщення, що склалася раніше, передбачала використання двигунів постійного струму для кранів з важкими умовами експлуатації [23] (режими тяжкий - Т і дуже важкий - ДТ). Параметричне керування електроприводами здійснюється силовими контролерами типу КВ1-01 або магнітними контролерами серій П-160, П-200, П-630, ДП-63, ДП-250, ДП-630 [23].

Для кранів з режимами роботи легкий (Л) і середній (С) використовуються електроприводи змінного струму на базі асинхронних двигунів з фазним ротором і параметричних керуванням типу ККТ-67А або магнітним контролером К-63, а також асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором (наприклад, кулачковим контролером ККТ-66А) [24].

Принцип роботи схем узгодженого керування заснований на забезпеченні механічних характеристик малої жорсткості, при яких відхилення частоти обертання ротора при збуреннях моменту на його валу знаходиться в прийнятних межах.

Зазначені схеми параметричного керування мають істотні недоліки:

- значні втрати потужності при пуску і номінальній швидкості через наявність резисторів в колах статора та ротора;

- ступенева зміна моменту при пуску викликає додаткові динамічні механічні навантаження на елементи механізму переміщення і балки моста крана, що знижує термін служби крана [7];

- не ідентичність механічних характеристик при зміні параметрів двигунів і пускових опорів призводить до неузгодженості швидкостей (відповідно, до перекосу моста крана), а також до додаткових механічних впливів на металоконструкцію моста, підвищеного зносу реборд ходових коліс і підкранових колій [7].

Існує ряд досліджень і практичних розробок, пов'язаних з включенням в коло ротора додаткових реактивних елементів (індуктивностей)[30], несиметричних схем керування [23, 30], які дозволяють підвищити плавність ходу, але вони не вирішують основні недоліки систем електроприводів з параметричних керуванням (релейно-контролерним керуванням). Загальний недолік цих схем полягає в тому, що вони не забезпечують самовирівнювання частот обертання АД під дією різних збурюючих впливів.

Більш поширеним і досконалими є схеми, які використовують принцип електричного валу (рис.1.2).

Принцип дії електричного валу заснований на ефекті виникнення зрівняльного струму між обмотками роторів при неузгодженості ЕРС роторів, викликаного різними збуреннями моментів на валах АДФР [28].

Зрівняльний струм викликає синхронізуючий момент, який визначається співвідношенням [28]:

$$\Delta M = M_{кр} \left( \frac{2s/s_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} + \frac{2s/s_{кр}^*}{\frac{s}{s_{кр}^*} + \frac{s_{кр}^*}{s}} \right) \sin\Theta, \quad (1.1)$$

де  $M_{кр}$  - критичний момент двигуна на природній характеристиці;

$s_{кр}$  - критичне ковзання АДФР на природній характеристиці;

$s_{кр}^* = \frac{r_2 + 2R_0}{x}$  - критичне ковзання з додатковим опором;

$\Theta$  - кут неузгодженості фазних ЕРС у роторі АДФР.

Проведені в [28] дослідження показують, що при схемному рішенні (рис. 1.2) стійкість електроприводу виконується тільки за відносно невеликої різниці моментів на валу АДФР.

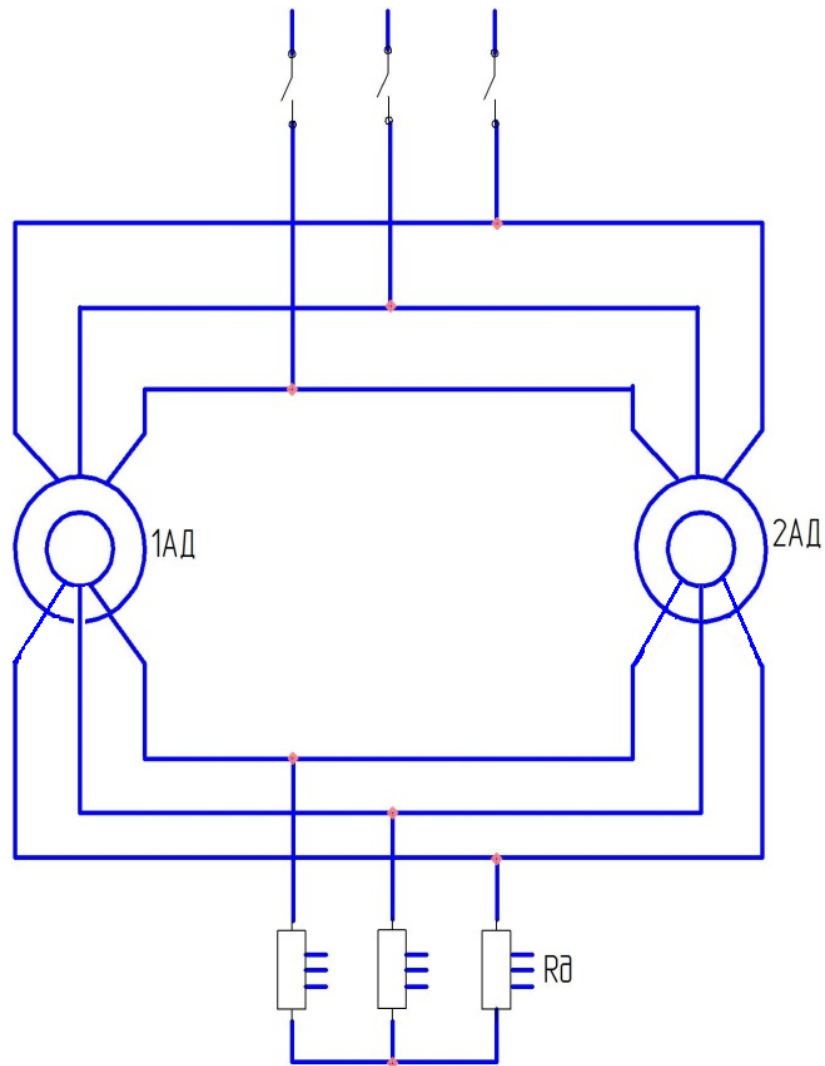


Рисунок 1.2 - Принципова схема електричного валу

При підвищенні кута  $\theta$  понад критичного його значення (до 180 град) можливі автоколивання моменту АДФР.

В роботі [26] запропонована схема багатодвигуневого узгодженого керування з електричним зв'язком у колі випрямленого струму ротора (рис. 1.3).

Схемне рішення, згідно рис 1.3 забезпечує стійку синхронізацію частот обертання при значних коливань моменту, через те, що зрівняльний струм визначається різницею амплітуд ЕРС роторів АДФР. Для отримання більшої різниці ЕРС і збільшення синхронізуючого моменту в колі випрямленого струму застосовується резистор  $R$  (рис.1.3). Схемне рішення забезпечує узгодження частоти обертання АДФР, зменшує в кілька разів динамічні навантаження, пов'язані з перекосом металоконструкції балок [26]. Наявність випрямних мостів

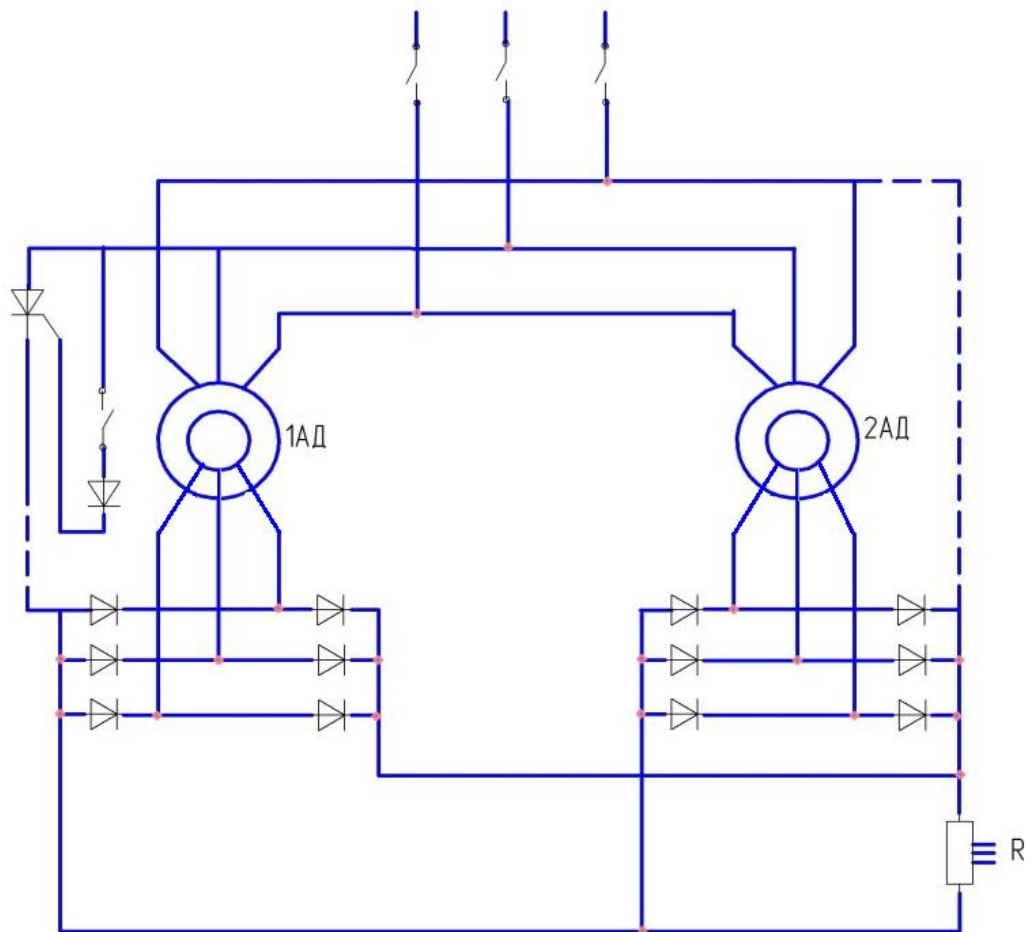


Рисунок 1.3 - Принципова схема дводвигуневого електроприводу з електричним зв'язком в колі випрямленого струму ротора АДФР

дозволяє відносно просто реалізувати схемне рішення щодо динамічного гальмування з використанням остаточного магнітного потоку ротора, що дуже важливо при аварійному відключенні напруги мережі.

До недоліків даної схеми слід віднести:

- ступенева зміна моменту при отриманні проміжних швидкостей;
- підвищена енергоємність схемного рішення за рахунок втрат в резисторі.

Подальший розвиток отримала схема з використанням замість діодних мостів керованих тиристорних мостів [31]. Схема забезпечує плавність пуску, можливість отримання проміжних швидкостей, а також синхронізацію частоти обертання роторів, шляхом введення зворотного зв'язку по частоті ЕРС ротора АДФР [31]. Тиристорний керований міст дозволяє забезпечити плавність пускового струму, однак призводить до появи значних пульсацій в струмі

ротора, які залежать від кута керування. Для зменшення пульсації струму ротора потрібна установка згладжувального дроселя.

Наявність фазового керування в роторі викликає зменшення коефіцієнта потужності ротора, що призводить до зменшення електромагнітного моменту АДФР. Для отримання необхідного моменту необхідно збільшувати амплітуду випрямленого струму ротора, а це призведе до зростання додаткових втрат потужності в АДФР. Для даного схемного рішення система фазового керування досить складна, тому, що синхронізація відбувається при змінній частоті ротора і амплітуді ЕРС ротора АДФР. При отриманні позитивних властивостей за керуванням, система залишається енергоємною через наявність додаткового опору в колі ротора АДФР.

Розглянуті вище схеми мають спільний недолік - низьку енергоефективність, тому рекомендуються для кранів з малою інтенсивністю роботи [31].

Значний інтерес представляють схеми узгодження обертання з джерелом струму в колі ротора. В [32, 33] показано, що керування АДФР з джерелом струму в колі ротора дозволяє виключити вплив зміни параметрів на механічні характеристики електроприводу.

В роботі [33] розглянута схема узгодження обертання асинхронного двигуна з індуктивно-ємнісним джерелом струму в колі ротора (рис.1.4).

Принцип дії заснований на підтримці постійного по величині струму в роторному колі індуктивно-ємнісним перетворювачем (ІЄП), що працює в режимі джерела струму з випрямлячем В3, у паралельно включених випрямлячах В1 і В2 і резисторі R. Оскільки струм в паралельному колі В1 і В2 підтримується постійним, то при неузгодженості частоти обертання роторів двигунів 1АД, 2АД, струм найбільш навантаженого двигуна зростає, а менш навантаженого зменшується, отже забезпечується вирівнювання частот обертання.



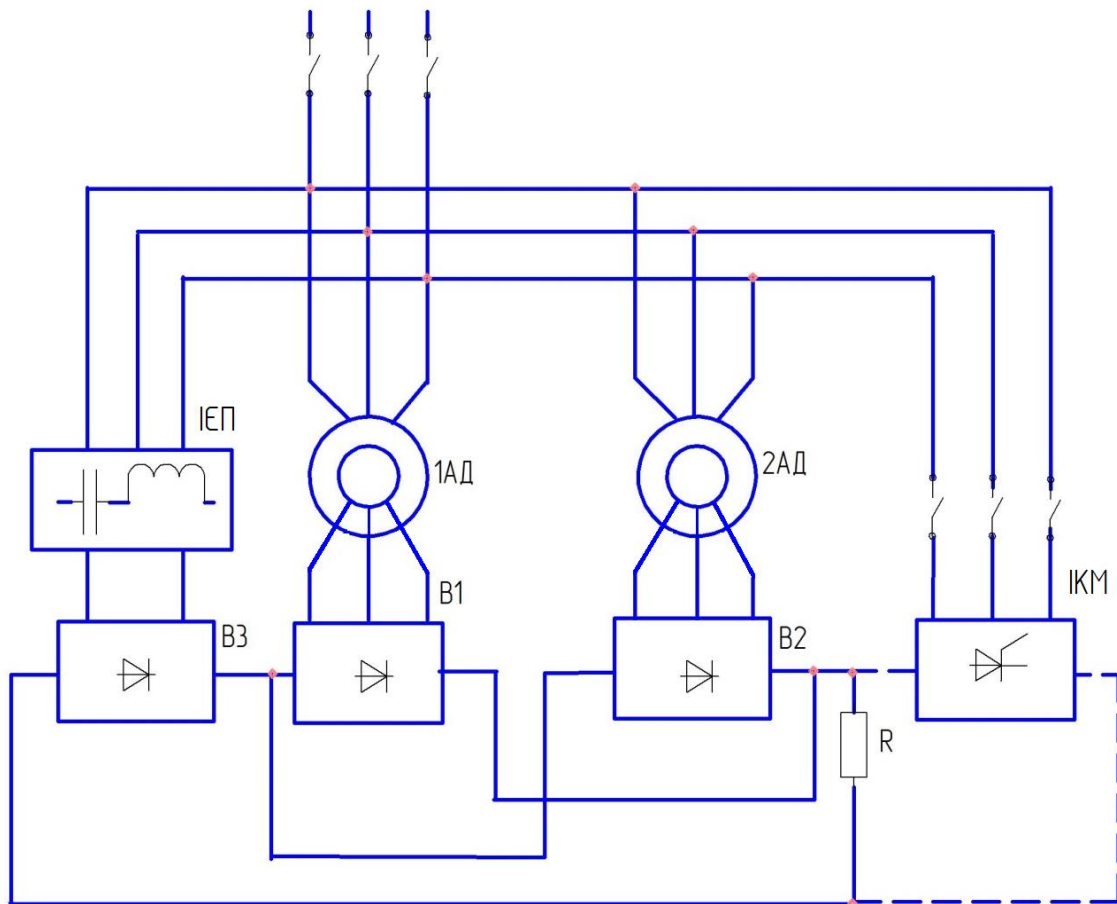


Рисунок 1.4 - Функціональна схема двохдвигунного електроприводу узгодженого обертання з індуктивно-ємнісним джерелом струму

Падіння напруги на активному опорі  $R$  постійно, тому що по ньому протікає струм джерела струму  $I_d = \text{const}$ . Це дозволяє використовувати замість резистора  $R$  інвертора керованого мережею (ІКМ), що працює з постійним кутом випередження, та виконувати рекуперацію енергії в мережу, що розсіювалась на резисторі, з відносно високим коефіцієнтом потужності інвертора.

Основною перевагою схеми є автоматична синхронізація швидкостей, не залежно від виду збурювальних впливів, що виникають в електромеханічній системі має більш високу енергоефективність. Пуск електроприводу відбувається з постійним прискоренням, що забезпечує високу плавність пуску. Наявність індуктивно-ємнісного перетворювача дозволяє в сталому режимі на природній характеристиці використовувати його в якості компенсатора реактивної потужності. Для цього в схему необхідно включити контактори для

шунтування випрямлячів В1 і В2 і відключення випрямляча В3, що знижує якість схеми як безконтактної.

До недоліків схеми слід віднести наступне:

- встановлена потужність ІСП значно (більш ніж в 2 рази) перевищує встановлену потужність АДФР [34], тому вартість і маса елементної бази перетворювача значно зростають;

- наявність у ІСП випрямляча В3 призводить до збільшення втрат, отже до зменшення ККД електроприводу;

- при включенні електроприводу і індуктивно-ємнісного перетворювача виникають перехідні процеси, тривалість яких становить  $0,047 \div 0,03$  с [33]. Це забезпечує появу значних пускових струмів і моментів під час початку руху АДФР;

- для отримання проміжних швидкостей необхідно вводити контакторну апаратуру, а індуктивно-ємнісний перетворювач виводити з режиму джерела струму;

- некероване джерело струму не дає змоги змінювати прискорення при пуску АДФР, тому потрібно ретельне узгодження параметрів двигуна і джерела струму. Це призводить до ускладнення схемного рішення за рахунок введення регулятора струму в ІСП [35].

Для отримання керованого джерела струму, випрямляч індуктивно-ємнісного перетворювача шунтується керованим ключем, що забезпечує керованість статичних і динамічних режимів [35]. При високому ступені керованості, індуктивно-ємнісний перетворювач працює в режимі максимального струму, що призводить до збільшення габаритів і зниження ККД електроприводу.

Реалізація системи електроприводу з режимом постійного струму в роторному колі (рис. 1.5) є можливою за допомогою інвертора керованого мережею. В цьому випадку інвертор виконує роль регульованого активного опору (рис. 1.2), а система електроприводу (рис. 1.4) набуває властивостей вентильного каскаду.

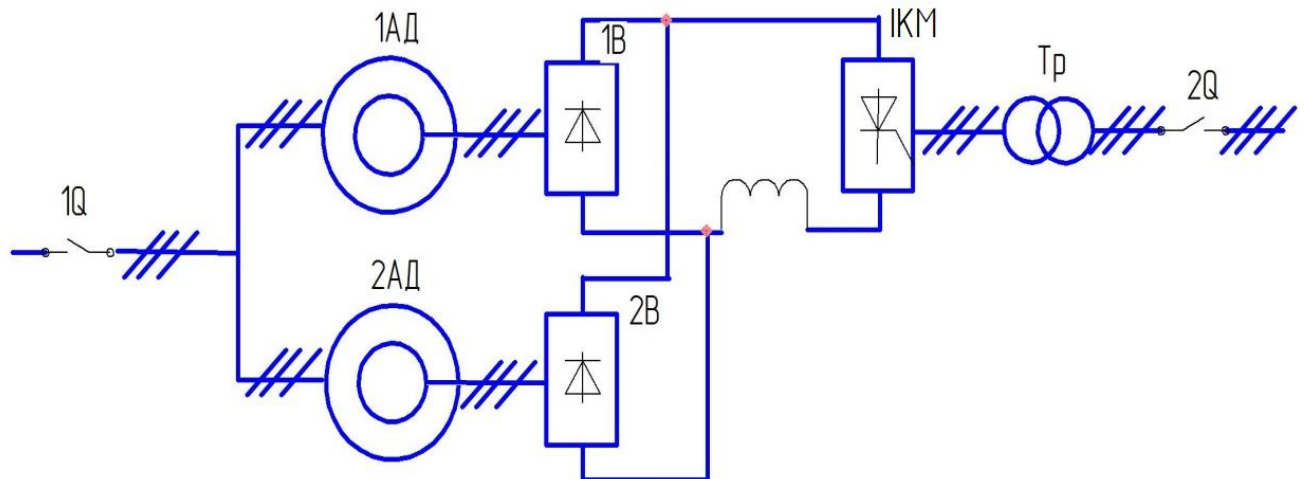


Рисунок 1.5 - Однолінійна схема узгодженого обертання з асинхронно-вентильним каскадом

Основними перевагами даного схемного рішення є:

- безконтактне плавне керування інтенсивності пуску і величиною моменту АДФР;
- рекуперация енергії ковзання роторів АДФР до мережі;
- реалізація необхідного діапазону регулювання в залежності від виду зворотного зв'язку;

До істотних недоліків схемного рішення слід віднести:

- низький коефіцієнт потужності;
- необхідність установки трансформатора або автотрансформатора для підвищення коефіцієнта потужності, а також для реалізації режиму гальмування противвімкненням;
- наявність зрівняльного струму між роторами АДФР і інвертором призводить до зниження ККД електроприводу, а також зростанню індуктивності, отже, габаритів згладжувального реактора. [31].

- потрібно, щоб встановлена потужність інвертора була вищою за встановлену потужність АД, особливо це стосується реакторних варіантів підключення інвертора керованого мережею.

- висока чутливість до зриву інвертування в момент різкої зміни навантаження і коливаннях напруги мережі, що вимагає застосування швидкодіючих захистів.

Реалізація режиму постійного струму в роторному колі можлива з використанням імпульсного регулятора струму [36]. Електропривод з імпульсним-струмовим обмеженням дозволяє реалізувати будь-яку задану жорсткість механічної характеристики і плавність пуску та руху, отримання проміжних швидкостей за наявності зворотних зв'язків. Формування заданого струму визначається імпульсним регулятором струму, незалежно від частоти струму ротора.

Маючи необхідні регульовальні характеристики, а з розвитком силової електроніки і простоту реалізації, електропривод з імпульсним регулюванням має енергетичні характеристики, дещо гірше, ніж при реостатному керуванні [36].

В роботі [37] розглянута схема імпульсного керування за частотою обертання асинхронного двигуна з фазним ротором, яка поєднує в собі властивості імпульсного керування струмом ротора і асинхронно-вентильного каскаду (рис.1.6), що забезпечує високі енергетичні характеристики і регульовальні властивості електроприводу.

Автор застосував термін «імпульсно-струмове обмеження» за аналогією з «частотно-струмовим» [38].

Запропоноване схемне рішення є особливо актуальною для модернізації кранових електроприводів з фазним ротором, що мають відносно низьку напругу ротора - (нижчу за 300 В), та за потужністю до 45÷75 кВт для основного номінального режиму роботи ПВ=40%. Для таких потужностей кранових електроприводів є можливим використання відносно дешеві інвертори керовані мережею, при живленні електроприводу від мережі 380В з без трансформаторним виконанням.

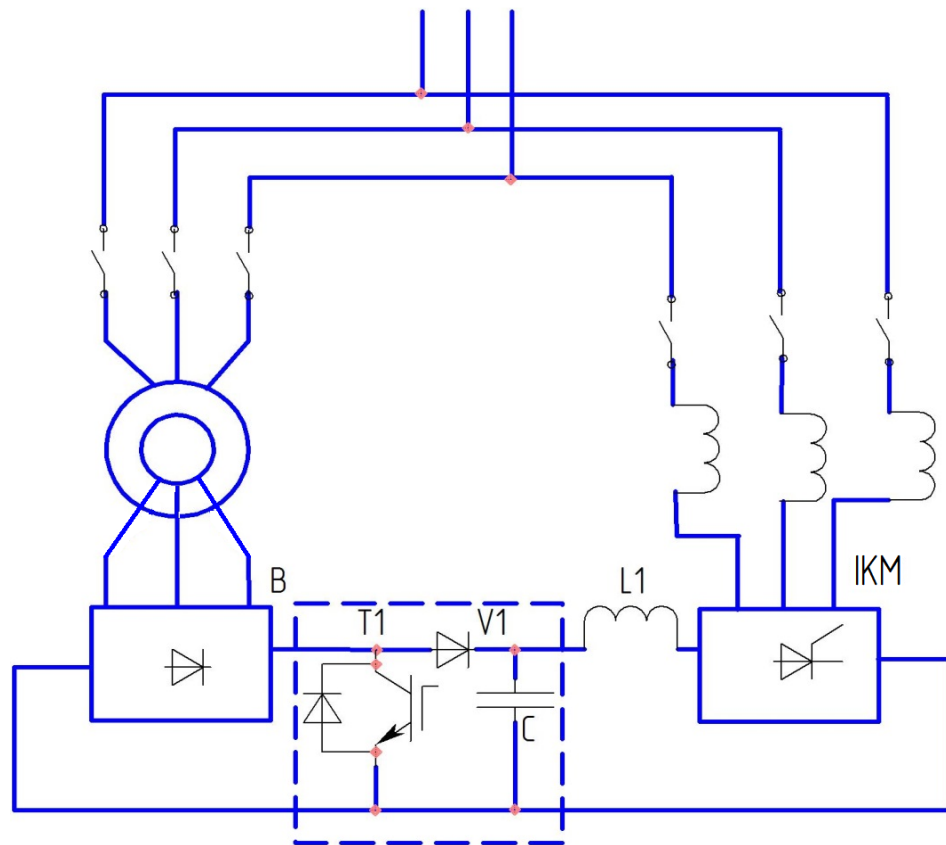


Рисунок 1.6 - Принципова схема головних кіл імпульсно-струмового керування асинхронного двигуна з фазним ротором з рекуперацією енергії ковзання ротора в мережу

Використання імпульсного перетворювача підвищувальної напруги в колі випрямленого струму роторів АДФР забезпечує підтримку постійної напруги на конденсаторі  $C$ , а, отже, роботу інвертора керованого мережею з постійним кутом інвертування при максимально можливій напруги інвертування.

Встановлена потужність обладнання інвертора визначається режимом пуску електроприводу. При роботі на природній характеристиці випрямляч ротора закорочується ключем  $T1$  (рис. 1.6), а інвертор відключається від мережі.

Струмове навантаження інвертора визначається співвідношенням випрямленої напруги ротора до напруги інвертора. Високочастотна модуляція струму ротора і досить малий кут випередження ( $\beta \leq 30$  ел. град) дозволяють істотно зменшити встановлену потужність як мережевого, так і узгоджувального реакторів. В [16, 17, 39, 40] показано, що така схема має більш високі

енергетичні характеристики в порівнянні з класичними схемами імпульсного регулювання і асинхронно-вентильного каскаду.

Розвиток частотно-керованих електроприводів призвів до створення систем узгодженого обертання механізмів переміщення з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. В [41, 42] наведені результати роботи зі створення та налагодження багатодвигунового електроприводу механізму переміщення 200т крана з перетворювачами частоти. Особливістю реалізації системи узгодженого обертання з частотно-регульованими електроприводами є використання давачів частоти обертання. В [41] наведені результати використання частотного електроприводу з роздільним керуванням двигунів механізму переміщення моста 125т крана і давачем перекосу моста. Маючи високі енергетичні та регульовальні характеристики, вони мають відносно високу вартість і складність налагодження. В [43] описана методика визначення параметрів електромеханічних систем багатодвигунового електроприводу за допомогою експерименту та імітаційного моделювання. Для прискорення налагодження таких систем необхідне створення стенду, що дозволяє виконувати налагодження без порушення технологічного процесу [43]. В [44] описано використання електроприводу переміщення моста порталного крана на базі перетворювача частоти, що живить одночасно два двигуна. Узгодження частот обертання ротора забезпечується жорсткістю механічних характеристик двигуна.

При дослідженні систем узгодженого обертання використовують в основному двох і трьох масові моделі електромеханічних систем з використанням аналітичних методів [29, 38, 45] і чисельних методів [18, 46-49 ], які реалізовані в спеціальних професійних програмних комплексів як MathCAD, MatLAB, SciLAB і ін. [50-54]. Дослідження електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах, що використовуються в системі електроприводу проводиться чисельними та аналітичними методами, за допомогою рядів Фур'є, перетворень Лапласа, розв'язання лінійних диференціальних рівнянь першого порядку та за допомогою застосування комп'ютерного моделювання [55-58].

Проведені авторами дослідження роботи механізму переміщення моста крана виявили основні причини, що впливають на перекоє моста крана і, отже, вплив на ті, хто підбурює моменти при деформації балок моста [7,18, 24, 25]:

- зміна параметрів і характеристик приводних АДФР;
- зміщення візка з вантажем щодо центру моста крану викликає зміну моменту опору коліс;
- коливання вантажу при переміщенні моста крану;
- не однакові діаметри коліс, які змінюються в процесі експлуатації;
- порушення зчеплення коліс з рейками, особливо за наявності мастила реборд, що використовується для зменшення зносу коліс і рейок;
- зазори в кінематичній схемі;
- суміщення робочих рухів ряду механізмів крана;
- установка коліс крана під кутом перекоє щодо рейкового шляху;
- ряд інших важко прогнозованих факторів, пов'язаних з особливістю конструкції кранів, нерівномірністю підкранової колії, невраховані пружні зв'язку елементів конструкції і т.д.

Облік всіх факторів призводить до суттєвого ускладнення системи керування механізмів переміщення кранів, пов'язаного з необхідністю установки різних давачів перекоє моста, візка, навіть за наявності давачів частоти обертання роторів приводних двигунів, ускладнення налагодження таких систем.

У цьому контексті розробка систем електроприводу, що володіють властивостями самосинхронізації, дозволяє компенсувати вплив неврахованих факторів і істотно спростити побудову електромеханічних систем узгодженого обертання.

Як було показано раніше, властивістю самосинхронізації мають електроприводи з АДФР, які побудовані за принципом електричного валу, і забезпечують сталість прискорення при зміні частоти обертання приводних двигунів. В [33] показано, що схеми узгодженого обертання з параметричними джерелами струму мають властивість самосинхронізації, що дозволяє мати відносно прості схеми керування для кранів. Однак наявність таких недоліків, як

збільшена встановлена потужність, низькі показники ККД і коефіцієнта потужності, викликають необхідність подальшого дослідження і вдосконалення схемних рішень з метою підвищення енергетичних і динамічних характеристик.

Таким чином, за принципом дії схемні рішення узгодженого обертання можна класифікувати за такими ознаками:

- схемні рішення з параметричних керуванням, в яких узгодження частот обертання забезпечується формуванням м'яких механічних характеристик, що забезпечують прийнятне неузгодженість частот обертання при зміні моменту на валу двигунів;

- схемні рішення, що забезпечують самосинхронізацію частот обертання за рахунок наявності електричного зв'язку по ланцюгах випрямленої напруги (струму) ротора;

- схемні рішення з роздільним керуванням АД, що забезпечують узгодження частот обертання з використанням зворотних зв'язків по частоті обертання і положення моста щодо підкранових колій.

Перша група таких приводів приваблива відносно низькою вартістю, але має підвищену енергоємність, високі механічні перевантаження в елементах металоконструкції електромеханічної системи і моста крана. Тому використовується в кранах з легкими режимами роботи Л, рідше - С [7, 23, 27].

Друга група має задовільними властивостями в динаміці і більш високими енергетичними показниками при більш високій вартості, і може бути рекомендована для кранів з режимами роботи Л, С, Т [7, 23, 27].

Третя група, яка реалізована на базі частотно-регульованих електроприводів, є енергозберігаючою, що забезпечує необхідну динаміку електромеханічної системи. Має найбільшу встановлену потужність та досить складна в налагодженні. Рекомендується для режимів Т, ВТ [7, 25, 27, 41, 43, 45, 59].

Сучасна тенденція характерна високими вимогами до енерго- та ресурсозбереження та необхідністю у енергонезалежності, що особливо важливо для України, в зв'язку з обмеженням природних ресурсів в енергоносіях і істотно



більшою, в порівнянні з закордонним досвідом, енергоємністю технологічних процесів.

У зв'язку з цим, в деяких роботах науковців з'являються дослідження, щодо розробки методики, що дозволяє здійснювати оцінку застосовності електроприводів за критеріями вартості, надійності та енергоємності. В роботі [27] зроблена спроба створити градацію за показниками вартості, і запропонована наступна градація за техніко-економічних показників кранових асинхронних електроприводів (табл. 1.1).

В роботі [59] зроблена оцінка по енергоємності електроприводів, яка визначена для найбільш характерних режимів кранових механізмів. В результаті цього сформульовані рекомендації по використанню електроприводів з перетворювачем напруги (ПН-АД), перетворювачами частоти (ПЧ-АД) з двигунами з фазним та короткозамкненим роторами.

Таблиця 1.1 - Порівняльна оцінка техніко-економічних показників кранових асинхронних електроприводів

№	Тип кранового електроприводу	Тип двигуна	Діапазон потужностей, кВт	Режим роботи	ПВ, %	Діапазон регулювання	Кількість включень	Питома маса кг/кВт	Відносна витрата електроенергії	Пит. вартість, у.о./кВт
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	3 параметричним регулюванням 1.1 ККТ, ТСА, КС, К, ТА, ТАН	АДФР	2-20	А0-А4	40	1:4(10)	150-360	40-8	1,0	100-50
	1.2 ТДА, ТСД, ТСДН		5-100	А0-А4	40	1:8(10)	150-360	29-9	0,8	100-50

Кінець таблиці 1.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1.3 КСДБ		30-145	A5-A6	40	1:7(10)	Вище 360	20-14	0,8	150-100
2	Уніфікований крановий ЕП	АДКЗ	2-200	A0-A6	40	1:10	600	30-3	0,8	100-50
3	Частотно-регульований	АДФР	2-45	A0-A6	40	1:10	600	3-2	0,6	600-200
		АДКЗ	53-20					2-1		200-150
4	З квазі-частотним регулюванням	АДФР	2-45	A0-A6	40	1:10	600	3-1,5	0,8	150-5
		АДКЗ	53-20					1,5-0,6		25-15

У табл. 1.2 наведені порівняльні дані по енергоспоживанню деяких приводів [59].

Таблиця 1.2 - Споживання енергії (кВт год) при різних способах керування АД по відношенню до реостатного керування.

Кількість циклів за рік	ПН-АД	ПЧ-АД без рекуперації	ПЧ-АД з рекуперацією
85000 (≈1200 год.)	+2325	-10740	-13260
8500 (≈120 год.)	+232,5	-1074	-1326

Знак «+» означає збільшення, знак «-» - зменшення. Дані табл.1.2 наведені для механізму повороту порталного крана з АД потужністю 30 кВт при

приведеному моменті інерції, що в 15 разів більше моменту інерції самого двигуна.

Для більш повного врахування втрат в електроприводах, що працюють в динамічних режимах, використовуються методики, що враховують втрати в перехідних режимах з урахуванням змінного ККД механізмів, в залежності від частоти обертання і повних втрат в колах перетворювач-двигун, так як облік втрат по номінальному ККД призводить до суттєвих помилок в оцінці втрат [59, 60]. Слід звернути увагу, що при експлуатації електроприводів узгодженого обертання, що працюють у відносно важких режимах, додатково зростає вартість ремонту підкранових колій та кранових коліс, пов'язаних з перекосом гребнів реборд при перекося мосту, що необхідно враховувати в першу чергу [24, 25].

### 1.3 Висновки до першого розділу і постановка задачі досліджень

В результаті аналізу стану і тенденцій розвитку електроприводів узгодженого обертання, намітилось чітке розуміння, що пов'язане зі створенням електроприводів узгодженого обертання, які забезпечують відносно рівномірну частоту обертання приводних коліс механізмів переміщення мостів і візків мостових кранів, а також забезпечують постійні прискорення в процесі розгону і гальмування двигунів, що сприяє збільшенню терміну служби кранів і зниженням витрат при експлуатації.

Застосування сучасних засобів силової електроніки дозволяє істотно поліпшити статичні і динамічні характеристики електроприводів з фазним і короткозамкненим ротором, однак при цьому зростає вартісні показники електроприводів.

Сучасна тенденція зниження енергетичних і ресурсних витрат при експлуатації кранів і їх електроприводів, вимагає більш зваженого підходу до вибору систем електроприводів узгодженого обертання з точки зору

співвідношень "ціна-якість" та витрат при експлуатації. Це вимагає додаткових досліджень в частині обліку енерговитрат, в конкретних режимах роботи електроприводу, що, викликає необхідність в дослідженні ряду альтернативних електроприводів для різних механізмів крану.

З огляду на значне число чинників, що впливають на узгодженість частот обертання приводних коліс механізмів переміщення з багатодвигуним електроприводом, заслуговують на увагу ті електроприводи, які володіють властивістю самосинхронізації.

На підставі проведеного аналізу силових схемних рішень електроприводів узгодженого обертання сформульовано мету і постановку задач досліджень, спрямованих на дослідження енергозберігаючих електроприводів узгодженого з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, що володіють властивістю самосинхронізації, які могли би бути альтернативою ЧРП, за рахунок зменшеної встановленої потужності силових елементів електроприводу та більш простої реалізації системи керування.

Таким чином метою дисертаційної роботи є дослідження та обґрунтування технічних рішень по застосуванню енергозберігаючих електроприводів узгодженого обертання механізмів переміщення мостових кранів, які мають властивості самосинхронізації з відносно малою встановленою потужністю, високими синхронізувальними властивостями, і енергетичними показниками.

При цьому необхідно вирішити такі завдання:

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

2. Розробка математичної та імітаційної моделі електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів для механізму переміщення мостового крану, що дозволяє оцінити демпфуючі можливості системи електроприводу при невизначених збурюючих механічних моментів;

3. Дослідження самосинхронізувальних властивостей електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів при різних збурюючих моментах механізму переміщення мостового крану;

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

5. Експериментальна перевірка електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів на макетному зразку.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА УЗГОДЖЕНОГО ОБЕРТАННЯ З ІМПУЛЬСНО-СТРУМОВИМ ОБМЕЖЕННЯМ В КОЛІ ЕЛЕКТРИЧНО ПОВ'ЯЗАНИХ РОТОРНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

У першому розділі було показано, що електропривід узгодженого обертання повинен мати властивість підтримки заданого постійного прискорення і самосинхронізації з метою забезпечити зниження динамічних навантажень і вирівнювання частоти обертання роторів АДФР при збурюючих впливах, в тому числі і неврахованих в теоретичних розрахунках, які мають місце в електромеханічній системі механізмів переміщення мостових кранів.

Цим вимогам відповідають електроприводи, що мають електричну зв'язок в колі ротора з параметричним джерелом і імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів [26, 33].

Нижче проведено аналіз дослідження електромагнітних процесів нової системи енергозберігаючого електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів АДФР [61, 62].

#### 2.1 Особливості функціонування електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням

На рис.2.1. представлена принципова схема, запропонована у [61, 62], головних кіл енергозберігаючого електроприводу узгодженого обертання на базі АДФР з імпульсно-струмовим обмеженням. Схема за принципом дії поєднує в собі позитивні властивості системи імпульсного регулювання в колі випрямленого струму ротора і асинхронно-вентильного каскаду, що забезпечує рекуперацію енергії ковзання роторів АД в мережу енергопостачання [16, 37].

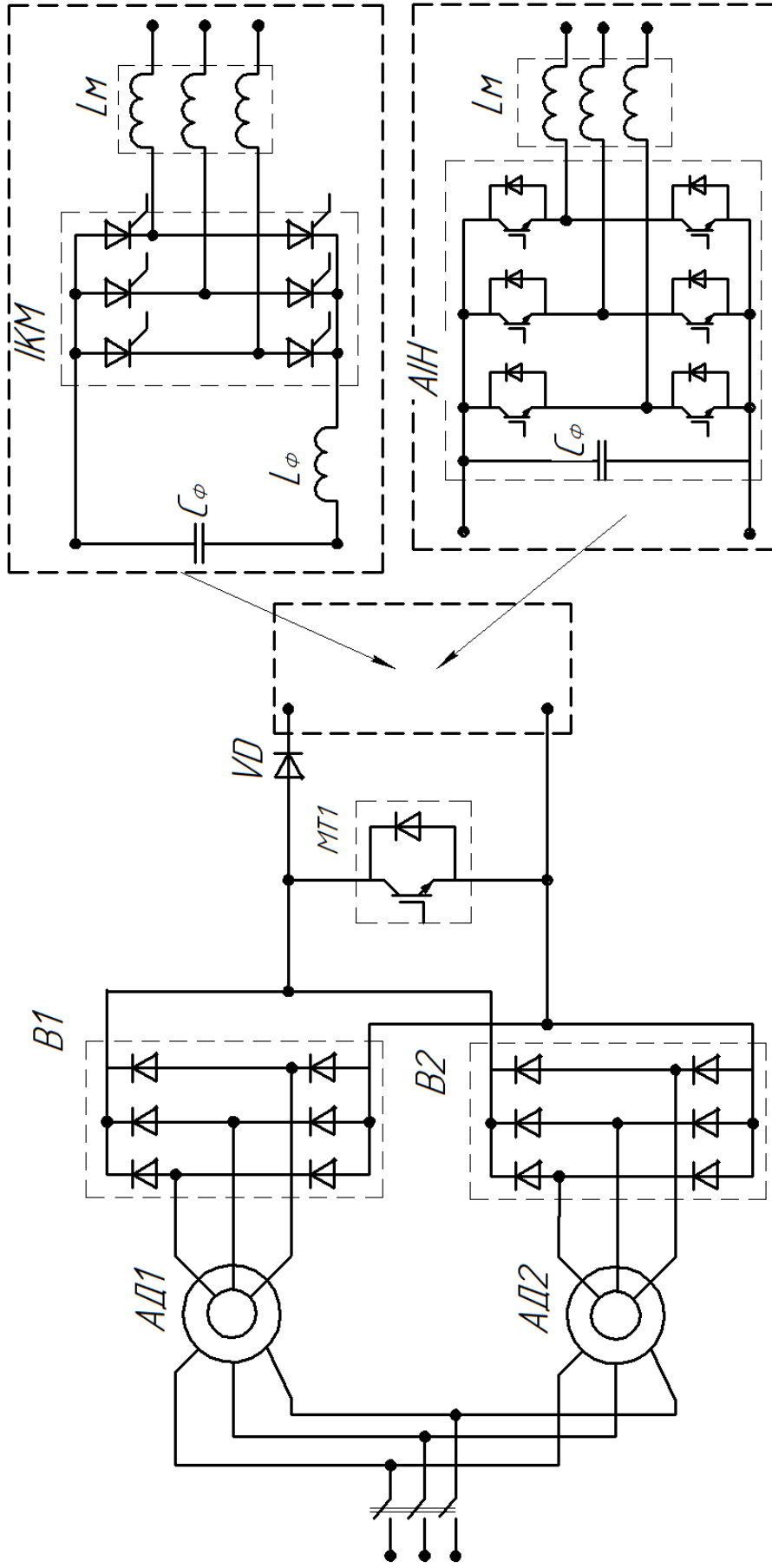


Рисунок 2.1 – Принципова схема енергозберігаючого електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням з реалізацією ІКМ або АІН

Імпульсний перетворювач підвищуючої напруги (ІППН) забезпечує підтримання постійного заданого сумарного випрямленого струму роторів АДФР і узгодження випрямленої напруги ротора з напругою інвертора ІКМ або АІН, що працює з постійним кутом випередження, підтримуючи при цьому високий коефіцієнт потужності [16, 17, 37].

Принцип дії запропонованого схемного рішення полягає в наступному. Включаються пускачі на інверторі, забезпечуючи підготовку інвертора ІКМ до роботи. Далі включаються статорні кола двигунів АД1 і АД2. Із затримкою за часом до  $t=0,03$ с. після завершення перехідних процесів в статорних колах АДФР транзистор МТ1 блоку ІППН закорочує роторні випрямлячі В1 і В2. При досягненні сумарного струму випрямлячів до заданої величини, ключ МТ1 закривається, а енергія ковзання і енергія, яка акумульована в індуктивності ротора, скидаються на конденсатор фільтра  $C_{\phi}$ . При збільшенні напруги на конденсаторі до середньої величини напруги інвертування, енергія, що накопичена в роторі, інвертується в мережу, тим самим забезпечуючи підвищення ККД електроприводу. При досягненні двигуном мінімального ковзання  $s_{\min}$ , при якому струм короткого замикання випрямляча дорівнює струму уставки, рекуперація енергії припиняється, ключ МТ1 закорочує випрямлячі В1 і В2. При цьому двигуни АД1 та АД2 працюють на природній характеристиці. Цей режим принципово відрізняється від схеми АВК, в якому при ковзаннях, близьких до номінальних, в контурі випрямляч-інвертор протікає зрівняльний струм, для зменшення якого необхідний і згладжувальний реактор [62, 63].



## 2.2 Визначення коефіцієнта посилення імпульсного перетворювача в роторному колі АДФР

Як сказано вище, роторні випрямлячі з імпульсним перетворювачем працюють в двох режимах:

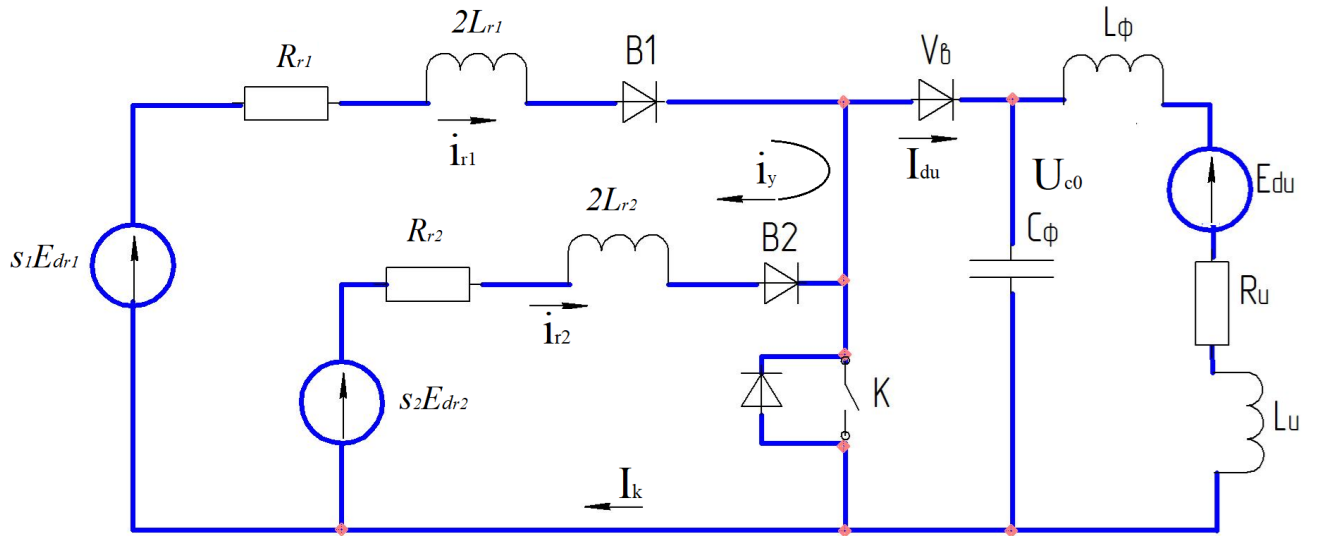
-режим безперервного струму при імпульсному регулюванні струму ротора;

-режим короткого замикання, при якому сумарний максимальний струм випрямлячів ротора не перевищує значення уставки за струмом ключа МТ1 блоку ІППН.

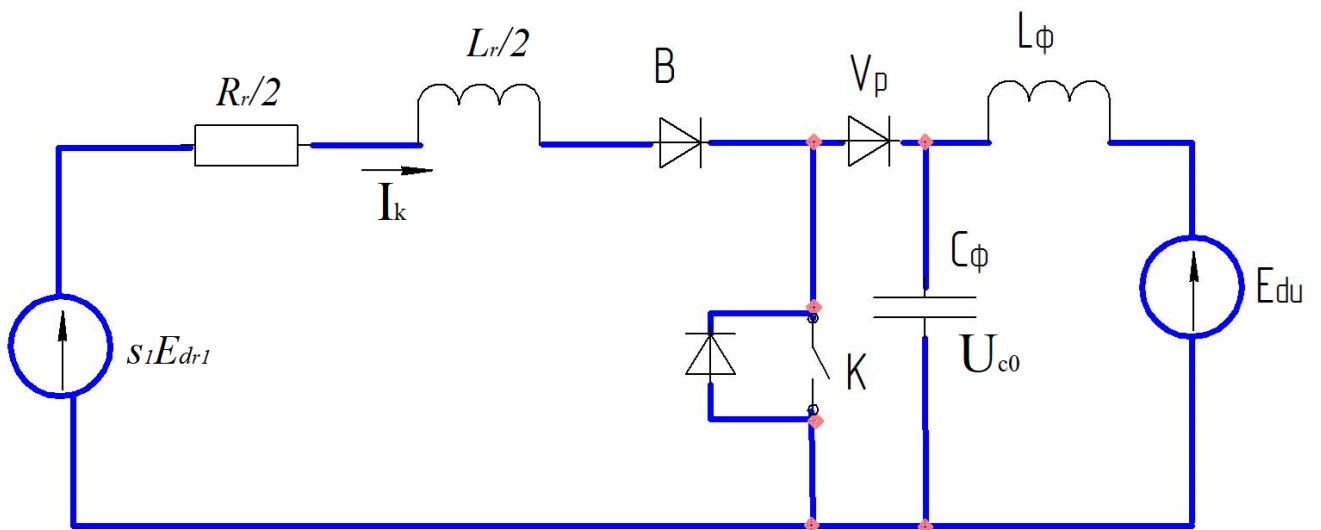
Для розгляду режиму роботи випрямляча з ІППН на рис.2.2 запропоновані повна розрахункова і спрощена схеми заміщення роторного кола двохдвигунного електроприводу.

При складанні схем заміщення були прийняті наступні допущення:

- потокозчеплення статора незмінно;
- комутація в колах ротора визначається параметрами ротора АДФР за аналогією роботи випрямляча від трансформатора [64];
- не враховується падіння напруги на напівпровідникових елементах;
- активні опору і індуктивності сполучних проводів враховуються у відповідних елементах згідно зі схемою заміщення;
- не враховуються пульсації напруги випрямлячів ротора і випрямленого струму ротора;
- середнє значення сумарного струму випрямлячів має постійне значення;
- електромагнітний момент двигунів пропорційний середньому значенню випрямленому струму ротора.
- напруга ІКМ (АІН) враховується середнім значенням напруги на конденсаторі  $C_{\phi}$ . Внутрішнім опором інвертора нехтуємо.



а)



б)

а) повна розрахункова схема заміщення;

б) спрощена схема заміщення.

Рисунок 2.2 – Схема заміщення роторних кіл електроприводу

За даною схемою заміщення (рис.2.2, а) активні опори перетворювача можна визначити як [65]:

$$R_{r1(2)} = 2 \cdot r_{r1(2)} + \frac{3}{\pi} x_{r1(2)} \cdot s_{1(2)} \quad (2.1)$$

де  $x_{r1(2)}$  - індуктивний опір фази першого та другого АДФР;

$r_{r1(2)}$  - активно опір фази ротора першого та другого АДФР;

$s_{1(2)}$  - ковзання ротора першого та другого АДФР.

Для механізмів переміщення основної маси мостових кранів використовуються АДФР не більше 90 кВт, у яких напруга роторних ЕРС знаходяться в межах 178-339В (табл. 2.1), що дозволяє використовувати інвертори ІКМ або АІН з реакторним підключенням до мережі 380 В.

При  $U = 380\text{В}$  і  $\beta_{min} \leq 30$  ел. град.  $E_{du} = 445\text{В}$ . Тому, в момент пуску АДФР блок ІППН повинен забезпечити мінімальний коефіцієнт посилення [66]:

$$K_{min} = \frac{E_{du}}{E_{dr}} = \frac{K_1}{s}, \quad (2.2)$$

$$K_1 = \frac{E_{du}}{E_{dgn}} = \frac{U_{л}}{E_{gn}}, \quad (2.3)$$

де  $E_{du}$  - ЕРС інвертора;

$E_{gn}$  - номінальне значення ЕРС ротора;

$E_{dgn}$  - номінальне випрямлене значення ЕРС ротора;

$E_{dr}$  - середнє значення випрямленої ЕРС ротора;

$U_{л}$  - лінійна напруга ротора АДФР;

$s$  - ковзання ротора АДФР;

Для визначення можливості отримання необхідного коефіцієнта посилення, згідно схеми заміщення (рис. 2.2, б), скористаємося відомими співвідношеннями напруг і струмів на вході і виході ІППН [66, 67]:

$$\left. \begin{aligned} E_{du} &= K \cdot E_{dr}; \\ I_{dr} &= K \cdot I_{du}; \\ K &= \frac{1}{1-\gamma_1}; \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

де  $\gamma_1$  - коефіцієнт щільності ІППН.

$I_{dr}$  - середнє значення випрямленого струму ротора;

$I_{du}$  - середнє значення струму інвертора

Згідно рис. 2.2, вираз (2.4) можна представити в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} E_{du} &= K \cdot \left( E_{d\text{rn}} \cdot s - I_{dr} \cdot R_e \right); \\ I_{du} &= \frac{2 \cdot I_{dr}}{K}; \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

$$I_{dr} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_r \approx 1,22 I_r,$$

$$R_e = \frac{2r_1 + 2r_2}{2} = r_1 + r_2,$$

де  $I_r$  - струм ротора АДФР

$R_e$  - еквівалентний опір роторного кола, що враховує активний опір проводів,

випрямляча В та силового ключа К [68].

Тоді вираз для середньої напруги інвертора з урахуванням (2.4) і (2.5):

$$E_{du} = K \cdot E_{dr0} \cdot s - \frac{K^2 I_{du} R_e}{2} \quad (2.6)$$

Рівняння (2.6) з урахуванням (2.2) можна представити в наступному вигляді:

$$I = s \cdot \frac{K}{K_1} - \frac{K^2 I_{du} R_e}{2E_{du}}, \quad (2.7)$$

З рівняння (2.7), з урахуванням (2.2) можна отримати вираз максимального значення коефіцієнта посилення ІППН:

$$K_{max} = \frac{s}{R_e^* I_{du}^*}, \quad (2.8)$$

де  $R_e^* = \frac{R_e}{R_n}$  - відносний опір ротора;

$R_n = \frac{E_{dr0}}{I_{drn}}$  - номінальний опір ротора, приведений до кола постійного

струму (чисельне значення для двигунів МТ див. табл. 2.1);

$I_{du}^* = \frac{I_{dn}^*}{I_{drn}}$  - відносне значення струму інвертора.

Таким чином, максимально можливий коефіцієнт посилення ІППН прямо пропорційний ковзанню  $s$  і зворотно пропорційний відносного активного опору ротора  $R_e^*$  та струму інвертора  $I_{du}^*$ .

Для двигунів типу МТН, з потужностями 3,5-125кВт для ПВ = 25%, величина  $R_e^*$  знаходиться в межах 0,057÷0,016 (див. табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Паспортні і розрахункові параметри двигунів типу МТН при ПВ = 25% [1]

$P$ , кВт	$s_H$ , в.о.	$E_{rH}$ , В	$I_{rH}$ , А	$R_r$ , Ом	$X_r$ , Ом	$R_{rH}$ , Ом	$\frac{X_r}{R_r} = \text{tg } \varphi_r$	$R_e^*$ , в.о.
3,5	0,13	178	15,5	0,671	0,505	11,8	0,753	0,0567
8,2	0,1	267	23	0,466	0,666	12,3	1,43	0,0378
17,5	0,055	233	54	0,125	0,254	4,75	2,0	0,0203
36	0,045	271	88	0,059	0,173	3,39	2,45	0,017
18	0,073	221	59	0,125	0,245	4,12	2,0	0,03
26	0,053	266	68	0,102	0,231	3	3,1	0,034
45	0,073	319	94	0,091	0,356	3,7	3,9	0,025
53	0,067	197	185	0,0274	0,176	1,17	6,7	0,023
90	0,05	339	179	0,0384	0,09888	2,09	2,63	0,018
125	0,0333	288	294	0,017	0,077	1,07	4,55	0,016

Вираз (2.8) складно використовувати для практичного застосування, тому максимальне значення коефіцієнта посилення ІППН можна визначити, виходячи з балансу потужності.

Використовуючи баланс потужностей роторів і інвертора [69]:

$$P_{em} = 2 \cdot P_H \cdot s = 2S E_{drH} I_{drH} = E_{du} I_{du}, \quad (2.9)$$

де  $P_{em}$ ,  $P_H$  – відповідно електромагнітна і номінальна потужності на валу АДФР.

Згідно (2.9) отримаємо співвідношення:

$$\frac{2 \cdot s}{K_1} = I_{du}^* \quad (2.10)$$

Максимальне значення коефіцієнта посилення ІППН з урахуванням (2.8) визначається як:

$$K_{max} = \frac{K_1}{2 \cdot R_9^*} \quad (2.11)$$

Отже,  $K_{max}$  залежить від співвідношення напруги ротора і мережі, а також відносного значення активного опору ротора. В табл. 2.2 наведені розрахункові коефіцієнти посилення  $K_1$ ,  $K_{max}$ ,  $K_{min}$  для двигунів серії МТН, згідно паспортних даних з табл. 2.1.

Аналіз даних за табл. 2.2 і виразу (2.2) показує, що ІППН забезпечить стійку роботу схеми при рекуперації енергії в мережу. При цьому коефіцієнт щільності  $\gamma_l$  при  $s = s_H$  буде приймати значення  $\gamma_l = 0,96 \div 0,92$ .

Таким чином, при роботі АДФР практично на природній характеристиці забезпечується рекуперація номінального струму ротора в мережу.

### 2.3 Статичні синхронізуючі моменти електроприводу узгодженого обертання

Особливістю роботи запропонованого схемного рішення полягає в підтримці постійного сумарного струму ротора, а з урахуванням прийнятих припущень, електромеханічний момент двигунів пропорційний випрямленому струму ротора. Тому згідно зі спрощеною схемою заміщення (рис. 1.2, б)

Таблиця 2.2 – Розрахункові коефіцієнтів  $K_I$ ,  $K_{max}$ ,  $K_{min}$  для електроприводу узгодженого обертання з двигунами серії МТН

Кількість пар полюсів, $p$	Номінальна потужність двигуна серії МТН, $P_n$ , кВт	Коефіцієнт посилення, в.о.		
		$K_I$	$K_{min}$	$K_{max}$
1	2	3	4	5
6	3,5	2,13	7,6	18,0
	8,2	1,42	10,0	18,7
	17,5	1,63	18,1	40,75
8	18	1,72	16,6	28,7
	26	1,43	18,7	21,02
	45	1,19	12,7	23,8
10	53	1,03	14,9	41,96
	90	1,12	20,0	31,14
	125	1,32	30,0	42,37

роторного кола при пуску АДФР, коли  $s=1$ , параметри схеми заміщення двох АДФР приймаються ідентичними, а струми роторів АДФР рівними.

Якщо збудуючі моменти однакові, то в міру зміни частоти обертання, при підтримці ІППН постійного сумарного струму, забезпечується рівноприскорений пуск двигунів з постійним моментом. Механічні характеристики (рис. 2.4) набувають вигляду, аналогічно характеристикам з джерелом струму в колі ротора [35, 38].

В реальності АДФР, що застосовуються для механізму переміщення, мають різний статичний момент, який визначається положенням візка з вантажем і моментом тертя реборд коліс об гребні рейки при перекосі моста, і ін.

Припустимо, що візок з вантажем поміщений в одному з крайніх положень. Тоді момент двигуна М2, найближчого до візка, більший, ніж у



іншого М1. При ідентичних природніх характеристиках двигунів, різниця в моментах М1 і М2, яка визначається різницею струмів  $I_{dr1}$  і  $I_{dr2}$  при  $I_{dr1} + I_{dr2} = I_{dr} = const$ , буде викликати різний темп розгону, відповідний різниці динамічних моментів, і двигуни почнуть розганятися з різною швидкістю. Для АДФР з меншим ковзанням (меншим статичним моментом) в період розгону,

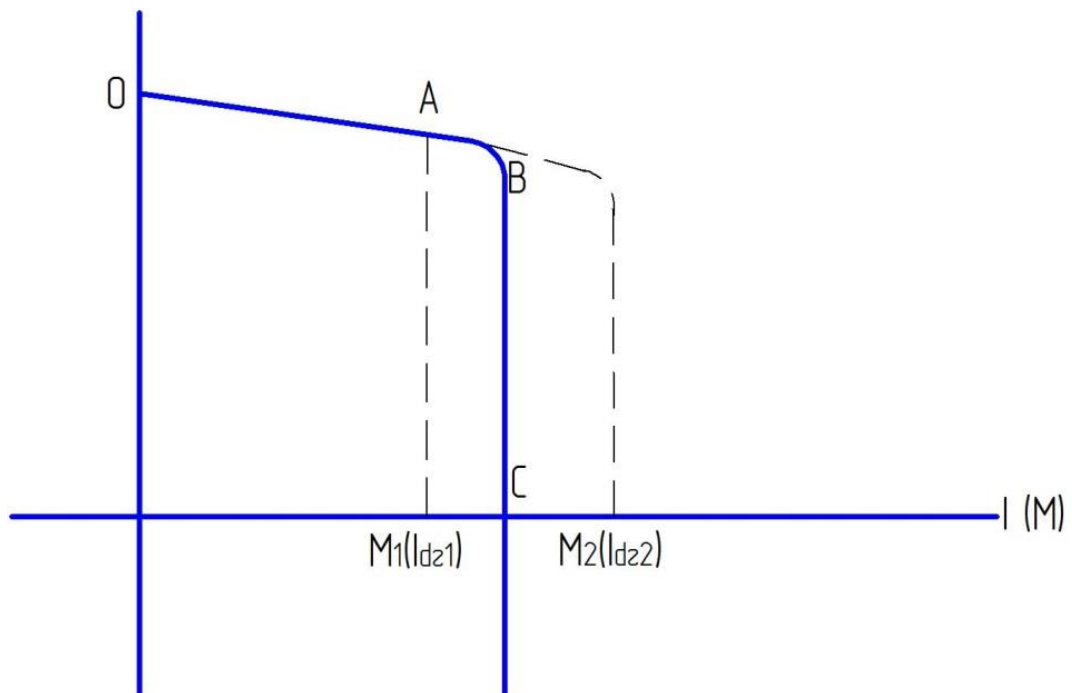


Рисунок 2.4 - Статичні механічні характеристики електроприводу узгодженого обертання з імпульсним струмовим керуванням в колі ротора

ЕРС ротора є меншим, ніж у АДФР з великим ковзанням. Це буде викликати протікання зрівняльного струму.

Створений зрівняльний струм призводить до зростання струму ротора та динамічного моменту АДФР, у якого найбільше ковзання, та до зменшення струму та динамічного моменту АДФР, який працює з меншим ковзанням. За рахунок цього, наявність зрівняльного струму забезпечує вирівнювання частоти обертання двох АДФР в динамічному режимі їх роботи.

Для визначення середнього значення зрівняльного струму скористаємося схемою заміщення (рис. 2.5). Схема заміщення побудована на основі схеми,

наведеної на рис. 2.2. Струм  $I_k$  визначається заданою уставкою струмообмежувача ключа К (рис. 2.2).

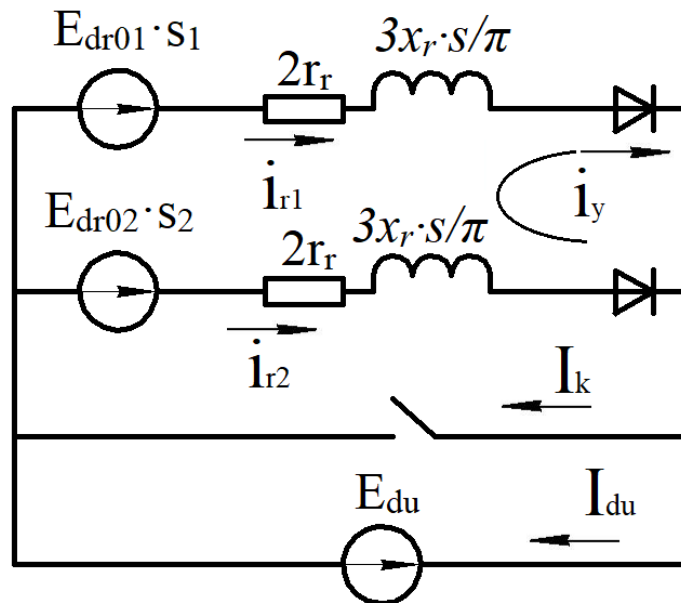


Рисунок 2.5 - Розрахункова схема роторних кіл в режимах заданого струмообмеження

Визначення зрівняльного струму, що забезпечує синхронізуючий момент, виконується з урахуванням наступних припущень:

- середня напруга інвертора  $E_{du}$  є постійною величиною, яка визначається напругою на конденсаторі;
- величина ємності конденсатора досить велика, що дозволяє вважати струм рекуперації енергії ковзання ротора незмінним;
- допускаємо, що внутрішній опір інвертора відсутній [71, 72];
- процес комутації в роторних випрямлячах враховується еквівалентним опором  $\frac{3}{\pi} x_r \cdot s$  [64];
- параметри схеми заміщення є постійними;
- параметри електричних машин ідентичні [73-75];
- відсутній механічний зв'язок між роторами двигунів.

Виходячи з прийнятих припущень випрямлена напруга випрямлячів в загальному вигляді визначається співвідношенням [76]:

$$\left. \begin{aligned} e_{r1} &= E_{du1} \cdot s_1 \cdot \left( 1 + \frac{2}{m^2 \cdot n^2 - 1} \cdot \sum_{n=1}^n \sin(m_n \omega_0 s_1 + \Psi_1) \right) \\ e_{r2} &= E_{du2} \cdot s_2 \cdot \left( 1 + \frac{2}{m^2 n^2 - 1} \sum_{n=1}^{mn} \sin(m_n \omega_0 s_2 + \Psi_1) \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

де  $m = 6 \cdot n$  - кратність пульсацій;

$n$  - натуральний ряд чисел.

Наявність пульсацій в зрівняльному струмі, пов'язано з пульсаціями сумарного струму  $I_k$  роторів АДФР (рис. 2.6) який може бути представлений у вигляді ряду [77]:

$$I_{yk} = \frac{8 \cdot \Delta I_k}{\pi^2} \sum_{k=1}^k \frac{(-1)^{2k}}{2k-1} \cdot \sin(\omega_0 (2k-1)t) \quad (2.13)$$

На рис 2.6 представлені часозалежні діаграми струму і напруги на виході випрямляча при роботі ключа К в квазісталому режимі роботи. На першому етапі на ділянці  $t_1 \rightarrow t_2$  ключ замкнено. Сумарний струм роторів з початковим значенням  $I_{t1}$  починає зростати до значення струму уставки струмообмежувача. На другому етапі ключ К розімкнено. Сумарний струм починає спадати під дією різниці ЕРС роторів та інвертора. У момент часу  $t_3$  ключ К замикається і процес повторюється. Розмах пульсацій  $2 \cdot \Delta I_k$  визначається петлею гістерезису уставки струмообмеження. Практично  $\Delta I_k$  знаходиться в межах  $0,05 \Delta I_k$ . На величину і форму зрівняльного струму впливає робота ключа К, що працює зі змінним значення щільності, яка визначає пульсацію випрямленого струму.

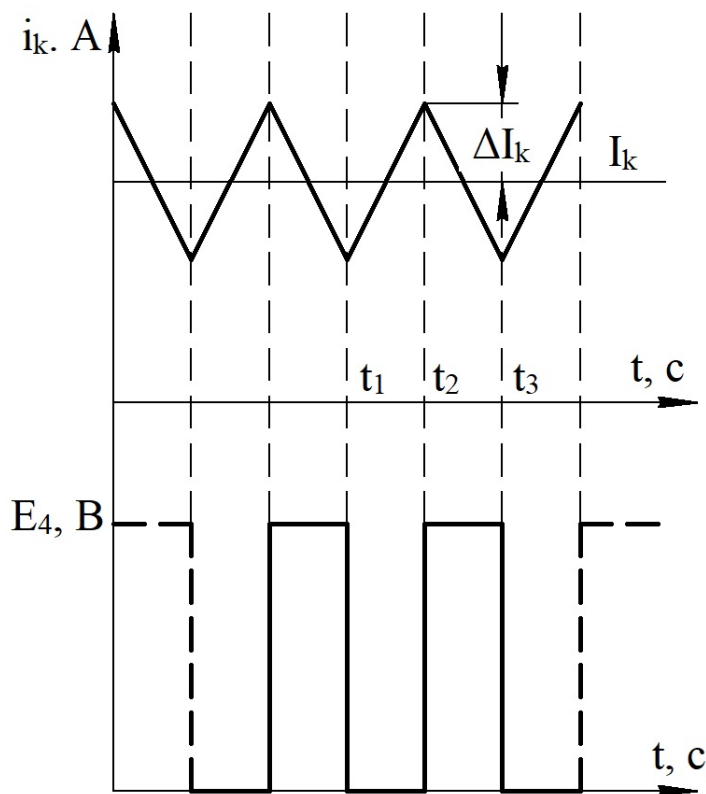


Рисунок 2.6 – Діаграма струму та напруги на виході випрямляча

Так як постійні часу розряду і заряду конденсатора однакові, а також відносно мале значення амплітуди та тривалості інтервалів  $t_1 \rightarrow t_2$  і  $t_2 \rightarrow t_3$ , то максимальна амплітуда пульсації струму  $\Delta I_k$  може бути представлена у вигляді пульсацій трикутної форми, яка може бути представлена за допомогою рівняння (2.13).

Електромагнітний момент асинхронного двигуна, при припущенні сталості магнітного потоку в повітряному зазорі, пропорційний активної складової струму ротора [16], а також середньому значенню випрямленого струму. Отже, синхронізуючий момент роторів АДФР буде пропорційним різниці струмів ротора АДФР, тобто, середньому значенню зрівняльного струму.

Для визначення середнього значення зрівняльного струму, згідно рис. 2.5 використовується система рівнянь, яка складена за методом контурних струмів [78]:

$$\left. \begin{aligned} 4 \cdot r_r + \frac{3}{\pi} x_r (s_1 + s_2) I_{12} - I_K \left( 2 \cdot r_r + \frac{\pi}{3} x_r \cdot s_1 \right) &= E_{dr} (s_1 - s_2) \\ I_{r2} &= I_K - I_{12} \\ I_{3p} &= I_{r1} - I_{r2} = I_K - 2 \cdot I_{12} \end{aligned} \right\}. \quad (2.14)$$

Згідно системи рівнянь (2.14), зрівняльного струму  $I_{3p}$  має вигляд:

$$I_{3p} = \frac{I_K \cdot \frac{3}{\pi} (s_1 - s_2) \cdot \operatorname{tg} \phi_r}{4 \cdot \left( 1 + \frac{3}{2\pi} s_{cp} \right) \cdot \operatorname{tg} \phi_r} - \frac{E_{dr} \cdot (s_1 - s_2)}{2 \cdot r_r \cdot \left( 1 + \frac{3}{2\pi} s_{cp} \right) \cdot \operatorname{tg} \phi_r}, \quad (2.15)$$

$$s_{cp} = \frac{s_1 + s_2}{2}, \quad (2.16)$$

$$\operatorname{tg} \phi_r = \frac{x_r}{r_r}, \quad (2.17)$$

де  $\operatorname{tg} \phi_r$  - конструктивний параметр обмотки ротора АДФР;

$s_{cp}$  - середнє ковзання між двома АДФР.

У відносних одиницях маємо:

$$I_{3p}^* = I_K^* \cdot \frac{3}{2\pi} \cdot (s_1 - s_2) \cdot \operatorname{tg} \phi_r \cdot R_{\mathcal{E}} \cdot K_c - K_c \cdot (s_1 - s_2), \quad (2.18)$$

$$K_c = \frac{1}{2 \cdot R_{\mathcal{E}}^* \cdot \left( 1 + \frac{3}{2\pi} \cdot s_{cp} \cdot \operatorname{tg} \phi_r \right)}, \quad (2.19)$$

$$I_{зр}^* = \frac{I_{зр}}{I_{дрн}}; \quad (2.20)$$

$$I_K^* = \frac{I_K}{I_{дрн}}, \quad (2.21)$$

де  $K_c$  - коефіцієнт синхронізації;

Рівняння (2.18), після перетворення має вигляд:

$$I_{зр} = K_c \cdot (s_2 - s_1) \cdot \left( I_K^* \cdot \frac{3}{2\pi} \operatorname{tg} \varphi_r R_\epsilon^* - 1 \right) \quad (2.22)$$

Таким чином, зрівняльний струм визначається двома складовими: різницею ковзань  $(s_2 - s_1)$  і величиною  $I_K^*$ . Абсолютна величина пропорційна коефіцієнту синхронізації  $K_c$ , який залежних від параметрів двигуна. Фізичне значення складової  $I_K^*$ , відображає залежність  $I_{зр}$  від комутаційних падінь напруг в роторах, які залежать від величини середнього струму уставки струмообмежувача  $I_K$ .

При роботі в режимі струмообмеження  $I_K^* = \text{const}$ . При відсутності струмообмеження ротор є закороченим, а струм ротора визначається статичним моментом.

Для аналізу значень синхронізуючого моменту та зрівняльного струму, скористаємося паспортними розрахунковими даними двигунів МТН при ПВ = 25% [1], які наведені в табл. 2.1. Значення коефіцієнтів синхронізації  $K_c$  за даними табл. 2.1 наведені в табл 2.3.

Таблиця 2.3 Розраховані значення коефіцієнтів синхронізації  $K_c$  для серії двигунів МТН

Кількість пар полюсів, $p$	Номінальна потужність двигуна серії МТН, $P_n$ , кВт	середнє значення ковзання $s_c$ , в.о.					
		0	0,25	0,1	0,2	0,5	1
		Коефіцієнт синхронізації $K_c$ , в.о.					
6	3,5	8,85	8,65	8,4	8,22	7,46	6,47
	8,2	13,2	13,2	12,3	11,6	9,85	7,85
	17,5	25	23,85	22,8	20,9	16,9	12,7
	36	29	26,45	25,06	22,7	18,24	13,36
8	18	16,7	17,57	17,18	16,43	12,17	9,4
	26	14,52	13,52	12,6	11,2	8,35	5,86
	45	20,0	18,29	16,8	14,5	10,36	6,99
10	53	21,18	18,68	16,42	13,22	8,34	5,02
	90	21,8	20,51	19,4	17,44	13,42	9,69
	125	32,2	29,1	26,55	22,6	15,6	10,3

Аналіз табл. 2.3 показує, що двигуни з більшою встановленою потужністю мають більш високий коефіцієнт синхронізації  $K_c$  при роботі на природній характеристиці ( $s=0 \div 2 s_n$ ). Це пояснюється більшим зростанням значення  $tg \varphi_r$  відносно  $R_c^*$ .

У режимі пуску, при ковзаннях близьких до  $s=1$ , величина коефіцієнта синхронізації знижується і має майже незмінне значення для всього діапазону встановлених потужностей АДФР (див. табл. 2.3).

За даними табл. 2.3., на рис 2.7 побудовані залежності  $K_c = f(s_{cp})$  для двох потужностей двигунів 3,5 кВт і 125кВт, які визначають поле максимальних змін коефіцієнту  $K_c$  для досліджуваного електроприводу з двигунами серії МТН.

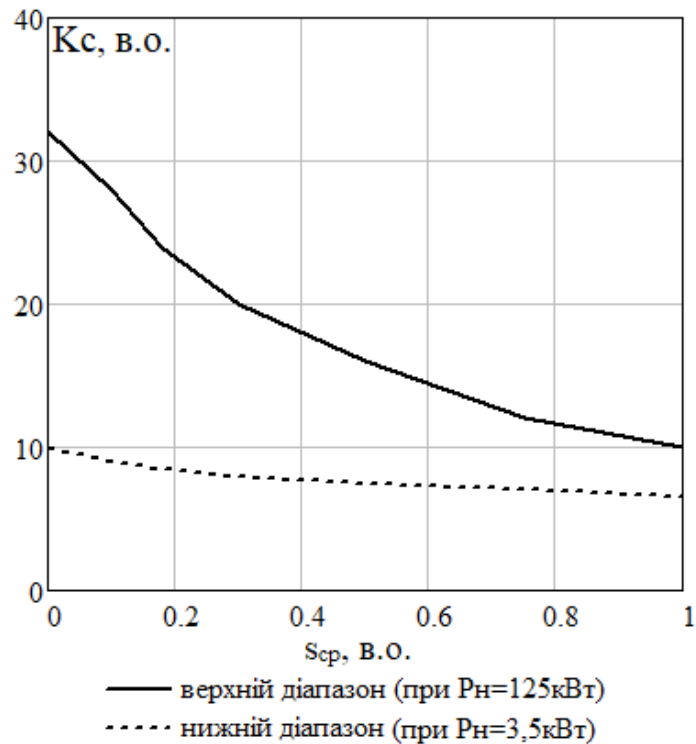


Рисунок 2.7 – Граничні значення коефіцієнту посилення  $K_c$  для двигунів серії МТН

Аналіз за рис 2.7 показує, що двигуни з відносно високою напругою ротора ( $U_{rn} < 250$ В) мають експоненціальну залежність  $K_c = f(s_{cp})$ , що пояснюється їх відносно високою  $tg\varphi_r$  і мають кращі синхронізуючі властивості в зоні роботи на природній характеристиці, де статичний момент двигуна, працюючого у важких режимах, знаходиться в межах 30÷70% від його номінального значення.

При номінальному ковзанні  $s_n = 0,13-0,033$  (табл. 2.1) величина робочого ковзання знаходиться в межах  $s_p = 0,049 \div 0,009$  при роботі крана без вантажу, а при роботі крана з вантажем в межах  $s_p = 0,091 \div 0,022$ . Різниця середніх ковзань для цих режимів може досягати  $s_{cp} = 0,042 \div 0,012$ .

Згідно (2.7), складова зрівняльного струму  $\left( I_K^* \cdot \frac{3}{2\pi} tg\varphi_r R_c^* - 1 \right)$  визначається множиною параметрів двигуна,  $tg\varphi_r$ ,  $R_c^*$  і відносною уставкою



струмообмеження. При зміні величини уставки струмообмеження в межах  $I_K^* = (3 \div 6)$ , що відповідає струму ротора одного двигуна  $(1,5 \div 3)I_{dH}$ , величина складової зрівняльного струму  $\left( I_K^* \cdot \frac{3}{2\pi} \operatorname{tg} \varphi_r R_\epsilon^* - I \right)$  знаходиться в межах  $(0,06 \div 0,11) \div (0,12 \div 0,22)$ . Отже, в режимі струмообмеження вплив складової визначається падінням напруги у випрямлячі при його комутації, та призводить до зменшення величини зрівняльного струму на  $(6-11) \div (12-22)\%$ .

Тому величину зрівняльного струму в залежності від параметрів двигуна при зазначених величинах струмообмеження можна висловити спрощеним співвідношенням:

$$I_{зр}^* = (0,94 \div 0,89) \div (0,88 - 0,75) K_c \cdot (s_1 - s_2) \quad (2.23)$$

Таким чином, збільшення кратності пускового струму призводить до зменшення  $I_{зр}^*$  через істотне падіння напруги у зрівняльному контурі при комутації випрямлячів.

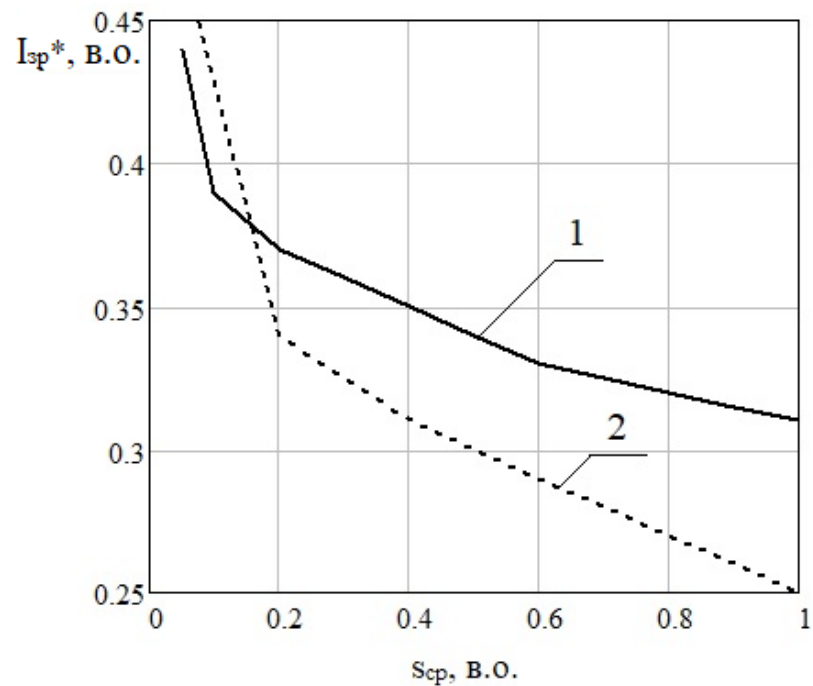
В табл. 2.4 наведені розрахункові значення зрівняльного струму та середнього значення ковзань при роботі двигунів серії МТН в системі електроприводу узгодженого обертання з уставкою струмообмеження  $I_K^* = 2$  при дії статичних моментів  $M_1 = 0,3M_H$  і  $M_2 = 0,7M_H$ .

За даними табл. 2.4 на рис. 2.8 представлена залежність зрівняльного струму від різниці ковзань роторів АДФР та струму уставки струмообмеження  $I_K^* = 2$  для двигунів МТН-112-6 і МТН-412-6.

Аналіз залежностей (рис. 2.8) показує, що двигуни мають приблизно однакові синхронізуючі моменти в робочому діапазоні зміни навантаження і ковзань роторів двигуна. Синхронізуючий момент для МТН-11-6 становить  $(0,44 \div 0,3)M_H$ ; а для МТН-412-6 -  $(0,465 \div 0,26)M_H$ . Відмінності в характері зміни

Таблиця 2.4 – Розрахункові значення  $I_{зр}^*$ ,  $s_{ср}$  при роботі двигунів серії МТН в системі електроприводу узгодженого обертання

серія АДФР	$s_1 - s_2$ , в.о.	$s_{ср}$ , в.о.				
		0,05	0,1	0,2	0,5	1,0
		$I_{зр}^*$ , в.о.				
МТН-111-6	0,052	0,44	0,395	0,38	0,35	0,3
МТН-411-6	0,012	0,465	0,450	0,345	0,315	0,26



1 – для МТН = 111-6, при  $s_1 - s_2 = 0,052$ ;

2 – для МТН = 411-6, при  $s_1 - s_2 = 0,012$ .

Рисунок 2.8 – Залежності зрівняльного струму від середнього значення ковзання

АДФР серії МТН при  $I_K^* = 2$  та дії статичних моментів  $M_1 = 0,3M_H$  і

$$M_2 = 0,7M_H$$

моментів визначаються поведінкою параметра  $K_C$ , який для двигунів з великим  $tg\varphi_r$  має стрімкий приріст в зоні малих ковзань  $s_{ср}$ .

Наявність в складі напруги та струму роторів АФДР вищих гармонік, що викликані пульсаціями випрямленої напруги, призводить до появи пульсацій зрівняльного струму і зрівняльного моменту тощо.

З урахуванням (2.12) і (2.18) величина змінної складової зрівняльного струму визначається співвідношенням:

$$I_{3p}^* = \frac{K_c}{Z} \cdot (s_1 - s_2) \cdot \sum_{n=1}^{6n} \frac{1}{6 \cdot n^2 - 1} \cdot [\sin(6ns_1\omega_0 t + \psi_1) - \dots \\ \dots - \sin(6ns_2\omega_0 t + \psi_2)], \quad (2.24)$$

$$z = \sqrt{r_r^2 + x_r^2}, \quad (2.25)$$

$$\psi_{1,2} = \arctg \frac{x_r \cdot s_{1,2}}{r_r}, \quad (2.26)$$

В остаточному вигляді (2.19) можна представити як:

$$I_{3p}^* = \frac{K_c}{z} (s_1 - s_2) \cdot \sum_{n=1}^{6n} \frac{2}{6n^2 - 1} \cdot \left[ \cos\left(6n\omega_0 t (s_1 + s_2) + \frac{1}{2}(\psi_1 + \psi_2)\right) \right] \\ \dots \times \sin\left(6n(s_1 - s_2)\omega_0 t + \frac{1}{2}(\psi_1 - \psi_2)\right) \quad (2.27)$$

Таким чином, в змінній складовій є дві складові: синусоїдальна з частотою пропорційною суми ковзань двох АДФР; косинусоїдальна складова, яка пропорційна половині різниці цих ковзань.

Найбільш істотне значення має косинусоїдальна складова частота якої може перебувати в межах  $(2 \div 0,6)\Gamma\text{ц}$  для роботи крана без вантажу і з вантажем. Мінімальне значення ця складова приймає при  $(\psi_1 - \psi_2) = 0$ , тобто, при протифазі

пульсуючих струмів зрівняльного струму. Зсув фаз струмів ротора на  $90^\circ$  сприятиме збільшенню пульсації зрівняльного моменту в два рази і зменшенню пульсацій за швидкістю АДФР.

#### 2.4 Особливості роботи роторних випрямлячів

При частоті модуляції силового ключа  $f_k = 1 \div 3$  кГц, значення пульсації випрямленого струму ротора знаходяться в межах  $\Delta I_d = (0,05 \div 0,10) \Delta I_d^\Sigma$  [77]. Тому для спрощення щодо визначення кутів комутації при роботі випрямлячів нехтуємо пульсаціями випрямленого струму роторів АДФР.

При постійному статичному моменті двигунів справедливе співвідношення для кутів комутації, які визначають зсув фаз струму ротора і, відповідно,  $\cos \varphi_r$  [64]:

$$\cos \gamma = 1 - \frac{I_d \cdot \sqrt{2} \cdot x_r}{S \cdot U_{rH}} \quad (2.28)$$

Оскільки індуктивний опір і ЕРС ротора при зміні частоти обертання ротора є пропорційним до ковзання, то з (2.21) випливає, що кут комутації щодо частоти ротора - величина постійна. Зазначене співвідношення справедливо при досить малих співвідношеннях  $r_r/x_r$  ( $\tan \varphi_r$ ), коли величиною активного опору можна знехтувати. Однак при наближенні до робочої точки В механічної характеристики АДФР (рис. 2.4), співвідношення  $r_r/(x_r \cdot s)$  істотно збільшується. При ковзанні  $s < s_k$  в 5 і більше разів, що змінює характер комутаційних процесів в випрямлячах, оскільки змінюється не тільки співвідношення  $r_r/(x_r \cdot s)$ ,

але і величина ЕРС ротора, що викликає нелінійну зміну струму в комутуючих контурах.

Для більш коректного визначення кута комутації, який являє вплив на зсув фази струму ротора, розглянемо більш докладно процеси комутації в роторному випрямлячі.

Оскільки на ділянці В-С механічної характеристики (рис.2.4) середнє значення струму ротора постійно підтримується за допомогою ІППН, то форма струму ротора, з урахуванням кута комутації, має трапецеїдальну форму, а напруга комутації  $U_k$  в момент початку комутації буде визначається з співвідношення:

$$\dot{U} = \dot{E}_{\phi rc} - \left( \dot{E}_{\phi re} - I_{dr} \cdot r_r \right), \quad (2.30)$$

$$\dot{E}_{\phi ra} = \dot{E}_{\phi rb} = \dot{E}_{\phi rc} = E_{rn} = \sqrt{2} E_{rn} \cdot s \cdot \sin(\omega t) \quad (2.31)$$

де  $\dot{E}_{\phi ra}, \dot{E}_{\phi rb}, \dot{E}_{\phi rc}$  - вектори напруги відповідно у фазах А, В, С обмотки ротора АДФР;

$E_{rn}$  - номінальна лінійна напруга ротора.

Комутація вентилів відбувається в момент, коли комутуюче напруга дорівнює нулю (рис.2.9).

Оскільки  $I_{dr} r_r = \text{const}$ , то падіння на активному опорі призводить до зменшення напруги в фазі на величину  $I_{dr} r_r$ , а також до зсуву початку комутації на кут  $\alpha'$ , величина якого визначається зі співвідношення [64]:

$$s \cdot E_{rm} \cdot \sin(180 - \alpha') = I_{dr} r_r \quad (2.32)$$

$$\alpha' = s \cdot \omega \cdot t \quad (2.33)$$

де  $E_{rm}$  - амплітудне значення лінійної ЕРС ротора.

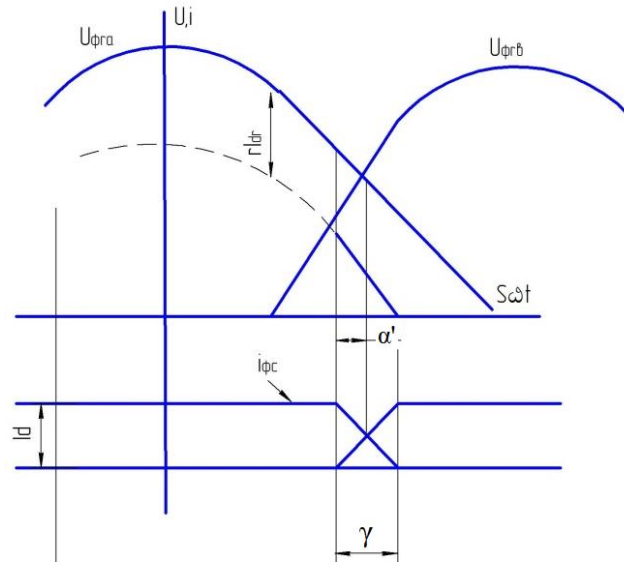


Рисунок 2.9 – Часозалежна діаграма напруги і струмів під час комутації

Тоді

$$\sin \alpha' = \frac{I_d \cdot r_r}{s \cdot E_{rm}} \quad (2.34)$$

Початок комутації зсувається в бік випередження (2.34), що призводить до збільшення коефіцієнта потужності, і відповідно, до збільшення електромагнітного моменту двигуна, що кілька компенсує зменшення струму та моменту від вищих гармонійних [36].

Для кранових двигунів потужністю до 75кВт, при його номінальному струмі ротора, величина  $\sin \alpha'$  знаходиться в межах  $0,45 \div 0,6$ , що відповідає  $27 \div 37$  ел. град. При значенні моменту  $M = 0,3 \div 0,6 M_n$ , що відповідає робочим режимам роботи кранових АДФР, то кут зсуву  $\alpha'$  при  $M = 0,3 M_n$ , буде знаходитись в межах  $\alpha' = 4,8 \div 6,6$  ел. град., а при  $M = 0,6 M_n$  -  $\alpha' = 10,2 \div 15,4$  ел. град.

Рівняння балансу напруг в контурі комутації с урахуванням (2.30) має вигляд:

$$s \cdot \sqrt{2} \cdot E_{rH} \cdot \sin(s\omega t) + I_d r_r = 2 \cdot L_r \frac{di_k}{dt} + 2r_r \cdot i_k, \quad (2.35)$$

де  $i_k$  - струм комутації при двофазному короткому замиканні мостового випрямляча.

Використовуючи рівняння (2.35), з урахуванням, що  $\omega t = 0$  при умові  $-\alpha' = s\omega t$  знайдемо струм комутації при двофазному короткому замиканні мостового випрямляча:

$$i_k = \frac{s \cdot E_r}{\sqrt{2} Z_r} \left[ \sin(s\omega t) + \sin(\alpha' - \varphi) e^{-\frac{r_r}{s \cdot x_r} (s\omega t + \alpha)} \right] + \frac{I_d}{2} \left[ 1 - e^{-\frac{r_r}{s \cdot x_r} (s\omega t + \alpha')} \right], \quad (2.36)$$

$$Z_r = \sqrt{x_r^2 + r_r^2} \quad (2.37)$$

$$\varphi = \arctg \frac{s \cdot x_r}{r_r} \quad (2.38)$$

де  $Z_r$  - повний опір фази ротора;

$\varphi$  - фазовий зсув струму комутації від лінійної ЕРС ротора АДФР.

У разі виконання умови, що  $i_k = I_d$  комутація закінчується, а параметр  $s\omega t$  приймає значення  $\gamma - \alpha'$ , тоді (2.36) після перетворень набуде вигляду:

$$\frac{I_d \sqrt{2} Z_r}{2 s \cdot E_{rn}} \cdot \left( 1 + e^{\frac{r_r \cdot \gamma}{s \cdot x_r}} \right) = \sin[\gamma - (\alpha' + \varphi)] + \sin(\alpha' + \varphi) e^{-\frac{r_r}{s \cdot x_r} \gamma} \quad (2.39)$$

Через те, що при зміні частоти обертання індуктивний опір ротора є пропорційним до його ковзання, то параметр  $r_r/(x_r \cdot s)$  має змінне значення. Роль активного опору на процес комутації надає істотне значення, за рахунок зміни кута  $\varphi$  і більш швидкого загасання вільної складової струму, яка змінюється за

експоненціальним законом  $e^{\frac{r_r \cdot \gamma}{s \cdot x_r}}$ .

Аналіз параметрів двигунів (табл.2.1) показує, що величина  $r_r/(x_r \cdot s)$  в діапазоні робочого ковзання (див. табл. 2.2), знаходиться в межах  $11 \div 6,6$  ( $\tan \varphi_r \leq 0,09 \div 0,15$ ). Тому індуктивний параметр роторного кола  $x_r$  має незначний вплив на величину повного опору ротора  $Z_r$ , амплітуду струму комутації, а також і його вільну складову. Таким чином струм комутації знаходиться практично в фазі з ЕРС ротора АДФР.

У разі, якщо  $x_r = 0$ , то згідно (2.39) після нескладних перетворень отримаємо:

$$\sin(\gamma - \alpha') + \sin \alpha = \frac{2 \cdot I_d \cdot r_r}{s \cdot E_{rn}} \quad (2.40)$$

Вираз (2.40) з урахуванням (2.34) можна представити в наступному вигляді:

$$\sin(\gamma - \alpha') = \sin(\alpha') \quad (2.41)$$

Для випадку, коли  $x_r = 0$ :

$$\gamma = 2 \cdot \alpha' \quad (2.42)$$



Оскільки коефіцієнт потужності випрямляча визначається прийнятним для практичного застосування співвідношенням [64]:

$$\cos \varphi = \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right), \quad (2.43)$$

то з урахуванням (2.43) і (2.42), вираз (2.43) набуде вигляду:

$$\cos \phi = \cos\left(-\alpha' + \frac{2\alpha'}{2}\right) = 1 \quad (2.44)$$

Коли ключ К (рис.2.1, а) постійно модулює в зоні робочих ковзань АДФР, фазний струм випрямляча знаходиться в фазі з лінійною напругою, і має практично прямокутну форму. Коли силовий ключ постійно закорочено, формування струму відбувається під дією лінійної напруги, і в роторі формується практично синусоїдальний струм (див. рис. 2.5). Тоді механічна характеристика двигунів в сталому режимі близька до природної зі значенням ковзань незначно більше свого номінального, так як має місце падіння напруги на діодах випрямлячів і силового ключа К (рис.2.1, а).

Таким чином, схема електроприводу узгодженого обертання при роботі в зоні ковзань  $s \leq s_n$  принципово відрізняється від схеми вентиляного каскаду наступним:

- в схемі відсутній зрівняльний струм між інвертором і роторним випрямлячем;
- коефіцієнт потужності роторного кола на природній характеристиці (ключ К1 - закритий) близький до  $\cos \phi_r$ ;
- механічна характеристика має більш жорстку характеристику, оскільки відсутній вплив параметрів керованої мережею інвертора на параметри роторного кола, що забезпечує високий коефіцієнт потужності ротора;

- відсутність споживання реактивної потужності інвертором, що забезпечує коефіцієнт потужності електроприводу, рівного коефіцієнту потужності двигуна.

## 2.5 Дослідження особливостей роботи інвертора керованого мережею в аварійних режимах в вентильному каскаді з імпульсно-струмовим обмеженням

Як відомо, в інверторі з мережевою комутацією можливі наступні аварійні режими [79]: однофазний й двофазний зрив інвертора. Найбільш небезпечним є режим однофазного зриву інвертора [79].

Для роботи трифазного мостового інвертора в сталому режимі згідно розрахункової схеми (рис.2.2, а) необхідно дотримуватися балансу напруг [64]:

$$E_{du} = E_{d0} \cdot \cos \beta + \left( I_d \frac{3 \cdot x_c}{\pi} + r_c \right), \quad (2.45)$$

$$E_{d0} = 1,35 \cdot E_2, \quad (2.46)$$

де  $E_2$  - діюче значення лінійної напруги мережі;

$x_c$ ,  $r_c$  - відповідно індуктивний і активний опір мережевого реактора інвертора.

Кут комутації інвертора визначається співвідношенням [64]:

$$\gamma = \beta - \arccos \left( \cos \beta + \frac{\sqrt{2} I_d x_c}{E_2} \right) = 0 \quad (2.47)$$

Умова  $\gamma = \beta$ , є межею успішної комутації, після якої настає однофазне перекидання інвертора.

Критичне значення струму інвертування визначається зі співвідношення [80]:

$$\arccos\left(\cos\beta + \frac{\sqrt{2}I_{d\text{кр}}x_c}{E_2}\right) = 0 \quad (2.48)$$

або

$$\cos\beta + \frac{\sqrt{2}I_{d\text{кр}}x_c}{E_2} = 1 \quad (2.49)$$

З (2.49) критичне значення струму:

$$I_{d\text{кр}} = \frac{(1 - \cos\beta)E_2}{\sqrt{2}x_c} \quad (2.50)$$

Базове значення струму короткого замикання в точці підключення інвертора:

$$I_{\bar{\sigma}} = \frac{E_2}{x_c}, \quad (2.51)$$

Визначимо відносне значення критичного струму:

$$I_{d\text{кр}}^* = \frac{I_{d\text{кр}}}{I_{\bar{\sigma}}} = \frac{1 - \cos\beta}{\sqrt{2}} \quad (2.52)$$

Кут інвертування теоретично може знаходитися в межах  $10 \leq \beta \leq 30$  ел. град., то значення відносного струму короткого замикання знаходиться в межах  $0,7 \leq I_{dk}^* \leq 0,095$ .

З іншого боку, згідно розрахункової схеми заміщення (рис. 2.2) амплітуда аварійного струму при однофазному зриві інвертора буде визначатися параметрами коливального контуру  $L_\phi - C_\phi$ .

Якщо знехтувати втратами на активному опорі контуру, то згідно [79]:

$$I_m = E_{du} \sqrt{\frac{C_\phi}{L_\phi}} \quad (2.53)$$

Період коливань розрядного струму:

$$T_\phi = 2\pi \sqrt{I_\phi C_\phi} \quad (2.54)$$

Максимальне значення струму в відносних одиницях:

$$I_m^* = \frac{I_m}{I_\phi} = \frac{m x_c}{\sqrt{2}\pi} \cos \beta \sqrt{\frac{C_\phi}{L_\phi}} \quad (2.55)$$

У разі рівності максимального значення струму розряду  $I_m^*$  (2.55) і критичного значення струму зриву інвертора керованого мережею  $I_{dk}^*$  (2.52) отримаємо наступне співвідношення, що забезпечує стійку комутацію тиристора при однофазному зриву інвертора:

$$\frac{1 - \cos \beta}{\sqrt{2}} \geq \frac{x_c m \sqrt{2}}{\pi} \cos \beta \cdot \sqrt{\frac{C_\phi}{L_\phi}} \quad (2.56)$$

Якщо уявити, що  $\frac{L_\phi}{L_c} = K_d$  і виконати перетворення в (2.56) з урахуванням (2.54), отримаємо:

$$K_d \leq \frac{2 \cdot m \cdot T_\phi \cdot \cos \beta}{\pi \cdot T_c \cdot (1 - \cos \beta)}, \quad (2.57)$$

$$T_\phi = \sqrt{\frac{C_\phi}{L_\phi}}; \quad T_c = \frac{1}{f_c}, \quad (2.58)$$

де  $f_c$  - частота живлячої напруги в мережі.

При  $T_\phi = T_c$  і  $\beta = 30$  ел. град. співвідношення індуктивностей фільтрового і мережевого реакторів приймає значення  $K_d \geq 12,35$ .

Якщо прийняти величину індуктивності мережевого реактора  $L_c$  інвертора при загально використуваному значенні напруги короткого замикання  $U_{кз} = 5\%$ , то значення індуктивності мережевого реактора  $L_c$  при фазних струмах інвертора  $10 \div 100$  А буде перебувати в межах  $L_c = 5,7 \div 0,57$  мГн. Отже значення індуктивності фільтрового реактору  $L_\phi$  буде дорівнювати  $L_\phi = 70,4 \div 7,0$  мГн відповідно.

При зазначених умовах величина ємності  $C_\phi$  повинна знаходитися в межах:

$$C_\phi = \frac{\sqrt{T_c}}{2\pi} L_\phi = (0,158) [\Phi] \quad (2.59)$$

З іншого боку, необхідна величина ємності блоку ППН для забезпечення високочастотних пульсацій, викликаних роботою ключа К визначається співвідношенням [66]:

$$C_{\phi} = \frac{E_u \cdot \gamma}{f_k \Delta U_{\phi m} R_{ни}} = \frac{I_{du} \cdot \gamma}{f_k \Delta U_c} \quad (2.60)$$

де  $\Delta U_{\phi m}$  - амплітудне значення пульсації напруги фільтра  $C_{\phi}$ ;

$R_{ни} = E_{ни} / I_{ни}$  - номінальне значення опору навантаження інвертора.

За розрахунковими даними перетворювача для двигунів МТН-111-6 та МТН-411-6 ( $\gamma = 0,92 \div 0,94$ ;  $I_{du} = 10 \div 150 \text{ А}$ ;  $\Delta U_c = 0,05 E_u$ ;  $f_k = 2 \div 3 \text{ кГц}$ ), величина ємності за (2.60) дорівнює  $C_{\phi} \approx (3,5 \div 2,5) \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$ , що в  $16 \div 23$  рази менша, ніж величини ємності, розрахованої за (2.59).

Для обмеження пульсацій при роботі інвертора керованою мережею, значення індуктивності згладжувального реактора  $L_{\phi}$  визначається пульсаціями його напруги при  $\beta \leq 30$  ел. град., яка для мостової схеми складає  $U_{ни}^* = 0,176$  [64].

Відповідно, необхідне значення індуктивності  $L_{\phi}$  при  $\Delta I_{du} = 0,1 \cdot I_{дн}$  для  $I_{дн} = 10 \div 1000 \text{ А}$  визначається як:

$$L_{\phi} = \frac{U_m}{\omega \cdot m \cdot \Delta I} = 47,7 \div 4,77 \text{ мГн}, \quad (2.61)$$

Значення індуктивності, розрахована за (2.53) в 1,5 рази менша за необхідної величини мережевої індуктивності для стійкого відключення однофазного зриву інвертора.

Отримані ємності і індуктивності, які необхідні для забезпечення успішної роботи інвертора в аварійних режимах приймають неприйнятні значення з точки зору габаритів, маси та їх вартості. Тому для запропонованої системи електроприводу такий підхід, щодо визначення параметрів, що забезпечують безаварійну роботу інвертора керованого мережею, не може бути використаний, по відношенню до систем електроприводу з асинхронно-вентильним каскадом, що працюють в під синхронному діапазоні обертання ротора АДФР [80].

Для захисту інвертора керованого мережею рекомендується використовувати штучну комутацію за допомогою додаткового коливального контуру [79].

На рис.2.7 представлена схема з примусовим гасінням аварійного струму при перекиданні інвертора.

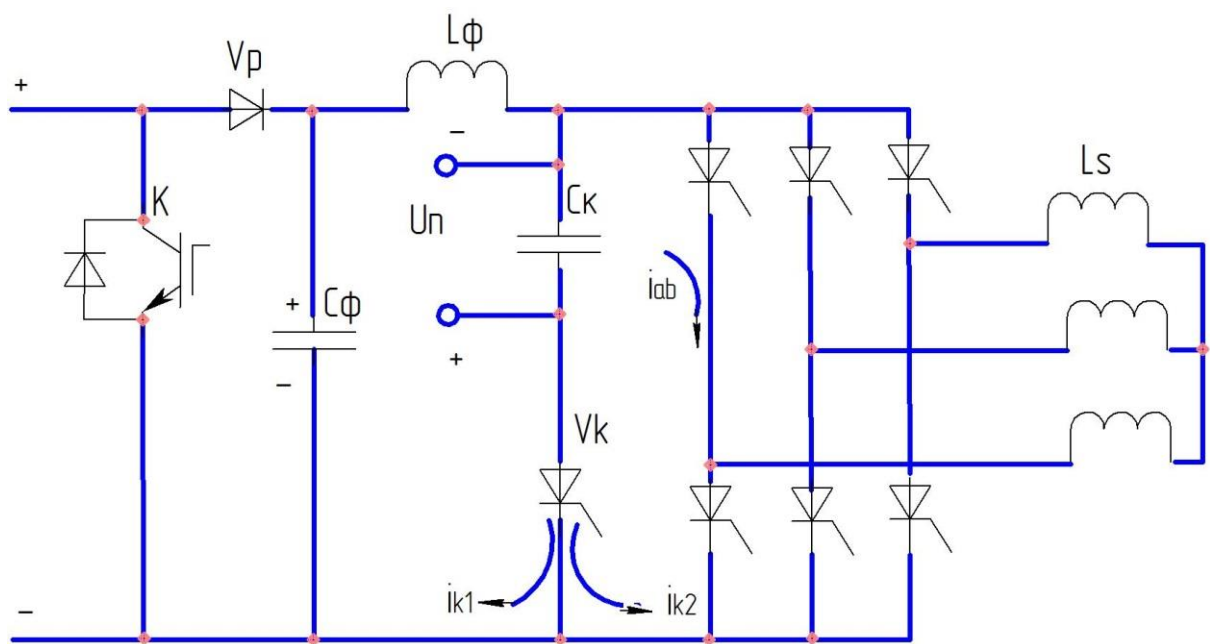


Рисунок 2.7. - Схема захисту інвертора при перекиданні

Комутуючий конденсатор  $C_k$  попередньо заряджений від стороннього джерела з полярністю, показаної на рис.2.7, та має гальванічну розв'язку від напруги інвертора мережі. При виникненні аварійної струму, що перевищує допустимий струм інвертування, або при зникненні однієї з фаз мережі живлення

(що найбільш імовірно при живленні крана від тролейних ліній), тиристор  $V_k$  включається, і конденсатор  $C_k$  розряджається по контуру  $V_k - C_k - L_\phi$ , а також через тиристири випрямляча керованої мережі  $V1$  і  $V4 - C_k$  і  $V_k$  та тиристири  $V1$  і  $V4 - C_k$ . Так як індуктивність  $L_\phi$  на два і більше порядків відрізняється від індуктивності сполучних проводів, то струм комутації  $i_{k2}$  значно більше  $i_{k1}$ .

Для того, щоб припинити розвиток аварійного режиму, струм комутації повинен перевищувати значення струму зриву інвертора.

Струм зриву інвертора  $i_{ab}$  визначається співвідношенням згідно (2.53) і (2.54):

$$i_{ae} = I_m \cdot \sin(\omega_0 t) + I_{du} = U_\phi \cdot \sqrt{\frac{C_\phi}{L_\phi}} \cdot \sin(t \sqrt{C_\phi L_\phi}), \quad (2.62)$$

де  $I_{du}$  - струм інвертора в момент його зриву.

Захист подає сигнал на включення комутуючого тиристора  $V_k$  при досягненні струмами  $i_{ab}$  значення уставки захисту за струмом  $I_z$ .

У свою чергу, струм примусової комутації  $i_k$  визначається як [87]:

$$i_k = U_n \sqrt{\frac{C_k}{L_k}} \cdot \sin t(\sqrt{C_k L_k}) \geq I_{ae} \quad (2.63)$$

Власна частота коливань розряду аварійного струму згідно (2.53) знаходиться в межах  $f_c = 11,8-46,9$  Гц. При цьому менші значення частот відносяться до електроприводів з меншою потужністю (3,5-5 кВт). Амплітуди аварійного струму при параметрах захисту, які визначаються за умовами



забезпечення статичних режимів роботи обладнання, будуть перебувати відповідно в межах:

$$I_{max} = \frac{U_{du\ max}}{\sqrt{\frac{L_{\phi}}{C_{\phi}}}} \approx 350-1000A \quad (2.64)$$

Для успішного захисту умовою максимального струму в контурі при врахуванні часу відновлення тиристорів ( $t_{відн}$ ) [81] є :

$$\left. \begin{array}{l} t_{відн} = 1,68\sqrt{L_k C_k} \\ I_m \geq 1,5I_{ав} \end{array} \right\} \quad (2.65)$$

Використовуючи швидкодіючий тиристор з часом  $t_{відн} = 20$  мкс, згідно (2.65) отримаємо:

$$L_k C_k = 141,7 \cdot 10^{-12} \quad (2.66)$$

Оскільки в контурі протікання аварійного струму при однофазному зриві інвертора індуктивність сполучних проводів знаходиться в межах 1-2 мкГн, то величина ємності складає 71-140 мкФ.

Згідно (2.62) отримані параметри комутуючого контуру забезпечують амплітуду струму комутуючого контуру в 1720-3440А, що в свою чергу забезпечує виконання умови (2.65), отже, і успішне відновлення керованого мережею інвертора при випадковому його зриві. Якщо зрив інвертора викликано короткочасним зникненням напруги, то алгоритм керування СІФК повинен забезпечити зняття керуючих імпульсів з блоку ІППН і інвертора, з подальшим автоматичним повторним включенням.

Зазначена система захисту від перекидання інвертора була реалізована в перетворювачі типу МПЧ-ТТП-160-380-50 УХЛ4.2, який виготовлений ТОВ «НДІ» Перетворювач »для електроприводу узгодженого обертання мостового крана 60т для Алчевського меткомбінату.

## 2.6 Висновки до другого розділу

Запропоновано енергоефективний електропривод узгодженого обертання асинхронних двигунів з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, який представлено в вигляді перетворювача підвищуючого типу та інвертора керованого мережею (або автономного інвертора напруги), що забезпечує безперервну рекуперацію енергії в мережу у динамічному режимі роботи при максимальному коефіцієнті потужності електропривода.

За результатами теоретичного дослідження отримано аналітичний вираз коефіцієнту підсилення імпульсно-струмового перетворювача в колі електрично пов'язаними роторними випрямлячами, при якому забезпечується стабілізація напруги на вході інвертора керованого мережею, працюючого в режимі безперервної рекуперації з постійним кутом інвертування, що забезпечує максимально граничне значення коефіцієнта потужності електроприводу. Встановлено, що при змінних параметрах роторних кіл, що залежить від ковзань взаємопов'язаних двигунів, забезпечується потрібне значення коефіцієнту підсилення у всіх режимах роботи електроприводу узгодженого обертання з рекуперацією енергії ковзання до мережі.

За результатами теоретичного дослідження вперше отримано безрозмірний узагальнений параметр (коефіцієнт) синхронізації  $K_c$ , який залежить від конструктивних особливостей схемного рішення, параметрів роторного кола

АДФР та співвідношення статичних моментів асинхронного електропривода узгодженого обертання.

Отримано аналітичний вираз для зрівняльного струму між роторами двигунів, що зумовлює появу зрівнювального моменту. Доведено, що величина зрівняльного струму пропорційна коефіцієнту синхронізації  $K_c$ , та різниці ковзань взаємопов'язаних двигунів. Встановлено, що в пускових режимах роботи електроприводу узгодженого обертання, обмеження величини уставки за струмом  $I_k^*$  зменшує зрівняльний струм, що пояснюється впливом комутаційних процесів в роторних випрямлячах. При роботі в межах малих значень ковзань двигунів, коли вони працюють з закороченими роторними випрямлячами (природня характеристика), зрівняльний струм визначається коефіцієнтом синхронізації  $K_c$  та різницею ковзань двигунів.

Встановлено, що електропривод узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі з електрично пов'язаними роторними випрямлячами в межах ковзань  $s \leq s_n$  принципово відрізняється від асинхронного вентильного каскаду:

- відсутністю зрівняльного струму між інвертором керованою мережею та роторними випрямлячами;
- більш жорсткою механічною характеристикою електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі з електрично пов'язаними роторними випрямлячами, аналогічною для електроприводів з індуктивно-ємнісним перетворювачем;
- коефіцієнтом потужності при роботі електроприводу узгодженого обертання на природній характеристиці, який дорівнює коефіцієнту потужності взаємопов'язаних двигунів;
- відсутністю споживання реактивної потужності інвертором супроводжується більш високим ККД електропривода при роботі на природній характеристиці і мінімальним споживанням реактивної потужності в режимі пуску та прискорення двигунів при роботі з кутом випередження  $\beta_{min} = const$ .

Визначені параметри електричної схеми при застосуванні інвертора керованого мережею зі штучною комутацією його вентилів, що застосовується в електроприводі узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі з електрично пов'язаними роторними випрямлячами, при яких забезпечується надійна робота інвертора та його захист від його зриву.

### РОЗДІЛ 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОНІЗУЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ УЗГОДЖЕНОГО ОБЕРТАННЯ З ІМПУЛЬСНО-СТРУМОВИМ ОБМЕЖЕННЯМ ЗАСОБАМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Проведені в розділі 2 дослідження синхронізуючих властивостей електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів без урахування пружних зв'язків між електродвигунами для механізму переміщення мостового крану показали, що зазначена схема електроприводу має властивості самосинхронізації при статичних і гармонійних діях навантажувальних моментів.

У реальних системах електроприводу механізмів переміщення мостових кранів та візків присутній пружний зв'язок між валами електродвигунів, який викликає коливання механічних зусиль в конструкції балки моста, в залежності від положень вантажу і жорсткості конструкції кран-балок.

У розділі 2 показано, що система узгодженого обертання досить ефективно зменшує неузгодженість частот обертання двигунів при високочастотних (більше за 2-3Гц) коливаннях моменту навантаження, які досить складно врахувати в системах регулювання електродвигунами узгодженого обертання [18, 29, 70]. Проведені авторами дослідження показують, що в багатьох випадках динаміку електроприводів мостових кранів можливо описати 2-х та 3-х масовими моделями, які при певних припущеннях призводять до прийнятих на практиці результатів [18, 29, 70].

Незважаючи на наявність складних математичних моделей і структур реалізації систем регулювання електроприводами узгодженого обертання, компенсувати всі різновиди обурень, в тому числі і випадкові обурення не можливо. Тому актуальним питанням є створення і дослідження самосинхронізуючих властивостей систем узгодженого електроприводу.

Враховуючи нелінійність електромагнітних процесів в системі електроприводу узгодженого обертання, що впливають на значення зрівняльного

струму (моменту), доцільно провести дослідження засобами імітаційного моделювання.

### 3.1. Математична та імітаційна моделі дослідження узгодженого обертання асинхронного електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням

Для проведення дослідження, розроблена імітаційна модель, яка враховує взаємопов'язані електромагнітні й електромеханічні процеси в системі електроприводу з АДФР з єдиним каналом струмообмеження в колі випрямленого струму їх роторів, та дозволяє встановити ефективний способи та алгоритми керування перетворювачем для отримання найкращих синхронізуючих властивостей АДФР при збереженні високого рівня ККД та коефіцієнту потужності електроприводу. Структурна схема імітаційної моделі(рис. 3.1) складається з підмоделей асинхронного двигуна, механічного пружного зв'язку, перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, інвертора керованого мережею та систем керування перетворювачем та інвертором. Імітаційна модель реалізована в структурі Simulink програмного комплексу MatLAB [51, 52, 54].

#### 3.1.1 Імітаційна реалізація математичної підмоделі асинхронного двигуна

Використання в електроприводі АДФР краново-металургійної серії, що мають відкритий або напіввідкритий паз і підвищений активний опір обмотки ротора, дозволяє знехтувати зміною параметрів двигуна і прийняти їх постійними.

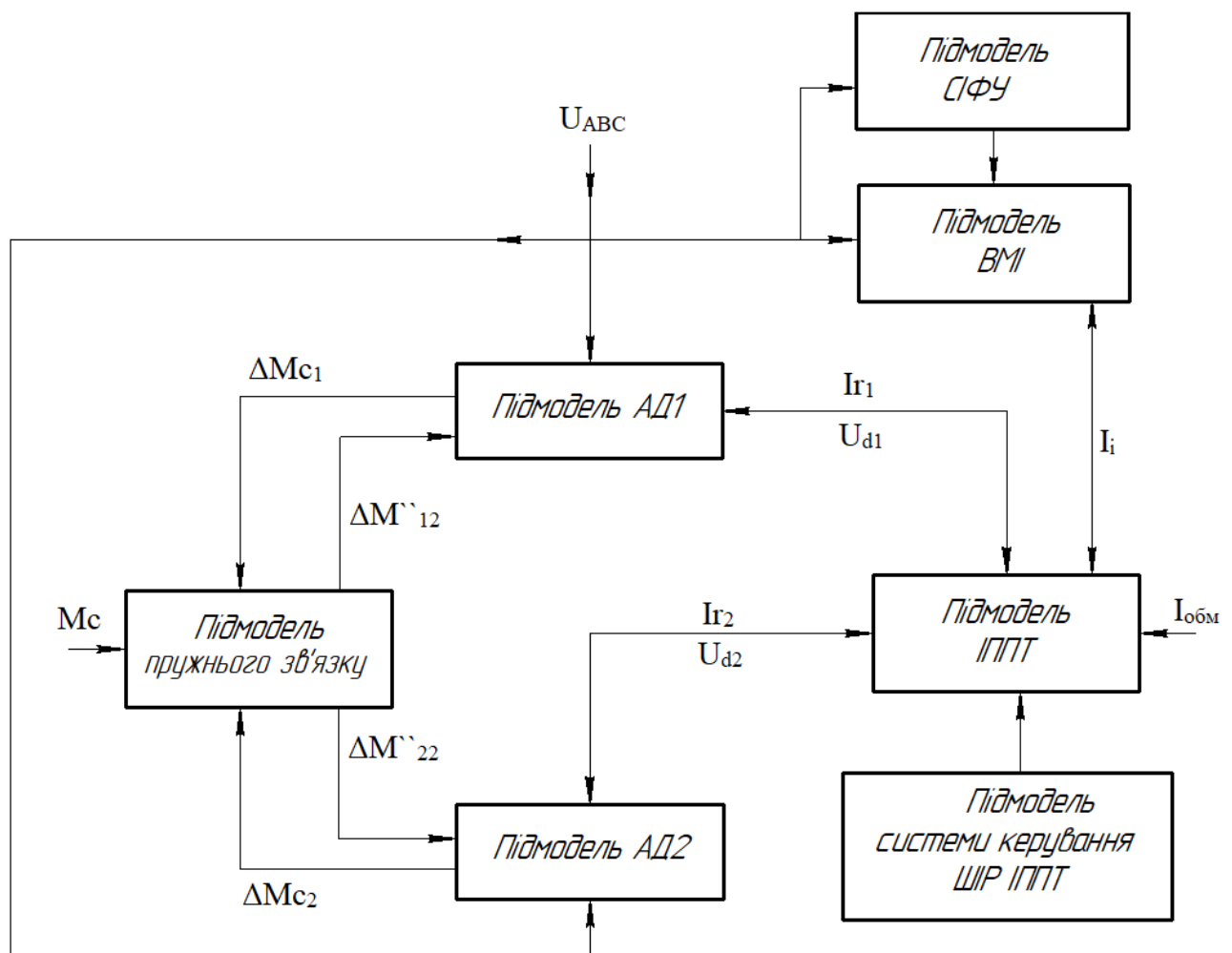


Рисунок 3.1 – Структурна схема імітаційної моделі електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів АДФР

Тому в даній роботі електромагнітна модель АДФР описується з урахуванням загальноприйнятих припущень [82-91]:

- повітряний зазор гладкий, без пазів на статорі і роторі, з обмотками у вигляді струмових шарів, що мають синусоїдальний розподіл МДС;
- АДФР має круговий магнітне поле в повітряному зазорі;
- параметри схеми заміщення приводних двигунів ідентичні;
- магнітна система не насичена, не містить нелінійні опори;

- параметри кола статора приведені до кола ротора;
- напруга мережі живлення має синусоїдальну форму.

Для більш точного врахування впливу зрівняльного струму між двома АДФР при нерівних статичних та динамічних моментах опору необхідно до математичної моделі АДФР доданий параметр активного опору в магнітному контурі.

Математична модель, що описується диференціальними рівняннями в двофазній системі координат  $\alpha, \beta$  з синхронною швидкістю обертання магнітного поля статора, має вигляд [50-52, 63, 90, 91]:

$$\frac{di_{\alpha s}}{dt} = \frac{\dot{L}_r \left[ \omega (L_s \cdot i_{\beta s} + L_m \dot{i}_{\beta r}) - U_{\alpha s}(t) + i_{\alpha s} (R_s + R_m) + R_m \dot{i}_{\alpha r} \right]}{L_m^2 - L_s \dot{L}_r} - \frac{L_m \left[ (L_m \dot{i}_{\beta s} + \dot{L}_r \dot{i}_{\beta r}) \cdot (\omega - \omega_r) - U_{\alpha r}(t) + R_r \dot{i}_{\alpha r} \right]}{L_m^2 - L_s \dot{L}_r}, \quad (3.1)$$

$$\frac{di_{\beta s}}{dt} = \frac{L_m \left[ U_{\alpha r}(t) \cdot (L_m \dot{i}_{\alpha s} + \dot{L}_r \dot{i}_{\beta r}) \cdot (\omega - \omega_r) - R_r \dot{i}_{\beta r} \right]}{L_m^2 - L_s \dot{L}_r} - \frac{\dot{L}_r \left[ U_{\beta s}(t) + \omega \cdot (L_s \dot{i}_{\alpha s} + L_m \dot{i}_{\beta r}) - i_{\beta s} (R_s + R_m) - R_m \dot{i}_{\beta r} \right]}{L_m^2 - L_s \dot{L}_r}; \quad (3.2)$$

$$\frac{d\dot{i}_{\alpha r}}{dt} = \frac{L_s \left[ (\dot{L}_r \dot{i}_{\alpha r} + L_m \dot{i}_{\beta r}) (\omega - \omega_r) - U_{\alpha r}(t) + R_r \dot{i}_{\alpha r} \right]}{L_m^2 - L_s \dot{L}_r}$$



$$\frac{L_m \left[ \omega \cdot (L_s i_{\beta s} + L_m \dot{i}_{\beta r}) - U_{\alpha s}(t) + i_{\alpha s} (R_s + R_m) + R_m \dot{i}_{\alpha r} \right]}{L_m^2 - L_s \dot{L}_r} \quad (3.3)$$

$$\frac{d\dot{i}_{\beta r}}{dt} = \frac{L_m \left[ (U_{\beta s}(t) + \omega \cdot (L_s i_{\beta s} + L_m \dot{i}_{\beta r})) - i_{\alpha s} (R_s + R_m) - R_m \dot{i}_{\alpha r} \right]}{L_m^2 - L_s \dot{L}_r} - \frac{L_m \cdot \left[ U_{\alpha r}(t) + (L_m i_{\alpha s} + \dot{L}_r i_{\beta r}) \cdot (\omega - \omega_r) - R_r \dot{i}_{\beta r} \right]}{L_m^2 - L_s \dot{L}_r} \quad (3.4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J} \left[ \frac{3}{2} p \left[ (L_s i_{\beta s} + L_m \dot{i}_{\beta r}) \cdot i_{\alpha s} - (L_s i_{\alpha s} + L_m \dot{i}_{\alpha r}) i_{\beta s} \right] - M_c \right] \quad (3.5)$$

де  $U_{\alpha s}$ ,  $U_{\beta s}$ ,  $i_{\alpha s}$ ,  $i_{\beta s}$  – відповідно напруга і струм обмотки статора по осях  $\alpha$ ,  $\beta$ ;

$U_{\alpha r}$ ,  $U_{\beta r}$ ,  $\dot{i}_{\alpha r}$ ,  $\dot{i}_{\beta r}$  – відповідно наведені напруги і струми по осях  $\alpha$ ,  $\beta$ ;

$R_s$ ,  $R_r$  – активний опір обмотки статора і наведене активну опору обмотки ротора;

$R_m$  - активний опір контуру намагнічування;

$L_s$ ,  $L_r$  – повна індуктивність обмотки статора, і наведена повна індуктивність обмотки ротора АДФР

$M_{\text{эм}}$ ,  $M_c$  – електромагнітний момент і момент опору;

$p$  – кількість пар полюсів;

$\omega_r$ ,  $\omega$  – відповідно частота обертання ротора і магнітного поля статора АД;

$J$  – момент інерції ротора.

Повна індуктивність обмотки статора, і наведена повна індуктивність обмотки ротора АДФР [82-85]:

$$L_s = l_s + L_m, \quad (3.6)$$

$$\hat{L}_r = \hat{l}_r + L_m. \quad (3.7)$$

де  $l_s$ ,  $\hat{l}_r$  - індуктивність обмотки статора і наведена індуктивність обмотки ротора;

$L_m$  - взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора;

Активні опору і індуктивності обмоток статора і ротора визначаються зі схеми заміщення АДФР (рис.3.2), згідно [51, 52, 82, 85].

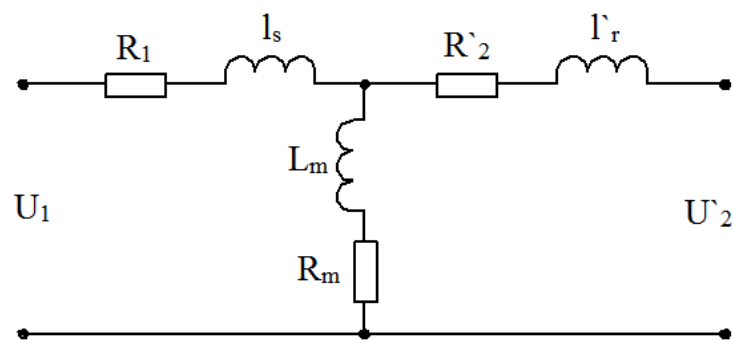


Рисунок 3.2 - Схема заміщення асинхронного двигуна з фазним ротором

Індуктивний опір контуру намагнічування знаходиться з наступної системи рівнянь, згідно [85, 89, 92]:

$$\left. \begin{aligned} I_{m0} &= \frac{U_s}{\sqrt{(R_s + R_m)^2 + \omega^2 L_s^2}} \\ \cos \psi_0 &= \frac{R_m + R_s}{\sqrt{(R_s + R_m)^2 + \omega^2 L_s^2}} \end{aligned} \right\}, \quad (3.8)$$

де  $I_{m0}$  - струм намагнічування в режимі холостого ходу;

$\cos \psi_0$  - коефіцієнт потужності холостого ходу АТ;

$U_s$  - фазна напруга статора.

Систему рівнянь (3.1) - (3.5) доцільно вирішувати методом Рунге-Кутта, який в порівнянні з іншими чисельними методами дозволить зменшити розрахунковий час моделювання при тій же точності розрахунку [54, 56].

Для перетворення трифазних струмів і напруги статора і ротора АДФР в двофазні і навпаки використовуються матриці перетворення Парка - Гурвіца ( $\Theta = 0$ ,  $\beta = \Theta - \Theta_r$ ) [30, 85, 90, 91]:

$$\begin{bmatrix} U_{\alpha s} \\ U_{\beta s} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cdot \cos \Theta & \cos \Theta_r + \sqrt{3} \cdot \sin \Theta \\ 2 \cdot \sin \Theta & \sin \Theta_r - \sqrt{3} \cdot \cos \Theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{abs} \\ U_{bcs} \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} U_{\alpha r} \\ U_{\beta r} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 \cdot \cos \beta & \cos \beta + \sqrt{3} \cdot \sin \beta \\ 2 \cdot \sin \beta & \sin \beta - \sqrt{3} \cdot \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{abr} \\ U_{bcr} \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta \\ -\cos \Theta + \sqrt{3} \cdot \sin \Theta & -\sqrt{3} \cdot \cos \Theta - \sin \Theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{ar} \\ \hat{i}_{br} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\cos \beta + \sqrt{3} \cdot \sin \beta & -\sqrt{3} \cdot \cos \beta - \sin \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{i}_{\alpha r} \\ \hat{i}_{\beta r} \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

$$i_{cs} = -i_{as} - i_{bs}, \quad (3.13)$$

$$\hat{i}_{cr} = -\hat{i}_{ar} - \hat{i}_{br}. \quad (3.14)$$

Математична модель (3.1)-(3.5) за допомогою функцій напруги  $U_{\alpha r}(t)$  і  $U_{\beta r}(t)$  описує електромагнітні процеси в АДФР, що викликані впливом комутацією силових ключів у єдиному каналі випрямлений струм ротора АДФР.

На рис. 3.3 приведена візуальна імітаційна модель АД, яка реалізована в структурі Simulink програмного комплексу MatLAB [51, 52, 54].

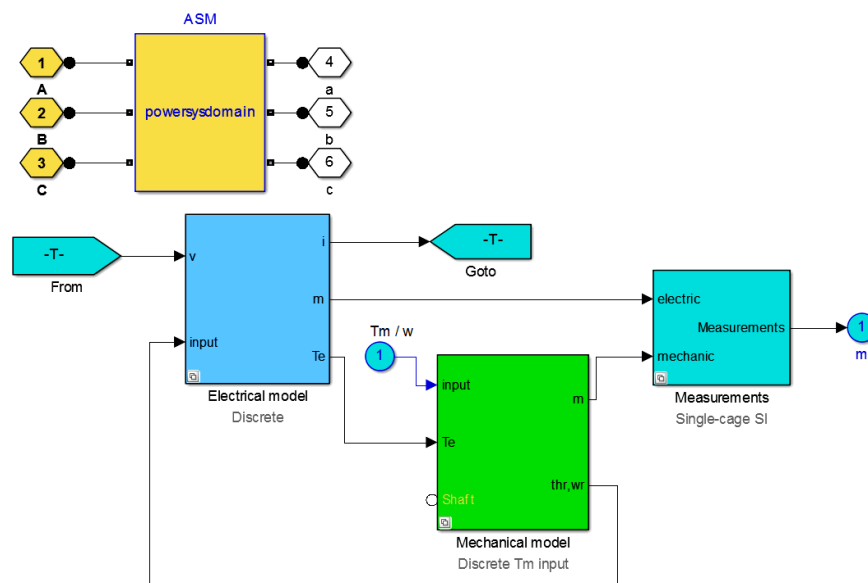


Рисунок 3.3 - Структурний блок математичної моделі АДФР

Візуальна імітаційна під модель АД включає блоки математичної електромагнітної моделі, виконаної за (3.1) - (3.4), (3.6) - (3.8), блоку математичної механічної моделі щодо визначення електромагнітного моменту з

врахуванням дії різних збурюючих моментів за (3.5), а також блоку матриці перетворення Парка – Гурвіца за (3.9)-(3.14).

### 3.1.2 Імітаційна реалізація математичної підмоделі механічного пружного зв'язку

У першій главі наведено результати аналізу двомасової, трьох та більш масових систем пружних зв'язків. Згідно [18, 29] для врахування дії елементів кінетичної ланки мостового крану без врахування коливання вантажу достатньо використовувати двомасову систему жорсткого зв'язку (рис. 3.4).

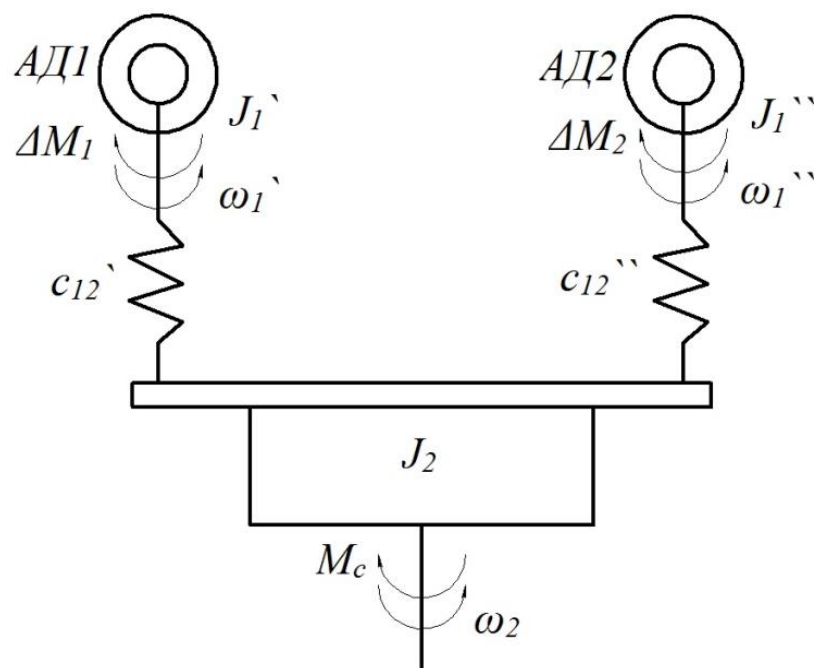


Рисунок 3.4 – Двомасова система пружного зв'язку валів АДФР з імпульсно-струмовим перетворювачем

Математична підмодель механічної одномасової системи жорсткого зв'язку валів роторів АД виглядає наступним чином [4, 12, 18, 21, 28]:

$$\left. \begin{aligned} M_{\partial_1} \dot{\ } - \Delta M_1 &= J_1 \dot{\ } \cdot \frac{d\omega_1 \dot{\ }}{dt} \\ M_{\partial_2} \dot{\ } - \Delta M_2 &= J_2 \frac{d\omega''}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Двомасова математична підмодель системи електроприводи з АДФР і урахуванням пружних зв'язків має вигляд [4, 12, 18, 21, 28]:

$$M_{12} \ddot{\ } - \Delta M_2 = J_1 \ddot{\ } \cdot \frac{d\omega_1 \ddot{\ }}{dt} \quad , \quad (3.16)$$

$$M_{12}'' + \Delta M_1 - J_1 \frac{d\omega'}{dt} \quad (3.17)$$

$$M_{12} \dot{\ } + M_{12} \ddot{\ } - M_c = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} \quad (3.18)$$

$$M_{12} \dot{\ } = k \cdot c_{12} \dot{\ } \cdot (\varphi_1 \dot{\ } - \varphi_2) \quad (3.19)$$

$$M_{12} \ddot{\ } = (2 - k) \cdot c_{12} \ddot{\ } \cdot (\varphi_1 \ddot{\ } - \varphi_2) \quad (3.20)$$

$$M_c = \frac{M_1 + M_2}{2} \quad (3.21)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_1 &= M_1 - M_c \\ \Delta M_2 &= M_2 - M_c \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

де  $k_1$  - коефіцієнт, що характеризує положення візка мостового крану;

$c_{12} \dot{\ } , c_{12} \ddot{\ }$  - коефіцієнти пружності валопроводів;

$M_{12} \dot{\ } , M_{12} \ddot{\ }$  - пружні моменти в валопроводах;

$J_1^{\prime}$ ,  $J_1^{\prime\prime}$ ,  $J_2$  - приведені моменти інерції валопроводів ( відповідно першого АДФР, другого АДФР, кран-балки);

$M_C$  - статичний момент опору;

$\varphi_1^{\prime}$ ,  $\varphi_1^{\prime\prime}$ ,  $\varphi_2$  - кути повороту валів двигунів та робочого органу механізму.

Використовуючи рівняння (3.15)-(3.22) блок математичної підмоделі імітаційної реалізації двомасової системи пружного зв'язку двох роторів АДФР (рис. 3.5), реалізована у системі програмного засобу MatLAB у середовищі Simulink [51, 52, 54].

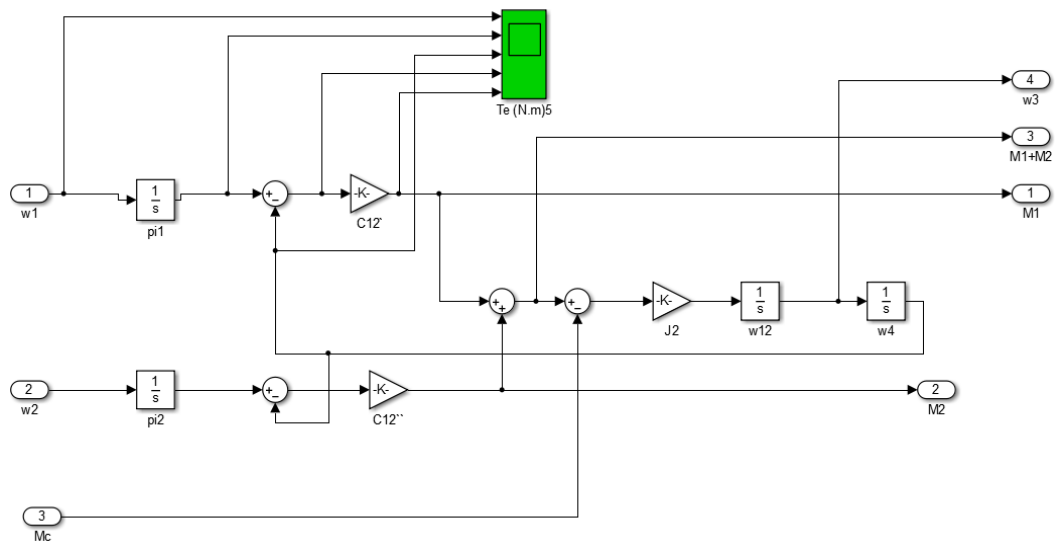


Рисунок 3.5. – Блок математичної підмоделі імітаційної реалізації двомасової системи пружного зв'язку валів АДФР з імпульсно-струмовим перетворювачем

### 3.1.3. Імітаційна реалізація моделі перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично-пов'язаних роторних випрямлячів

Імітаційна підмодель перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів виконана згідно рис.2.1. і

представлена на рис.3.6. Імітаційна підмодель перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів включає в себе:

- блоків некерованих випрямлячів, кожен з яких виконаний у вигляді трифазного діодного мосту за схемою Ларіонова. Анодні і катодні групи випрямлячів підключені паралельно [61, 64];

- силового ключа у вигляді IGBT транзистора, який колекторним виходом підключений до анодної групи випрямлячів, а емітерний – катодної групи. Силовий ключ шунтується зворотним діодом для виключення протікання зворотного струму через нього;

- діоду, який підключено катодом до анодної групі випрямляча і колекторного виводу силового ключа, що забезпечує захист від протікання зворотного струму до силового ключа;

- конденсатора С, що забезпечує накопичення та скидання в мережу енергії в обмотках роторів АДФР в процесі комутації силового ключа. Конденсатор паралельно підключений до анода діода і катодної групи випрямлячів.

- згладжувального дроселя інвертора забезпечує згладжування випрямленого імпульсного струму, а також безперервну рекуперацію енергії ковзання роторів АДФР і енергії, яка накопичена на конденсаторі в процесі комутації силового ключа;

- підмоделі керованого мережею інвертора, представленого у вигляді трифазного тиристорного мосту. Замість трифазного тиристорного моста при моделюванні доцільно б було використовувати транзисторних міст на IGBT модулях (як в АІН), але це не дозволило б повною мірою оцінити надійність роботи ІППН при інвертуванні енергії ковзання ротора до мережі.

- узгоджувальних (мережевих) реакторів.

До виводів реакторів пофазно введені джерела синусоїдальної ЕРС промислової частотою  $f_c = 50$  Гц з необмеженою потужністю.

Синхронізація ЕРС інвертора з ЕРС мережею виконується за допомогою блоку системи імпульсно-фазового керування СІФК при постійному



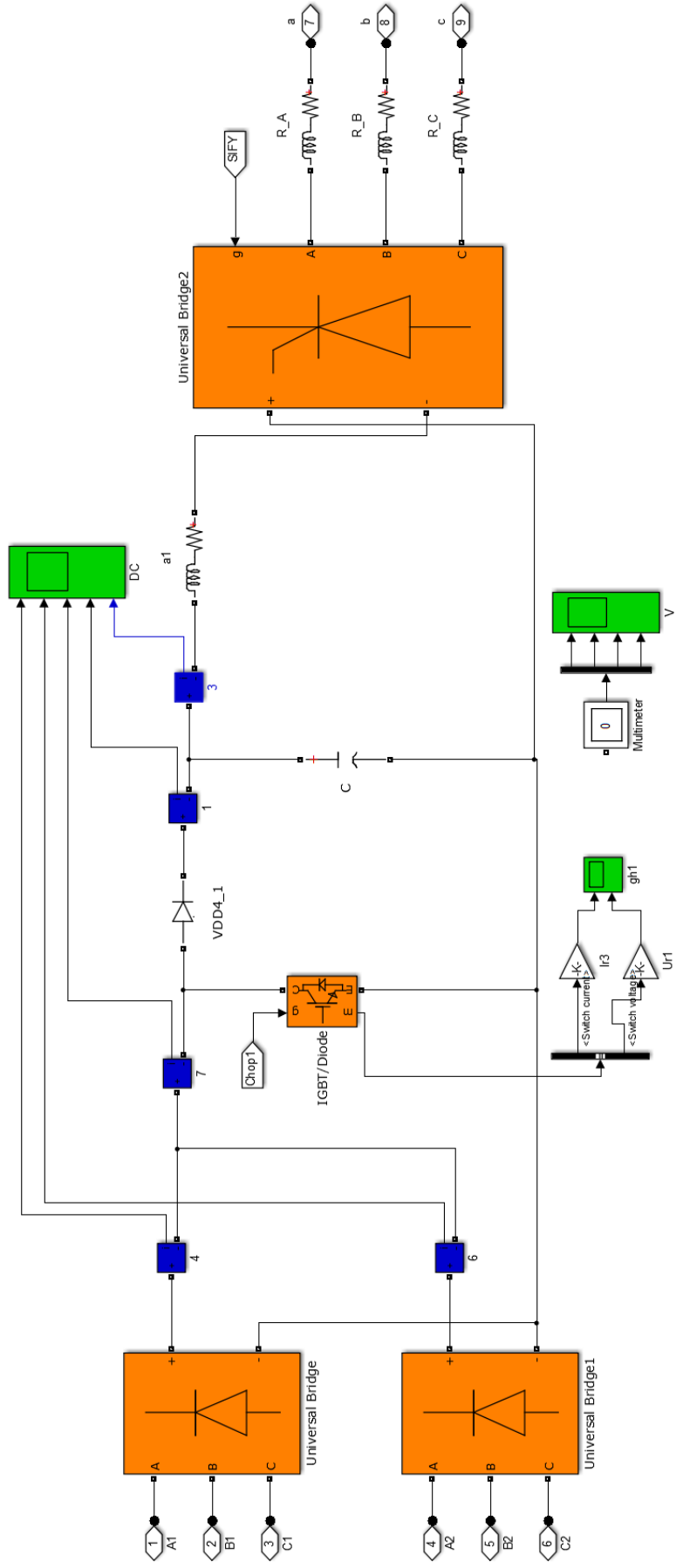


Рисунок 3.6 – Імітаційна підмодель перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов’язаних роторних випрямлячів

мінімальному куті інвертування  $\beta = 30$  ел. град. Моделювання роботи силового ключа (К) і вентилів випрямної і інверторної груп виконано при допущенні, що їх включення і відключення відбувається миттєво. Опір відкритого ключа дорівнює нулю, при закритому ключі – нескінченності [93].

Також розглянуто варіант схеми перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів з двома силовими ключами (рис. 3.7). Наведене схемне рішення перетворювача відрізняється від схемного рішення за рис. 3.6 тим, що містить два силових ключі. Перший силовий ключ приєднано до першого випрямного мосту, другий – до другого випрямного мосту. До кожних паралельно з'єднаних анодних груп випрямлячів приєднані катоди зворотних діодів для незалежного обмеження зворотного струму через них. Дане схемне рішення дозволяє забезпечити незалежне регулювання частоти обертання ротора АДФР.

Подальше дослідження синхронізуючих властивостей електроприводу проводилось на імітаційних моделях в режимах пуску, гальмування противключенням з обмеженням сумарного випрямленого струму роторів за наступними алгоритмами керування:

- переривання роботи одночасно працюючих силових ключів по середній швидкості обертання роторів АДФР;
- переривання роботи одночасно працюючих силових ключів по мінімальній швидкості обертання одного з роторів АДФР;
- переривання роботи одночасно працюючих силових ключів, що працюють з модуляцією керуючого сигналу з фіксованою частотою;
- переривання роботи ключа з обмеженням сумарного випрямленого струму ротора в межах заданих пульсацій (широтно-імпульсна модуляція зі змінною щільністю керуючого сигналу);
- роздільна робота ключів і переривання їх при заданій частоті обертання з постійною частотою модуляції;

При всіх алгоритмах роботи в зоні робочих ковзань, коли ЕРС ротора не може розвинути заданий сумарний струм, силовий ключ за схемою рис. 3.6 та

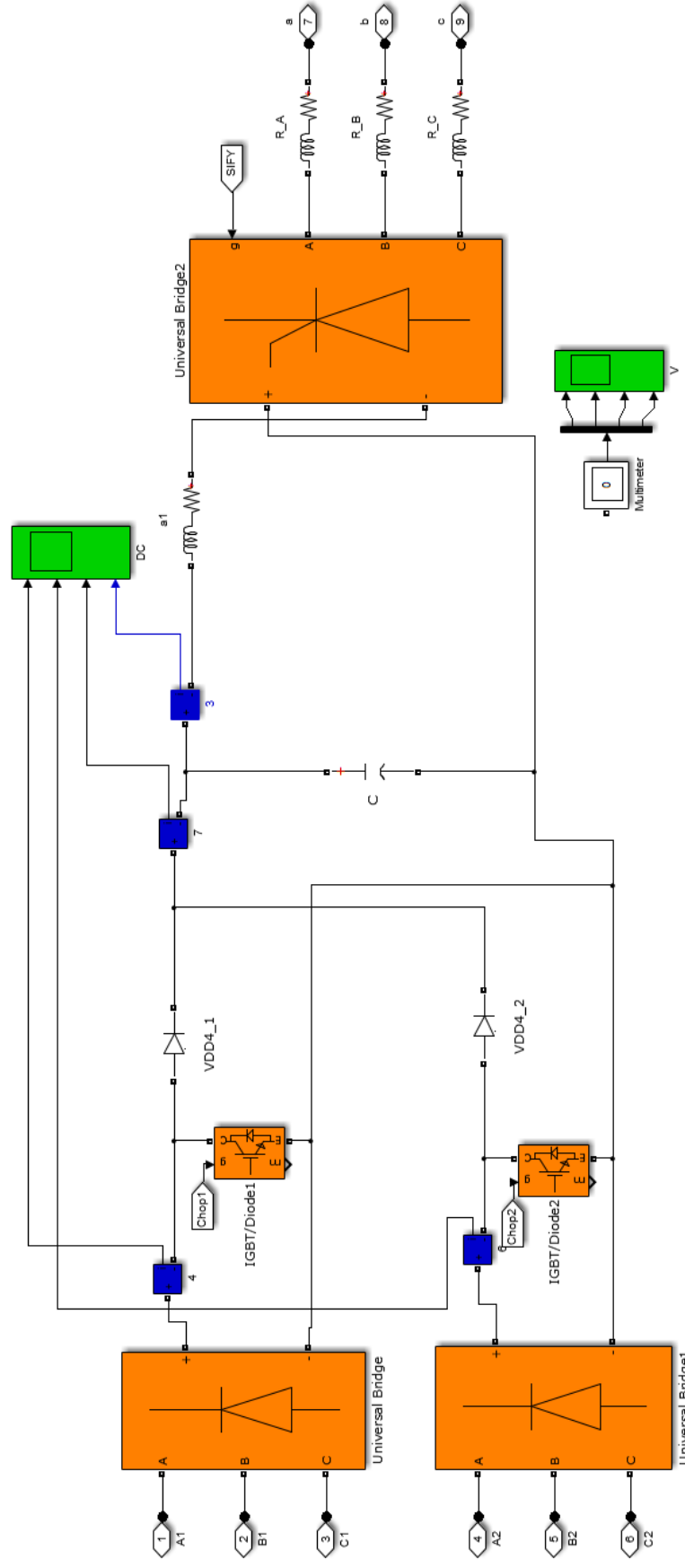


Рисунок 3.7. – Імітаційна підмодель перетворювача з роздільним імпульсно-струмовим керуванням в єдиному колі ротора

рис.3.7 закорочує випрямляч. В цьому випадку система електроприводу працює в режимі самосинхронізації на природній характеристиці АДФР.

3.1.4. Реалізація алгоритмів керування перетворювачем для узгодження частоти обертання асинхронного електроприводу

Регулювання частоти обертання роторів АД виконується комутацією силового ключа з постійною частотою  $f_k$  при змінному значенні цільності керуючого сигналу  $\gamma$ . Тому розглянемо різні способи узгодження частоти обертання двох АДФР, при яких найбільш виражений ефект синхронізації.

Спосіб обмеження сумарного струму роторів АДФР значенням струму уставки без використання широтно-імпульсного регулювання (ШІР) під час пуску. Реалізація блоку регулювання для імітаційної моделі наведена на рис. 3.8. Керування двох АДФР в динамічному режимі роботи досягається обмеження сумарного випрямленого струму роторів АДФР завдяки постійній комутації силового ключа. Для цього на силовий ключ подається сигнал з обмежувача сумарного струму у вигляді прямокутних імпульсів (на рис.2.1 не відображено).

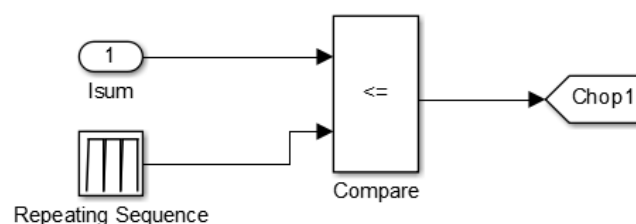


Рисунок 3.8 - Обмеження сумарного струму роторів АДФР без ШІР

Вхідний сигнал обмежувача струму надходить від датчика струму. Для узгодженого обертання роторів АДФР в процесі їх розгону, обмежувачем струму задається прямолінійна функція у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} I_{d\_уст}(t) &= A \cdot t \\ I_{d\_уст}(t) &\leq I_{d\_ном} \end{aligned} \right\}, \quad (3.23)$$

де  $I_{d\_уст}$  - уставка по струму;

$I_{d\_ном}$  - сумарне значення випрямленого струму роторів АДФР;

$t$  - час;

$A$  - коефіцієнт, який характеризує швидкість зміни струму від 0 до  $I_{d\_ном}$ , та

задає час розгону двигунів.

Коли струм в колі роторів стає більше значення уставки по струму обмежувача, силовий ключ розмикається. В момент розмикання силового ключа, накопичена енергія в обмотках роторів АДФР, через зворотній діод заряджає конденсатор  $C_{\phi}$ , а енергія ковзання роторів АДФР через згладжуваний  $L_{\phi}$ , інвертор керованого мережею та мережевий реактор повертається у мережу електропостачання. Коли струм в колі менше значення уставки по струму обмежувача, силовий ключ замикається. В момент замикання силового ключа, енергія, яка накопичена на конденсаторі  $C_{\phi}$ , через дросель  $L_{\phi}$ , інвертор керованого мережею та мережевий реактор повертається до мережі електропостачання. Таким чином на силовий ключ подаються керуючі імпульси з різним значенням щільності та частоти імпульсів, які залежать від постійної часу ротора і уставки струму обмежувача. У схемі наявність зворотного діоду запобігає появі струму в зворотному напрямку від конденсатора  $C_{\phi}$  до силового ключа. Завдяки дроселю  $L_{\phi}$ , який згладжує струм від конденсатора  $C_{\phi}$ , та некерованих мостових випрямлячів В1 та В2 процес інвертування енергії триває не залежно від моменту часу замикання чи розмикання самого силового ключа.

Блок-схема імітаційної моделі реалізації обмеження сумарного струму роторів АДФР значенням струму уставки з використанням ШПР при пуску наведено на рис. 3.9. Візуальна реалізації блоку ШПР приведена на рис. 3.10.

Способи обмеження сумарного струму роторів при запуску АДФР значенням струму уставки з використанням і без використання ШПР не вимагає наявності датчиків частоти обертання АДФР. Для реалізації наведених способів достатня наявність датчику сумарного струму роторів АДФР.

При пуску АДФР, а також під час регулювання їх частот обертання може бути реалізовано алгоритм "обмеження за мінімальною частотою обертання". Він забезпечує обмеження швидкості того АДФР, швидкість якого вище, в порівнянні з другим АДФР. Реалізація даного способу регулювання для імітаційного моделювання наведена на рис.3.11. Цей спосіб передбачає "підтримування" мінімальної частоти обертання одного з двох АДФР. При цьому "підтримувана" швидкість задається системою регулювання в залежності від часу розгону АДФР. Зазвичай на практиці, особливо для частотного регулювання уставка за часом розгону не перевищує 2-3с.

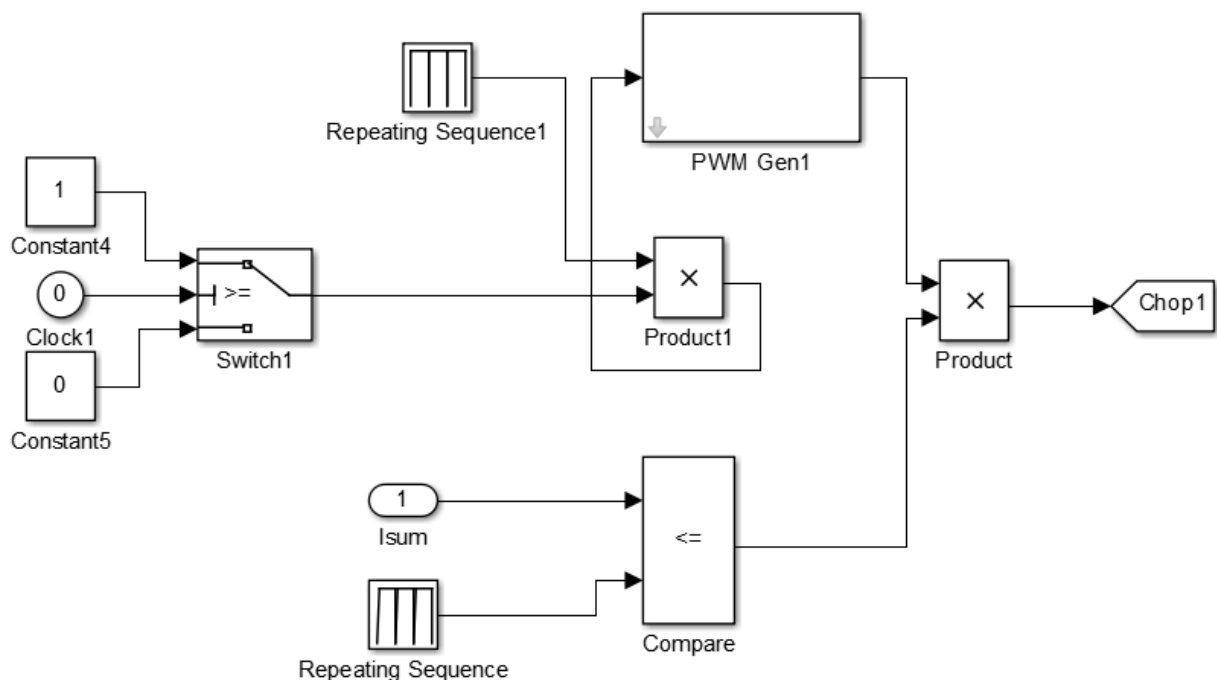


Рисунок 3.9 - Блок імітаційної моделі обмеження за сумарним струмом роторів АДФР з використанням ШПР

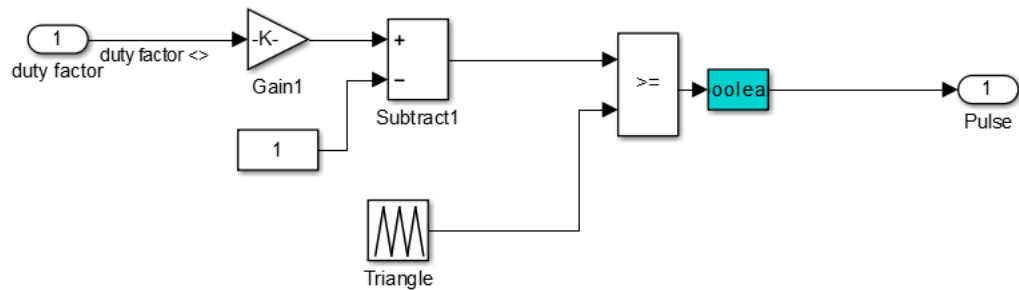


Рисунок 3.10 - Візуальна математична модель ШІР

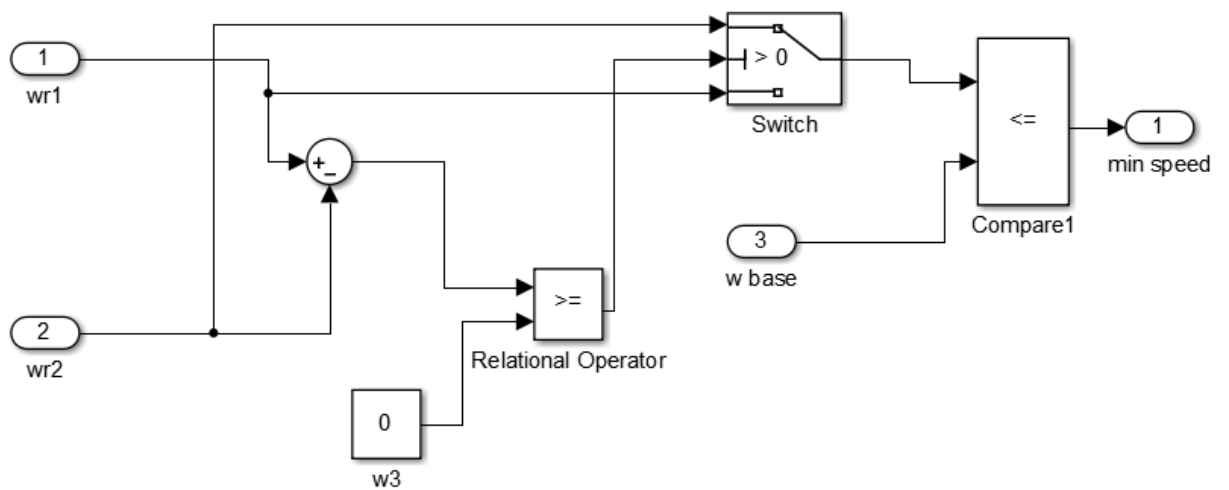


Рисунок 3.11 - Блок-схема імітаційної моделі реалізації алгоритму "обмеження за мінімальною частотою обертання" роторів АДФР

Спосіб "обмеження за мінімальною частотою обертання", згідно з рис. 3.11 описується наступною системою рівняння:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{base} = b \cdot t \\ \gamma = 1, \text{if } \omega_{base} \geq \omega_{min} \\ \gamma = 0, \text{if } \omega_{base} < \omega_{min} \\ \omega_1 = \omega_{min}, \text{if } \omega_1 - \omega_2 < 0 \\ \omega_2 = \omega_{min}, \text{if } \omega_1 - \omega_2 \geq 0 \end{array} \right. , \quad (3.24)$$

де  $\omega_1, \omega_2$  - кутова швидкість відповідного першого та другого АДФР;

$b$  - коефіцієнт, який характеризує інтенсивність зміни заданої швидкості розгону АДФР;

$t$  - дискретна величина часу, с;

Алгоритм "обмеження за мінімальною частотою обертання" реалізується разом з ШІР, який використовується в період пуску приводу.

Наступний алгоритм "обмеження за середньою швидкістю" забезпечує обмеження швидкості двох АДФР щодо середньої заданої швидкості, яку задає система керування. Блок-схема імітаційної моделі представлена на рис. (3.12).

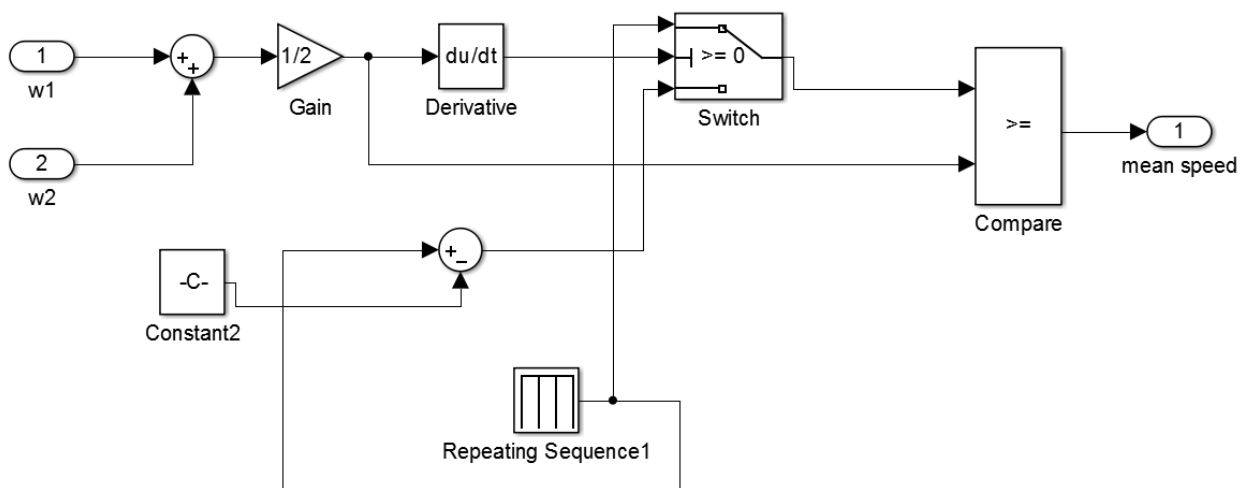


Рисунок 3.12 - Блок-схема імітаційної моделі реалізації алгоритму "обмеження за середньою швидкістю" роторів АДФР



Для реалізації даного алгоритму керування (рис. 3.12) використовуються наступні умови:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{base} = b \cdot t \\ \omega_{mean} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \\ \gamma = 1, \text{ if } \omega_{base} < \omega_{mean}, \frac{d\omega_{mean}}{dt} \geq 0 \\ \gamma = 1, \text{ if } \omega_{base} + \omega_{\Delta} < \omega_{mean}, \frac{d\omega_{mean}}{dt} < 0 \\ \gamma = 0, \text{ if } \omega_{base} \geq \omega_{mean}, \frac{d\omega_{mean}}{dt} \geq 0 \\ \gamma = 0, \text{ if } \omega_{base} + \omega_{\Delta} \geq \omega_{mean}, \frac{d\omega_{mean}}{dt} < 0 \end{array} \right. \quad (3.25)$$

$\omega_{\Delta}$  - допустима уставка по неузгодженості частот обертання роторів АДФР.

Всі розглянуті алгоритми керування реалізуються з ШПР, які використовуються при пуску АДФР. Для наведених способів регулювання частот обертання двох АДФР, крім способу з обмеженням за сумарним струмом ротора, потрібні датчики частоти обертання АДФР. Замість датчиків частоти обертання можуть бути використані датчики частоти або ЕРС ротора [94].

Для виконання схеми перетворювача з роздільним імпульсно-струмовим керуванням в єдиному колі ротора з двома силовими ключами можуть бути реалізовані всі розглянуті способи регулювання частотою обертання АДФР. Крім цих способів, також можливий спосіб регулювання частотою обертання АДФР за принципом "ведучий-відомий". Для даного способу перший двигун задає темп і швидкість розгону, другий, за допомогою роздільної системи керування, за швидкістю підлаштовується під нього.

### 3.1.5 Реалізація імітаційної підмоделі інвертора керованого мережею

Для забезпечення ефективної роботи інвертора керованого мережею на нього подаються керуючі сигнали у вигляді прямокутних імпульсів від пристрою системи імпульсно-фазового керування (СІФК).

На рис. 3.13. наведена загальна функціональна схема трьохканальної синхронної СІФК. Система імпульсно-фазового керування містить:

- пристрій синхронізації (ПС1-ПС3);
- генератори опорних напруг (ГОН1-ГОН3);
- компаратор (К1-К3); блок обмеження кутів керування (БОК);
- формувачі імпульсів керування силовим тиристорами (ФІ1-ФІ3);
- розподільник (РІ) та підсилювачі потужності (ПП) імпульсів керування [95-99].

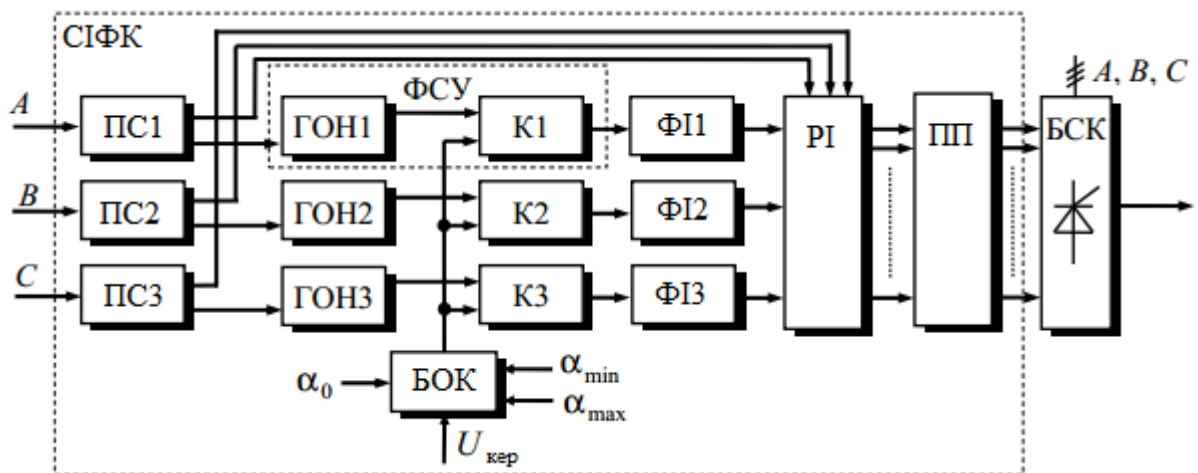


Рисунок 3.13 - Загальна функціональна схема трьохканальної синхронної СІФК

На рис. 3.14 зображена імітаційна реалізація математичної моделі системи імпульсно-фазового керування СІФК. Математична модель системи імпульсно-фазового керування СІФК реалізована згідно [100-110].

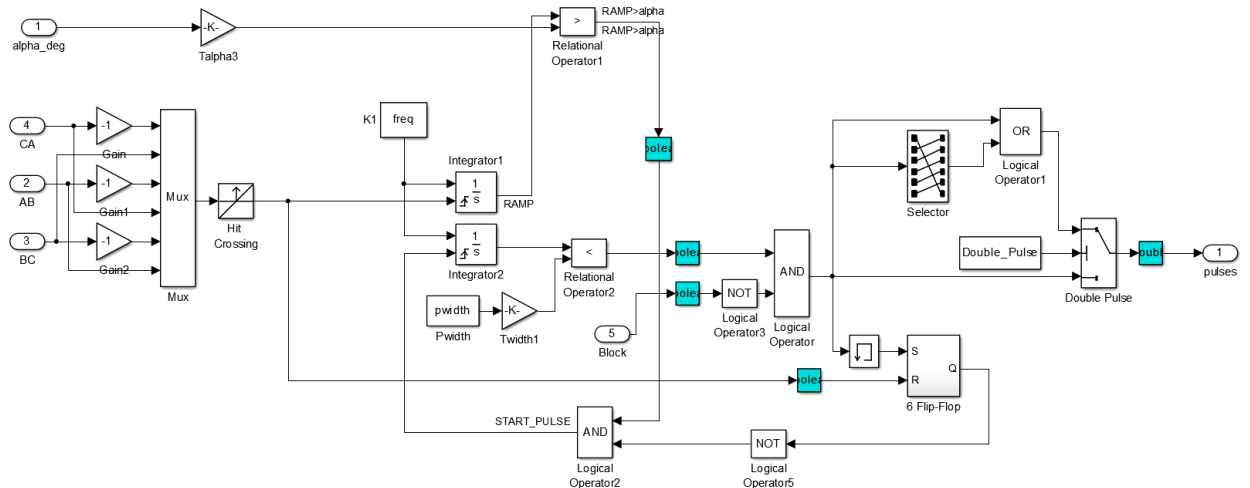


Рисунок 3.14 - Блок імітаційної реалізації математичної моделі системи керування СІФК

Таким чином розроблена комплексна математична модель перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, яка дозволяє врахувати особливості протікання електромагнітних, енергетичних та електромеханічних процесів в асинхронному електроприводі узгодженого обертання АДФР.

### 3.2 Дослідження ефективності алгоритмів керування електроприводу узгодженого обертання

Для врахування впливу моментів пружних зв'язків мостових кранів для дослідження системи електроприводу узгодженого обертання з єдиним каналом керування в колі випрямленого струму ротора АДФР, при врахуванні збурюючих моментів, можна використати наступне співвідношення:

$$M = M_{cp} + \Delta M \cdot \sin \omega_b t, \quad (3.26)$$

$$M_{cp} = \frac{M_1 + M_2}{2}, \quad (3.27)$$

$$\omega_g = 2\pi \cdot f_g, \quad (3.28)$$

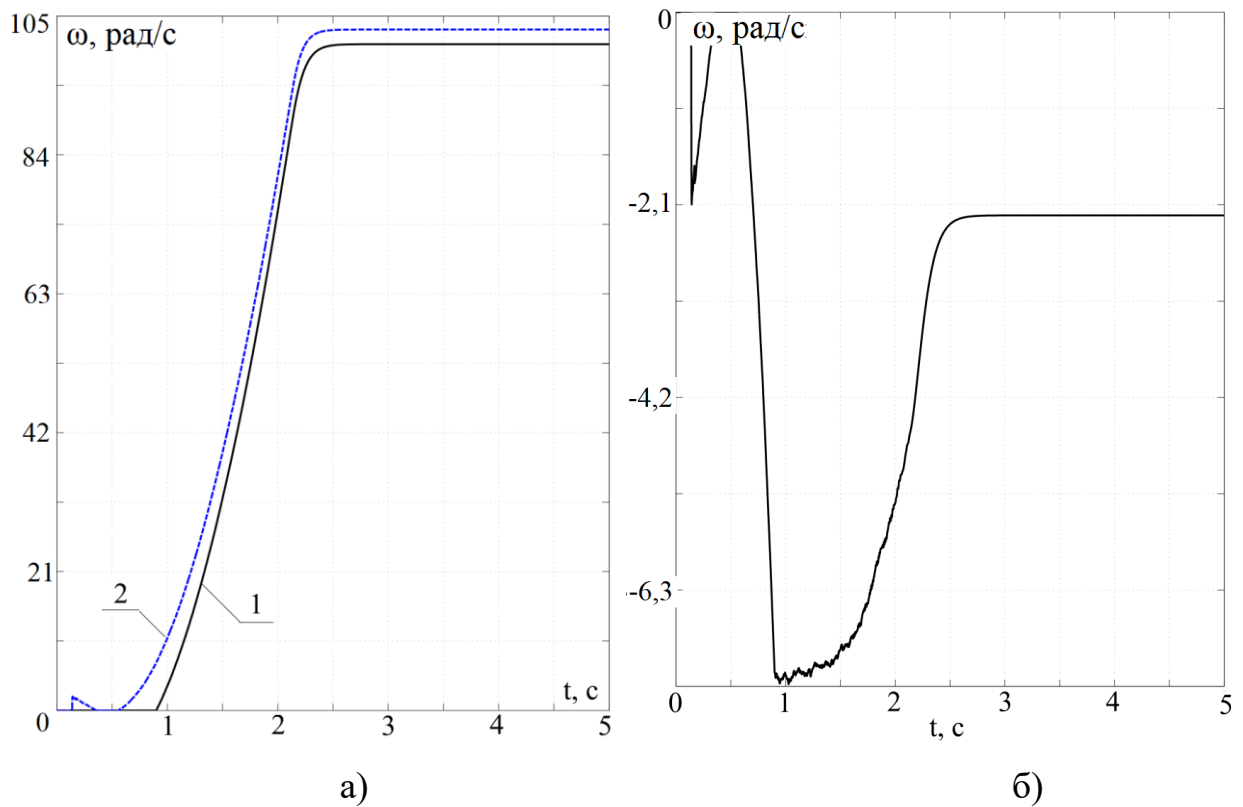
де  $M_{cp}$  - середнє значення статичних моментів двигунів;

$\Delta M$  - амплітуда моменту пружного зв'язку;

$f_g$  – частота впливу моменту пружного зв'язку.

При частоті  $f_g = 0$  рівняння (3.26) описує різницю прикладених статичних моментів, які, як зазначалося раніше, становить  $0,4 \div 0,8 M_n$ , в залежності від положення візка без вантажу і з вантажем відповідно.

На рис 3.14 представлена осцилограма пуску двигуна типу МТН-111-6 з моментом  $M_1 = 0,4 M_n$ ,  $M_2 = 0,8 M_n$  при моменті інерції рівному моменту інерції самого двигуна  $GD^2 = GD_{og}^2$ , з алгоритмом керування "обмеження за середньою швидкістю" роторів АДФР. В момент пуску електроприводу має місце ривок розбіжності по швидкості двох АДФР, що визвано різницею дії статичних моментів, що приводить до того, що час початку рушення настає для того АДФР, який має менший момент на валу (рис. 3.15, а, крива 2). При досягненні часу, коли струм у колі ротора АДФР с більшим статичним моментом забезпечує розвинення більшого за його значенням електромагнітного моменту, настає час рушення цього АДФР (рис. 3.15, а, крива 1). В цей час струм АДФР з меншим статичним моментом досягає значення уставки обмеження за струмом, завдяки чого виконується обмеження його швидкості, що призводить до зникнення неузгодженості за швидкостями двох АДФР  $\Delta\omega = 0$  (рис. 3.15, б). По завершенню аперіодичних електромагнітних процесів двох АДФР, коли струми роторів першого та другого АДФР досягають свої робочих значень (рис. 3.16), настає

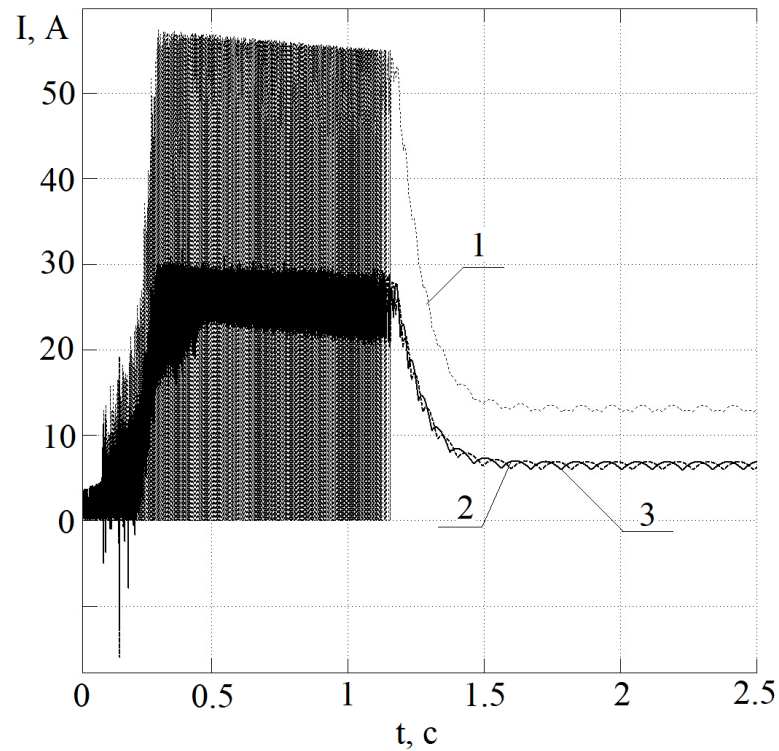


а) швидкість першого (1) при  $M_1 = 0,4 M_H$ , і другого (2) при  $M_1 = 0,8 M_H$  двигунів;

б) неузгодженість швидкостей першого (1) і другого (2) двигунів.

Рисунок 3.15 - Осцилограми швидкостей розгону двигунів МТН-111-6 при статичних моментах  $M_1 = 0,4 M_H$ ,  $M_2 = 0,8 M_H$  при реалізації алгоритму

"обмеження за середньою швидкістю"



1 – струм силового ключа, А;

2 – випрямлений струм першого АДФР ( $M_1=0,4 M_H$ )

3 – випрямлений струм другого АДФР ( $M_1=0,8 M_H$ )

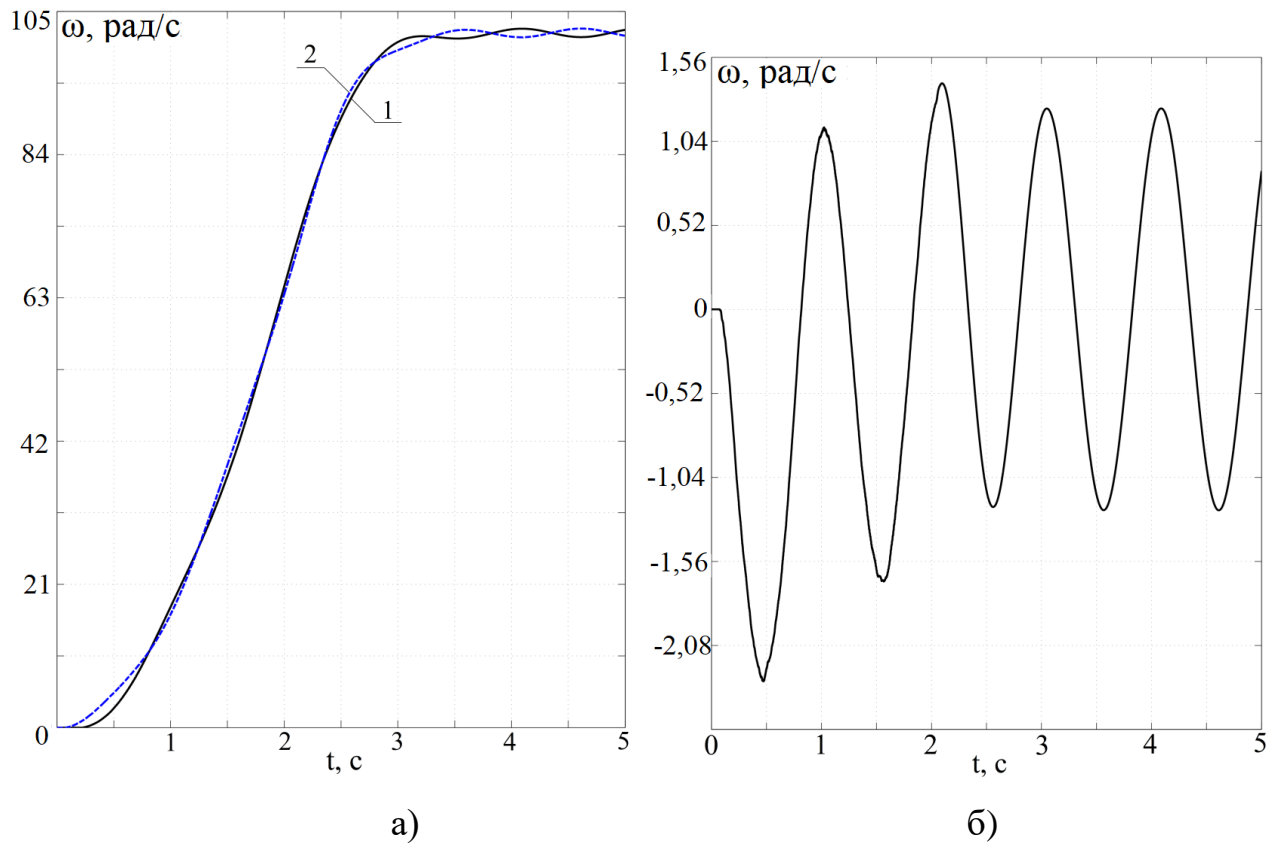
Рисунок 3.16 - Осцилограма струмів двох двигунів МТН-111-6 при статичних моментах  $M_1=0,4 M_H$ ,  $M_2=0,8 M_H$  при реалізації алгоритму

"обмеження за середньою швидкістю"

стрімке розвинення швидкостей АДФР. В цей час починає працювати алгоритм роботи силового ключа "обмеження за середньою швидкістю". За рахунок різного значення постійного часу перехідних процесів АДФР з різними статичними моментами та інерційності системи керування силового ключа в єдиному колі випрямленого струму роторів АДФР за алгоритмом "обмеження за середньою швидкістю", та системи струмообмеження сумарного струму, має місце ефект "мертвого часу". Це призводить до некерованого зростання неузгодженості за швидкостями двох АДФР до максимального значення  $|\Delta\omega|=7,01$  рад/с. (рис. 3.15, б).

По завершенню періоду дії ефекту "мертвого часу" система керування за алгоритмом "обмеження за середньою швидкістю" забезпечує синхронізуючий вплив між двома АДФР, що забезпечується постійним стрімким зменшення неузгодженості обертання роторів до моменту часу, коли АДФР виходять на природні свої характеристики. (3.15, б). Причому швидкість зменшення неузгодженості під впливом системи керування за алгоритмом "обмеження за середньою швидкістю" досягає швидкості при некерованому наростанні неузгодженості обертів АДФР. При застосуванні інших алгоритмів керування силовим ключем в єдиному колі випрямленого струму перетворювача, особливості отримання початкової неузгодженості за швидкостями та при виході АДФР на природню характеристику є однаковими, окрім значень максимальної неузгодженості швидкостей на етапі розгону АДФР.

За результатами даних моделювання отримані результати неузгодженості швидкостей обертання АДФР типу МТН-111-6 при регулюванні в єдиному колі випрямленого струму їх роторів, при моменті інерції  $GD^2 = GD_{\partial e}^2$ , з алгоритмом керування "обмеження за середньою швидкістю" (рис. 3.17), при дії динамічних збуджуючих моментів, що зміниться за законом  $M_C = M_H \cdot (0,6 + 0,2 \sin \omega_e)$  з частотою збуджуючих моментів  $f_e = 6$  Гц. В момент пуску АДФР з імпульсно-струмовим обмеженням, коли перший двигун з меншим навантаженням почав рухатись, а інший ще ні, досягається неузгодженість за швидкостями за тією ж



а) швидкість першого (1) і другого (2) двигунів при  $M_c = M_H \cdot (0,6 + 0,2 \sin \omega_e)$ ;

б) неузгодженість швидкостей першого (1) і другого (2) двигунів при

$$M_c = M_H \cdot (0,6 + 0,2 \sin \omega_e).$$

Рисунок 3.17 - Осцилограми пуску двигунів типу МТН-111-6 при дії динамічних збурюючих моментів

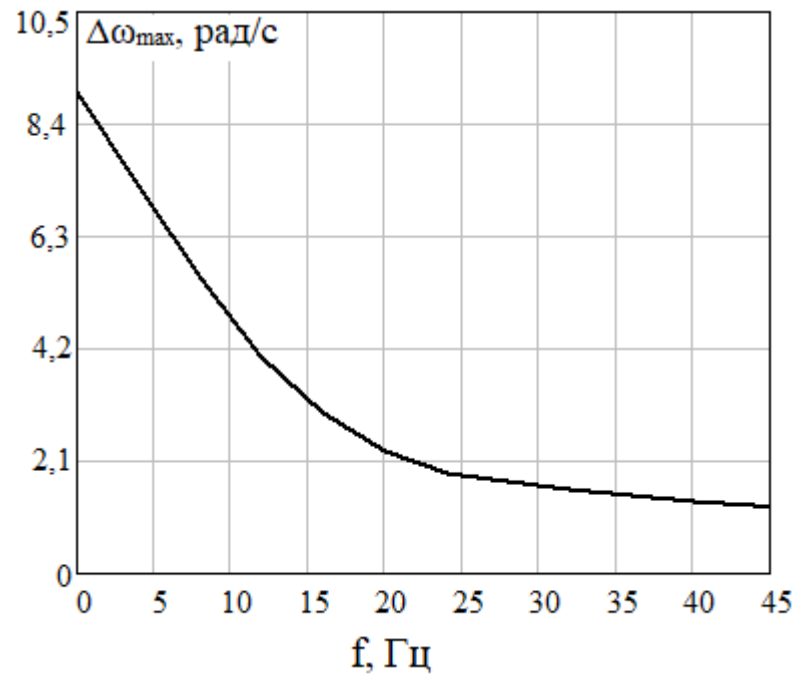


величиною  $\Delta\omega=2,1$  рад/с, що і при навантаженні двох АДФР статичним моментом ( рис. 3.15, б; рис. 3.17, б). При подальшому розвиненні швидкостей двох АДФР неузгодженість за швидкість АДФР має періодичний характер. При цьому в період розгону  $\Delta\omega=2,77$  рад/с, а при досягненні природньої характеристики -  $\Delta\omega=2,5$  рад/с. Як свідчать результати дослідження, при виникненні динамічних збурюючих моментів для АДФР з імпульсно-струмовим обмеженням в єдиному колі випрямленого струму ротора має кращі узгоджувальні за швидкістю властивості ніж при дії статичних моментів навантаження АДФР.

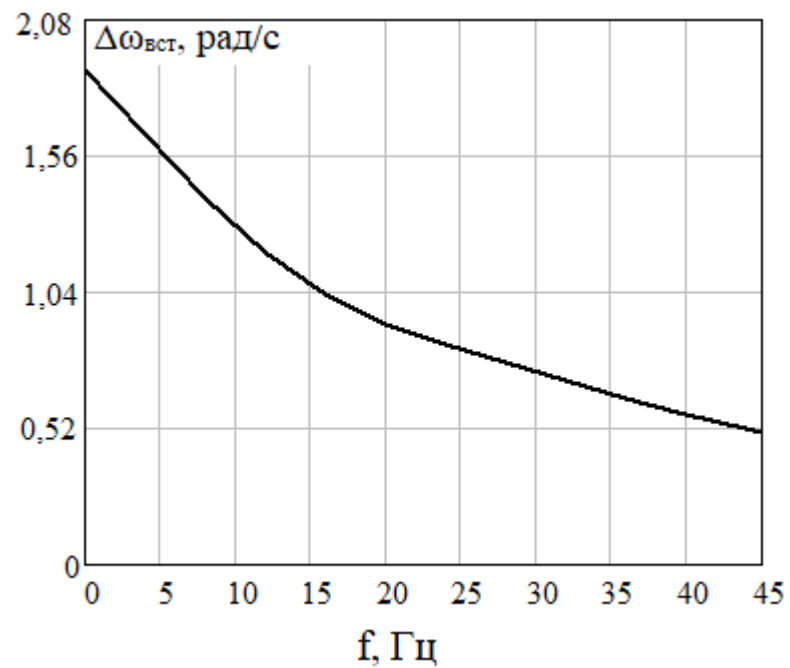
За результатами даних моделювання отримані результати неузгодженості швидкостей обертання  $\Delta\omega$ , різниці моментів  $\Delta M$  та зрівняльного струму  $I_{зр}$  між АДФР при різних значеннях частоти збурюючих моментів  $f_g$  ( табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Мінімальні, максимальні та сталі значення  $\Delta\omega$ ,  $\Delta M$ , та  $I_{зр}$  при різних значеннях частоти збурюючих моментів

Параметри		f, Гц				
		0	1,5	6	24	48
$\Delta\omega$ , рад/с	max	7,33	6,7	-2,26	-0,15	+0,78
	min	-	-	+3,14	+1,3	-1,04
	стале	2,2	2,09	1,26	0,74	0,58
$\Delta M$ , (Н·м)	max	+25	+19	+17	17,5	+17,1
	min	-55	-85	-27	10	-15
	стале	-11	-11	-9,2	5,0	2,6
$I_{зр}$ , А		4,1	4,8	4,2	2,0	1,8



а)



б)

а) залежність максимального значення  $\Delta\omega$  від  $f_{\text{в}}$ ;б) залежність сталого значення  $\Delta\omega$  від  $f_{\text{в}}$ ;

Рисунок 3.18 – Залежності значень неузгодженості швидкостей АДФР типу МТН-111-6 від частоти збурюючих моментів

При зростанні частоти збурюючих моментах має місце зменшення неузгодженості швидкостей АДФР, різниці їх моментів та зменшення зрівняльного струму. При  $f_g = 0 \div 2$  Гц неузгодженість швидкостей АДФР практично не змінюється (рис. 3.18). При  $f_g = 2 \div 12$  Гц має місце стрімке зменшення значення неузгодженості швидкостей АДФР, що свідчить про збільшення синхронізуючих властивостей електроприводу узгодженого обертання. При  $f_g = 12 \div 45$  Гц швидкість зменшення неузгодженості знижується у 2 рази. У процесі розгону АДФР значення неузгодженостей швидкостей в 2,48 рази менше за їх значення при їх роботі на природній характеристиці, що забезпечується наявністю достатньо великого синхронізуючого моменту.

Якщо припустити, що при імпульсно-струмовому обмеженні електропривода узгодженого обертання АДФР, що його характеристика подібна екскаваторній характеристиці, то середній пусковий момент двигунів постійний і визначається заданою кратністю пускового моменту.

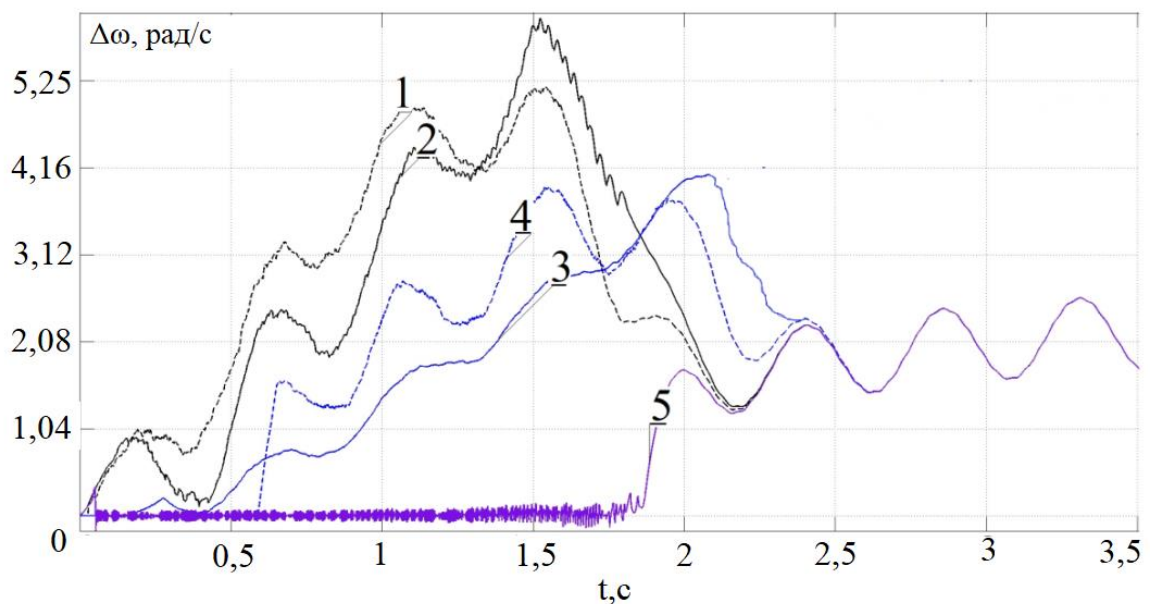
На рис. 3.19 представлені результати моделювання роботи електроприводу для різних алгоритмах керування при впливі статичних та збурюючих моментів  $M = 0,6M_n + 0,2 \sin \omega_g t$  при їх частоті  $f_g = 1,5$  Гц.

Результати моделювання показують, що найбільш ефективним алгоритмом керування є алгоритм "обмеження за сумарним струмом ротора з ШІР" при постійній частоті модуляції. На відміну від інших алгоритмів керування, він забезпечує найкращі синхронізуючі властивості в процесах розгону АДФР, та найменший рівень максимальної неузгодженості швидкостей в динамічному режимі роботи, що становить 3,61% (табл. 3.2).

Схемне рішення та система керування з незалежною роботою силових ключів (рис. 3.7) дозволяє повністю виключити неузгодженості швидкостей між двома АДФР.

Таблиця 3.2. – Порівняльний аналіз рівня неузгодженості за швидкостями АДФР при різних алгоритмах керування

Алгоритм роботи силових ключів	Рівень максимальної неузгодженості швидкостей $\max(s_1 - s_2) \cdot 100\% / s_H, \%$
"обмеження за середньою швидкістю"	5,97
"обмеження за мінімальною швидкістю"	4,95
"обмеження за сумарним струмом без ШІР"	4,07
"обмеження за сумарним струмом з ШІР"	3,61



- 1 – алгоритм керування "обмеження за середньою швидкістю";  
 2 – алгоритм керування "обмеження за мінімальною швидкістю";  
 3 – алгоритм керування "обмеження за сумарним струмом без ШІР";  
 4 – алгоритм керування "обмеження за сумарним струмом з ШІР";  
 5 - при незалежній роботі силових ключів.

Рисунок 3.19 - Неузгодженості швидкостей роторів АДФР типу МТН-111-6 при різних алгоритмах керування силовим ключем в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів

Але використання такого схемного рішення буде дорожче по відношенню до схемного рішення електроприводу з використання одного силового ключа в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, за рахунок збільшення елементної бази та ускладнення системи керування ними. При цьому така система електроприводу також буде мати більші втрати, а слідковано менший ККД електроприводу. Тому таке схемне рішення доцільно використовуватись в окремих випадках, де необхідне точне позиціонування за відповідними координатами виконавчого органу.

Рівень неузгодженості в сталому режимі роботи АДФР на природній характеристиці не залежить від алгоритму керування силовим ключем та складає 2,25%. Таким чином запропонований електропривод узгодженого обертання з алгоритмом керування "обмеження за сумарним струмом з ШПР" має найкращі синхронізуючі властивості, та буде застосовано при порівняльному аналізі щодо неузгодженості швидкостей АДФР з результатами аналітичного дослідження при дії статичних та динамічних моментах навантаження.

### 3.3 Аналітичне дослідження неузгодженості швидкості двигунів при дії статичних та динамічних моментів навантаження

Середній зрівняльний момент пропорційний зрівняльному струму згідно (2.17):

$$M_{zp} = \frac{M_H}{I_{dH}} I_{zp} = M_H \cdot K_C \cdot (s_1 - s_2). \quad (3.29)$$

Для спрощення вважаємо, що коефіцієнт  $K_C$  постійний, і не залежить від падіння напруги при комутації струму ротора. При рівних параметрах АДФР і однаковому навантаженні середні пускові моменти АДФР будуть рівні.

Рівняння динаміки електроприводу узгодженого обертання при пуску з постійними моментами опору на валу двигуна  $M_{CT1}$  і  $M_{CT2}$ :

$$\left. \begin{aligned} M_{cp} + M_{zp} &= M_{CT1} - j\omega_0 \frac{ds_1}{dt} \\ M_{cp} - M_{zp} &= M_{CT2} - j\omega_0 \frac{ds_2}{dt} \end{aligned} \right\}, \quad (3.30)$$

а з урахуванням співвідношень  $M_{CT1} = \frac{M_H}{s_H} s_{CT1}$  та  $M_{CT2} = \frac{M_H}{s_H} s_{CT2}$ , рівняння (3.30) буде мати вигляд:

$$2 \cdot M_H \cdot K_c (s_1 - s_2) - \frac{M}{s_H} \cdot s_{CT1} = j\omega_0 \frac{d(s_1 - s_2)}{dt}, \quad (3.31)$$

звідки

$$\frac{d(s_1 - s_2)}{s_1 - s_2} = - \frac{dt}{T_M \cdot 2 \cdot s_H \cdot K_c}, \quad (3.32)$$

$$T_M = \frac{j\omega_0 s_H}{M_H}, \quad (3.33)$$

де  $T_M$  - електромеханічна стала часу двигуна;

$M_H$  - номінальне значення моменту двигуна;

$s_{CT1}$  - ковзання першого двигуна при статичному моменті  $M_{CT1}$ ;

$s_{CT2}$  - ковзання другого двигуна при статичному моменті  $M_{CT2}$ ;

$s_H$  - номінальне ковзання двигуна.

Інтегруючи (3.32), отримуємо:

$$\ln\left[s_1 - s_2 - \frac{s_{CT1} - s_{CT2}}{2 \cdot s_H \cdot K_C}\right] - \ln K = \frac{t}{T_M \cdot 2 \cdot s_H \cdot K_C} \quad (3.34)$$

Постійна інтегрування  $K$  визначається зі співвідношення при умові, що  $t = 0$ :

$$s_1 - s_2 - \frac{s_{CT1} - s_{CT2}}{2 \cdot s_M \cdot K_C} = K \cdot e^{\frac{t}{T_M \cdot 2 \cdot s_H \cdot K_C}} \quad (3.35)$$

Коли  $t=0$ , різниця ковзань  $s_1 - s_2 = 0$ . Однак, через наявність статичного моменту, двигун з меншим статичним моментом почне розгортатися раніше і різниця ковзань буде прагнути до  $(s_1 - s_2) = (s_{CT1} - s_{CT2})$ .

З огляду на те, що проміжок часу в процесі пуску АДФР досить малий, то для спрощення аналізу будемо вважати, що при  $t=0$ ,  $\Delta s_{поч} = s_{CT1} - s_{CT2}$ . Тоді постійна інтегрування з урахуванням прийнятого допущення і (3.35) буде мати вигляд:

$$K = (s_{CT1} - s_{CT2}) \cdot \left(1 - \frac{1}{2 \cdot s_H \cdot K_C}\right) \quad (3.36)$$

Таким чином перехідний електромеханічний процес буде описуватись рівнянням:

$$s_1 - s_2 = (s_{CT1} - s_{CT2}) \cdot \left[ \frac{1}{2 \cdot s_H \cdot K_C} + \left(1 - \frac{1}{2 \cdot s_H \cdot K_C}\right) e^{-\frac{t}{T'_M}} \right], \quad (3.37)$$

$$T'_M = T_M \cdot 2 \cdot s_H \cdot K_C. \quad (3.38)$$

Аналіз рівняння (3.38) показує, що електромеханічна стала часу електроприводу узгодженого обертання  $T_M$  зростає в  $2 \cdot s_H K_C$  разів, що є еквівалентним збільшенню махових мас системи вирівнювання моментів (частот обертання) двигунів і відповідно, збільшенню демпфуючої здатності приводу при динамічних впливах збурюючого моменту. При умові  $s = \frac{I}{2 \cdot s_H \cdot K_C} = 1$ , неузгодженість швидкостей  $s_1 - s_2$  досягає сталого значення, рівного  $\frac{s_{CT1} - s_{CT2}}{2 \cdot s_H \cdot K_C}$ . Тобто, система електроприводу не буде здатною вирівнювати частоти обертання двигунів.

З урахуванням даних табл. 2.1 і табл. 2.2, для двигунів серії МТН з діапазоном потужностей 3-125 кВт (ПВ-25%) в режимі пуску при ковзаннях  $s = (0,9 \div 1,0)$ , величина  $2 \cdot s_H \cdot K_C$  знаходяться в межах  $1,68 \div 1,3$  і при роботі на природній характеристиці, при умові  $s \leq s_H$  - в межах  $2,3 \div 2,94$ , що більше ніж одиниця. Отже, всі двигуни серії МТН мають здатність до самосинхронізації в електропроводах узгодженого обертання. Для розглянутого прикладу для двигунів МТН-111-6 при початкових статичних моментах  $M_{CT1} = 0,8$  та  $M_{CT2} = 0,4$ , що відповідає розподілу навантажень при неузгодженості візка з вантажем у крайньому положенні, то за (3.37) буде виконуватись умова  $\frac{s_{CT1} - s_{CT2}}{2 \cdot K_S \cdot s_H} = 0,052$  (52 об/хв) та  $2 \cdot s_H \cdot K_C = 1,68$ .

По мірі розвинення швидкостей АДФР експоненційна складова з (3.37) зменшуються і неузгодженість оборотів двигунів прагне до величини  $\frac{s_{CT1} - s_{CT2}}{2 \cdot K_S \cdot s_H} \rightarrow 0,0225$  (22 об/хв)  $K_C \rightarrow 8,85$ , що відповідає роботі двигунів на природній характеристиці.

Таким чином, для сталого режиму роботи АДФР при статичних моментах навантаження, неузгодженість їх швидкостей за аналітичним розрахунком (3.37) складає  $\omega_{CT1} - \omega_{CT2} = 2,2$  рад/с, а за допомогою чисельного експерименту з



використанням імітаційного моделювання –  $\omega_{CT1} - \omega_{CT2} = 2,36$  рад/с, При цьому нев'язка за неузгодженістю швидкостей складає 6,6%. В перехідних режимах роботи, особливо в процесі пуску АДФР нев'язка за неузгодженістю їх швидкостей складає 25,7%. При врахуванні впливу комутації в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів нев'язка за неузгодженістю обертання роторів АДФР зменшується до 23%, що є цілком прийнятним при застосуванні в інженерних розрахунках для якісної оцінки електромеханічних процесів в електроприводі узгодженого обертання.

Для аналітичної оцінки синхронізуючих властивостей систем електроприводу узгодженого обертання при збуреннях моментів з гармонійною складовою, рівняння динаміки електромеханічних процесів в електроприводі з урахуванням (3.30) та , вважаючи що  $M_{CT1} = M_{CT2}$ ,  $K_C = const$ ,

$\Delta M = \frac{M_H}{s_H} (s_{CT1} - s_{CT2}) \sin \omega_b t$  буде мати загальний вигляд:

$$\frac{2 \cdot M_H}{s_H} (s_1 - s_2) \cdot K_S = \frac{M_H}{s_H} (s_1 - s_2) + \Delta M \sin \omega_b t - j \omega_0 \frac{d(s_1 - s_2)}{dt} \quad (3.39)$$

Вважаючи, що параметри системи є постійними, тоді рівняння (3.39) від впливу постійного і змінного моментів набуде вигляду:

$$s_1 - s_2 = \frac{s_{CT1} - s_{CT2}}{2 \cdot s_H \cdot K_S} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_b \cdot T'_M)^2}} \sin(\omega_b t - \varphi_M) + \dots \right. \\ \left. \dots \left( 1 - \frac{1}{2 \cdot s_H \cdot K_C} - \sin \varphi_M \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_M}} \right], \quad (3.40)$$

$$\varphi_M = \arctg(\omega_b T'_M). \quad (3.41)$$

Рівняння (3.40) свідчить про те, що при відносно низьких частотах збурюючого впливу  $f_{\epsilon}=0-3\text{Гц}$  поведінка електроприводу визначається різницею статичних моментів. Завдяки параметру  $\varphi_M$ , змінна складова збурюючих моментів практично не впливає на неузгодженість швидкостей АДФР. При цьому для  $f_{\epsilon}=0-3\text{Гц}$  значення  $\sin \varphi_M$  знаходиться в межах  $0,60 \div 0,26$ , а, відповідно складова,  $1 - \frac{1}{2 \cdot s_H \cdot K_H} - \sin \varphi_M \approx -0,1 \div 0,13$ . Наявність знаку "-" вільної складової змінного моменту практично нехтує його вплив на етапі пуску АДФР. При рівних значеннях статичних моментів вплив постійної складової неузгодженості швидкостей буде дорівнювати нулю, а її значення визначається тільки різницею збурюючих моментів.

Таким чином запропонована методика визначення неузгодженості швидкостей АДФР в системі електроприводу узгодженого обертання, яка враховує наявність як статичних та і динамічних збурюючих моментів, що діють на АДФР, та дозволяє з достатньою точністю до 6,6% в сталих режимах їх роботи та до 25,7% у перехідних режимах їх роботи виконувати оцінку неузгодженості швидкостей АДФР в залежності від паспортних даних та параметрів схеми заміщення АДФР, а також параметрів самої системи електроприводу. Запропонована методика може використовуватись в інженерних розрахунках для вибору силового обладнання при проектуванні систем узгодженого обертання АДФР.

### 3.4 Дослідження неузгодженості швидкостей АДФР в сталих режимах роботи з врахуванням пружного зв'язку

У попередніх підрозділах розглянуті особливості роботи електроприводу узгодженого обертання АДФР в перехідних режимах роботи при статичних та

динамічних збурюючих моментах.

Для визначення ефекту узгодженості між швидкостями АДФР при реалізації системи електроприводу на основі перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів доцільно розглянути ефект узгодженості обертів валів двигунів у порівнянні з їх прямим пуском при роботі на природній характеристиці.

Дослідження неузгодженості роторів двох АДФР проводиться при різних параметрах пружного зв'язку (коефіцієнту пружності та коефіцієнту положення візку кран-балки мостового крану). Коефіцієнт положення візку приймає значення 1, коли візок займає центральне положення кран-балки, тобто відстань візка від правого та лівого краю кран-балки однакова. Зміна значення коефіцієнту положення від 1 до 0.1 характеризує зміщення положення візка від центру до одного зі сторін кран-балки. Дослідження проводяться відносно моделей АДФР двомасової системи (рис. 3.4 – рис.3.5).

На рис. 3.18 - рис. 3.22 наведені результати дослідження у вигляді залежностей неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнту положення візка кран-балки при різних значення коефіцієнту пружного зв'язку з моментами опору  $M_{CT1} = M_n$ ,  $M_{CT2} = 0.2M_n$ . Як показує аналіз отриманих результатів, найменше значення неузгодженості швидкостей АДФР має місце при центральному розміщенні візка на кран-балці. При зміні положення ліворуч, або праворуч, на відстань не більше 40% від напів довжини кран-балки, значення неузгодженості швидкостей при використанні перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів практично не змінюється. При збільшенні відстані розташування візка величина неузгодженості швидкостей АДФР зростає за лінійним законом майже в 3 рази, не залежно від значення коефіцієнту жорсткого зв'язку. При прямому пуску АДФР без застосування перетворювачів при зміні розташування візка від центрального положення, інтенсивність зміни величини неузгодженості швидкостей АДФР зростає, та може збільшитись в 5-9 раз в залежності від коефіцієнта пружного зв'язку.

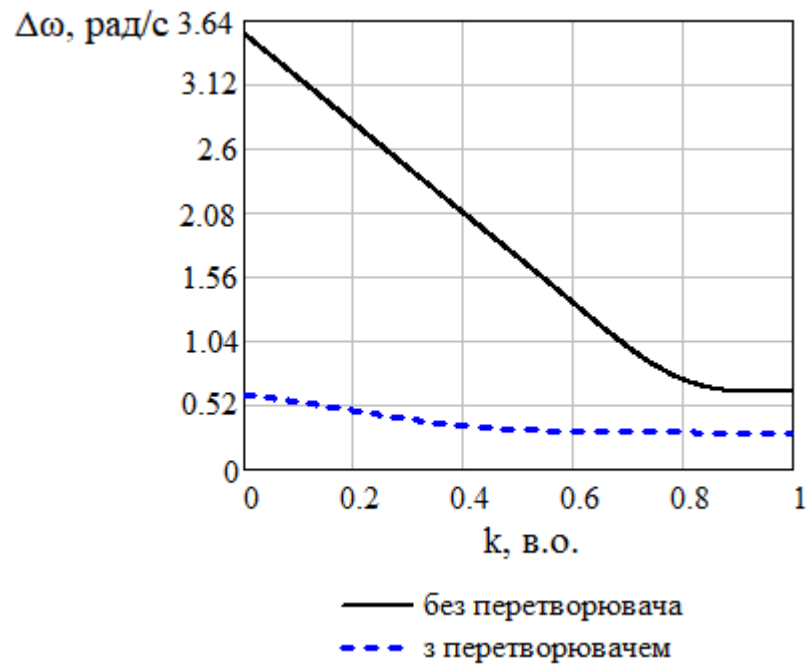


Рисунок 3.18 – Залежність неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнту положення візка кран-балки при коефіцієнті жорсткого зв'язку  $c_{12}=5 \cdot 10^3$

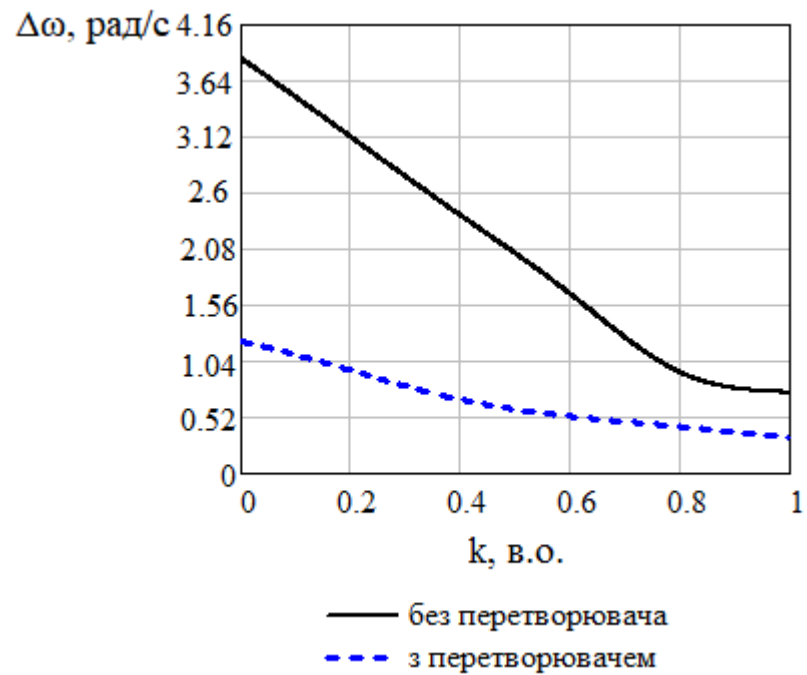


Рисунок 3.19 – Залежність неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнту положення візка кран-балки при коефіцієнті жорсткого зв'язку  $c_{12}=1 \cdot 10^3$

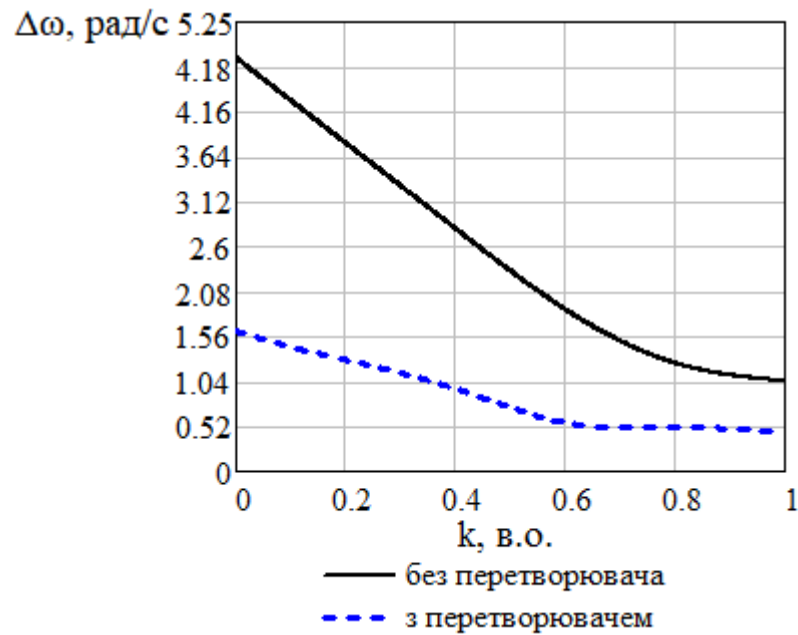


Рисунок 3.20 – Залежність неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнту положення візка кран-балки при коефіцієнті жорсткого зв'язку  $c_{12}=5 \cdot 10^2$

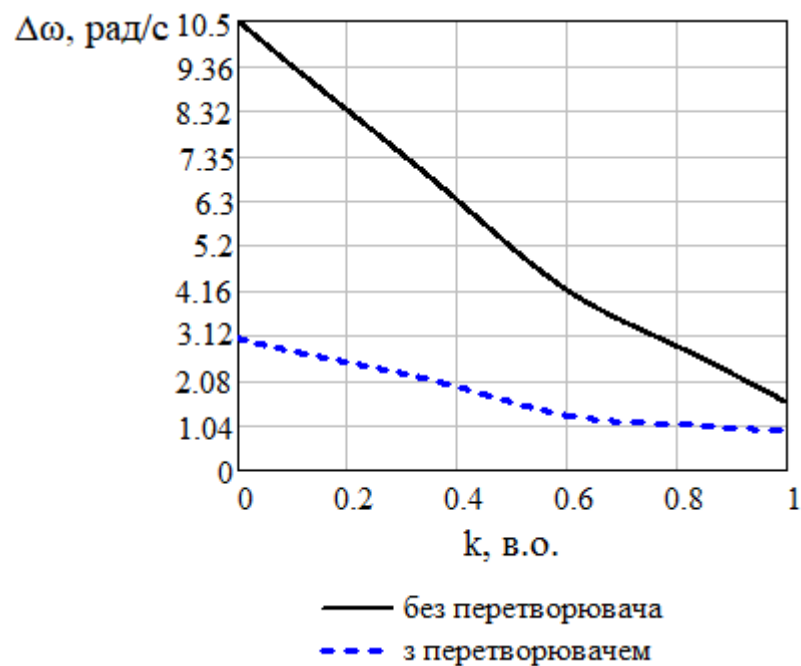


Рисунок 3.21 – Залежність неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнту положення візка кран-балки при коефіцієнті жорсткого зв'язку  $c_{12}=1 \cdot 10^2$

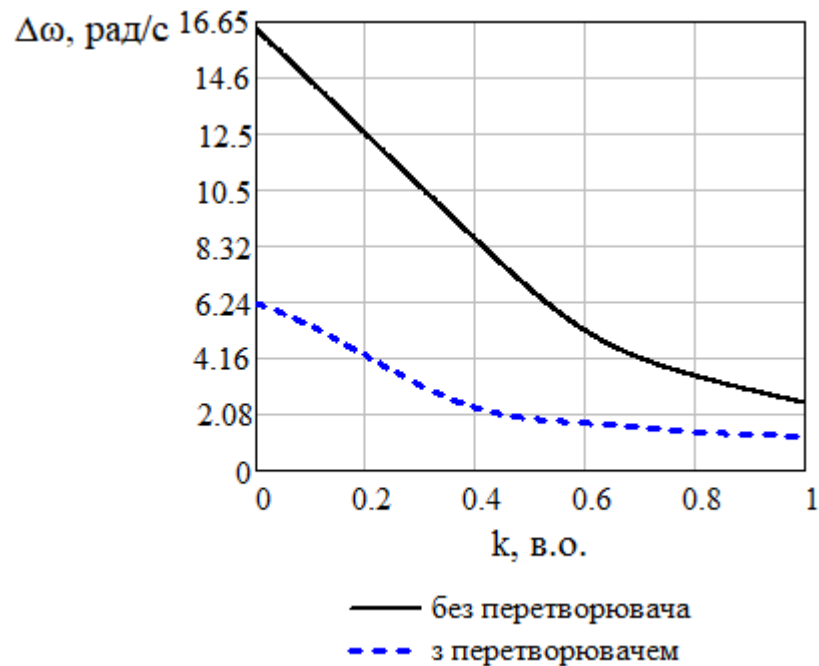


Рисунок 3.22 – Залежність неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнту положення візка кран-балки при коефіцієнті пружного зв'язку  $c_{12}=5 \cdot 10^1$

На рис. 3.23 – рис. 3.27 наведені результати дослідження у вигляді залежностей неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнта жорсткого зв'язку при різних коефіцієнтах положення візка кран-балки відповідно  $k=1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2$ .

Як показує аналіз отриманих результатів, при застосуванні перетворювача з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів отримано ефект узгодженості швидкостей обертання АДФР по відношенню до їх прямого пуску. При цьому значеннях коефіцієнтів пружного зв'язку  $c_{12}=1 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10$  неузгодженість швидкостей двох АДФР з перетворювачем знижується у 3-4 рази. Зі зростанням коефіцієнту жорсткого зв'язку неузгодженість обертів роторів АДФР зменшується незначно, що при використанні перетворювача, що при їх прямому пуску.

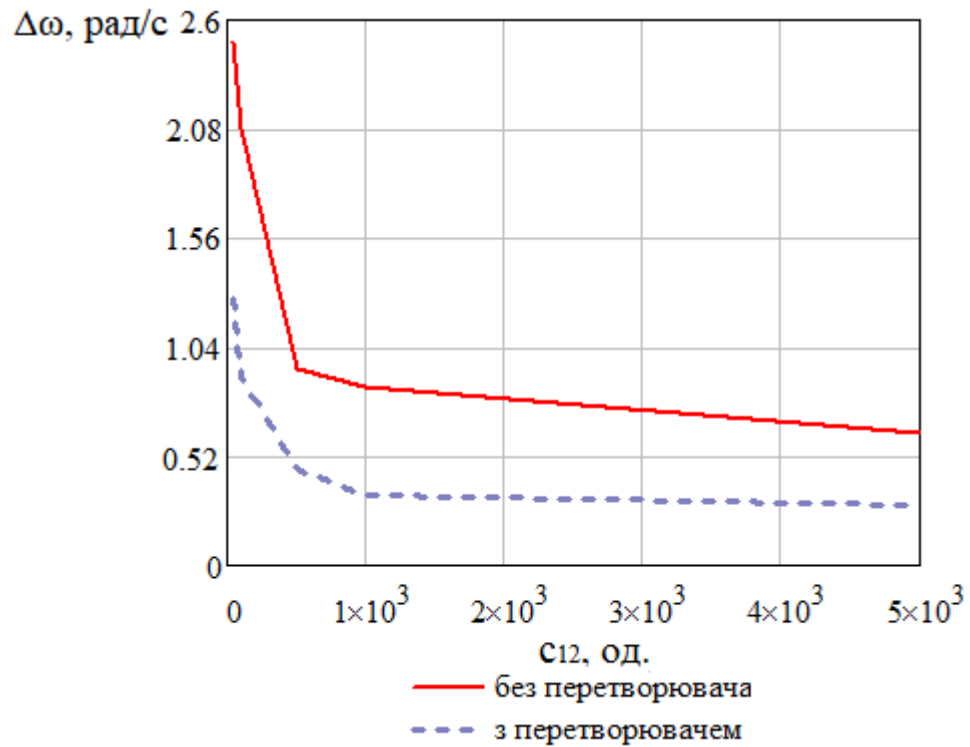


Рисунок 3.23 – Залежність неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнта жорсткого зв'язку при коефіцієнті положення візка кран-балки  $k = 1$

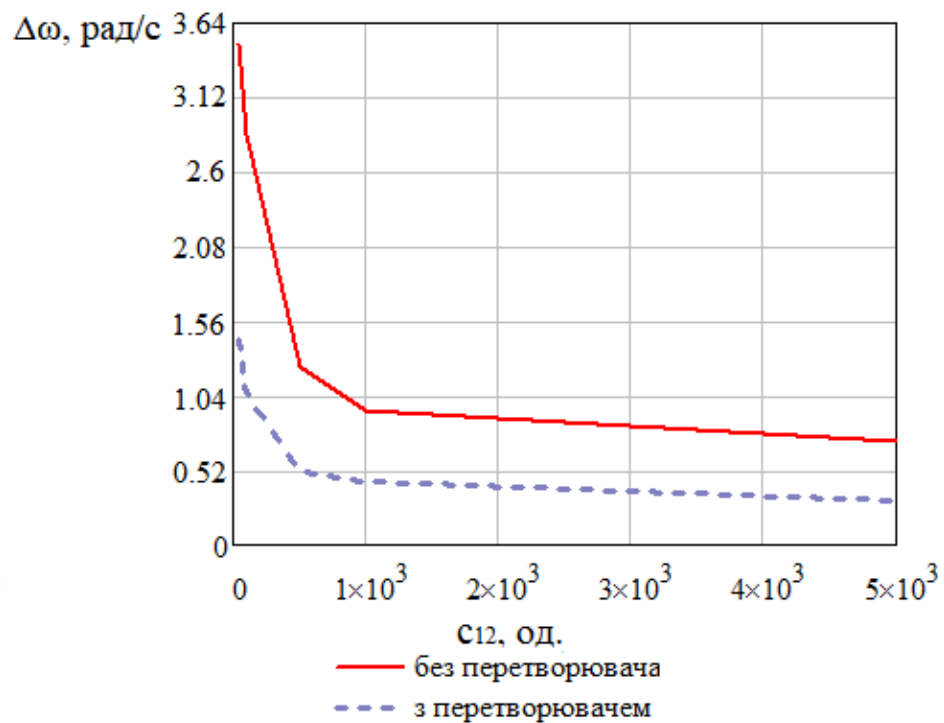


Рисунок 3.24 – Залежність неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнта жорсткого зв'язку при коефіцієнті положення візка кран-балки  $k = 0.8$

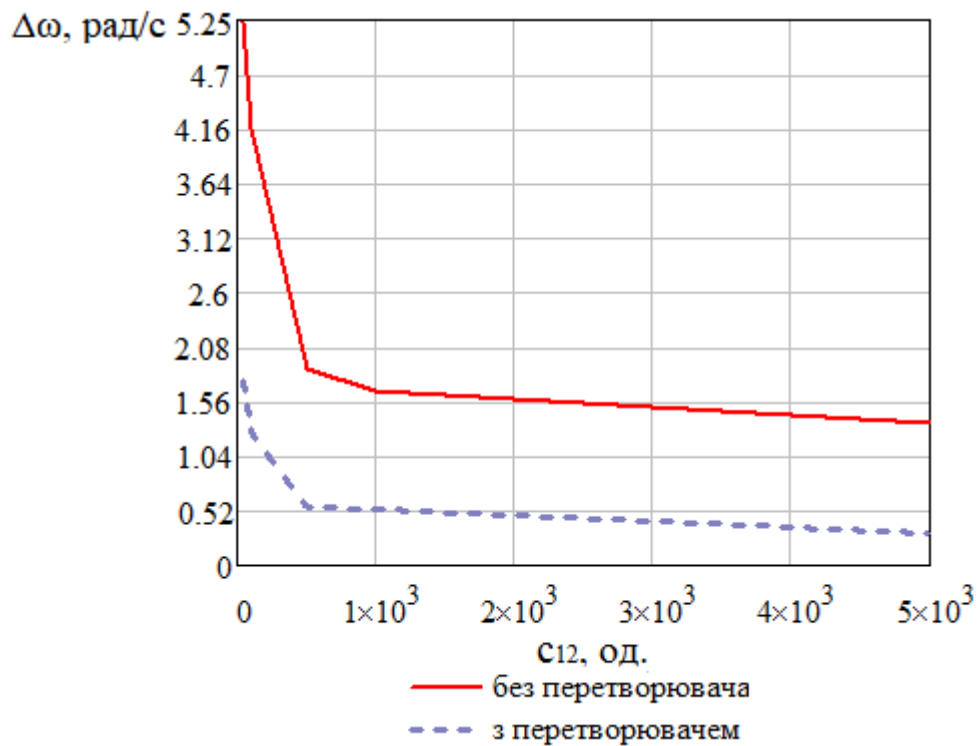


Рисунок 3.25 – Залежність неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнта жорсткого зв'язку при коефіцієнті положення візка кран-балки  $k = 0.6$

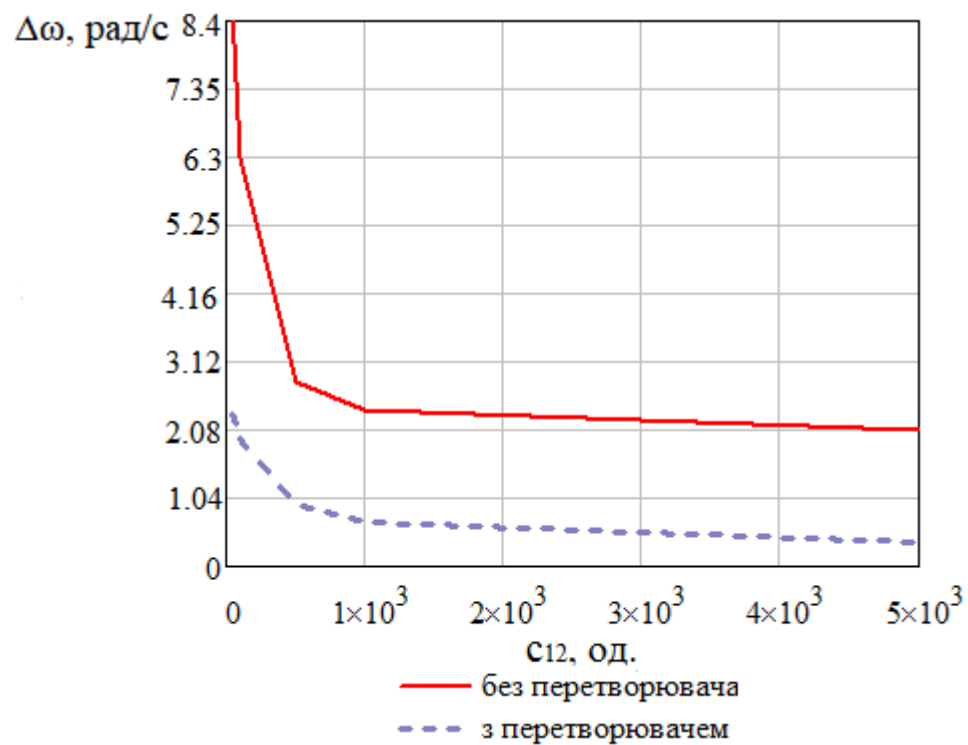


Рисунок 3.26 – Залежність неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнта жорсткого зв'язку при коефіцієнті положення візка кран-балки  $k = 0.4$



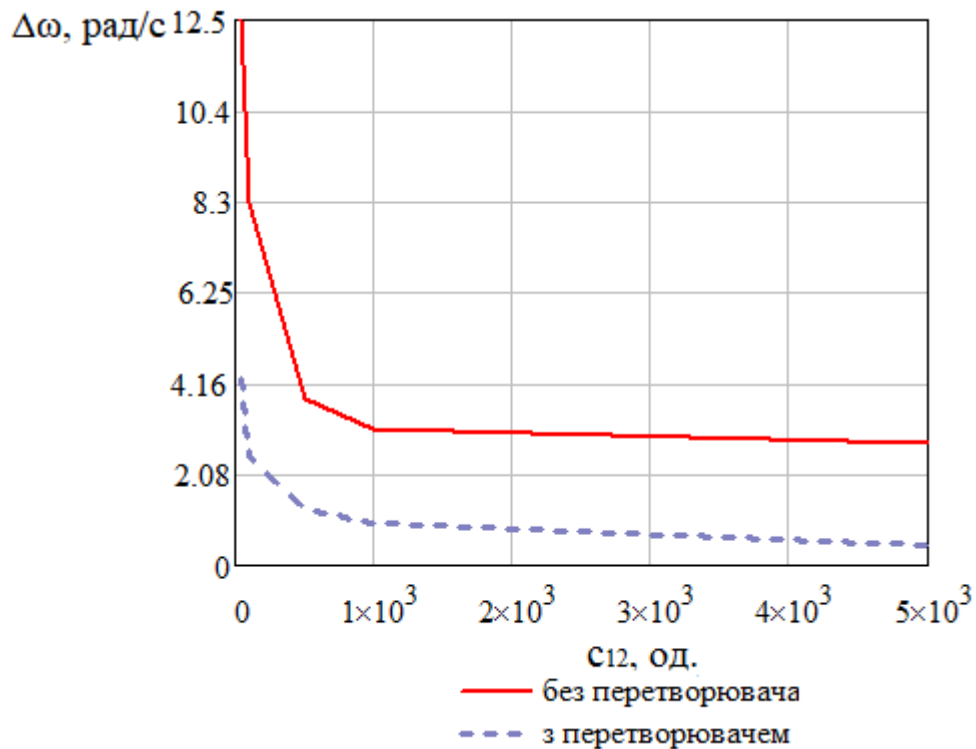


Рисунок 3.27 – Залежність неузгодженості швидкостей АДФР від коефіцієнта жорсткого зв'язку при коефіцієнті положення візка кран-балки  $k = 0.2$

Таким чином підтверджено ефект підвищення узгодженості швидкостей двох АДФР в системі електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, який дозволяє при роботі АДФР на природній характеристиці зменшити неузгодженість обертання роторів в 3-4 рази, та підвищити енергоефективність та надійність дводвигунного електроприводу.

### 3.5 Висновки до третього розділу

Розроблена імітаційна комп'ютерна модель, яка враховує взаємопов'язані електромагнітні й електромеханічні процеси в системі електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, та дозволяє встановити ефективний способи

та алгоритми керування перетворювачем для отримання найкращих синхронізувальних властивостей АДФР при збереженні високого рівня ККД та коефіцієнта потужності електропривода.

За результатами імітаційного дослідження встановлено, що найбільш ефективним алгоритмом керування є алгоритм "обмеження за сумарним струмом ротора з ШПР" при постійній частоті модуляції в динамічному режимі роботи асинхронного електропривода узгодженого обертання. На відміну від інших алгоритмах керування, він забезпечує найкращі синхронізувальні властивості в процесі розгону АДФР, та найменший рівень максимальної неузгодженості швидкостей в динамічному режимі роботи, що становить 3,61%.

Запропонована методика визначення неузгодженості швидкостей АДФР в системі електроприводу узгодженого обертання, яка дозволяє врахувати наявність як статичних та і динамічних збурюючих моментів, що діють на взаємопов'язані АДФР, та дозволяє з достатньою похибкою до 6,6% в сталих режимах їх роботи, та до 25,7% у перехідних режимах їх роботи виконувати оцінку неузгодженості швидкостей АДФР в залежності від їх паспортних даних та параметрів схеми заміщення, а також параметрів самої системи електроприводу. Запропонована методика може використовуватись в інженерних розрахунках для вибору силового обладнання при проектуванні систем узгодженого обертання АДФР.

Вперше доведено, що величина неузгодженості швидкостей АДФР в сталому режимі роботи обернено пропорційна добутку  $2K_c \cdot s_n$ , значення якого для двигунів серії МТН для потужностей 3,5-125кВт (при ПВ-25%) знаходиться в межах  $2,3 \div 2,94$ . Встановлено, що електромеханічна постійна часу асинхронного електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів в  $2K_c \cdot s_n$  разів більша електромеханічної сталої часу асинхронного двигуна, за рахунок чого забезпечуються більш високі демпфуючі властивості електропривода при випадкових (неврахованих) збурюючих моментів при їх частотах більш ніж 1,5Гц.

За результатами моделювання встановлено, що при наявності пружних зв'язків між електроприводами механізму переміщення, 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, що дозволяє стверджувати про наявність в асинхронному електроприводі з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів самосинхронізувальних властивостей. Показано, що в межах зміни коефіцієнта жорсткості  $C_{12}=0\div 1\cdot 10^3$ , неузгодженість швидкостей АДФР в системі електроприводу в 4 рази менша, у порівнянні з їх роботою без електроприводу на істотній характеристиці, та у 2,5 рази менша при зміні коефіцієнта жорсткості в межах  $C_{12}=1\cdot 10^3\div 5\cdot 10^3$ .

За результатами теоретичного дослідження та моделювання отримано підтвердження наукового положення про самосинхронізувальні властивості асинхронного електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів АДФР.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА УЗГОДЖЕНОГО ОБЕРТАННЯ З ІМПУЛЬСНО-СТРУМОВИМ ОБМЕЖЕННЯМ В КОЛІ ЕЛЕКТРИЧНО ПОВ'ЯЗАНИХ РОТОРНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

У попередніх розділах були проведені аналітичні методи дослідження синхронізуючих властивостей електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів у порівнянні з чисельним моделюванням. Розглянуто вплив параметрів двигунів, пружних зв'язків і алгоритмів керування на рівень неузгодженості швидкостей роторів АДФР в сталому і пусковому режимах при різних механічних впливах.

У реальних умовах, як правило, потрібно забезпечити режим пуску, гальмування та роботи на проміжних (підсинхронних) швидкостях АДФР, для реалізації режиму точної зупинки електроприводу.

Нижче розглянуто практичні рекомендації щодо реалізації режимів роботи щодо підвищення ефективності електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів.

#### 4.1 Реалізація режимів гальмування в електроприводі узгодженого обертання

Схемне рішення перетворювача за (рис. 2.1) дозволяє реалізувати гальмування противімкненням і електродинамічне гальмування з самозбудженням [68].

Режим гальмування противімкненням здійснюється шляхом реверсу напруги на затискачах статора.

При реверсі фаз магнітний потік ротора починає обертатися в протилежному напрямку, що призводить до зміни ковзання. Якщо гальмування починається з усталеної швидкості, коли ковзання ротора  $s \leq s_H$ , то при реверсі напруги статора воно близьке до  $s_p \leq 2 - s_H$ . Це призводить до пропорційного збільшення напруги ротора. Згідно табл. 2.1 напруга в роторному колі для багатьох двигунів серії МТН для потужностей від 0,35кВт до 125 кВт знаходиться в межах 178÷339 В, що відповідає випрямленій напрузі 240÷457В. В режимі гальмування противмиканням випрямлена напруга ротора зростає до 480÷900В. Напруга на вході інвертора при куті інвертування  $\beta = 30$  ел. град. при напрузі мережі 380В становить 446 В. Таким чином, основна маса двигунів матиме випрямлену напругу ротора більше напруги інвертування, що потребують установки резистора для обмеження струму. На рис 4.1 представлена однолінійна схема реалізації струмообмежуючого резистора  $R_H$  в електроприводі узгодженого обертання. При виборі струмообмежуючого резистора слід мати на увазі таку особливість роботи приводу узгодженого обертання.

При роботі в сталому режимі роторні випрямлячі закорочені і рекуперація енергії інвертором керованою мережею не відбувається. Конденсатор фільтра в цьому режимі через наявність пульсації напруги інвертування, величина якого досягає  $0,5 U_{du}$ , розряджається до рівня  $0,5 U_{du}$ .

Тому різниця напруги в колі випрямленого струму роторів при реалізації режиму гальмування противмиканням становить:

$$\Delta U_d = K_U U_{du} \cdot (2 - s_p) - 0,5 \cdot U_{du} = U_{du} [(2 - s_p) \cdot K_U - 0,5] \quad (4.1)$$

де  $K_U$  - коефіцієнт трансформації напруги АДФР;

$s_p$  - робоче ковзання ротора в момент включення режиму гальмування противмиканням.

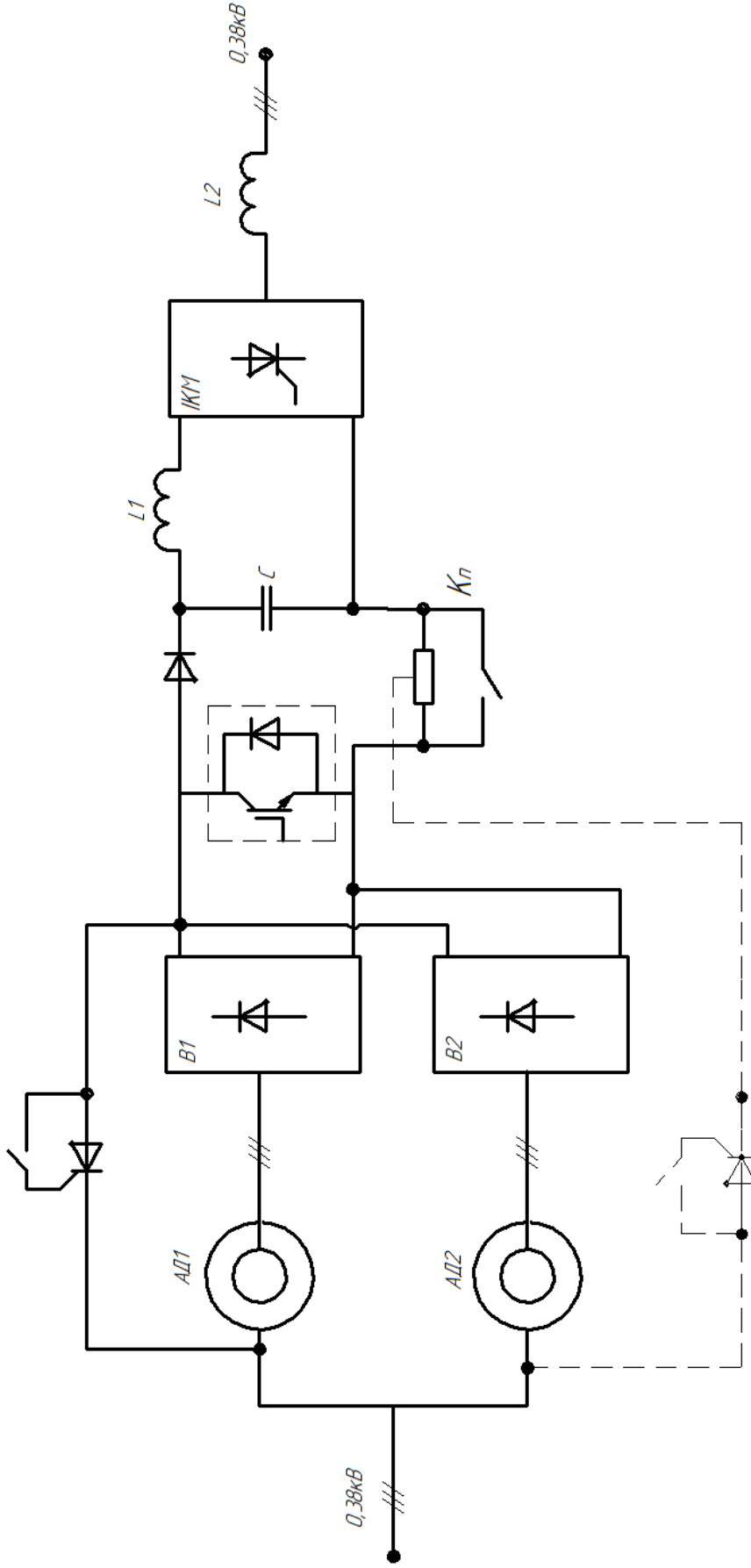


Рисунок 4.1 - Однолінійна схема електроприводу узгодженого обертяння для реалізації режиму гальмування

проти́вмі́канням

Якщо режим гальмування противмиканням відбувається в момент часу, коли працює імпульсне струмообмеження, тобто, інвертор працює в режимі рекуперації, то величина  $\Delta U_d$  буде дорівнювати:

$$\Delta U'_d = U_{du} \cdot [(2 - s_p)K_U - 0,86] \quad (4.2)$$

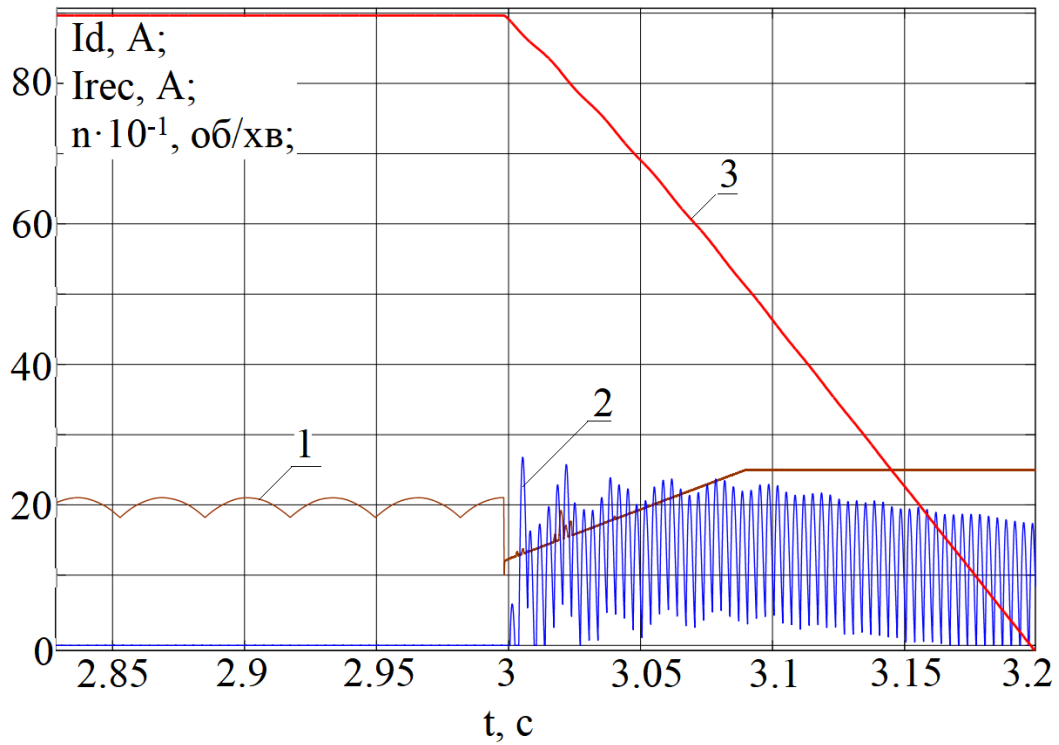
Вибір резистора для режиму гальмування противмиканням  $R_H$  визначається за максимальною різниці  $\Delta U_d$  згідно (4.1):

$$R_H = \frac{\Delta U_d \cdot [2 - s_p] - 0,5}{I_d} \quad (4.3)$$

При виконанні аналізу параметрів АДФР встановлено, що тільки для двигунів з потужностями 3,5 кВт, 18кВт та 36кВт з номінальною напругою ротора відповідно 178В, 221В та 197В (табл. 2.1) в системі електроприводу узгодженого обертання для реалізації режиму гальмування противмиканням не потрібно враховувати наявність струмообмежуючого резистора.

Методами чисельного експерименту, отримані результати імітаційного моделювання щодо реалізації режиму гальмування противмиканням АДФР типу МТН-111-6 без введення струмообмежуючого резистора, що наведені на рис. 4.2 та рис. 4.3. В момент реверсу фаз при постійному струмі ротора має місце коливальний характер моменту, що пов'язано появою аперіодичної складової потоку статора, величина якого залежить від фази напруги статора АДФР в момент реверсу [65, 113].

На рис 4.4 представлені осцилограми сумарного струму ротора при реалізації режиму гальмування противмиканням електропривода узгодженого обертання режиму з двигунами МТН-111-6 при умові закороченого ротора на



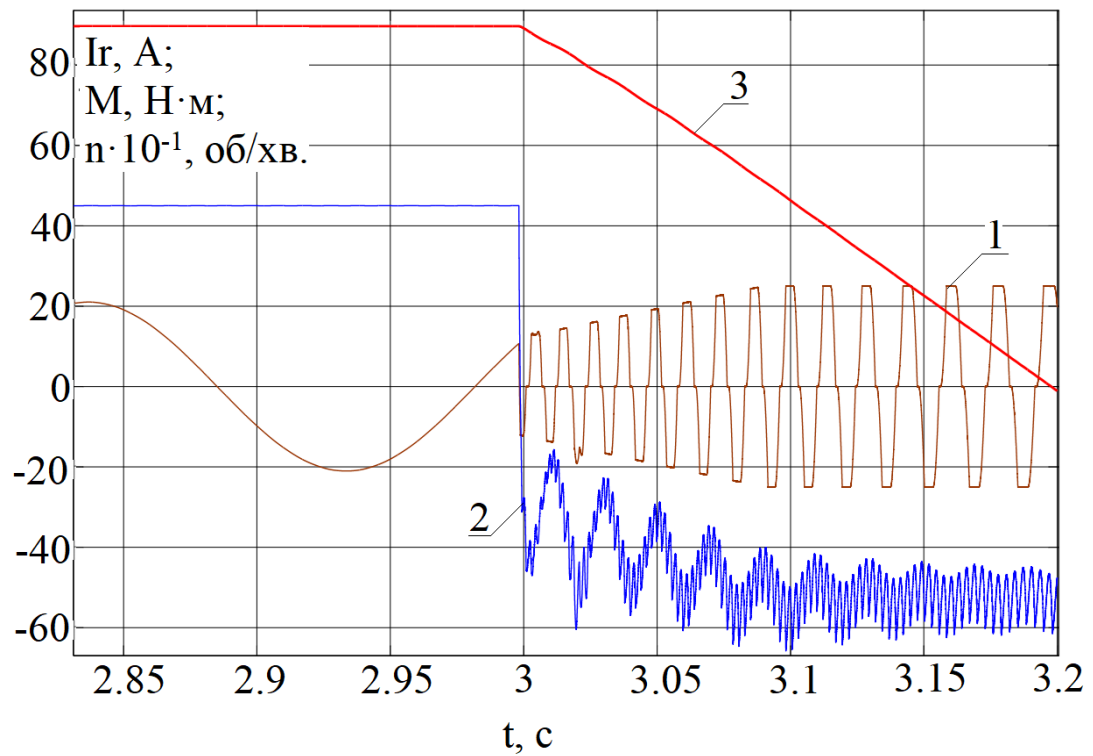
1 - випрямлений струм ротора ( $I_d$ );

2 - струм інвертора (струм рекуперації,  $I_{rec}$ );

3 - швидкість обертання ротора, ( $n$ ).

Рисунок 4.2 - Осцилограми струмів ротора АДФР типу МТН-111-6 і інвертора, а також швидкість обертання ротора в режимі гальмування противмиканням





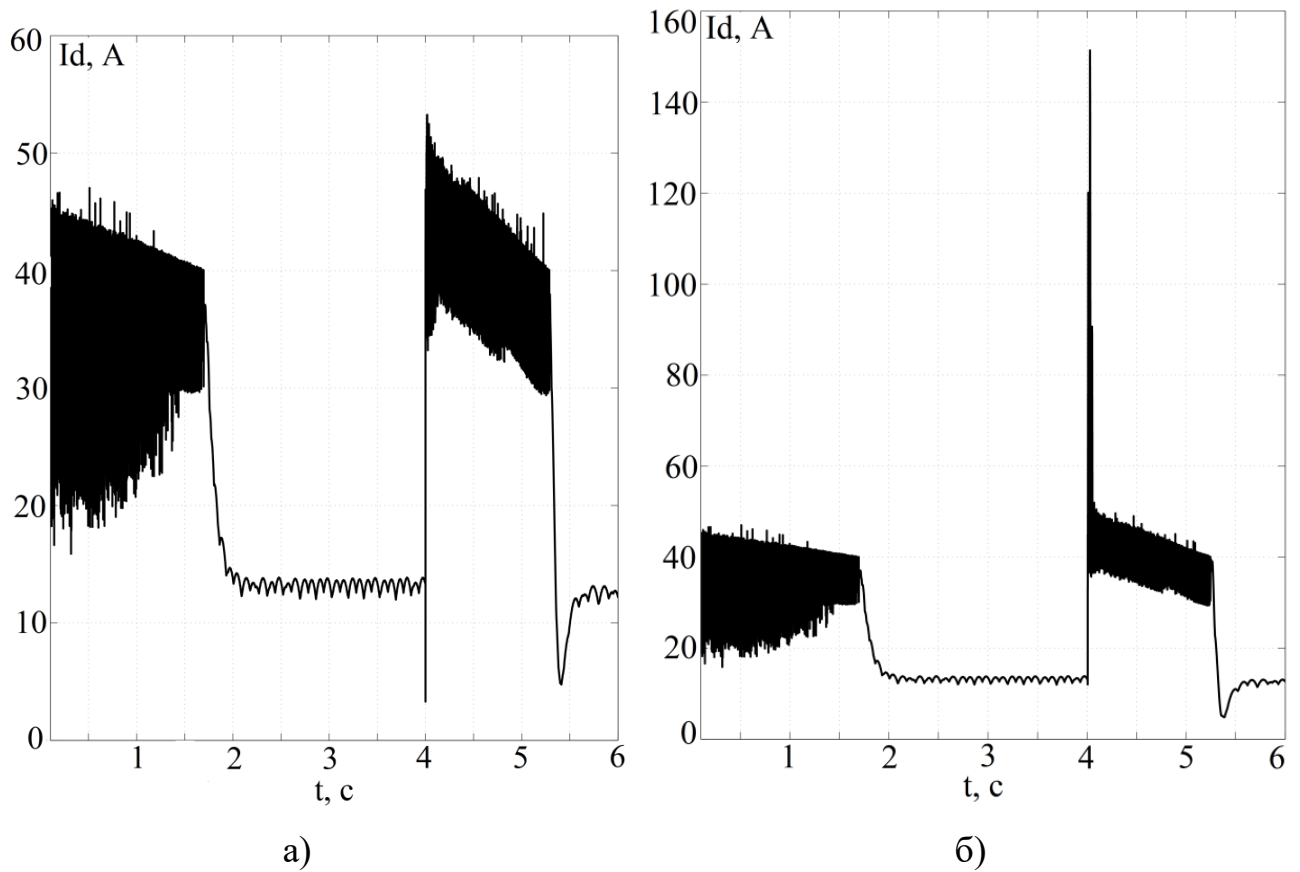
1 - струм ротора ( $I_d$ );

2 - електромагнітний момент ( $M$ );

3 - швидкість обертання ротора ( $n$ ).

Рисунок 4.3 - Осцилограми струму ротора, електромагнітного моменту та швидкості обертання ротора в режимі гальмування протівімкненням АДФР типу

МТН-111-6



а) при узгодженні ЕРС (при наявності  $R_H$ );

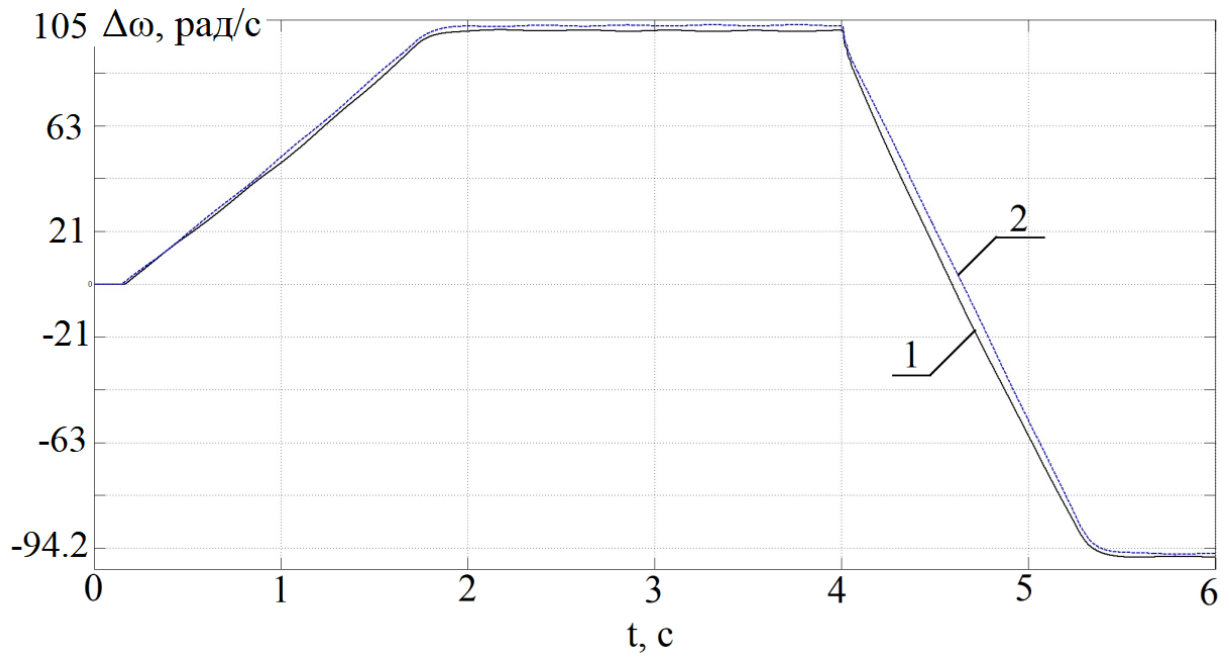
б) без узгодження ЕРС (без наявності  $R_H$ ).

Рисунок 4.4 - Осцилограми сумарного струму ротора в періоди розгону, сталого режиму та реверсу

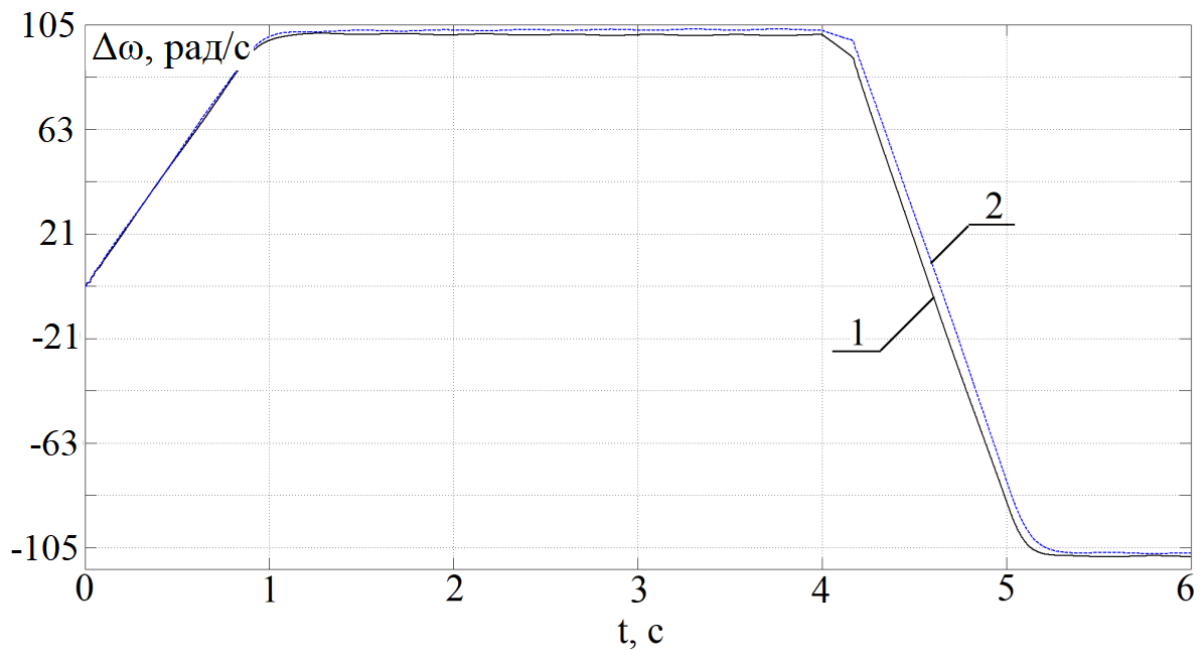
початку реверсу без та з узгодженням ЕРС струмообмежувальним резистором. Сумарний струм ротора через різницю напруги  $\Delta U'_d$  згідно (4.2) без реалізації струмообмежувального резистора зростає практично в 3 рази. Його величина визначається різницею  $\Delta U_d$  згідно (4.1) і опорами статора та ротора АДФР. Таким чином врахування струмообмежувального резистора за (4.3) дозволяє вилучити негативні ефекти, що тривають в перехідних процесах в момент реверсу при реалізації режиму гальмування противмиканням, а також забезпечити захист АДФР від перенапруг та ударних складових струмів в цих режимах роботи електроприводу, що визивають значний перегрів обмоток АДФР та значне зниження ресурсу його ізоляції [112].

На рис 4.5 представлені осцилограми швидкостей першого ( $\omega_1$ ) та другого ( $\omega_2$ ) АДФР МТН-111-6 в період розгону, сталого режиму і реверсу з і без узгодження ЕРС струмообмежувального резистора. Робота АДФР в системі електроприводу узгодженого обертання реалізована за допомогою алгоритму керування силовим ключем "обмеження за середньою швидкістю". В момент реверсу при застосування струмообмежувального резистора рівень неузгодженості за швидкостями зменшуються з 4,5% до 0,89%. В період гальмування рівень неузгодженості швидкостей АДФР збільшується до 3,78% та зберігається до повної зупинки електроприводу. Причому, в процесах безперервного розгону та гальмування, рівень неузгодженості швидкостей АДФР практично залишається незмінним. Таким чином при застосуванні струмообмежувального резистора для реалізації режиму гальмування противмиканням досягається зменшення рівня неузгодженості швидкостей АДФР, що працюють в системі електроприводу узгодженого обертання.

На рис. 4.1 пунктиром показана можливість реалізації режиму динамічного гальмування з самозбудженням з частковою реалізацією струмообмежувального резистора  $R_H$ . Цей режим досить докладно розглянуто в [26, 115-120] і на рис 4.1. продемонстрована можливість його реалізації, в якості захисту в аварійному режимі при зникненні напруги в тролейних лініях.



а)



б)

1- швидкість першого двигуна ( $n_1$ );1- швидкість другого двигуна ( $n_2$ );

а) при узгодженні ЕРС;

б) без узгодження ЕРС.

Рисунок 4.5 - Осцилограми швидкостей двигунів типу МТН-111-6 в періоди розгону, сталого режиму і реверсу з і без застосувань узгодження за ЕРС

#### 4.2. Особливості роботи електроприводу узгодженого обертання механізму переміщення візка

При реалізації схеми на рис 4.1 для механізму переміщення візка слід враховувати наступні рекомендації.

У ряді виконань мостових кранів живлення електроприводів, встановлених на візку, здійснюється від кранових тролейів, виконаних із сталевого кутового профілю. Оскільки сталевий профіль має досить високий опір (кутник  $50 \times 50 \times 5$  1,5 МОм/м), що при довжині мосту 25 м. призводить до збільшення відносного еквівалентного опору  $R'_e$  імпульсного перетворювача на  $5 \div 30\%$ . Це призводить, відповідно до пропорційного зменшення максимального коефіцієнта посилення  $K_{max}$ . Таке значне зменшення коефіцієнта посилення наближає (для ряду двигунів див. табл. 2.1 і 2.2) до його мінімально допустимого значення, що зменшить діапазон ковзань, при яких можлива рекуперація енергії в мережу.

Крім того наявність сталевих тролейів призводить до додаткових втрат від вищих гармонік, що призведе до зниження ККД електроприводу переміщення візка на 1-2% в діапазоні потужностей  $3,5 \div 36$  кВт [113-114]. Для вилучення зазначеного недоліку рекомендується некеровані роторні випрямлячі встановити на корпусі електродвигуна переміщення візка (або в безпосередній близькості в залежності від конструкції візки). За наявності безпотенційних модулів для струмів до  $200 \div 300$  А це не викличе значних витрат. При такому рішенні передача енергії до імпульсного перетворювача і інвертора здійснюється на постійному струмі, що зменшить величину  $R'_e$  приблизно в 5 разів, так як опір за постійним струмом для зазначеної тролейі складає 0,3 Ом/м, що дозволить знизити втрати від вищих гармонік в 1,26 рази, а від середнього значення випрямленого струму в 5 разів, в цілому до 6,3 раз. Відповідно ККД

електроприводу переміщення зменшиться лише на  $0,15 \div 0,3\%$ . Крім того, на крані зменшиться кількість кутових профілів в  $1,5n$  разів, де  $n$  - число двигунів.

Кардинальним є рішення для установки перетворювача електроприводу на візку крана в зв'язку з незначними їх габаритами особливо в діапазоні  $3,5 \div 43$  кВт. В цьому випадку струмопровід візка може бути здійсненим трьома тролеями, за аналогією частотно-регульованого електроприводу. Керування електроприводом механізму переміщення можливо виконати керованим по радіо сигналу, що характерно для сучасних кранових електроприводів, або гнучким контрольним кабелем. Проблему зниження втрат потужності і зменшення  $K_{max}$  вирішує система гнучких струмопроводів, які використовуються на кранах перевантажувачів, які працюють у важкому режимі роботи. Проміжна частота обертання ротора можлива за допомогою регулятора частоти обертання. В якості датчика зворотного зв'язку є можливим використання датчиків напруги ротора [24, 27, 121-125] або частоти обертання ротора. Для прийнятної точності підтримки частот обертання необхідно мати імпульсний датчик з  $40 \div 60$  імпульсами на одне обертання. При використанні в якості двигунів переміщення моста  $6 \div 10$  полюсних двигунів, частота обертання становить  $16 \div 10$  об/сек. Це потребує використання датчиків з числом імпульсів  $540 \div 720$ . Реалізація такого датчика можлива з використанням в якості зворотнього зв'язку 12-фазного малопотужного трансформатора за схемою з'єднання  $Y/Y/\Delta$ . Використовуючи фільтри високої частоти отримуємо 12 імпульсів за період частоти обертання ротора і, відповідно, датчик з 600-імпульсами на одне обертання ротора АДФР за секунду. Це дозволяє реалізувати діапазон регулювання частот обертання у діапазоні  $1:10 \div 1:20$ .

В електроприводі узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням типу МПЧ-ТТП-160-380-50-УХЛЧ (ВАТ «Перетворювач», м. Запоріжжя) стійкий діапазон регулювання частоти обертання відповідає  $1 \div 10$ , при статичному моменті  $M_c \geq M_H$ , отриманого при використанні імпульсних датчиків частоти ротора 300 імпульсів на одне обертання за секунду. В режимі

регулювання швидкості задана величина оборотів ротора забезпечується ПІ-регулятором частоти обертання ротора.

#### 4.3. Порівняльна оцінка техніко-економічних та експлуатаційних показників електроприводів узгодженого обертання

Порівняльний аналіз електроприводів узгодженого обертання проведений для мостових кранів, що працюють у важких умовах роботи, які використовують ЧРП з АДКР, АДФР з джерелом струму на схемі індуктивного ємнісного перетворювача в колі випрямленого струму ротора (рис. 1.4), а також АДФР з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів (рис.2.1). Всі електроприводи, окрім ЧРП забезпечують рекуперацію енергії в мережу.

Порівняльна оцінка техніко-економічних та експлуатаційних показників для електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів та ІЄП наведена в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. – Порівняльна оцінка техніко-економічних та експлуатаційних показників електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням та ІЄП

№ п/п	Найменування параметру	Найменування електроприводів	
		з ІЄП	з імпульсно-струмовим обмеженням
1	2	3	4
1	Встановлена потужність випрямляча	Немає	Немає

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
	(активного випрямляча) в колі статора		
2	Встановлена потужність випрямляча в колі ротора	$P_B = \sum_1^n P_{\text{дв.н}}$	$P_B = \sum_1^n P_{\text{дв.н}} \cdot S_n$
3	Кількість випрямлячів у роторі	n+1	n
4	Кількість інверторів у роторному колі	1	1
5	Встановлена потужність інвертора у роторному колі	$P_U = \sum_{c=1}^n P_{\text{дв.н}} \cdot \eta_{\text{дв.н}}$	$P_U = \sum_{i=1}^n P_{\text{дв.н}} \cdot \eta_{Bn}$
6	Наявність і встановлена потужність допоміжних приладів	Індуктивно-ємнісний перетворювач $P_{\text{уст}} \approx 2 \div 2,5 P_B$ , мережевий реактор інвертора, ІКМ $P_{\text{уст}} \approx S_n$	Імпульсний перетворювач у колі ротора $P_{\text{уст.ст.}} = \frac{1}{3} \sum_1^n P_{\text{дв.н}}$ реактор ІКМ $P_{\text{уст.}} = P_{II} S_n$



Продовження таблиці 4.1

1	2	4	4
7	ККД сталого режиму.	$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta P_{\text{дв}} + \Delta P_{\text{ІСП}})}{\sum_{i=1}^n \Delta P_{\text{дв}}}$	$\eta \approx \eta_{\text{дв.}}$
8	Коефіцієнт потужності на основній гармоніці	$\cos\varphi \approx 1$ випереджаючий за $M \leq 0,5M_{\text{н}}$	$\cos\varphi \approx \cos\varphi_{\text{АД}}$ ; $\cos\varphi = 1$ при застосуванні АІН.
9	Кількість діодів	$6(n+1)$	$6n+1$
10	Кількість тиристорів/IGBT	при застосуванні ІКМ – 6/-; при застосуванні АІН – -/6;	при застосуванні ІКМ – 6/-; при застосуванні АІН – -/6;
11	Необхідність давача частоти обертання	Проміжна швидкість отримується через зміну схеми підключення ІСП	Необхідний давач частоти (напруги) ротора при реалізації проміжних частот.
12	Можливість само-синхронізації	Має.	Має. Схема електропривода узгодженого обертання має

Кінець таблиці 4.1

1	2	3	4
			підвищену електромеханічну сталу в $2S_nK_s$ разів. Знижується статистична похибка.
13	Захист в аварійному режимі	Є необхідним захист від зриву інвертора ІКМ. За використання АІН захисту забезпечується ключами, якими керують.	Є необхідним захист від зриву інвертора ІКМ. При використанні АІН захист забезпечується ключем, яким керують.

Аналіз порівняльної таблиці показує, що для більшості випадків експлуатації електропривод узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням є найкращим по габаритними показниками, ККД у порівнянні з ІЄП. Привід з ІЄП також володіє самосинхронізацією без додаткових засобів регулювання.

В табл. 4.2 наведена порівняльна оцінка за техніко-економічними та експлуатаційними показниками електропривід з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів та ЧРП з активним випрямлячем (АВ). У порівнянні з ЧРП, електропривід з імпульсно-струмовим обмеженням (ІСО) забезпечує наявність синхронізуючого моменту при пуску, має більший ККД за рахунок відсутності додаткових втрат в активному випрямлячі, меншою встановленою потужністю, яка складає  $0,5 \div 0,75$  від встановленої потужності ЧРП, відсутністю датчиків частоти обертання ротора (інкодерів), відсутністю потреби в резервуванні другого перетворювача на випадок виходу з ладу в процесі експлуатації, має однаковий рівень магнітної сумісності з мережею [126].

Таблиця 4.2 – Порівняльна оцінка техніко-економічних та експлуатаційних показників електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням (ІСО) та ЧРП

п/п	Техніко-економічні та експлуатаційні показники	ЧРП з активним випрямлячем	Запропонований електропривід (ІСО) з АІН
1	2	3	4
1	Кількість не керованих/керованих п/п приладів	18/18	20/7
2	Наявність давачів	Давач частоти обертання ротора двигунів	При реалізації керування ІСО одним ключем давачі не потрібні. При керуванні двома ключами потрібні давачі напруги або частоти струму ротора
3	Визначення ККД електроприводу	$\eta_{чрп} = \eta_{AB} \cdot \eta_i \cdot \eta_{\delta}$ $\eta_{чрп}^* = \frac{\eta_{чрп}}{\eta_{ISO}} = 0,93 \div 0,96$ <p>(нижче на ККД активного випрямляча)</p>	$\eta_{ISO} = \eta_{\delta} \cdot \eta_B \cdot \eta_i$ $\eta_{ISO}^* = 1$
4	Визначення оціночної вартості	$C_{чрп} = 2C_{AB} + 2C_{AИH}$	$C_{ISO} = 2C_B + C_{IIIH} + C_{AИH}$

Продовження таблиці 4.2

5	Встановлена потужність реактора змінного струму	$S^* = \frac{2P_{\partial\epsilon}}{\eta_{\partial\epsilon} \cdot \eta_{пч}}$	$S^* = 2(0.6 - 0.7)P_{\partial} \cdot \eta_{\partial\epsilon} \eta_B \eta_{AИH} \cdot S_{НОМ}$
6	Наявність синхронізуючого моменту при пуску	Відсутня. Визначається механічними характеристиками АД	Присутня. $M_{зр} = (0,2 \div 0,3)M_H$ в залежності від потужності АДФР, що зменшує $\Delta\omega$ в 1,3÷1,68 рази проти ЧРП
7	Складність наладки	Складні для потужних приводів. Потребують стендів і складання моделей [41]	Відносно проста, не потребує наладки струмообмеження.
8	Особливості впливу роботи перетворювача на двигуни	При sin-ної ШІМ і при компенсації $\cos\varphi$ напруга постійного струму збільшується на 20-30%, що призводить до збільшення втрат в статорі АД, а також в АВ і АІН Сумісність з мережею АВ в сталому режимі залежить від активного струму, який повинен бути $> 0,2I_H$ [43].	Струм статора практично sin-ний у всіх режимах роботи. Сумісність АІН не залежить від активного струму статора оскільки він забезпечує синусоїдальність намагнічуючої складової струму в сталому режимі.

Кінець таблиці 4.2

9	Чутливість до зміни параметрів механічної системи	Необхідність до адаптації системи керування	Струмообмеження не залежить від зміни параметрів механічної системи
10	Наявність резерву	Потрібно мати резервний ЧРП на випадок виходу з ладу основного.	При виході з ладу перетворювача застосовується релейно-контактора система, яка може бути у наявності після модернізації електроприводу

В табл. 4.3 наведені порівняльна оцінка за вартісними показниками електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням (ІСО) та ЧРП без рекуперації енергії. Згідно рис.2.1. по відношенню до ЧРП електропривід з імпульсно-струмовим обмеженням додатково комплектується другим некерованим випрямлячем та модульним ключем IGBT з драйвером та датчиком струму. Для порівняння електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням з ЧРП використовується перетворювач з передбаченою перевантажною здібністю серії ATV-930 виробництва Schneider Electric для збереження однакової комплектності силових елементів та систем керування перетворювача. При цьому встановлена потужність інвертора електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням складає  $0,7 \div 0,75$  від встановленої потужності двох ЧРП. До повної ціни ЧРП додається вартість двох енкодерів. Таким чином, згідно табл. 4.3 для сумарних потужностей двох двигунів 7кВт, 60кВт та 250кВт, вартість електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням складає  $0,66 \div 0,77$  менше вартості двох ЧРП.

Таким чином, за техніко-економічними та експлуатаційними показниками пропонується електропривід з імпульсно-струмовим обмеженням є

альтернативним рішенням ЧРП, при якому не потрібні додаткові інвестиції щодо заміни кранових АДФР на АДКР при модернізації електроприводу мостового крану.

Таблиця 4.3 – Порівняльна оцінка вартісних показників електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням (ІСО) та ЧРП

Номінальна потужність двигунів	ЧРП без рекуперативної енергії (складові елементи)	Вартість ЧРП, дол. США	Вартість ЧРП, в.о.	Складові елементи пропонованого електроприводу з рекуперативною	Ціна пропонованого електроприводу, дол. США	Вартість пропонованого електроприводу відносно ЧРП, в.о.
1	2	3	4	5	6	7
7кВт (2*3,5кВт) типу МТН-111-6	ATV-930 5,5/4,0	2*1267	1,0	ATV-930 (7,5/5,5)	1511	
				випрямляч 30А	3,0	
	ЕНА1J- В28- L00100L , енкодер	2*42		Ключ з драйвером (100А/1200 V)	195	
	<b>Разом</b>	<b>2618</b>		<b>1,0</b>	<b>Разом</b>	

Кінець таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7
60кВт (2*30кВт) типу МТН- 412-6	АТV-930 37/30	2*3450		АТV-930 (45/35)	4610	
				випрямляч 80А	10	
	ЕНА1J- В28- L00100L , енкодер	2*42		Ключ з драйвером (200А/1200 V)	752	
	<b>Разом</b>	<b>6984</b>		<b>1,0</b>	<b>Разом</b>	
250кВт (2*125кВт) типу МТН- 712-10	АТV-930 132/110	2*9150		АТV-930 160/132	11050	
				випрямляч 300А	53	
	ЕНА1J- В28- L00100L , енкодер	2*42		Ключ з драйвером (1200А/170 0V)	1700	
	<b>Разом</b>	<b>18384</b>		<b>1,0</b>	<b>Разом</b>	

#### 4.4 Експериментальні дослідження електроприводу з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів

Експериментальна перевірка досліджуваного електроприводу узгодженого обертання була проведена на зразку багатоканального перетворювача типу МПЧ-ТТП-160-380-50 УХЛ4, виготовленого ТОВ «НДІ Перетворювач», м. Запоріжжя

для 60-тонного мостового крана Алчевського меткомбінату, технічні характеристики якого наведені в додатку А.

Експериментальна перевірка проводилася в 2 етапи:

- 1 етап: перевірка на стенді ТОВ "НДІ Перетворювач" (рис. 4.7);
- 2-й етап: перевірка на мостовому 60-тонному крані 2П30/5 в механічному цеху заводу ПАТ «Запоріжжкран».

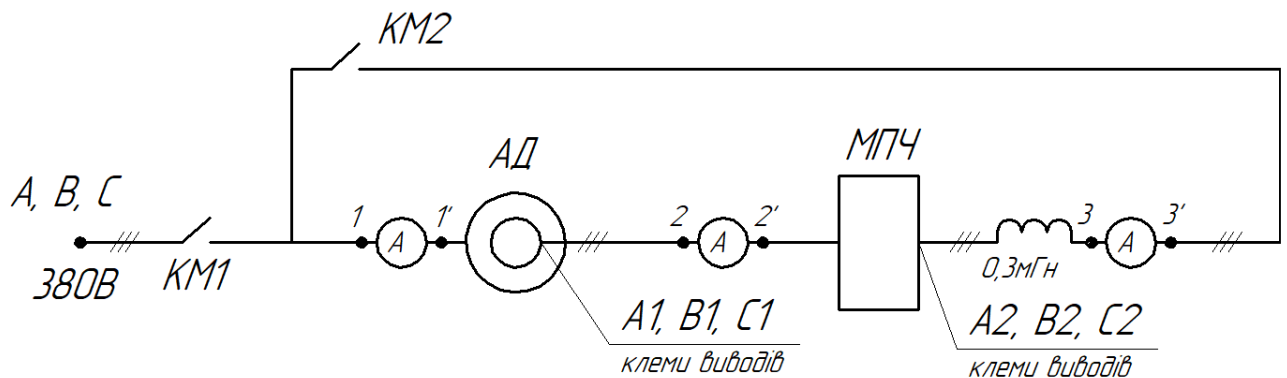


Рисунок 4.7 - Однолінійна схема випробувань МПЧ-ТПП-160-380-50 УХЛ4

Керування перетворювача проводилося за допомогою контролера: на 1-й позиції проміжної частоти обертання  $n \approx 0,1 n_H$ ; 2-й позиції - робота в сталому режимі після пуску. При випробуваннях використовувались АДФР типу МТН-412-36 кВт, ПВ 25%, 955 об/хв.

В якості навантаження використовувалось електромагнітне гальмо "Пасенкова". При перевірці на стенді перевірялося функціонування схеми в режимах еквівалентних роботі механізму переміщення крана. Процес проведення випробування зображено на рис. 4.8.



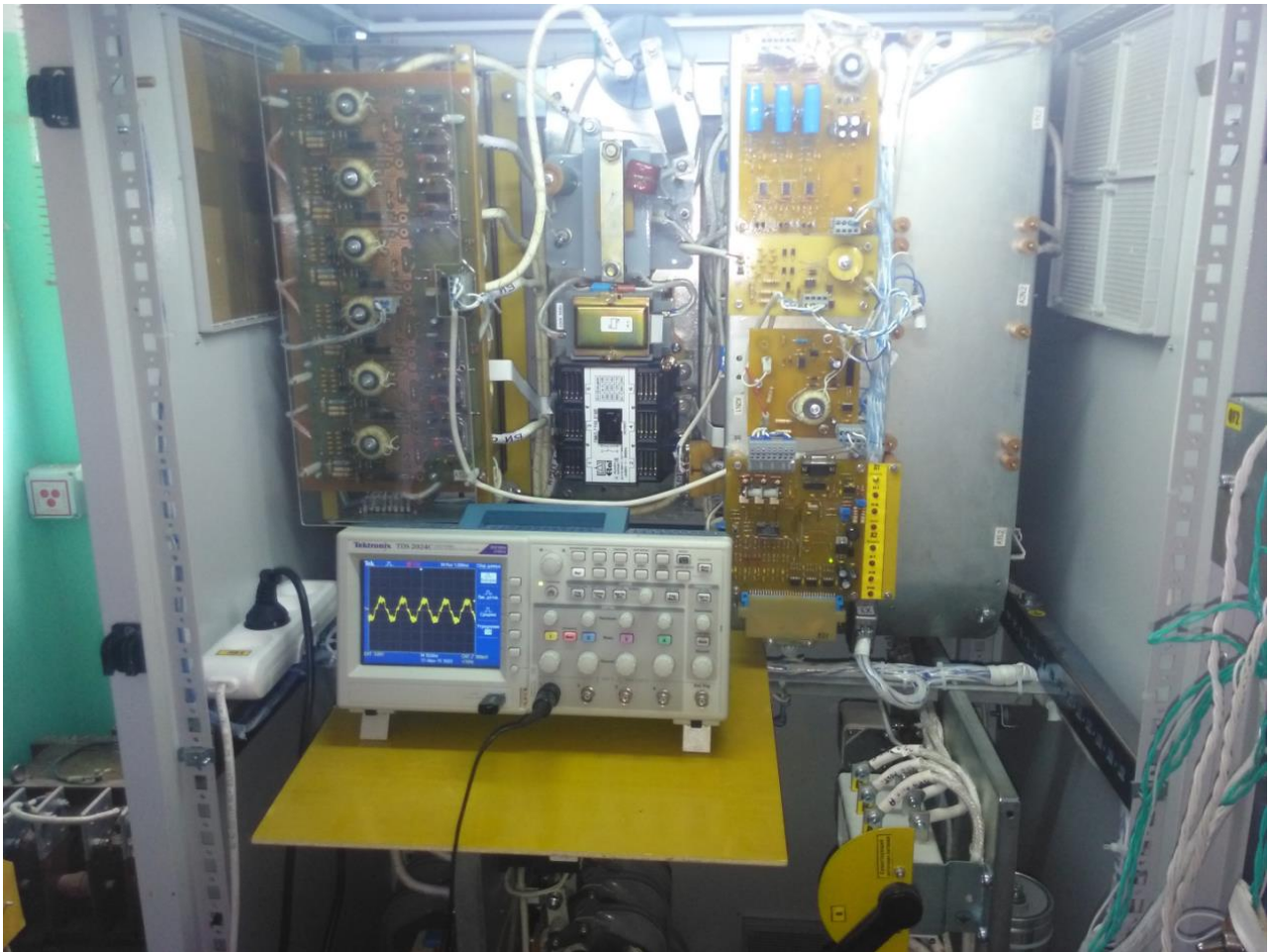
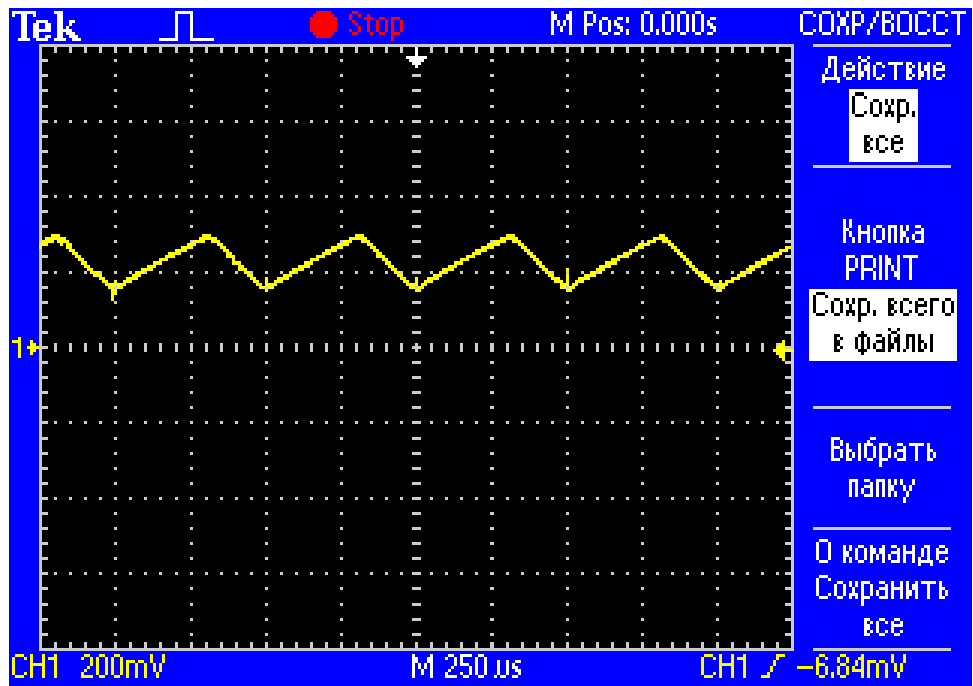


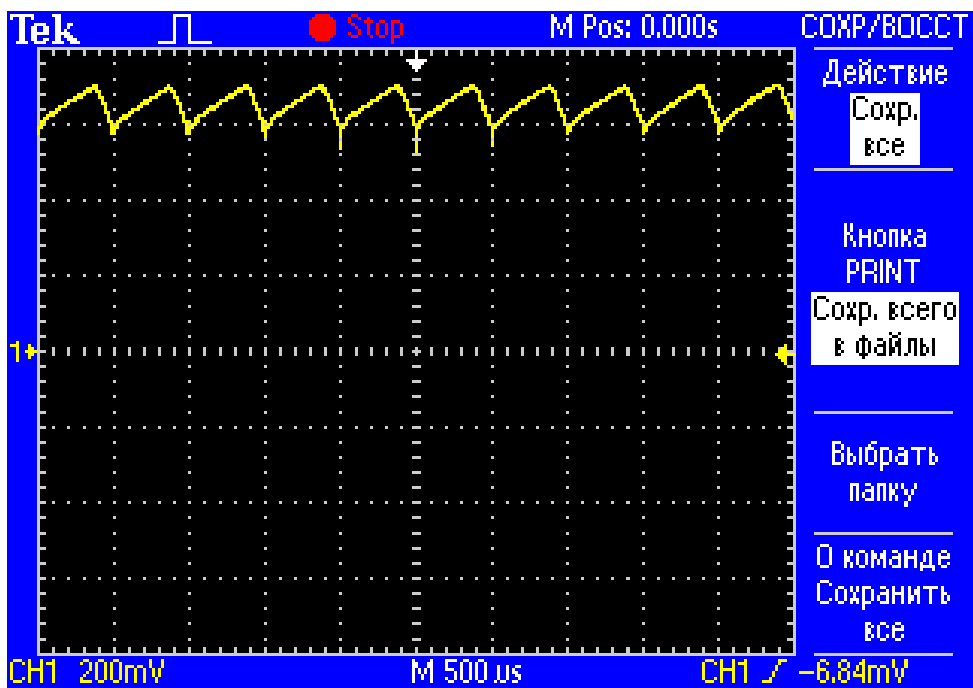
Рисунок 4.8 - Процес проведення випробування

На рис 4.9 представлені експериментальні осцилограми випрямленого струму ротора. З осцилограм було встановлено, що пульсації струму ротора при частоті модуляції ключа 2кГц на 1-й позиції контролера складають 20%, та близько 8% на 2-й позиції контролера. Величина оптимальної модуляції визначалася за методикою, викладеною в [77].

На рис 4.10 представлені осцилограми режимів рекуперації енергії через інвертор керований мережею (ІКМ). Пульсації струму з частотою 300Гц обумовлені роботою мостової схеми інвертора. Амплітуда струму рекуперації



а)

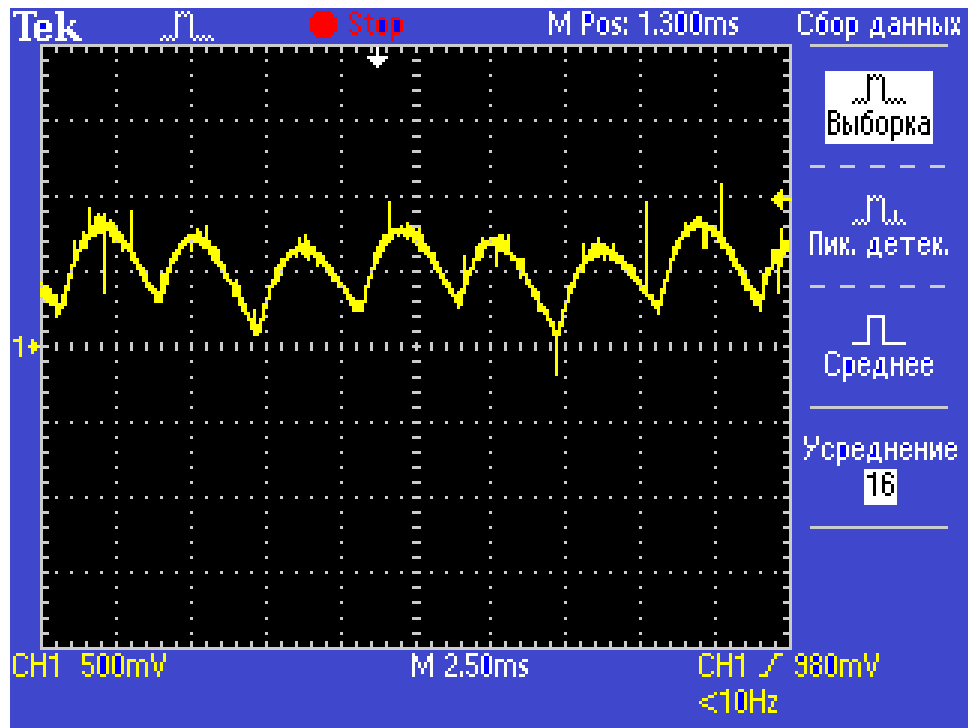


б)

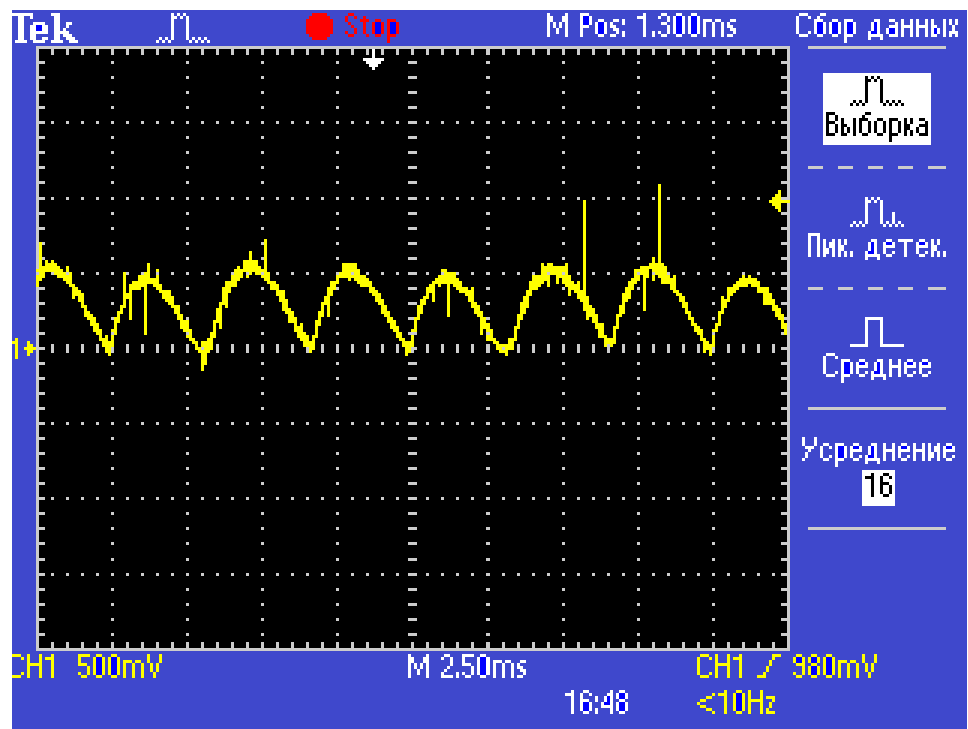
а) I позиція контролера (Масштаб: 1В - 30А);

б) II позиція контролера (Масштаб: 1В - 40А)

Рисунок 4.9 - Осцилограми випрямленого струму ротора АДФР типу МТН-412



а)



б)

а) I позиція контролера (Масштаб: 1В - 50А);

б) II позиція контролера (Масштаб: 1В - 50А)

Рисунок 4.10. Осцилограми струму рекуперації перетворювача

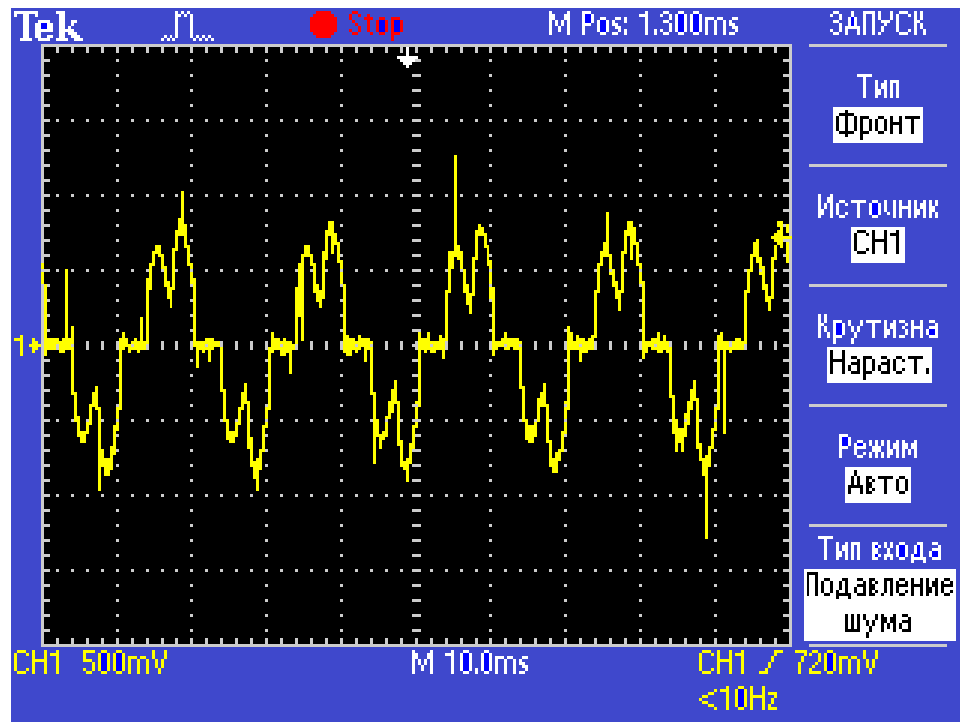
менше випрямленого струму ротора, що пояснюється принципом роботи імпульсного перетворювача ІППН. На 2-й позиції  $P_T = P_n S$ , зі зменшенням ковзання при постійній напрузі інвертування зменшується коефіцієнт трансформації струму пропорційно ковзанню двигуна.

Осцилограма фазного струму інвертора представлена на рис 4.11. Форма струму практично повторює форму струму, що інвертується. На рис. 4.12 представлені осцилограми фазного струму ротора на різних позиціях контролера. Форми струму повністю відповідають формам струмів при моделюванні (рис. 4.13) та підтверджують прийняті допущення при аналітичному дослідженні.

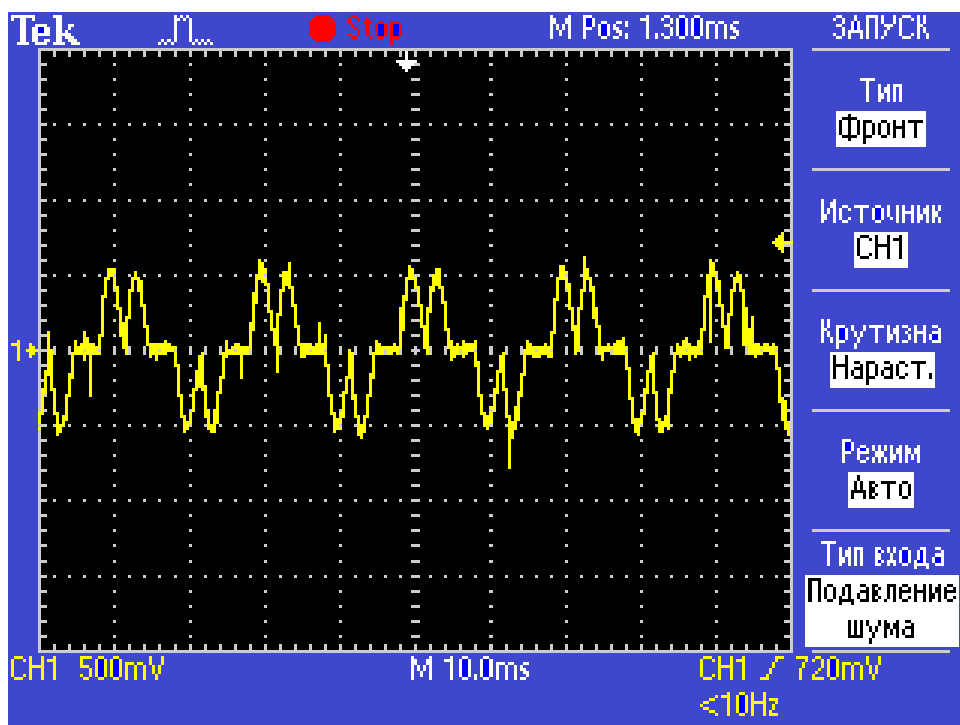
Перевірка роботи електроприводу узгодженого обертання проводилася на мостовому крані 2П30/5 ЗАТ № 338 ПАТ «Запоріжкран», в якості приводу механізму переміщення крана. Перетворювач МПЧ-ТТП-160-380-50 УХЛ4 використовувався для двигунів МТН-211-6 потужністю по 7,5 кВт кожен при ПВ 40%,  $\cos\varphi=0,7$ . Схема перетворювача, представлена на рис 4.1. Опір для режиму противмикання відсутній. Позиція контролера І забезпечувала швидкість обертання 10% від номінальної. Керування контролером проводиться машиністом крана. Друга позиція контролера, відповідала роботі на природній характеристиці. Результати випробувань оформлені протоколом випробувань (додаток А). У табл. 4.2 наведені основні виміри втрат потужності. Вимірювання потужності і струмів виконувалось комплектом К-50.

Таблиця 4.2. – Результати експерименту на крані 2П30/5

Позиція контролера	Електропровід з релейно-контакторним керуванням крану 2П30/5					
	$U_{\phi}, \text{В}$	$P_{\Sigma}, \text{Вт.}$	$I_{\phi\Sigma}, \text{А}$	$S_{\phi\Sigma}, \text{ВА}$	$\cos\varphi, \text{о. е.}$	Відношення $P_{\Sigma}, \text{о. е.}$
І	230	3000	43	9890	0,304	
ІІ	230	2800	40	9200	0,304	
	Електропровід з МПЧ-ТТП-160-380-50-УХЛ4					
І	230	1400	28	8700	0,16	2,14
ІІ	230	3000	43	9200	0,326	0,933



а)

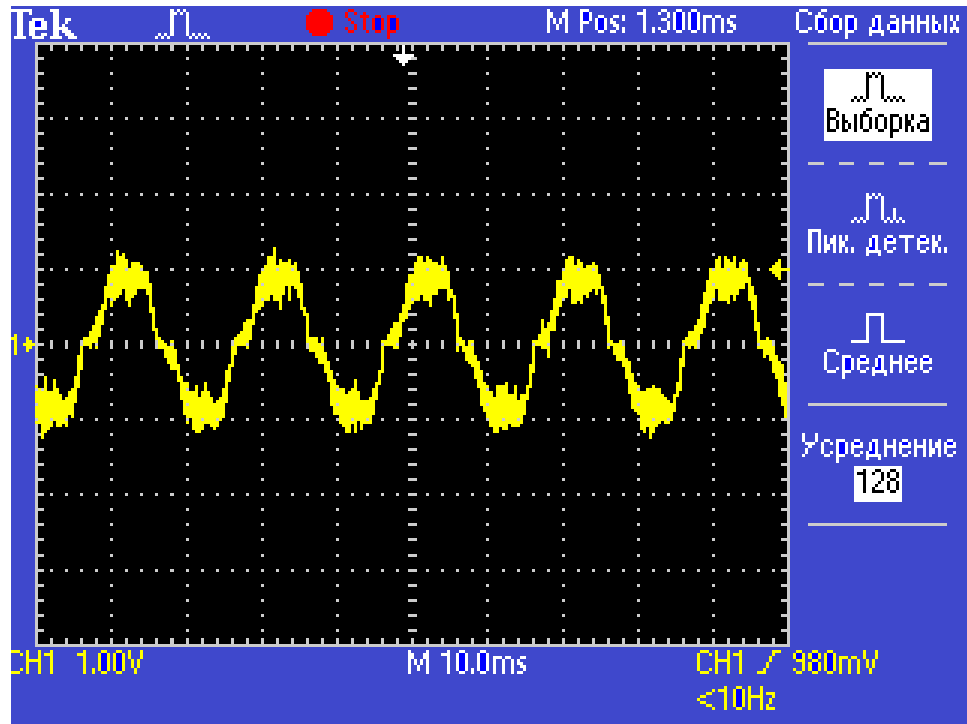


б)

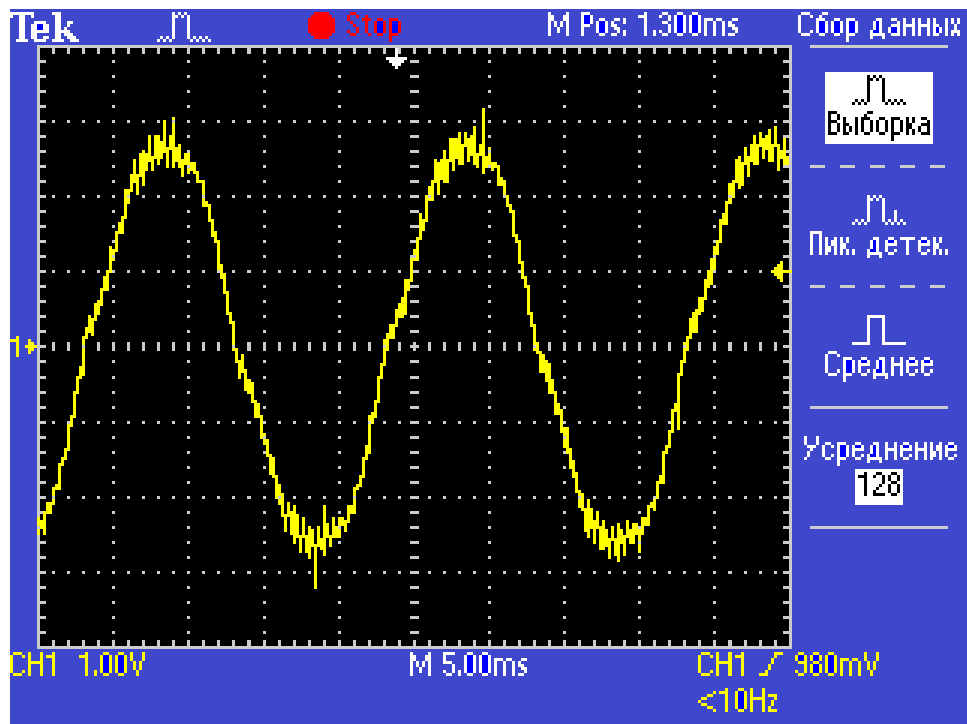
а) I позиція контролера (Масштаб: 1В – 50А);

б) II позиція контролера (Масштаб: 1В – 50А).

Рисунок 4.11 – Осцилограми фазного (вихідного) струму інвертора перетворювача



а)

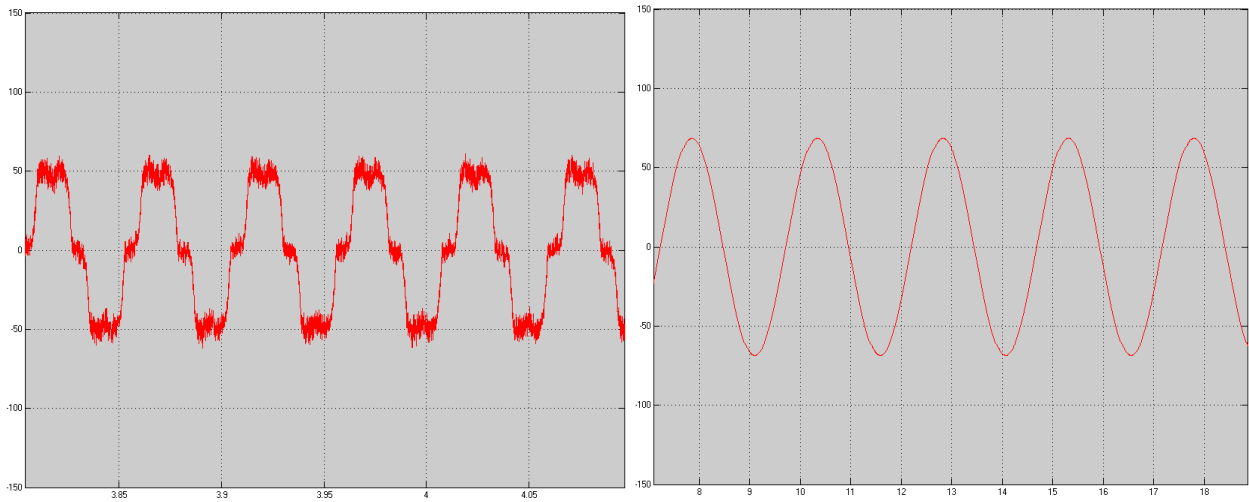


б)

а) I позиция контролера (Масштаб: 1В - 50А);

б) II позиция контролера (Масштаб: 1В - 50А).

Рисунок 4.12 - Осцилограмми фазного струму ротора АД типу МТН-412-6



а) I позиція контролера;

б) II позиція контролера.

Рисунок 4.13 – Осцилограми фазного струму ротора АД типу МТН-412-6 (моделювання)

Аналіз результатів табл. 4.2. показує, що втрати активної потужності при роботі на проміжній частоті обертання зменшуються для даного режиму в 2,14 рази. Повна споживана потужність знижується в 1,17 рази, при зниженні  $\cos\varphi$  практично в 2 рази. Останнє пояснюється великим струмом холостого ходу і наявністю реактивної складової струму в ВМІ при рекуперації енергії ковзання в мережу при зменшенні активної складової АДФР.

При роботі на II позиції споживана активна потужність зростає за рахунок втрат в єдиному роторному колі з закorchеним ключем випрямлячів. Коефіцієнт корисної дії підвищується до рівня  $0,933\eta_{\text{дв}}$  у порівнянні зі схемою з релейно-контакторним керуванням. Споживана реактивна потужність залишається практично незмінною, так як ІКМ не генерує струму в мережу. Коефіцієнт потужності дещо зростає за рахунок збільшення активних втрат.

При роботі 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 при русі відчувається фізично, що відзначено машиністом крана.

Таким чином, експериментальна перевірка показала ефективність і працездатність досліджуваного технічного рішення, яке використано при створенні електроприводу для узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, типу МПЧ-ТТП-160-380-50 УХЛ4.

#### 4.5 Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності електроприводу узгодженого обертання

При дослідженні виявлено, ряд недоліків запропонованої системи електроприводу. Один з основний - це підвищений неузгодженості частот обертання в режимах пуску і гальмування, яке збільшується в 2÷4 рази в порівнянні з неузгодженістю в сталому режимі. Для усунення зазначеного недоліку пропонується введення індивідуальних ключів для обмеження струму кожного двигуна в залежності від рівня неузгодженості частот обертання. Схема включення представлена на рис. 4.14. Осцилограми неузгодженості швидкостей при роботі електропривода з двома ключами наведені на рис. 3.17.

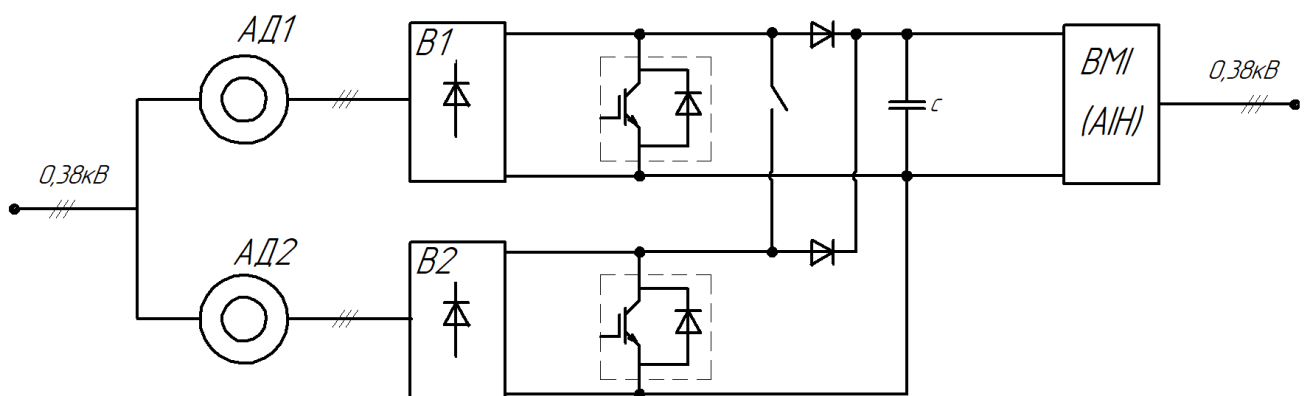


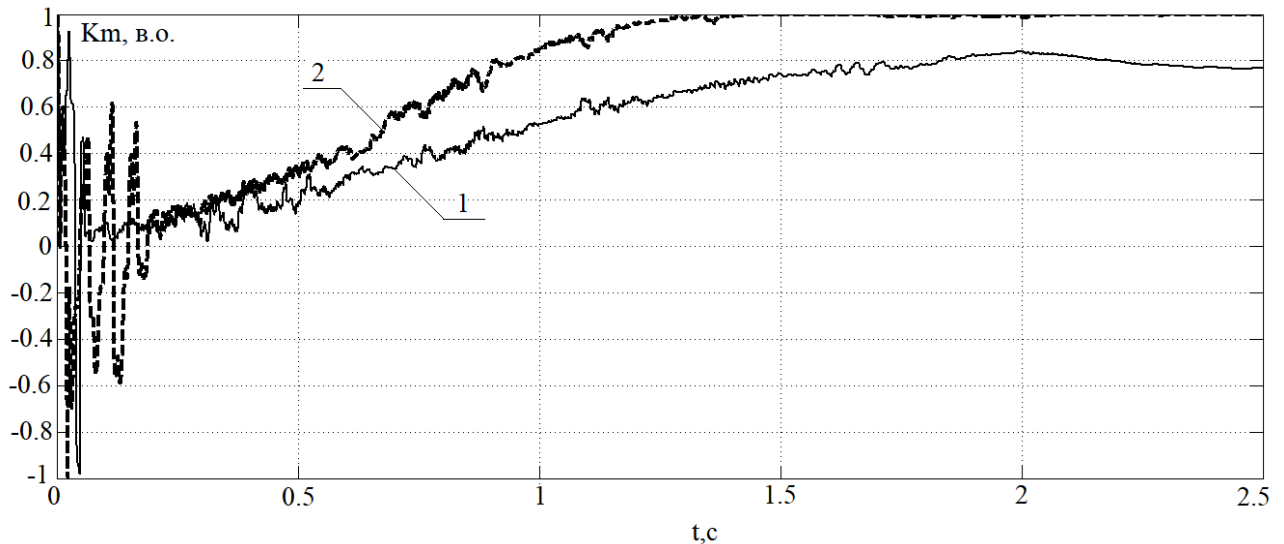
Рисунок 4.14 - Схема включення індивідуальних ключів для кожного випрямляча



Для забезпечення умов самосинхронізації, випрямлячі ротора в сталому режимі повинні бути закороченими додатковим комутатором. При цьому зростає можливість розширення діапазону роботи електроприводу при отриманні проміжних частот обертання. В цьому режимі електропривод принципово відрізняється від схем електроприводу з ІЄП, де реалізація таких режимів неможлива. Другим недоліком схеми є наявність інвертора керованого мережею, який викликає збільшення реактивної потужності приводу в перехідних режимах роботи електроприводу. Крім того, потрібна наявність пристрою захисту від зриву інвертора. Усунення зазначених недоліків можливо заміною інвертора керованого мережею на автономний інвертор напруги (АІН). Наявність АІН призведе до деякого подорожчання в порівнянні з інвертором керованого мережею, проте можливо забезпечити зниження споживання реактивної потужності електроприводів в цілому. В [113] показано можливість використання АІН синхронізованих з мережею на кут  $\cos(-\beta)$ , де  $\beta = \arctg \varphi_n$ .

На рис. 4.15 наведено порівняльну осцилограму пуску електроприводу узгодженого обертання з АІН та інвертором керованого мережею з постійним кутом випередження 30 ел. град. по відношенні до напруги мережі.

Аналіз осцилограм показує, що при простому способі керування АІН можливе підвищення коефіцієнта потужності до  $\cos\varphi=1$ , і часткового підвищення коефіцієнта потужності в режимі пуску. Це досягається частковою компенсацією реактивної потужності під час пуску. Зазначені рекомендації прийняті до реалізації ТОВ «НДІ Перетворювач» м. Запоріжжя (див. додаток Б).



- 1 - робота електроприводу з інвертором керованою мережею при постійному максимальному куті інвертування ( $\beta=30$  ел. град.);
- 2 - робота електроприводу з автономним інвертором напруги з синхронізацією з мережею при  $\beta=-\arctg\varphi_n$ ;

Рисунок 4.15 - Коефіцієнт потужності електроприводу в динамічному і сталому режимах роботи при використанні інвертора керованою мережею та автономного інвертора напруги

#### 4.6. Висновки до четвертого розділу

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

Розглянуто особливості реалізації режиму гальмування противмиканням електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів. Показана необхідність у застосуванні в схемі електроприводу узгодженого обертання

струмообмежуючого резистора для обмеження негативних ефектів (перенапруга та ударна складова струму ротора) в момент реверсу та в процесі гальмування. Врахування струмообмежуючого резистора дозволяє вилучити негативні ефекти, що тривають в перехідних процесах в момент реверсу при реалізації режиму противмиканням, а також зменшити рівень неузгодженість швидкостей АДФР в системі електроприводу з 4,5% до 0,89%.

Розглянуті особливості застосування електропривода узгодженого обертання для механізму переміщення візка мостового підйомного крана. Показана доцільність установки випрямляча (перетворювача) електроприводу на візку, що дозволяє збільшити коефіцієнт посилення імпульсно-струмового перетворювача та підвищити ККД електроприводу.

Проведена порівняльна оцінка техніко-економічних та експлуатаційних показників електропривода узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів з сучасними електроприводами узгодженого обертання (частотно-регульованих, та з джерелом струму на базі ІСП). Показано, що завдяки універсальності, малими масо-габаритними показниками і більш високою ефективністю системи електроприводу узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів, є конкурентоспроможною альтернативою частотно-регульованому електроприводу.

Показано шляхи поліпшення узгодженості обертання ротора двигунів шляхом незалежного керування АДФР в системі електроприводу узгодженого обертання зі збереженням самосинхронізуючих властивостей, та можливістю підвищення коефіцієнта потужності електроприводу з використанням АІН з випереджальним кутом керування, замість інвертора керованого мережею, що сприяє підвищенню надійності електропривода.

Запропоноване схемне рішення електроприводу узгодженого обертання і схеми його захисту використані ТОВ НДІ «Перетворювач» під час розробки електропривода узгодженого обертання типу МПЧ-ТТП-150-380 УХЛ4.2, який

призначено для підйомного крана вантажністю 60т. Алчевського металургійного комбінату.

## 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 електроприводу 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 противмиканням, 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 «Запоріжкран» підтверджують працездатність і ефективність запропонованого технічного рішення та достовірність отриманих теоретичних досліджень.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Баталов Н.М. Краново-металлургические электродвигатели [Текст]/ Н.М. Баталов, В.А. Белый, А.Б. Иоффе и др; - М.: Энергии, 1967. 238 с.
2. Крановое электрооборудование [Текст]: Справочник/ Ю.В. Алексеев, А.П. Богословский, Е.М. Певзнер и др.; под общ. ред. А.А. Рабиновича; - М.: Энергия, 1979 - 240 с.
3. Краново-металлургическое электрооборудование [Текст]/ А.И. Бертинова, Л.А. Капустина и др.; под общ. ред. А.И. Бертинова. - М.: Государственное Энергетическое Издательство, 1961. — 247 с.
4. Ключев В.И. Теория электропривода [Текст]/ В.И. Ключев;—М.: Энергоатомиздат, 1985.-560с.
5. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе [Текст] / С.Н. Вешеневский; М.: Энергия, 1977,-431 с.
6. Герасимьяк Р.П. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением [Текст]/ Р.П. Герасимьяк, В.Д. Лещев, Н.С. Путилин; - Киев.: Техника, 1984. - 150 с.
7. Герасимьяк Р.П. Электроприводы крановых механизмов [Текст]/ Р.П. Герасимьяк, В.А. Параил; - М.: Энергия, 1970. - 136 с.
8. Герасимьяк Р.П. Тиристорный электропривод для кранов [Текст]/ Р.П. Герасимьяк; - М.: Энергия, 1978.- 176 с.
9. Автоматизированный электропривод промышленных установок [Текст]/ Г. Б. Онищенко, М. И. Аксенов, В. П. Грехов и др.; под общ. ред. Онищенко Г.Б. -М.: РАСХН, 2001 -520 с.
10. Волков И. В. Системы стабилизированного тока для автоматизированных электроприводов [Текст] / И. В. Волков, В. П. Стяжкин, С. В. Подольный // Пр. ін-ту електродинаміки НАН України. – 2009. – Вип. 23. – С. 64-72.



11. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод [Текст]: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений/ И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; под общ. ред. И.Я. Браславского.- М.: Издательский центр «Академия», 2004.-256 с.

12. Драчев Г.И. Теория электропривода [Текст]: учебное пособие к курсовому проектированию для студентов заочного обучения/ Г.И. Драчев; — Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002,- 137 с.

13. Загорский А.Е. Регулируемые электрические машины переменного тока [Текст]/ А.Е. Загорский; — М.: Энергоатомиздат, 1992. - 287 с.

14. Ключев В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов [Текст]/ В.И. Ключев, В.М. Терехов; - М.: Энергия 1980. -360 с.

15. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией [Текст] / Г.Г. Пивняк, А. В. Волков - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет – 2006. - 470 с

16. Коцур М. И. Особенности режимов работы модифицированной системы импульсного регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андриенко, И. М. Коцур, // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – №3(19) – С. 163 – 165.

17. Коцур М. И. Сравнительный анализ энергоэффективности систем регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, П. Д. Андриенко, И. М. Коцур // Ползуновский вестник – 2013 – №4-2. – С.114-120.

18. Палис Ф. Анализ поперечных колебаний мостового крана при изменении положения тележки [Текст] / Ф. Палис, О. И. Толочко, Д. В. Бажутин // Проблемы автоматизованного электропривода. Теория и практика –Х: НТУ «ХПИ» - 2013 - №36(1009), С.36-39.

19. Amin A. Induction Motors. Analysis and Torque Control [Text] / A. Amin, D. Bahram , Series: Power Systems., 2001, XV, 262 p., Hardcover.

20. Terede G. Speed, flux and torque estimation of induction motor drives with adaptive system model [Text] / G. Terede, R. Belmans // International conference on Power electronics, machines and drives, Bath, UK, April 16-18, 2002; pp. 498-503.

21. Герасимьяк Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем [Текст] / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещев – Одесса, СМИСЛ, 2008-192с.

22. Busschots F., Renier B., Belmans R. Direct torque control: application to crane drives [Text] / F. Busschots, B. Renier, R. Belmans // 7th European conference on power electronics and applications EPE, Trondheim, Norway, September 8-10, 1997; pp. 4579-4584.

23. Рапутов Б.М. Электрооборудование кранов металлургических предприятий / Б.М. Рапутов. – М: Металлургия. - 1990. – 272с.

24. Дорофеев А.А, Разработка и исследование систем электроприводов, обеспечивающих бесперекусное движение мостовых кранов / А.А. Дорофеев. Автореферат на соискание степени кандидата техн. наук. - Липецк, ЛГТУ. – 2010

25. Макурин А.В. Динамика продольного перемещения мостового крана с учётом упругости элементов конструкции / А.В. Макурин, Д.И. Морозов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2010. - №3(75). С. 167-169.

26. Яуре А.Г. Построение асинхронных многодвигательных электроприводов механизмов передвижения кранов с электрической связью по цепи выпрямленного тока ротора / А.Г. Яуре, Е.М. Певзнер, В.Н. Тищенко // Електротехнічна промисленість. – Серія: Електроприводи. – 1981. – Вып. 4(93). – С. 12-15.

27. Тищенко В.Н. Современное состояние электроприводов грузоподъёмных механизмов / В.Н. Тищенко, В.М. Колотило // Вісник НТУ ХП. Тем. випуск 45. - 2005. - С. 301-306.

28. Шамардина В.Н. Многодвигательный асинхронный электропривод грузоподъёмных механизмов с улучшенными динамическими и статическими характеристиками. Автореферат диссерт. к. т. н. ХПИ, 1991. - 16 с.

29. Толочко О. І. Розробка моделей складних електромеханічних систем в середовищі пакета matlab з використанням блоків додатку віртуального

фізичного моделювання simscape / О.І. Толочко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2015. – № 12 (1121). – С. 118-123.

30. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением [Текст]/ И.Я. Браславский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. -224 с.

31. Тищенко В.Н. Современное состояние электроприводов грузоподъёмных механизмов / В.Н. Тищенко, В.М. Колотило // Вісник НТУ ХПІ. Тем. випуск 45. - 2005. - С. 301-306.

32. Волков И.В. Системы стабилизированного тока для автоматизированных электроприводов / И.В. Волков, В.П. Стяжкин, С.В. Подольный // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. — К.: ІЕД НАНУ, 2009. — Вип 23. — С. 64-71.

33. Калюжний С. В. Електромеханічні системи узгодженого обертання з живленням від струмопараметричного вентильного перетворювача : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / С. В. Калюжний; МОНМС України, Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т". - Х., 2012. - 20 с.

34. Волков И.В. Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях / И.В. Волков, В.Н. Исаков. - М., Радиосвязь. - 1991. С. 210.

35. Шевченко И.С. Регулируемый источник тока для электроприводов / И.С. Шевченко, Д.И. Морозов, Н.И. Андреев, С.В. Калюжний // Електромеханічні системи та автоматизація. Вісник КДУ ім. М. Остроградського. Вип №3(62). - С. 53-56.

36. Онищенко Г.Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г.Б. Онищенко, И.Л. Локтева. – М.: Энергия, - 1979, 200 с.

37. Пат. 64126 Україна, МПК H02P 27/05(2006.01). Пристрій імпульсного керування процесами перетворення енергії в асинхронному двигуні з фазним ротором [Електронний ресурс] / П.Д. Андрієнко, М.І. Коцур, І.М. Коцур; заявл. 22.04.11; опубл.25.10.2011 , Бюл. №20. – Режим доступу: <http://www.uipv.org>.

38. Бродовский В.Н. Электроприводы с частотно-токовым управлением / В.Н. Бродский, Е.С. Иванов. М.: Энергия. -1974. - С. 168.
39. Коцур, М.И. Повышение энергоэффективности схемы импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / М. И. Коцур // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. –2011. – №2(14) – С. 86-89.
40. Коцур, М. И. Особенности выбора балластного сопротивления для схемы импульсного регулирования в цепи выпрямленного тока ротора [Текст] / М. И. Коцур // Електротехнічні та комп'ютерні системи. –2011 – №4(80). – С. 56 – 61.
41. Дубенецкий А.С. Многодвигательная электромеханическая система литейного крана (опыт разработки, наладки и внедрения) / А. С. Дубенецкий, Л. Г. Лимонов, С. В. Потапов // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2013. – № 36 (1009). – С. 171-174.
42. Шевченко И.С. АВК на базе регулируемого источника тока / И.С. Шевченко, И.А. Корнук, Ю.П. Самгелев, Ю.В. Скурятин // Збірник наукових праць Східного національного університета ім. Володимира Даля. Технічні науки. - Луганська, 2004. - С. 143-149.
43. Гуркушин А. В. Комбинированные методы модернизации и наладки многодвигательных электроприводов в условиях действующего производства / А.В, Гуркушин, Г,А. Сивяков // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск науково-виробничого журналу "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. - Кременчук: КрНУ, 2012. - Вип. 3/2012(19). - С. 607-609.
44. Радимов С.Н. Потенция энергосбережения электроприводов грузовых подъёмных машин / С.Н. Радимов, К.А. Аниченко // Електротехнічні і комп'ютерні системи. – К., Техніка. – 2006. – Вип. 2956). – С. 61.-62.
45. Макурин А. В. Практическая реализация системы синхронного вращения приводов перемещения мостового крана / А. В. Макурин // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Проблемы

автоматизированного электропривода. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2013. – № 36 (1009). – С. 217-218.

46. Krishnan, R. Electric motor drives modeling analysis and control [Text] / R. Krishnan; – London: Prentice Hall, 2001. – 360 p.

47. Hilmi, A. High chopper frequency drive of wound rotor induction motor with a resistively loaded rotor chopper [Text] / A. Hilmi // IEEE: Transactions on Industrial Electronics. - 2006. Vol. 2. – No. 8. – P. 100–108.

48. Akpinar, E. Modeling and performance of slip energy recovery induction Motor drives [Text] / E. Akpinar // IEEE: Transaction on Energy Conversion. 1990. – Vol. 5. – No.1. – P. 203–210.

49. Carvalho, A. MatLab in Model-Based design for power electronics systems [Text] / Adriano Carvalho, Maria Teresa Outeiro // The works: Institute of Systems and Robotics, 2009. – Vol. 1 – No 2 – P. 71 – 111.

50. Петров Л.П. Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением [Текст] / Л.П. Петров; -М.: Энергия, 1977, -200 с.

51. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие / С. Г. Герман-Галкин; –СПб.: Корона принт. – 2001. - 320 с.

52. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб. Питер, 2008. – 288 с.

53. Кондрашов, В. Е. MATLAB как система программирования научно-технических расчетов [Текст] / В. Е. Кондрашов, С. Б. Королев. – М.: Мир, 2002. – 352 с.

54. Лозинський, А. О. Розв'язання задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB [Текст]: Навчальний посібник / А. О. Лозинський, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – Л.: Магнолія, 2007. – 215 с.

55. Бабенко, К. И. Основы численного анализа [Текст] / К. И. Бабенко. – М.: Наука, 1986. – 374 с.

56. Бахвалов, Н.С. Численные методы [Текст] / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 632 с.

57. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст]: учебник для вузов / под общей ред. Н. Д. Есупова и К. А. Пупкова. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 784 с.

58. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 831 с.

59. Савіч С.П. Альтернативні електроприводи змінного струму кранових механізмів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / С. П. Савич; Одес. нац. політехн. ун-т. - О., 2013. - 20 с

60. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: Уч. пособие / В.С. Петрушин. - О.: Наука и техника. - 2006. - С. 320.

61. Пат. Україна, 112044, МПК H02P5/74 (2006.01). Дводвигуновий 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).

62. Пат. Україна, 105994, МПК H02P5/74 (2006.01). Дводвигуновий 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)

63. Загорский А.Е. Регулируемые электрические машины переменного тока [Текст]/ А.Е. Загорский; — М.: Энергоатомиздат, 1992. - 287 с.

64. Беркович Е.И. Полупроводниковые выпрямители / Е.И. Беркович, Ф.И. Ковалёв, Г.П. Мостковая и др. Под ред. Ф.И. Ковалёва и Г.П. Мостковой. - М.: Энергия, 1978. - С 448.

65. Соколов М.М. Асинхронный электропривод с импульсным управлением в цепи выпрямленного тока ротора. / М.М. Соколов, П.Е. Данилов. - М.: Энергия. - 1972. - С. 72.

66. Шавьолкін О.О., Наливайко О.М. Перетворювальна техніка. / О.О. Шавьолкін, О.М. Наливайко / Під ред.. О.О. Шавьолкіна. – Донецьк – Краматорська: ДДМА. – 208. – С. 329.

67. Kotsur, M.I. Converter for frequency-current slip-power recovery scheme [Text] / M.I. Kotsur, P.D. Andrienko, I. M. Kotsur, O.V Bliznyakov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu – 2017. - №4 – Р. 49-54.

68. 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.

69. Фигаро, Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока [Текст] / Б.И. Фигаро, Л.Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363 с.

70. Ребедак О.А. Особенности работы многодвигательных электроприводов кранов металлургических электрических литейных / О. А. Ребедак, В.П. Верешко, С.А. Бакач // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 12 (1121). – С. 190-194.

71. Сандлер, А. С. Динамика каскадных асинхронных электроприводов [Текст] / А. С. Сандлер, Л. М. Тарасенко; - М.: Энергия, 1977. – 200 с.

72. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода [Текст] / М. Г. Чиликин, В. И. Ключев, А. С. Сандлер; - М.: Энергия, 1979. –616 с.

73. Zimmermann, P. Super synchronous static converter cascade [Text] / P. Zimmermann // IEEE: Trans. on Energy Conversion. –1976. – Vol. 4. – Р. 164-166.

74. Papathanasiou, S. Commutation angle analysis of slip energy recovery drive [Text] / S. A. Papathanasiou, M. P. Papadoupoulos // IEEE: Trans. On Energy Conversion. – 1998. – Vol. 13. – No. 1. – P. 21–26.

75. Krishnan, R. Electric Motor Drives, Modeling and Analysis [Text] / R. Krishnan // IEEE: Trans. on Power Electronics. – 2006. - №6. – P. 410–417.

76. Андриенко Д. С. Преобразователь для электропривода согласованного вращения асинхронных двигателей с фазным ротором. [Текст] / Д. С. Андриенко, П. Д. Андриенко, М. И. Коцур, И. М. Коцур // Энергосбережение, Энергетика, Энергоаудит – 2014 – №9(128), Т.2. – С. 37 – 42.

77. Коцур, М. И. Определение оптимальной частоты коммутации вентиля преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада [Текст] / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. А. Андриенко, Д. С. Андриенко // Электротехника та електроенергетика – 2016. – №1– С. 5 – 11.

78. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] / Л.А. Бессонов; - М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.

79. Глух Е.М. Защита полупроводниковых преобразователей / Е.М. Глух, В.Е. Зеленов // М., Энергоиздат. - 1982. - С. 152.

80. Бутаев Ф.И. Вентильный электропривод / Ф.И. Бутаев, Е.Л. Етигед // Госэнергоиздат. М.-Л. - 1957. - С. 248.

81. Бедфорд Б. Теория автономных инверторов / Б. Бедфорд, Р. Хофт // пер. с английского. - М., Энергия, 1965. - С. 280.

82. Вольдек А.И. Электрические машины [Текст]: учеб. Пособие для вузов / А.И. Вольдек; - Л.: Энергия, 1978-832 с.

83. Копылов И.П. Электрические машины [Текст]/ И.П. Копылов; -М.: Логос. 2000. - 607 с.

84. Проектирование электрических машин [Текст]: учеб. для вузов.— В 2-х кн.: кн. 1/ И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под общ. ред. И.П. Копылова -М.: Энергоатомиздат, 1993.-464 с.

85. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин [Текст]/ И.П. Копылов; - М.: Высшая школа, 2001. - 327 с.



86. Моделирование систем электропривода на ЦВМ [Текст]: Учеб. пособие по курсу: Применение вычисл. техники в задачах электропривода / В.В. Лыготчиков, П.Е. Данилов, В.И. Лабовский, и др.; под общ. ред. В.В. Лыготчикова; Моск. энерг. ин-т. - М.: МЭИ, 1993, - 120 с.

87. Масандилов Л.Б. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей [Текст] / Л.Б. Масандилов, В.В. Москаленко; 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергия, 1978, - 96 с.

88. Петров Л.П. Моделирование асинхронных электроприводов с тиристорным управлением [Текст] / Л.П. Петров; -М.: Энергия, 1977, -200 с.

89. Трещев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока [Текст]/ И.И. Трещев; -Л.: Энергия, 1980. – 344 с.

90. Abreu, J.P. Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost [Text] \ J.P Abreu, A.E. Emanuel // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2002. — №1. — P. 12-20.

91. Chalmers B.J. Optimum supply conditions for an induction motor [Text] / B.J. Chalmers, B.R. Sarkar // «Int. J. Elec. Eng. Educ.», 1970, 8, № 2, 141-143.

92. Вареник Е.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным [Текст]/ Е.А. Вареник, М.М. Федоров, В.Ф. Денник // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. – Донецк: ООО „Юго-Восток Лтд”, 2006. – С. 123-127.

93. Kotsur M. Impulse-controlled system for matched rotation of induction motors [Text] / M. Kotsur, P. Andrienko, O. Bliznyakov, A. Andrienko, D. Andrienko // Electrotechnic and Computer Systems – 2015. - № 19 (95). – С. 14 – 17.

94. 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](https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336208)

95. Феоктистов, В.П. Тиристорные импульсные преобразователи [Текст] / В.П. Феоктистов, О.Г. Чаусов; - М.: Информэлектро, 1985. – 55с.
96. Шикуть, Э.В. Импульсный регулируемый электропривод с фазными электродвигателями [Текст] / Э.В. Шикуть, М.И. Крайцберг, П.А. Фукс; - М.: Энергия, 1972. - 104 с.
97. Руденко, В.С. Основы преобразовательной техники. [Текст] / В. С Руденко, Сенько В. И., Чиженко И. М; - М.: Высшая школа, 1980. - 424 с.
98. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники [Текст]: Учебное пособие / Г.С. Зиновьев. - Изд. 2-е испр. и доп. – Новосибирск: НГТУ, 2003. - 644 с.
99. Гончаров, Ю.П. Перетворювальна техніка [Текст] / Ю.П. Гончаров, О.В. Будьонний, В.Г. Морозов, М.В. Панасенко, В.Я. Ромашко, В С. Руденко; під ред. В.С. Руденка; - Харків: Фоліо, 2000. - 360 с.
100. Franz, P. Digital simulation of a complete subsynchronous converter cascade with 6/12 pulse feedback system [Text] / P. Franz, A. Mayer // IEEE: Transactions on Power Apparatus and System. – 1981. – Vol. 100. – No 12. – P. 4948 – 4957.
101. Tunyasrirut S. DSP based modified slip energy recovery drive using a 12-pulse converter and shunt chopper for speed control system of a wound rotor induction motor [Text] / S. Tunyasrirut // Electric Power System Research. – 2008. – Vol. 78. – No. 6. – P. 861-872.
102. Grunbaum, R. FACTS and HVDC light for power system [Text] / R. Grunbaum, B. Halvarsson, A. Wilkwilczynski // Interconnections Power Delivery: International Technical Conf., 8<sup>th</sup> September 1999: abstracts. - Madrid, – 1999. – P. 20-28.
103. Kumar, A. Performance analysis of a microcontroller based slip power recovery drive [Text] / A. Kumar, S. K. Aggarwal, L. M. Saini // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2011. – Vol. 3. – No. 3. – P. 25 – 35.
104. Dixon, J. W. Control system for a three-phase active power filter which simultaneously compensates power factor and unbalanced loads [Text]./ W. Juan, J. G.

Dixon, L. Moran // IEEE: Transactions on Industrial Electronics. – 1995. – Vol. 42. – No. 6. – P. 636–641.

105. Miller, T. J. Reactive power Control in Electric Systems. [Text] / T. J. Miller; – London: John Willey & Sons, 1982. – 550 p.

106. Torseng, S. Shunt-connected reactors and capacitors controlled by thyristors [Text] / S. Torseng. // IEEE: Proc. – 1981. – Part C. – Vol. 128. – No. 6. – P. 366–373.

107. Frank, H. Thyristor-controlled shunt compensation in power networks [Text] / H. Frank, S. Ivner // ASEA Journal. – 1981. – Vol. 54. – No 5 – P. 121–127.

108. Datta, R. Decoupled control of active and reactive power for a grid-connected doubly-fed wound rotor induction machine without position sensors [Text] / R. Datta, V. T. Ranganathan // IEEE: Transaction on Energy Conversion. – 1999. – Vo. 2 – No 5 – P. 2623–2630.

109. Dubey, G.K. Power semiconductor controlled drives [Text] / G.K. Dubey; - London: PHI. Edition, 2008. – 440 p.

110. Carvalho, A. MatLab in Model-Based design for power electronics systems [Text] / Adriano Carvalho, Maria Teresa Outeiro // The works: Institute of Systems and Robotics, 2009. – Vol. 1 – No 2 – P. 71 – 111.

111. 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.

112. 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](https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248960)

113. Андриенко П.Д. Энергоэффективный крановый электропривод / П.Д. Андриенко, А.А. Андриенко Д.С. Андриенко В. П. Метельський, О.В. Немькина, // Вісник НТУ "ХПІ". - 2017. - №27(1249). - С. 254-257.

114. 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)

115. Doradla, S. New slip power recovery scheme with improved supply power factor [Text] / S.R. Doradla, S. Chakravorty, K.E. Hole // IEEE: Trans on Power Electronics. – 1988. – Vol. 3. – No. 2. – P. 200-207.

116. Leonharn, W. Control of electrical drives [Text] / W. Leonharn // IEEE: Trans. on Energy Conversion. – 1990. – Vol. 5. – No. 1. – 1985. – P. 245-259.

117. Yasuhiko, D. Application of modern control techniques to motor control [Text] // D. Yasuhiko / IEEE: Trans on Power Electronics. – 2001. – Vol. 16. – No. 3. – P. 410–417.

118. Bimal, K. Modern power electronics and ac drives [Text] / K. Bimal; – London: Prentice Hall, 2002. – 331 p.

119. Papathanassiou, S. A. State-space modeling and eigenvalue analysis of the slip energy recovery drive [Text] / S.A. Papathanassiou, M.P. Papadopoulos // IEEE: Proc-Electr. Power. – 1997. – Vol. 144. – No. 1. – P. 27 – 36.

120. Fan, L. A new energy recovery scheme for doubly fed variable speed induction motor drives [Text] / L. Fan, J. Sheng, T. A. Lipo // IEEE: Trans. on Power Electronics, 2001. – Vol. 10. – No. 2. – P. 301 – 304.

121. Cheung, K. Large-Scale Energy Storage Systems [Text] / K. Cheung, S. Cheung // Imperial College London. – 2002. –No. 4 (12). – P. 45 – 48.

122. Ping, J. Simulation of a new method in double closed loop for slip power recovery motor with chopper proceedings [Text] / J. Ping, W. Bingshu , Z. Junwei // IEEE: Trans. on Power Electronics.- 2009. – Vol. 1. – No. P. 6. – 66.

123. Lavi, A. Induction motor speed control with static inverter in the rotor [Text] / A. Lavi // IEEE: Transactions Power Application Systems. – 1966. – Vol. 85. – P. 76 – 84.

124. Zahawi, B. Electrical characteristics of alternative recovery convectors for slip-energy recovery drives [Text] / B. Zahawi // IEEE: Proceedings. – 1991. – Vol. 138. – P. 193–203.

125. Rao, N. Slip power recovery scheme employing a fully controlled converter with half-controlled characteristics [Text] / N. Rao // IEEE: Proceedings. - 1983. – Vol. 130. – №1. – P. 33–38.

126. Андриенко П.Д. Электромагнитная совместимость систем питания кранов с частотно-регулируемым приводом / П.Д. Андриенко, О.В. Немыкина Д.С. Андриенко // Електротехніка та електромеханіка. – 2016. - №4(2). - С. 109-112.

ДОДАТОК А  
ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ

СОГЛАСОВАНО

Гл. энергетик



Бублик В.И.

2015 г.



Ю.А.Андрианов

«15»

Мая

2015 г.

ПРОТОКОЛ № 1

от 15 мая 2015 г.

**испытаний многоканального преобразователя частоты  
МПК-ТТП-160-380-50 УХЛ4.2 ЄАВГ.435321.002**

**1 Объект испытаний**

Объектом испытаний является многоканальный преобразователь частоты МПК-ТТП-160-380-50 УХЛ4.2 изготовленный по комплекту документации ЄАВГ.435321.002, предназначенный для управления согласованным вращением двигателей механизма перемещения моста крана.

**2 Цель испытаний**

Целью испытаний является подтверждение работоспособности преобразователя при работе на реальную нагрузку, измерение активной и реактивной мощности при движении моста, снятие осциллограмм входного тока преобразователя.

**3 Объем испытаний**

Преобразователь подвергался испытаниям и проверкам в объеме «Программы испытаний электропривода согласованного вращения механизма передвижения моста», утвержденной первым зам. генерального директора П.Д.Андрienко.

**4 Методы испытаний**

Преобразователь подвергался испытаниям по стандартизованным методикам.

**5 Условия проведения испытаний**

5.1 Преобразователь подвергался испытаниям в нормальных климатических условиях по ГОСТ 15150-69. Испытания проводились на предприятии «Запорожжя» на кране мостовом электрическом 2П 30/5 зав. №338, рег. №53376, инв. № 5442. Преобразователь установлен в схеме управления двухдвигательным электроприводом перемещения моста крана.

Мощность двигателя 2x7,5 кВт.

5.2 Снятие энергетических характеристик механизма передвижения моста в стандартной комплектации крана.

Результаты измерений занесены в таблицу 1.

5.3 Снятие энергетических характеристик механизма передвижения моста с установленным электроприводом на базе преобразователя МПЧ-ТП-160-380-50 УХЛ 4.2. Результаты измерений приведены в таблице 2..

5.4 Испытания плавности хода, скорости перемещения и эргономичности управления механизма перемещения мостом крана.

5.5 Испытания режима торможения противовключением моста крана.

5.6. Испытания преобразователя в режимах реальной эксплуатации

### **6 Результаты испытаний**

Результаты испытаний приведены в таблице 1

*Таблица 1*

Позиция	$P_{\phi}$ , Вт	$I_{\phi}$ , А	$S_{\phi}$ , ВА	$U_{\phi}$ , В
I	3000	43	9890	230
IV	2800	40	9200	230

*Таблица 2*

Позиция	$P_{\phi}$ , Вт	$I_{\phi}$ , А	$S_{\phi}$ , ВА	$U_{\phi}$ , В
I	1400	38	8700	230
II	1500	40	9200	230
III	2100	41	9430	230
IV	3000	40	9200	230

### **Сравнительный анализ**

6.1 В режиме низких скоростей перемещения моста экономия активной электроэнергии составляет более 50 % по сравнению со стандартной комплектацией электропривода механизма перемещения моста крана.

6.2 При испытаниях отмечено более плавное перемещение моста крана.

6.3 Применение преобразователя позволяет обеспечить точную скорость перемещения моста крана.

6.3 При испытаниях режима торможения противовключением наблюдалась более плавная остановка моста, чем со стандартной комплектацией электропривода, а также отсутствие ударов и перекосов моста.

6.4 При эксплуатации отмечено более удобное управление краном, чем со стандартным электроприводом.



*7. Перечень приборов и оборудования, использованных при испытаниях*  
Комплект измерительный К505

Испытания провели:



А.Э.Леонов  
О.В.Набока  
А.Г.Кришталь  
П.Д.Андрienко



Рисунок А.1- Процес проведення випробування на мостовому крані 2П30/5 ЗАТ  
№ 338 ПАТ «Запоріжкран»

ДОДАТОК Б  
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Генеральний директор  
ТОВ «НДІ «Перетворювач», к.е.н.  
Андріанов Ю.О.  
\_\_\_\_\_ 2020р.



АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи

Андрієнка Данила Сергійовича

на тему: «Асинхронний електропривід узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів»

Цим підтверджую, що результати дисертаційної роботи Андрієнка Д.С. прийняті для використання в ТОВ «НДІ «Перетворювач» м. Запоріжжя при створенні перетворювача МПЧ-ТТП-150-380 УХЛЧ.2 для електроприводу узгодженого обертання двигунів переміщення мостового 60т крану Алчевського меткомбінату.

Найбільш суттєвими і практично цінними вважаємо наступні результати:

1. Дослідження схеми узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням електрично пов'язаних роторних випрямлячів асинхронних двигунів.
2. Аналіз статичних і динамічних властивостей кранових двигунів у схемах узгодженого обертання.
3. Аналіз порівняльних показників найбільш сучасних систем узгодженого обертання.

Запропонована схема узгодженого обертання реалізована при розробці схеми перетворювача частоти МПЧ-ТТП-150-380 УХЛЧ.2 для привода узгодженого обертання, як уніфікована для механізмів переміщення кранів різної вантажопідйомності.

Технічний директор  
ТОВ «НДІ «Перетворювач»

Директор з виробництва  
ТОВ «НДІ «Перетворювач», к.т.н.

Кришталь А.Г.

Немудрий І.Ю.



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з НР та МД  
НУ "Запорізька політехніка"  
д-р техн. наук, проф.

В. В. Наумик

підпис

ПІБ

« 15 » 12 2020 р.

### АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

"Асинхронний електропривід узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів"

« 15 » 12 2020 р.

м. Запоріжжя

Складено комісією у складі:

Голови професор каф. ЕЕА, д-р. техн. наук Алексієвський Д.Г.

члени комісії доцент каф. ЕЕА, канд. техн. наук Коцур М. І., доцент каф. ЕЕА, канд. техн. наук Близняков О. В.; доцент каф. ЕЕА, канд. техн. наук Жорняк Л. Б.

Комісія провела роботу по визначенню фактичного впровадження результатів дисертаційної роботи Андрієнко Д.С. "Асинхронний електропривід узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично-пов'язаних роторних випрямлячів", виконаної у НУ "Запорізька політехніка"

та установила, що результати вказаної роботи впроваджені в учбовий процес НУ "Запорізька політехніка", на кафедрі "ЕЕА" для розробки нової дисципліни та курсу лабораторних робіт для магістрів спеціальності №141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Вид та об'єм впровадження: 1. Імітаційна комп'ютерна модель, яка враховує взаємопов'язані електромагнітні й електромеханічні процеси в системі електроприводу 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 асинхронних двигунів з фазними роторами (АДФР) при збереженні високого рівня ККД та коефіцієнту потужності електроприводу; 2. Методика визначення неузгодженості швидкостей АДФР в системі електроприводу узгодженого обертання, яка враховує наявність як статичних, так і динамічних збурюючих моментів, що діють на АДФР, та дозволяє з достатньою точністю до 6,6% в сталих режимах їх роботи, та до 25,7% у перехідних режимах їх роботи виконувати оцінку неузгодженості швидкостей АДФР в залежності від паспортних даних та параметрів схеми заміщення АДФР, а також параметрів самої системи електроприводу. Досягненні технічні результати, їх рівень дозволить підвищити рівень підготовки студентів, при вивченні електромагнітних процесів в електроприводах змінного струму.

Голова комісії

Д. Г. Алексієвський

Члени комісії

М. І. Коцур

О. В. Близняков

Л. Б. Жорняк