

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електротехнічних систем автоматизації в
промисловості і на транспорті

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

_____магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Вдосконалення пускових характеристик електромеханічних систем з
електроприводом змінного струму»

Виконав: студент 2 курсу, гр. ЕПА-18м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____Замазаний І.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н., проф. Кутін В.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

Вінниця – 2020 року

Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра Електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕМСАПТ

д.т.н., проф.

В. М. Кутін

“ ___ ” _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Замазаному Ігорю Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Вдосконалення пускових характеристик електромеханічних систем з електроприводом змінного струму

керівник роботи Кутін Василь Михайлович, д.т.н. професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ___ ” _____ 20__ року № ___

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи: Параметри та основні характеристики об'єкту дослідження, а саме електропривода змінного струму. Типи систем автоматичного керування приводом змінного струму. Параметри та характеристики робочих механізмів. Статистичні дані про режими роботи робочих механізмів та їх електроприводів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Стан проблеми і задачі дослідження методів і засобів формування пускових характеристик існуючих електроприводів; 2 Теоретичне обґрунтування процесу рушання механізмів; 3 Синтез структурної моделі електромеханічного комплексу; 4 Техніко-економічна ефективність використання системи керованого рушання; 5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Класифікація відмов електроприводів змінного струму. Моделі технологічного середовища. Математичні моделі електроприводу як засобу керованого рушання та пуску. Математична модель тиристорного перетворювача. Розробка узагальненої структурної схеми механічної частини електропривода. Розробка математичної моделі електропривода з урахуванням пружних зв'язків та параметрів лінії живлення. Дослідження математичної моделі системи керованого рушання.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Кутін В.М., д.т.н., проф.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Зав кафедри БЖДПБ д.пед.н., проф. Кобилянський О.В.		
Економічна частина	к. е. н. доцент, Мельничук Л.М.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів МКР	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)		
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР		
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР		
4	Виконання розділу «Охорона праці»		
5	Попередній захист МКР		
6	Нормоконтроль МКР		
7	Рецензування МКР		
8	Захист МКР		

Студент

(підпис)

Замазаний І.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Кутін В.М.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Замазаний Ігор Сергійович. Вдосконалення пускових характеристик електромеханічних систем з електроприводом змінного струму. Магістерська кваліфікаційна робота – Вінниця: ВНТУ, 2020 – ____ с. Бібл.:14. Іл.:21. Табл.:11.

Вирішено актуальну наукову задачу поліпшення характеристик електроприводів технологічних механізмів з важкими умовами запуску. Розроблено систему, що забезпечує формування процесу рушання з урахуванням технологічних і конструктивних особливостей конкретного механізму. Проведено аналіз впливу теплових перевантажень на строк служби ізоляції. Розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: електропривід, пуск, рушання, технологічний механізм.

АНОТАЦИЯ

Замазаний Игорь Сергеевич. Усовершенствование пусковых характеристик электромеханических систем с электроприводом переменного тока. Магистерская квалификационная работа – Винница: ВНТУ, 2020 – ___ с. Библ.:14. Ил.:21. Табл.:11.

Решено актуальную научную задачу улучшения характеристик электроприводов технологических механизмов с тяжелыми условиями пуска. Разработана система, обеспечивающая формирование процесса трогания с учетом технологических и конструктивных особенностей конкретного механизма. Проведен анализ влияния тепловых перегрузок на срок службы изоляции. Рассмотрены вопросы охраны труда и безопасности в чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: электропривод, пуск, трогание, технологический механизм.

SUMMARY

Zamazanyi Ihor Sergeevich. Improvement of starting characteristics of electromechanical systems with electric actuator. Master's qualification work. – Vinnytsya: VNTU, 2020 – ____ p. Bibl.:14. Pic.:21. Tabl.:11.

The actual scientific task of improving the characteristics of electric drives of technological mechanisms with difficult starting conditions is solved. A system is developed that ensures the formation of the process of bursting taking into account the technological and structural features of a particular mechanism. An analysis of the influence of thermal overloads on the duration of insulation service is carried out. The issues of occupational safety and security in emergency situations are considered.

Key words: electric drive, starting, moving, technological mechanism.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
1 СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ФОРМУВАННЯ ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІСНУЮЧИХ ЕЛЕКТРОПРИ- ВОДІВ.....	10
1.1 Загальна характеристика аварійних режимів роботи, причини аварій- ності в пускових режимах та вплив вібраційних та теплових навантажень на електроприводи змінного струму.....	10
1.2 Характеристики пуску і рушання технологічних механізмів.....	13
1.3 Аналіз існуючих методів і засобів пускових систем при рушанні	16
1.4 Мета та задачі дослідження.....	23
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ РУШАННЯ МЕХАНІЗМІВ	24
2.1 Розробка математичної моделі розгону електропривода з урахуванням технологічного середовища	24
2.2 Дослідження динамічних характеристик рушання відносно технологічного середовища	25
2.3 Математична модель електропривода як засобу керованого рушання та пуску.....	28
2.3.1 Можливості формування пускового моменту засобами керованого рушання та пуску.....	29
2.3.2 Математична модель тиристорного перетворювача напруги у колі статора в трифазній системі координат	34
2.4 Висновки	38
3 СИНТЕЗ СТРУКТУРНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ.....	39

3.1 Розробка узагальненої структурної схеми механічної частини електропривода.....	39
3.2. Визначення частот і форм власних крутильних коливань електромеханічної системи	42
3.3 Розробка математичної моделі електропривода з урахуванням моменту рушання, пружних зв'язків та параметрів лінії живлення	48
3.4 Дослідження математичної моделі системи керованого рушання	52
3.5 Висновки	57
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ КЕРОВАНОВОГО РУШАННЯ.....	59
4.1 Оцінка впливу керованого рушання на збільшення строку служби ізоляції електричних машин.....	59
4.2 Економія електроенергії за рахунок зміни пускового режиму	63
4.3 Економія коштів за рахунок зниження витрат на ремонт електричних машин та підшипникових вузлів насосного агрегату	64
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ...	68
5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту	69
5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	70
5.2.1 Мікроклімат та повітря робочої зони	70
5.2.2 Склад повітря робочої зони	71
5.2.3 Виробниче освітлення	72
5.2.4 Виробничий шум.....	74
5.2.5 Виробничі вібрації	75
5.2.6 Психофізіологічні фактори	76
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи системи керування електроприводом насосу в умовах надзвичайних ситуацій....	77

5.3.1 Дослідження стійкості роботи системи керування електроприводом підйому пасажирського ліфта в умовах дії іонізуючих випромінювань.....	78
5.3.2 Дослідження стійкості роботи системи керування електроприводом підйому насосу в умовах дії електромагнітного імпульсу	81
5.3.3 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи системи керування електроприводом насосу в умовах надзвичайних ситуацій	83
5.4 Висновки	84
ВИСНОВКИ.....	86
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	88
Додаток А. Технічне завдання	90
Додаток Б. Ілюстративні матеріали.....	93

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЕМ – електрична машина

ЕМС – електромеханічна система

ЕП – електропривод

ЕТК – електротехнічний комплекс

КО – комутаційне обладнання

КЧК – квазічастотне керування

МК – мікроконтролер

ПП – передстартова підготовка

СД – синхронний двигун

ТПН – тиристорний перетворювач напруги

СК – система керування

СКР – система керованого рушання

M_c – статичний момент опору

M_p – момент рушання

M_δ – момент, що розвиває двигун

M_n – пусковий момент двигуна

M_{nn} – пусковий момент у номінальному режимі

M_k – критичний момент

M_{kn} – критичний момент у номінальному режимі

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота напруги статора

f – частота напруги статора

ω_r – частота обертання ротора двигуна

τ – дотична напруга зсуву

η – в'язкість технологічного середовища

ВСТУП

Останнім часом повсемістно використовуються системи обліку і визначення якісних характеристик електроенергії, зменшується споживання енергетичних ресурсів завдяки впровадженню систем контролю і регулювання параметрів, в більшості випадків використовується частотно-регульований електропривод (ЕП).

У той же час незмінною залишається проблема високої аварійності електрообладнання, яка є однією зі складових витрат під час реалізації конкретних технологічних програм. Головною з основних причин збільшення аварійності обладнання є підвищення числа включень електроприводів як наслідок недосконалості методів керування процесами енергоспоживання. Поломки електрообладнання під час пуску пояснюються недостатньою керованістю процесів, що відбуваються в нерегульованому електроприводі в динамічних режимах, під час яких прямі пуски приводять до механічних і теплових перевантажень електричних машин (ЕМ), комутаційного обладнання (КО) і системи електропостачання (СЕР).

Пуск в важких умовах праці електроприводів різних промислових механізмів є серйозною проблемою в багатьох галузях промисловості. Передусім це стосується гірничорудного і нафтохімічного виробництв. До електроприводів які працюють в важких умовах відносять приводи дробильно-розмельних механізмів (кульових та стрижневих млинів, дробарок), насосів які використовуються для транспортування нафтопродуктів, пульпонасосів, скребкових та гвинтових конвейєрів, мішалок і т.д.

Умістним є аналіз пуску таких механізмів з розрахунком процесу рушання. Формування моменту опору під час рушання - специфічне явище в теорії електропривода. Під рушанням прийнято вважати процес переходу електромеханічної системи з нерухомого в стан руху, під час якого змінюються сили і моменти опорів за відповідними законами, що є наслідком роботою сил тертя в підшипниках, ущільненнях, у ходовій частині механізму і в передачах, а також у

зоні контакту робочого органу з технологічним середовищем. Характер зміни моменту опору під час рушання є загальним для широкого класу виробничих механізмів - з початком обертання вала він досягає максимального значення, а далі поступово зменшується до значення, що вже не залежить від кута повороту.

При рушанні електроприводів зазначених технологічних механізмів збільшення моменту опору може бути настільки значним, що з'являється потреба застосування спеціального обладнання і способів формування пускових характеристик. Необхідність застосування вище вказаних технічних рішень викликана не тільки через особливості механічних характеристик технологічних механізмів під час рушання, але й експлуатаційними характеристиками мереж електропостачання та електричних двигунів, що застосовуються.

Сучасні пускові системи, як правило, не враховують весь перелік факторів, що визначають рівень аварійності обладнання в процесі пуску:

- підвищений момент опору в момент рушання призводить до високих показників динамічних зусиль в конструктивних вузлах системи «електродвигун - технологічний механізм» і, як наслідок, до інтенсивного зносу обладнання;

- сповільнення при рушанні двигунів змінного струму приводять до пришвидшеного руйнування ізоляційних матеріалів, теплових і механічних перенапружень в пускових і демпферних обмотках, порушення балансування ротора та ін.;

- падіння напруги на шинах підстанцій при запуску потужних двигунів призводить до протяжного пуску і перегріву електричних машин, неприпустимих умов експлуатації інших споживачів;

- важкі умови рушання приводять до перевантажень і скорочення терміну служби ліній живлення.

Питання поліпшення систем і пристроїв покра

Тому, є **актуальними** питання розробки систем і пристроїв вдосконалення характеристик електроприводів з урахуванням певних сил, що виникають в залежності від властивостей речовини, що оброблюється технологічним механізмом з врахуванням її властивостей, а саме фізичної природи сил і моментів

опору, які виникають і змінюються за фізичними законами на початку та в процесі руху.

Використання систем керованого рушання і пуску дозволить забезпечити час безаварійної роботи електроприводів на довший термін, не зважаючи на їх важкі умови пуску, підвищити кількість допустимих включень за фіксований інтервал часу, зменшити аварійність електроприводів і технологічного обладнання.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є аналіз існуючого рівня аварійності та в результаті дослідження підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу, що включає електропривод змінного струму, технологічний механізм та лінію живлення, завдяки використанню методів та засобів вдосконалення пускових характеристик електромеханічної системи.

Об'єкт дослідження – момент опору, що формується в електроприводах технологічних механізмів з важкими умовами пуску.

Предмет досліджень – методи і засоби вдосконалення характеристик пуску електроприводів змінного струму.

1 СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ФОРМУВАННЯ ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІСНУЮЧИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

1.1 Загальна характеристика аварійних режимів роботи, причини аварійності в пускових режимах та вплив вібраційних та теплових навантажень на електроприводи змінного струму

Недосконалість методів керування процесами енергоспоживання, що спричиняє збільшення числа включень електроприводів є однією з основних причин підвищення аварійності обладнання.

Асинхронні двигуни. У роботі [1] показано, що найчастіше (85-95%) відмов асинхронних двигунів потужністю більше 5 кіловат відбуваються через ушкодження обмоток, відмови через підшипниковий вузол складає від 5% до 8% відмов і невеликий відсоток пов'язаний з такими причинами, як скручування валів, відпаювання вивідних кінців, розрив стрижнів ротора та ін.

В роботі [2] причини відмов поділяють на: технологічні - 35%; експлуатаційні - 50% і конструкційні - 15%.

У середньому протягом року капітально ремонтують приблизно 20% встановлених електричних машин (в будівництві - 50%, в гірничій промисловості - 30%, в машинобудуванні - 20%, в чорній металургії - 13% і в хімічній промисловості - 9%).

Синхронні машини. Для того щоб оцінити експлуатаційну надійність синхронних генераторів широко застосовується так звана питома пошкоджуваність (питома кількість аварійних відключень), яка дорівнює середньому числу аварійних відключень на одну машину протягом року у відсотках від загального числа відключень.

Зі збільшенням потужності питома пошкоджуваність зростає. Розподіл питомої пошкоджуваності головних вузлів СМ свідчить про те, що статор є найбільш вразливим вузлом. Загалом 3,67% відмов пов'язані з ізоляцією обмотки

статора, на місця паяння припадає - до 0,92%, а пошкодження активної сталі статора складає -до 0,64%.

Зазвичай, відмова АД і СД відбувається у зв'язку з пошкодженням обмотки статора, яке виникає внаслідок пробую ізоляції обмотки.

Пришвидчується процес руйнування ізоляції під дією концентрованих навантажень в наслідок підвищених механічних зусиль у перехідних процесах, перенапруженнями, перевантаженнями за струмом та вібраціями. Також через теплові перевантаження які обумовлені причинами місцевого характеру руйнується ізоляція обмотки.

Враховуючи всі вищевказані фактори можна зробити вивід, що до зниження експлуатаційної надійності та відмови вузлів електричної машини і електропривода в цілому призводять теплові та вібраційні навантаження, які в першу чергу залежать від режиму роботи обладнання та в умовах важкого запуску є найбільш вираженими.

Висока вібрація в електричних машинах свідчить про можливі пошкодження, недоліки конструкції або дефекти які виникли в результаті виготовлення й складання. Сама вібрація є причиною аварій і значних пошкоджень. Підвищена вібрація сприяє таким негативним наслідкам як: порушення щільності з'єднань, ослаблення пресування активної сталі, руйнування зварних швів і деталей у звязку з утомою матеріалу та контактною корозією, пришвидшене спрацьовання ізоляції, в системах водо- і маслопостачання до порушення герметичності, спрацьовання щіткового апарату і контактних кілець, нагрів підшипників і т.д.

Як описано в роботі [13], в момент пуску двигуна в електроприводі коливання можуть виникати внаслідок:

- накиду навантаження, яке виникає в наслідок того, що експоненціальний фронт часової характеристики моменту опору має малу сталу часу;
- ударних знакозмінних моментів синусоїдальної форми з частотою, яка на початку процесу може бути дорівнювати частоті мережі;
- імпульсного електромагнітного моменту який визначається виразом:

$$M_A = k_1 M_{k1} \left(A_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - A_2 e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \quad (1.1)$$

де M_{k1} - початкове значення імпульсного моменту;

T_1, T_2 - сталі часу;

k_1, A_1, A_2 – константи.

При відсутності дії цих факторів в ЕП є неможливим виникнення коливань. Двигун що працює на стійкому відрізку механічної характеристики, забезпечує демпфування коливань у щілинах (з'єднаннях шпонкою і шліцом, зубчатих передачах) з коефіцієнтом ξ_+ , який змінюється пропорційно ω (швидкості обертання) та інерційних мас системи J , приведених до валу двигуна з моментом інерції ротору J_P . В випадку коли робота відбувається на нестійкому відрізку механічної характеристики тоді момент двигуна M_d вносить від'ємне демпфування з коефіцієнтом $\xi_- = dM_d/d\omega$, яке в свою чергу сприяє коливанням.

В момент початку розгону системи значення $dM_d/d\omega$ зростає, і в певний момент часу коли система стає нестійкою починає виконуватися наступна умова $(J/J_P)^2 \xi_- + \xi_+ < 0$. Максимальне значення якого може досягти коливальний момент складає $(2 \div 2.5) M_{ном}$ таке значення може бути небезпечним для привода.

Як наслідок цих факторів, в умовах важкого пуску джерелом силових збурень в конструкції машини є статор АД (СД). Амплітуди і частоти, що є складовими силового збурення, які вносяться статором двигуна в механічну систему робочої машини в пускових режимах тому є доцільним їх визначення і врахування.

Причини тепловиділення яке виникає в умовах важкого пуску. Під час важкого пуску і затриманні технологічного механізму присутні великі значення статичного моменту навантаження, як наслідок в АД за короткий проміжок часу починає виділяється велика кількість теплової енергії, що сприяє значним втратам в міді. Повітря яке знаходиться в середині закритого двигуна погіршує умови тепловіддачі, особливо для лобових частин обмотки [4]. Обмотка починає нагріватися до граничних температур швидше за сталь статора і ротора. В зв'язку

з чим в складові втрат враховують тільки втрати статора, тому що теплообмін між статором і ротором можна не брати до уваги.

Через додатковий нагрів обмоток при важких умовах пуску відбувається розм'якшення, розтріскування ізоляції, плавлення, зміна міцності на розтягування, що приводить до зміни її фізичних і електричних властивостей та як наслідок більш інтенсивного старіння.

1.2 Характеристики пуску і рушення технологічних механізмів

При рушанні технологічних механізмів існує проблема підвищеного моменту. Типові залежності які описують механічні характеристики робочих машин та технологічних механізмів не завжди дають наближене до дійсності значення. Сили та моменти опору в стані спокою дійсних механізмів можуть перевищувати сили і моменти опору під час руху.

З робіт [5-7] відомо, що більша частина загальнопромислових [5] (рисунок 1.1, а) і сільськогосподарських [6] механізмів (рисунок 1.1 б) має такий початковий статичний момент опору технологічного механізму (момент рушення), який є більший від статичного моменту опору, що діє після рушення механізму з місця.

Залежності моменту опору реальних робочих машин де від швидкості (суцільна лінія на рисунку 1.1, а) вони лише приблизно можуть бути зображені за допомогою емпіричної формули Бланка (пунктир на рисунку 1.1, а):

$$M_c = M_0 + k \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^p, \quad (1.2)$$

де k , p – коефіцієнти, які враховують, режими роботи механізму;

– номінальна кутова швидкість за якої ;

– момент холостого ходу машини, який враховує постійну складову моменту опору, що не залежить від швидкості, і описується в [5] як початковий момент опору робочого механізму без урахування моменту тертя спокою.

Різниця в реальних та в аналітичних характеристиках стосується саме моменту рушання, як зображено рисунку 1.1, а, б. Момент опору млина який змінюється за більш складним законом є виключенням (рисунок. 1.1, в).

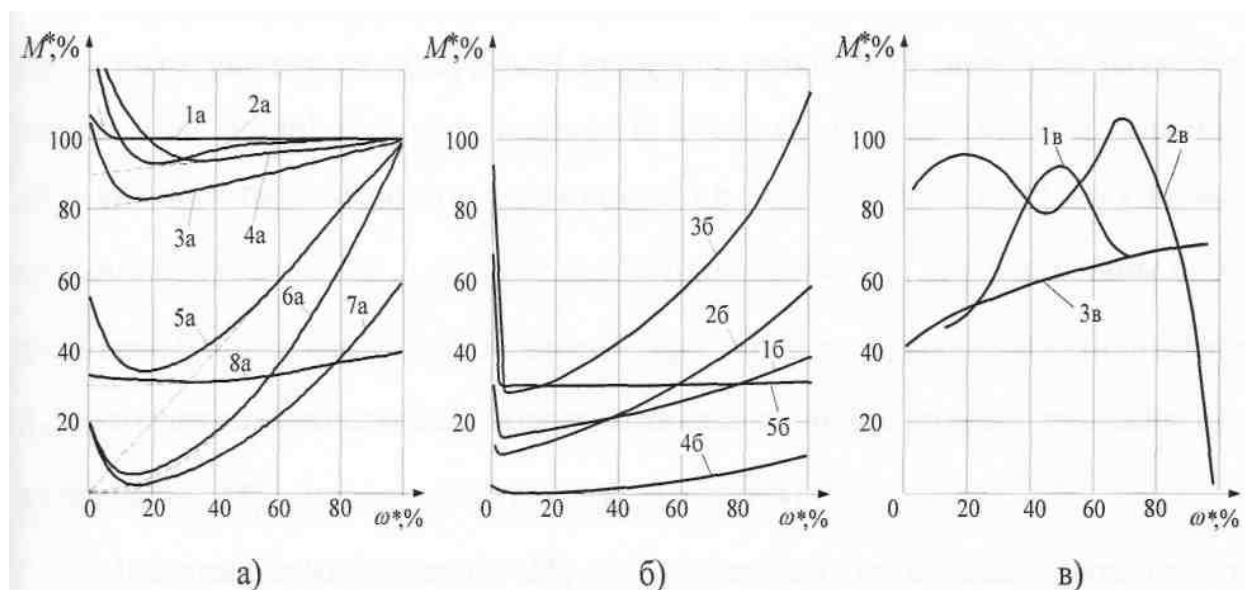


Рисунок 1.1 – Механічні характеристики реальних загально промислових механізмів (а), сільськогосподарських механізмів (б); шарового млина (в)

На рисунку 1.1. зображено наступні характеристики: 1а - підйомні крани; 2а - підйомні й транспортувальні механізми, пульпонасоси; 3а - нереверсивні прокатні станки; 4а – дробарки та млини; 5а - каландри; 6а - турбомеханізми, що запускаються при відкритій засувці; 7а - турбомеханізми, що запускаються з закритою засувкою; 8а - поршневі компресори і турбокомпресори; 1б - агрегат для приготування комбінованого силосу; 2б -універсальна дробарка для кормів; 3б - молотарка лляного вороху; 4б - молочний сепаратор; 5б - транспортер для прибирання гною; 1 в - момент опору млина при вибігу; 2в - надлишковий момент двигуна; 3 в - момент опору млина під час пуску.

Розглянемо, в якості прикладу, механічну характеристику турбомеханізму під час пуску при закритій засувці без продукту транспортування та за наявності в зоні робочого колес гідросуміші. В першому випадку момент рушання визначається наявністю сили тертя спокою в підшипниках, в другому випадку момент рушання збільшується за наявності контакту з технологічним середовищем, окрім постійної складової та моменту рушання в підшипниках додається технологічна складова, яка збільшує момент рушання до значення M_{02} , причому (рисунок 1.2).

Значення суми цих моментів $M_0 + M_p$ може суттєво перевищувати пусковий момент двигуна. Вплив M_p на залежність починає діяти на початку руху коли кути повороту валу, не перевищують 2 . Значення M_p варіюється в співвідношенні (1.2) від M_{01} до M_{02} не дозволяє наблизитися до опису підвищеного моменту опору під час пуску, як це зображено на рисунку 1.2.

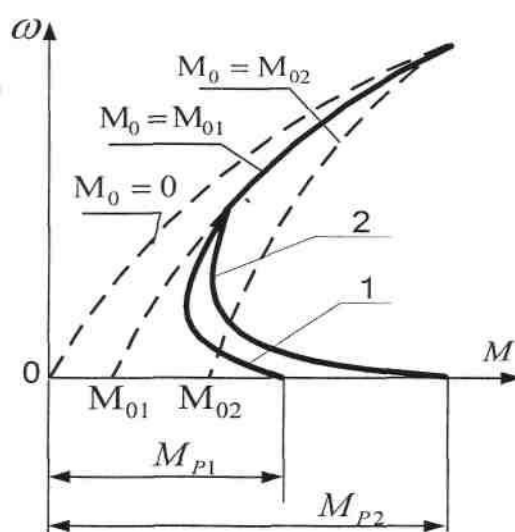


Рисунок 1.2 – Механічна характеристика турбомеханізму з урахуванням : 1 – за відсутності продукту транспортування; 2 – за наявності гідросуміші в зоні робочого колеса;

Залежність M_c має більш складний характер в реальних умовах:

$$M_c(\omega) = M_0 + k \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^p + M_p(\varphi), \quad (1.3)$$

де - залежність моменту рушання від кута повороту вала, який залежить від часу t , в продовж якого агрегат знаходиться в нерухомому стані, за властивостей мастила ν , при температурі навколишнього середовища, та характеристик робочого тіла та ін.: ,...)

У роботі [6] механізми і машини за значенням моменту рушання поділені на три груп, кожна з яких має певні вимоги до електропривода в момент пуску (таблиця 1.1). Механізми що належать до першої групи (< 0.3) допускають можливість пуску АД за пониженої напруги живлення. В механізмах внесених до другої групи ($=1$) можливим є пряме включення електродвигуна і, в певних випадках, потребує засобів для полегшення умов пуску. Механізми в яких відносний моментот рушання перевищує одиницю, потребує застосування способів і засобів прискорення пуску.

Таблиця 1.1 - Класифікація механізмів залежно від значення M_p

M_p / M_n	Перелік механізмів
$< 0,3$	Вентилятори, молочні сепаратори, зернодробарки, відцентрові насоси пневмотранспортери, що пускають в холосту.
$0,3 \div 1,0$	Змішувачі, молотильні агрегати, що пускають в холосту, підймальні машини, змішувачі, транспортери, агрегати приготування комбінованого силосу.
$> 1,0$	Конвеєри, пилорами, що пускаються під навантаженням, дробарки, пресгранулятори, млини, пульпонасоси.

1.3 Аналіз існуючих методів і засобів пускових систем при рушанні

Пуск асинхронних двигунів:

Спосіб 1. Контактний спосіб при якому розгон АД керується за рахунок перемикання схеми підключення обмоток статора з зірки на трикутник. Таке перемикання обмежує струми пуску струми і зробить пуск плавним. Недоліком данного способу є зниження фазної напруги у разі і як наслідок до зменшення

пускового моменту АД в 3 рази. Значне зниження пускового моменту робить неможливим застосування цього способу пуску для тих двигунів які вмикаються під навантаженням. Вказаний спосіб пуску використовують виключно для двигунів обмотки статора яких працюють при з'єднанні трикутником.

Спосіб 2. Є різні варіанти способів дросельного і реостатного пуску АД, обмеження пускових струмів і моментів досягається шляхом зменшення напруги живлення за рахунок вмикання в обмотки статора опорів або дроселів за симетричними (або несиметричними) схемами підключення. Після розгону двигуна для шунивання пускового опору вмикають контактор, і напруга живлення знижується до номінальної.

Недоліком є те, що при зниженню напруги в раз пусковий момент знижується в у раз.

Спосіб 3. Автотрансформаторний пуск АД. При пуску двигуна з використанням понижуючого автотрансформатора спочатку викають перший рубильник який з'єднує обмотки автотрансформатора зіркою, а потім вмикають другий рубильник, що подає на двигун понижену напругу. Перший рубильник вимикають після первинного розгону ротора і автотрансформатор починає працювати як реактор. Повна напруга подається на двигун включенням рубильника. Автотрансформаторний пуск краще реакторного за рахунок зменшення пускового струму, пусковий струм під час реакторного пуску в мережі живлення зменшується в раз, при автотрансформаторному. Використання автотрансформатора дозволяє не тільки зменшити , але й збільшити напруги живлення як наслідок і пусковий момент.

Застосування цього способу виключається через складність пускової операції, порівняно високу вартість і ненадійність пускової апаратури. Головним недоліком способів 1-3 являється застосування додаткових комутаційних апаратів, а дискретний характер керування процесом розгону погіршує пускові характеристики двигуна.

Спосіб 4. Спосіб динамічної індуктивності який передбачає включення в розріз зірки двигуна «динамічної індуктивності». Струм статора при вмиканні

двигуна обмежується електрорушійною силою самоіндукції дроселя. Після закінчення розгону випрямний вузол.

Необхідність в використанні додаткової комутаційної апаратури і відсутність можливості підвищення пускового моменту АД є недоліками цього способу.

Спосіб 5. Майже безступінчасте регулювання швидкості під час розгону досягається завдяки застосуванню плавнорегульованих індуктивних опорів, підмагнічувальних реакторів і магнітних підсилювачів. Суттєве обмеження ударних і знакозмінних складових моменту збільшує надійність механізмів та електрообладнання.

Через відносно великий опір дроселів в насиченому стані зменшується пусковий момент двигуна і це є недоліком данного способу.

Спосіб 6. Симетричне чи однофазне послідовне підключення в обмотки статора конденсатора з реактивним опором [3] підвищує пусковий момент, який визначається зі співвідношення:

$$\frac{M'_n}{M_n} = \frac{1-2b\sin\varphi_k}{1-4b\sin\varphi_k+4b^2} \quad (1.4)$$

$$\text{де } b = -\frac{1}{3} \frac{X_c}{Zk};$$

- опір короткого замикання;
- зсув фаз при короткому замиканні.

Недоліком способу є те що момент регулюється східчасто і в необхідності додаткового комутаційного обладнання. Також зі збільшенням потужності двигуна пропорційно зростає необхідна потужність конденсаторних елементів.

Спосіб 7. Схеми для послідовного підключення конденсаторів до дроселів насичення, що слугує для компенсації падіння напруги на дроселях, що мають назву безконтактних магнітних пускачів [3]. Данний спосіб відрізняється тим, що ударні знакозмінні моменти відсутні і що збільшує допустиму частоту пусків.

Недолік способу це можливість виникнення режиму конденсаторного самозбудження, під час якого відбуваються низькочастотними коливаннями струму і моменту двигуна, переходом в режим обертання при зменшеній швидкості в результаті підсумовування механічних характеристик рухового режиму і конденсаторного гальмування.

Спосіб 8. Пуск АД з конденсаторами в колах статора, щ обули ввімкнені з початку. Цей спосіб призначений для приводів працюючих в важких умовах пуску. Конденсатори слугують для підсилення коефіцієнту потужності системи, зменшують струми в лінії і просадку напруги в момент пуску, дозволяють підвищити пусковий момент і для формування необхідних характеристик АД.

Недоліками данного способу є те що формування пускових характеристик дискретне, також існує необхідність в додатковому комутаційному обладнанні.

Спосіб 9. Покращення системи керованого плавного пуску шляхом використання тиристорних схем керування пришвидшенням. Загальним для всіх існуючих тиристорних схем плавного пуску є поступове збільшення ефективного значення напруги на статорі в процесі розгону (плавний пуск).

Недолік таких схем полягає в неможливості формування пускових характеристик електропривода при суттєвих моментах рушання.

Спосіб 10. Пристрої плавного запуску, що виробляються фірмою Schneider Electronic, за умови, що забезпечують формування пускових характеристик і плавний запуск електропривода. В випадку коли момент рушання більший за вказане значення, тоді пусковий пристрій самостійно переходить в режим «повновольтажного байпасного старту».

При використанні даного способу неможливо отримати пусковий момент вище номінального, що є недоліком данного способу.

Спосіб 11. Певні способи плавного пуску на теристорах для підвищення пускового моменту двигуна ступінчасто підвищують напругу і моменту на початку руху з переходом плавний пуск з наростання напруги живлення експоненціального характеру. Такий принцип запуску в тиристорних перетворювачах напруги ТСУ-2.

Недолік способу в неможливості отримання пускового моменту АД, що більший за каталожні значення.

Спосіб 12. В роботі [3] описано спосіб детермінованого фазування з використанням тиристорних елементів для послідовного підключення затисків статора до фаз мережі живлення.

Не враховуючи ефективного послаблення електромагнітних перехідних моментів, недоліками способу є - неможливості підвищення пускового моменту АД при необхідності форсованого ипуску та ускладнення системи керування.

Спосіб 13. В роботі [3] описаний векторно-імпульсний спосіб пуску АД з використанням керованих силових елементів під час підключення обмоток статора відбувається за виконання певних початкових умов, що забезпечують появу першої півхвилі перехідного моменту з додатнім знаком. Відключення статора від мережі відбувається до того моменту, коли перехідний момент стане від'ємним. При цьому перехідний момент додаються до головного і підвищення середнє значання моменту АД без збільшення струму статора.

Складність реалізації способу, що передбачає визначення початкових електромагнітних умов, тобто визначення кута між векторами напруги статора і потокозчепленням ротора для підключення обмоток статора при певному значенні цього кута є недоліком способу.

Спосіб 14. Для спрощення схеми і зменшення собівартості пускового пристрою пропонується векторно-імпульсний спосіб керування обмотока статора якого з'єднана в зірку через трифазний випрямний міст та один силовий IGBT, який на стороні постійного струму, комутує обмотки статора.

Недоліками способу є те що неможливо застосувати двигуни, обмотки яких з'єднані в трикутник, потреюа наявності наявності на затисках двигуна всіх початків і кінців фазних обмоток, що рідко виконується в АД середньої і великої потужності.

Спосіб 15. Квазічастотний режим пуску АД в якому у системі ТПН-АД з взаємопов'язаним зворотнім зв'язком за швидкістю в процесі розгону відбувається модуляція струму статора АД за частотою і амплітудою так, щоб забезпечити зміну

кута відкривання тиристора в залежності від значення частоти струму ротора, що дозволяє знизити пускові втрати на існуючому силовому устаткуванні за незначних капітальних витратах.

Вузька область застосування є недоліком способу, яка призначає даний метод жля механізмів з незначним моментом статичного опору, значення якого не є більшим за .

Спосіб 16. Частотні способи пуску. Регулювання напруги і частоти які створюють в пусковому режимі необхідні закони зміни параметрів електроенергії, що в свою чергу дозволяє формувати характеристики АД для різних технологічних механізмів з широуим спектром механічними характеристиками.

Основний недолік частотного пуску є значні капітальні витрати на перетворювачі частоти, що робить його недоцільним для нерегульованих електроприводів.

Спосіб 17. Реостатний пуск АД з фазним ротором, який залежно від умов експлуатації, дозволяє вибирати значення опору пускового реостата, яке створює чи максимальний пусковий момент, чи мінімальний пусковий струм. Недоліком способу є складність реалізації, довготривалість і неекономічність пускової операції, через витрату електроенергії при нагріванні пускового реостата.

Спосіб 18. Використання для керованого пуску різноманітних схем симетричних і несиметричних напівпровідникових перетворювачів для фазового та для імпульсного керування в роторних ланцюгах.

Основним недоліком способу пуску з використанням роторних кіл АД та способів пуску, які включають в себе комбіноване керування статорними і роторними колами, є потреба в застосуванні АД спеціальної конструкції, які більш дорогих так і більш складних в експлуатації.

Пуск синхронного двигуна:

Спосіб 1. Збільшення значання середнього синхронізуючого моменту під час процесу асинхронного пуску можливе за рахунок впливу на статорні кола синхронного двигуна. Для того щоб зюільшити електромагнітний момент при пу-

ску і самозапуску СД використовують схему живлення статора підвищеною напругою від вторинної обмотки додаткового силового трансформатора через пусковий і шунтуючий вимикачі.

Необхідність встановлення трансформатора і додаткової комутаційної апаратури є недоліками.

При застосуванні способу імпульсного керування пуском синхронної машини, одиничні імпульси струму подаються в статор збудженої машини, які є синхронними до положення ротора. Для цього слугує тиристорний перетворювач з безпосереднім зв'язком та давач для визначення положення ротора. Для пуску СД необхідно використовувати спеціалізований сенсор який ускладнює конструкцію та систему керування електропривода.

Способи частотного пуску навантажених синхронних двигунів вимагають високого рівня потужності перетворювача частоти, є технічно складні в реалізації, вони є складними в керуванні в умовах відновлювальної напруги. Для забезпечення режиму самозапуску, СД повинні залишатися у ввімкненому стані.

Спосіб 2. Управління процесом асинхронного пуску СД за вдяки вмиканні активних опорів і реактивних елементів до контур збудження. Спосіб збільшення електромагнітного моменту СД який створюється обмоткою збудження (ОЗ), завдяки зменшенні індуктивності ОЗ з використанням динамічної ємності, що налаштована на бажану частоту.

Широке застосування цього способу обмежується через те, що величина ємності, яка досягає одного фараду та вище і також пониження ефекту при шунтуванні динамічної ємності збудником.

Спосіб 3. Управління процесом асинхронного пуску СД за циклічної зміни параметрів контуру збудження. В режимі асинхронного пуску СД, для підвищення максимального середнього моменту, необхідно змінювати амплітуду і фазу струму ротора. Це досягається шляхом циклічної зміни сумарного активного опору в контурі збудження. В ідеальному випадку за замиканні обмотки збудження і її подальшому розмиканні, в цьому випадку підвищення моменту збільшується в $\delta = 2,5$ рази. Розраховано, що за кратності пускового резистора $= 12$, середнє значення

моменту перевершує максимум моменту природної асинхронної характеристики в 1,8 рази.

Ефективність циклічного керування додатковим резистором зменшується зі зменшенням ковзання і пониженням напруги мережі живлення. Недоліком способу те, що він залежить від кутів комутації та від кратності пускового резистора.

1.4 Мета та задачі дослідження

Важкий пуск з несприятливим режимом роботи. Саме в цьому режимі роботи Відбувається спрацювання технологічного та електротехнічного обладнання, оскільки значення моменту опору під час рушання, в такому режимі, є рівним або навіть більшим ніж пусковий момент двигуна.

Як результат проведеного аналізу може бути такий висновок: не всі сучасні системи пуску беруть до уваги, що існує фактор аварійності електротехнічного та технологічного обладнання через підвищений момент опору під час рушання. Тому існує необхідність використання спеціальних засобів та обладнання для формування покращених пускових характеристик з урахуванням складової моменту опору, яка в свою чергу з певним підвищеним значенням є характерною для певної групи механізмів.

За свою мету дослідження бере зниження аварійності і підвищення енергоефективності електротехнічного механізму, в який входить електропривод змінного струму, робочий механізм та лінію живлення, з використання методів і засобів вдосконалення пускових характеристик електромеханічної системи.

Об'єкт дослідження – процес формування моменту опору електроприводів робочих механізмів в технологічних процесах з важкими умовами пуску.

Предмет досліджень – методи і засоби поліпшення характеристик рушання і пуску електроприводів змінного струму.

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ РУШАННЯ МЕХАНІЗМІВ

2.1 Розробка математичної моделі розгону електропривода з урахуванням технологічного середовища

Механізми які потребують підвищеного моменту рушання найчастіше використовуються в робочих процесах подрібнення, транспортування, гранулювання, виготовлення сумішей тощо. В середовищі яке обробляється за рахунок дії сили на нього, з'являються два види руху: загальний рух середовища як деякого тіла та відносний рух безмежно малих елементів середовища - «фізичних» матеріальних точок, що призводить до руйнування надмолекулярних зв'язків структури середовища, зміни його реологічних характеристик (в'язкості, модуля зсуву й т.д.). Структурою прийнято вважати просторовий каркас (сітку), який утворений хімічними зв'язками кристалічних зростків і частинок, що містяться у сировині що обробляється.

При наданні нових фізико-механічних властивостей середовищу що обробляється завдяки впливу на нього передстартового впливу робочого органа робить можливим полегшення умови запуску технологічних електроприводів. Тому доцільним є дослідження процесу пуску технологічних механізмів з погляду на реологічні властивості технологічної сировини, а саме:

- розгляду фізико-механічних властивостей та математичних моделей : середовища, яке обробляється технологічних механізмом;
- дослідження механізму формування високого моменту рушання та виявлення способів попереднього впливу на технологічне середовище засобами електропривода;
- аналізу емпіричної моделі процесу запуску з урахуванням властивостей середовища.

2.2 Дослідження динамічних характеристик рушання відносно технологічного середовища

Неньютонівська рідина початкова напруга зсуву якої представлену як структуру з жорстким просторовою сіткою, заповненим рідкою фазою. Каркас утворений між головними і вторинними валентними зв'язками (силами Ван-дер-Ваальса) та між атомами, молекулами, іонами, кристалічними зростками і частинками, що мають колоїдні розміри.

Процес пуску механізму, що обробляє неньютонівську технологічну сировину включає наступні етапи:

- за відсутності зсувної сили, що діє ззовні структурована рідина рівномірно розподілена у всіх напрямках (рисунок 2.5, а);

- при прикладанні сили, що діє ззовні, $\tau <$, починається руйнування зв'язків сітки у перпендикулярній площині до лінії дії напруги, та під впливом броунівського руху відновлення цих зв'язків. За таких умов ньютонівська течія має початкову в'язкість (рисунок 2.5, б);

- зі збільшенням напруги, $\tau <$, та градієнта швидкості, $\epsilon >$, кількість зв'язків, що зруйнувалось переважає кількість відновлених (рисунок 2.5, в). Частинки, що вивільнилися від поперечних зв'язків ущільнюються у подовжньому напрямі;

- коли напруга зсуву досягає значення з відповідним градієнтом швидкості $\dot{\epsilon}_m$, кількість поперечних зв'язків зменшується до мінімальної (рисунок 2.5, г). На цьому етапі закінчується процес рушання з погляду як на процес з аномально збільшеним моментом опору під час пуску. Після того як навантаження було знято (електропривод зупинився) подовжні зв'язки починають руйнуються під впливом броунівського руху та протягом деякого часу відбувається повне тиксотропне відновлення фізико-механічних властивостей технологічної сировини;

- структурована система рухається у ламінарному потоці, якщо напруга зсуву не є більшою за деяке значення, в іншому випадку ламінарний потік переходить у турбулентний.

Розглянутий механізм течії описується формулою (2.14):

$$\eta = \frac{\omega_0 k T e^{\frac{u}{kT}}}{\pi r a^2}, \quad (2.14)$$

де

r – радіус частинок твердої фази;

a – відстань між частинками, що не потрапили у подовжній ланцюжок;

δ – відстань між частинками у подовжньому ланцюжку;

u – енергія активації;

k – стала Больцмана;

T – абсолютна температура.

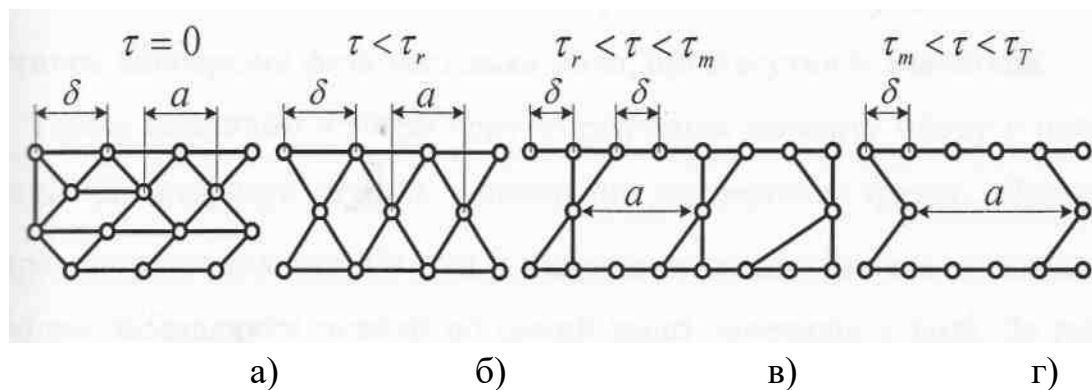


Рисунок 2.3 – Механізм формування моменту опору при русанні.

На рисунку 2.3 зображено : а) початок руху з в'язкістю структури, що не зруйнувалась ; б) початок руху з малою швидкістю $\dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_r$ за початкової в'язкості в) зниження в'язкості до $\dot{\epsilon} < \dot{\epsilon}_r$ при зростанні швидкості до $\dot{\epsilon} \geq \dot{\epsilon}_r$; г) досягнення найнижчого значення в'язкості $\eta = \eta_m$ при швидкості $\dot{\epsilon}_m$

Проаналізуємо властивості технологічного продукту, на прикладі, пульпи, яка транспортується у відстійник в залежності від рівня наповнення дисперсною фазою дисперсного середовища. В'язкість суміші при врахуванні в'язкості дисперсного середовища визначається за формулою:

$$\eta_{cm} = \eta_c(1 + \alpha\varphi), \quad (2.15)$$

де $\varphi = \frac{V_{\phi}}{V_{\phi} + V_{д.с.}}$ - відношення об'єму V_{ϕ} який займає дисперсна фаз по відношенні до загального об'єму $V_{\phi} + V_{д.с.}$;

α – коефіцієнт який враховує зміну кількості теплоти, що визначається як відношення коефіцієнта дифузії обертального броунівського руху до швидкості зсуву.

Рівняння (2.38) дійсне в випадку якщо :

– частинки дисперсної фази взаємодіють як тверді сфери, радіус яких великий у порівнянні з радіусом молекул дисперсного середовища, але малий у порівнянні з розмірами робочого органа;

– течія повільна настільки, що силами інерції можна знехтувати;

– взаємодія частинок дисперсної фази відсутня оскільки їх досить мало.

З точки зору формування моменту опору важливим є параметр φ , під яким описується ступінь наповнення дисперсною фазою. Наприклад, для транспортування хвостів руд, за допомогою пульпонасосів, у відстійник необхідно забезпечити певний вміст мінералів у воді. Вміст твердої фази у воді може підвищуватись саме в нижній частині робочого колеса за рахунок осідання частинок. В такому випадку відбувається зростання φ та перехід пульпи від структурованої рідини в твердоподібну структуру.

Не тільки збільшення φ призводить до зростання в'язкості, але і через зміну α за рахунок утворення вторинних коагуляційних структур. Останні є наслідком утворення навколо твердих частинок дисперсної фази структурованих дифузійних оболонок (рисунок 2.4).

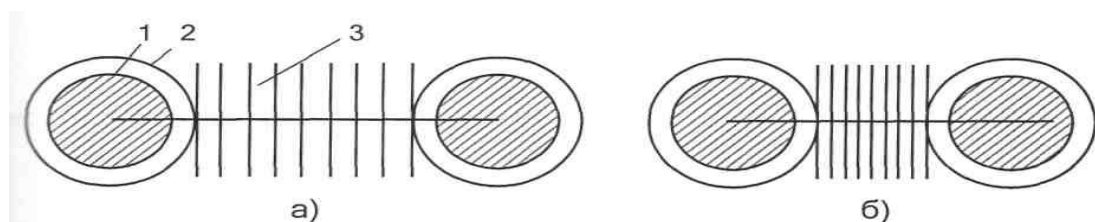


Рисунок 2.4 – Утворення вторинної коагуляційної структури з малим (а) та великим (б) вмістом твердої фази у дисперсному середовищі.

На рисунку 2.4 зображено: 1 – частинка твердої фази, 2 – структурна оболонка; 3 – дисперсне середовище.

Якщо ϕ замале (рисунок 2.4, а), то вторинна структура буде слабка через великий прошарок дисперсного середовища як наприклад, води. Зі збільшенням ϕ міцність вторинної структури збільшується через збільшення взаємодії структурованих оболонок (рисунок 2.4, б).

Як наслідок, одне і те саме технологічне середовище може переходити зі стану структурованої рідини до стану твердоподібної структури і навпаки.

Процес при врахуванні явищ утворення вторинних коагуляційних структур можна розбити на такі етапи:

- за низьких напруг зсуву відбувається впорядкування просторової сітки структури дисперсного середовища, як зображено на рисунку 2.3, б;
- зі збільшенням напруги відбувається перебудова структурованих оболонок вторинних структур;
- при подальшому підвищенні напруги відбувається перебудова самих вторинних структур.

2.3 Математична модель електропривода як засобу керованого рушання та пуску

Розглянемо квазічастотний спосіб керування (КЧК) асинхронним двигуном в якості способу підготовки перед стартом та керованого рушання технологічного механізму.

Особливості КЧК полягають, перш за все, в пульсаціях електромагнітного моменту, в результаті яких утворюється вібраційне навантаження електромеханічного комплексу. При розробці системи керованого рушання потрібно зважати на те, що в умовах виробництва важкий пуск часто пов'язаний з наявністю так званої «довгої лінії», яка призводить до пониження напруги на затискаях двигуна що в свою чергу призводить до зниження пускового моменту. Система КЧК повинна враховувати данну проблему забезпечувати запуск

технологічного об'єкту незважаючи на його віддаленість його від джерела живлення.

Дослідження електротехнічного комплексу «мережа живлення – електропривод - технологічний механізм» є важливим питанням з урахуванням взаємного впливу його складових, а саме:

- розгляд можливостей формування пускового моменту та розробка математичної моделі для системи ТПН-АД з КЧК при керованому русанні;
- розробка математичної моделі технологічного механізму в яку будуть враховані процес русання та можливі резонансні коливання в механічній частині системи «електропривод - технологічний механізм»;
- дослідження та аналіз розроблених моделей зважаючи на вплив параметрів лінії живлення.

2.3.1 Можливості формування пускового моменту засобами керованого русання та пуску

Система ТГШ-АД з КЧК (рисунок 2.5) включає в себе силовий тиристорний комутатор ТК, логічний пристрій ЛП, давачі стану ДС, асинхронний двигун, систему керування СК, задавальний генератор ЗГ. Тиристорний комутатор ТК являє собою вентиля $V_1 - V_6$, що комутуються за допомогою ключів $K_1 - K_6$ відповідно.

Частота f_z вихідної напруги U_z встановлюється за допомогою задавального генератора ЗГ, а за логічну послідовність комутації ключів $K_1 - K_6$ відповідають генератор ЗГ, логічний пристрій ЛП та давачі ДС, які працюють сумісно, останні з яких слідкують за станом напруги мережі U_1 , з частотою f_1 .

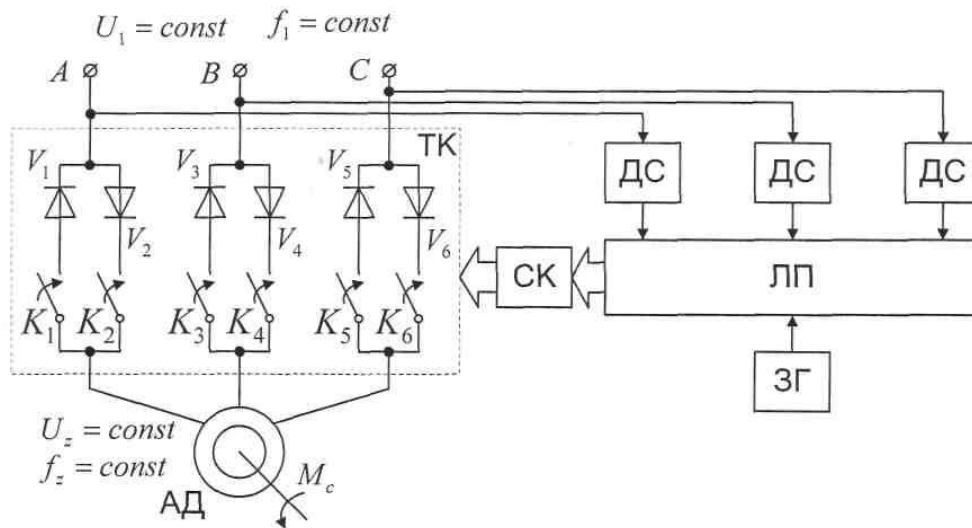


Рисунок 2.5 – функціональна схема системи ТПЧ-АД з КЧК

Складається напруга U_z (рисунок 2.6) з почергових пакетів півхвиль додатної та від'ємної полярності, які утворюються в наслідок комутації U_1 .

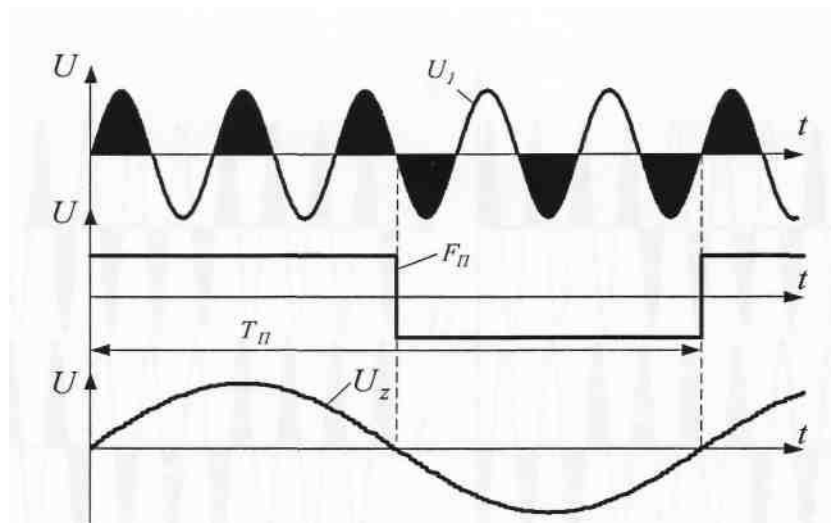


Рисунок 2.6 – Фазна напруга при квазічастотному керуванні

Знак функції F_n , що відповідає за перемикання визначає полярність напруги на затисках АД, а період T_n визначає кількість додатних і від'ємних півхвиль і як наслідок частоту основної гармоніки напруги живлення U_z . Функції перемикання формуються для кожної фази в випадку використання тифазного АД. Регулювання фазового кута між перемикаючими функціями забезпечує система керування, що в свою чергу дозволяє створювати симетричну або несиметричну систему живлення і за рахунок цього керувати моментом АД.

При КЧК аналіз кривих фазних напруг при частоті модуляції $f_z = 50/7$ та при несиметричному фазовому зсуві $2\pi/21$ (рисунок 2.7, а) і симетричному фазовому зсуві $14\pi/21$ (рисунок 2.7, б) дозволяє отримати сімейство напруг з різними фазовими зсувами при фіксованій частоті f_z . Величину фазового зсуву між перемикаючими функціями можна визначити як:

$$\varphi_{F[B(C)]} = \frac{[2+3(n-1)\pi]}{3k}, \quad (2.16)$$

де $k = f_1/f_z = 1, 2, 3, \dots$;

n – кількість варіантів фазових зсувів, що можлива між напругами двох фаз для визначеного k . Максимальна кількість комбінацій k^2 .

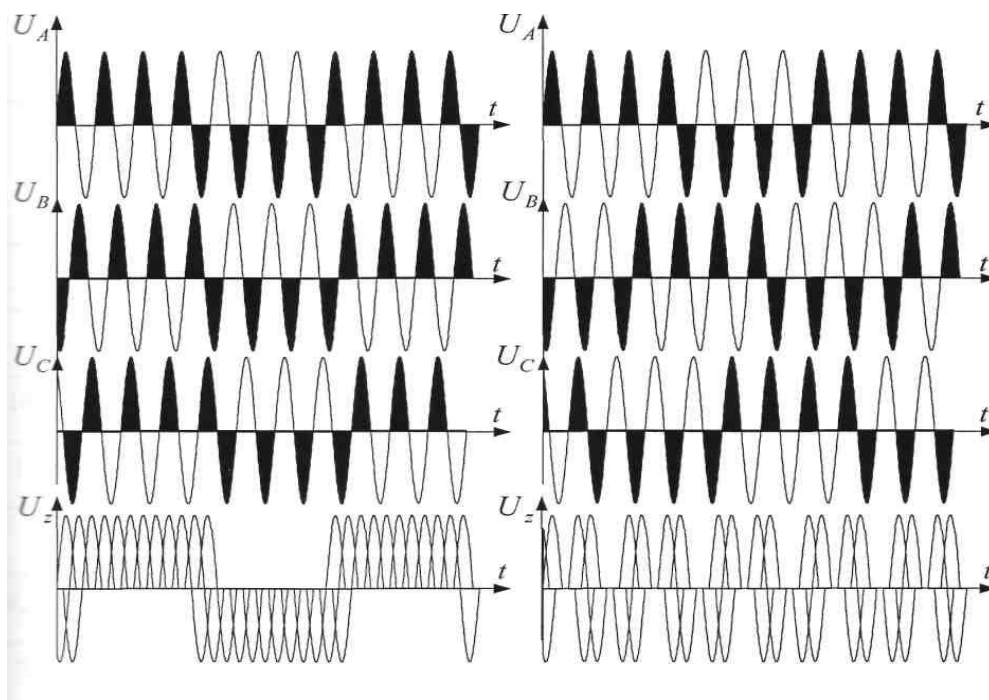


Рисунок 2.7 – Діаграма напруги живлення при симетричному (а) та несиметричному (б) фазових зсувах

З рівняння (2.16) зрозуміло, що за певних значеннях n і k , фазові кути створюють симетричну систему напруг для цілого n :

$$n = \frac{2k+1}{3}. \quad (2.17)$$

Можливо отримати симетричну систему, наприклад для частот:

$$k = 4, \quad f_z = 12.5;$$

$$k = 7, \quad f_z = 7.14;$$

$$k = 10, \quad f_z = 5.$$

Можливі значення фазових кутів для діповідних k записані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри напруги живлення при квазічастотному керуванні

f_z , Гц	k	Фазовий кут між $\varphi(F_A)$ і $\varphi(F_B)$						
		n						
		1	2	3	4	5	6	7
50	1	$\frac{2\pi}{3}$	-	-	-	-	-	-
20	2	$\frac{2\pi}{6}$	$\frac{5\pi}{6}$	-	-	-	-	-
16.67	3	$\frac{2\pi}{9}$	$\frac{5\pi}{9}$	$\frac{8\pi}{9}$	-	-	-	-
12.5	4	$\frac{2\pi}{12}$	$\frac{5\pi}{12}$	$\frac{8\pi}{12}$	$\frac{11\pi}{12}$	-	-	-
10	5	$\frac{2\pi}{15}$	$\frac{5\pi}{15}$	$\frac{8\pi}{15}$	$\frac{11\pi}{15}$	$\frac{14\pi}{15}$	-	-
8.333	6	$\frac{2\pi}{18}$	$\frac{5\pi}{18}$	$\frac{8\pi}{18}$	$\frac{11\pi}{18}$	$\frac{14\pi}{18}$	$\frac{17\pi}{18}$	-
7.14	7	$\frac{2\pi}{21}$	$\frac{5\pi}{21}$	$\frac{8\pi}{21}$	$\frac{11\pi}{21}$	$\frac{14\pi}{21}$	$\frac{17\pi}{21}$	$\frac{20\pi}{21}$

В залежності від значення фазового зсуву між функціями що перемикаються пусковий момент АД може приймати як додатні, так і від'ємні значення, що в свою чергу визначає напрям обертання АД (рисунок 2.8). Вирази для фазових кутів перемикаючих функцій при $k = 7$ мають наступний вигляд:

$$M > 0, \varphi_b = \frac{2\pi}{3k} + (4 + n) \frac{\pi}{k}; \quad \varphi_c = \frac{4\pi}{3k} + \left[12 - \left(4 - \text{int} \left(\frac{n}{2} \right) \right) \right] \frac{\pi}{k}; \quad (2.18)$$

$$M < 0, \varphi_b = \frac{2\pi}{3k} + [12 - (4 + n)] \frac{\pi}{k}; \quad \varphi_c = \frac{4\pi}{3k} + \left[12 - \text{int} \left(\frac{n+2}{2} \right) \right] \frac{\pi}{k}; \quad (2.19)$$

де $n=0,1,\dots, k+1$.

При $k = 10$:

$$M < 0, \varphi_b = \frac{2\pi}{3k} + (6 + n) \frac{\pi}{k}; \quad \varphi_c = \frac{4\pi}{3k} + \left[18 - \left(6 - \text{int} \left(\frac{n}{2} \right) \right) \right] \frac{\pi}{k}; \quad (2.20)$$

$$M < 0, \varphi_b = \frac{2\pi}{3k} + [18 - (6 + n)] \frac{\pi}{k}; \quad \varphi_c = \frac{4\pi}{3k} + \left[6 - \text{int} \left(\frac{n+2}{2} \right) \right] \frac{\pi}{k}; \quad (2.21)$$

де $n=0,1,\dots, k+2$.

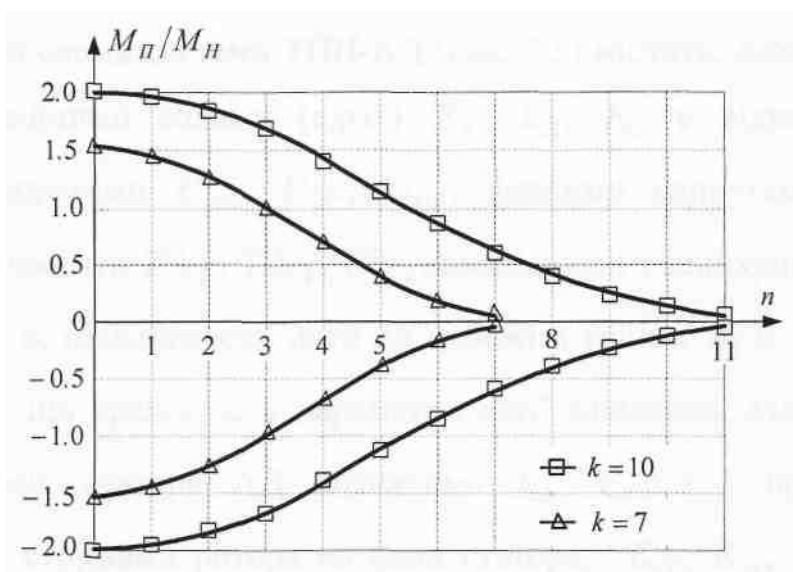


Рисунок 2.8 – Діаграма для зміни пускового моменту $k = 7$ і $k = 10$

Виходячи з описаного вище можна зробити висновок, що квазічастотне керування використане засіб керованого рушання дозволяє:

- регулювання амплітудних та інтегральних значень електромагнітного моменту завдяки зміні фазового кута між напругами низькочастотних фаз або через зміну кута управління тиристорами;
- з метою контролювання напрямку обертання вала електричної машини під час відпрацювання алгоритмів передстартової підготовки ЕП забезпечувати вимагане співвідношення додатних та від'ємних значень знакозмінного електромагнітного моменту;
- добирати такі закони частотного керування які будуть доцільними, тобто співвідношення частоти f_z до вихідної напруги U_z .

2.3.2 Математична модель тиристорного перетворювача напруги у колі статора в трифазній системі координат

В процесі моделюванні ТПН-АД потрібно запровадити такі обмеження та припущення: фазні обмотки виконані ідентичними; не враховувати насичення магнітопроводу; повітряний проміжок в електричній машині рівномірний; не враховувати втрати в сталі; не враховувати вищі просторові гармоніки магнітного поля.

Заступна схема системи ТПН-АД (рисунок 2.9) включає в себе: джерело живлення з електрорушійними силами (е.р.с.) E_A, E_B, E_C у відповідних фазах та лінійними напругами U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} і фазними напругами U_A, U_B, U_C . Тиристорні елементи $T\Delta_{1,2}, T\Delta_{3,4}, T\Delta_{5,6}$, що з'єднуються з асинхронним двигуном в точках а, б, с, в точках А, В, С підключають його до мережі через опори $Z_{\Delta}^A, Z_{\Delta}^B, Z_{\Delta}^C$, які враховують параметри лінії живлення. Миттєві значення фазних струмів статора АД позначено i_{sA}, i_{sB}, i_{sC} , E_{rA}, E_{rB}, E_{rC} проти-е.р.с, які наводяться струмами ротора на фази статора, лінійні та фазні напруги на затискачах двигуна - $u'_{ad}, u'_{bc}, u'_{ca}$ та $u'_{sa}, u'_{sb}, u'_{sc}$ відповідно.

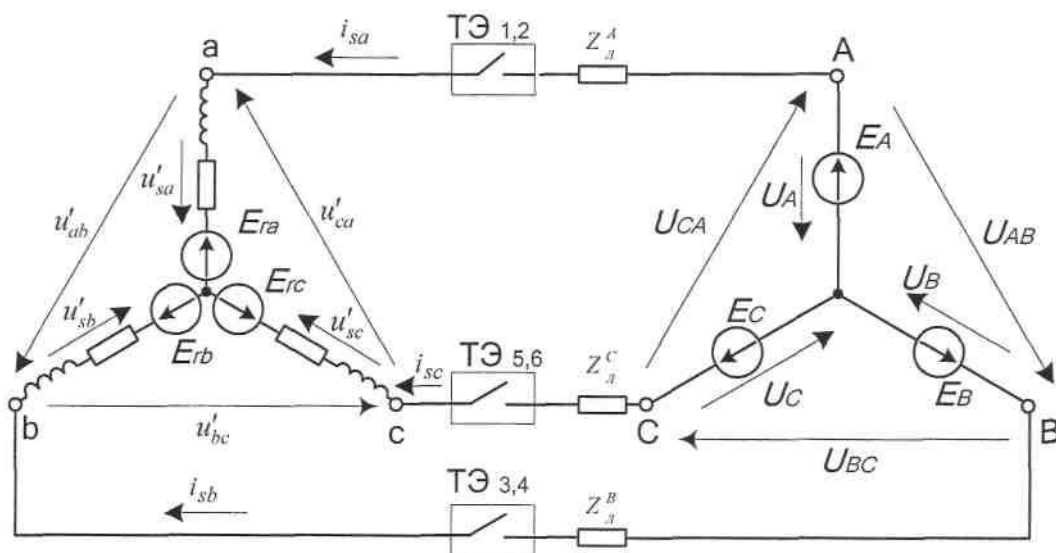


Рисунок 2.9 – Схема заміщення системи ТПН-АД у трифазній системі координат

У відповідності до розрахункової схеми заміщення складемо систему диференціальних рівнянь у відповідності до розрахункової схеми заміщення:

$$\left. \begin{aligned}
 u'_{sa} &= r_s i_{sa} = \sigma L_s \frac{di_{sa}}{dt}; \\
 u'_{sb} &= r_s i_{sb} = \sigma L_s \frac{di_{sb}}{dt}; \\
 u'_{sc} &= r_s i_{sc} = \sigma L_s \frac{di_{sc}}{dt}; \\
 0 &= k_r r_r i_{sa} - \frac{r_r}{L_r} \psi_{rA} - \frac{d\psi_{rA}}{dt} + j\omega_r \psi_{rA}; \\
 0 &= k_r r_r i_{sb} - \frac{r_r}{L_r} \psi_{rB} - \frac{d\psi_{rB}}{dt} + j\omega_r \psi_{rB}; \\
 0 &= k_r r_r i_{sc} - \frac{r_r}{L_r} \psi_{rC} - \frac{d\psi_{rC}}{dt} + j\omega_r \psi_{rC},
 \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

де $k_r = L_m/L_r$ - коефіцієнт ротора;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{(L_s L_r)}$ - коефіцієнт розсіювання;

r_s, L_s - активні та реактивні опори фаз статора;

r_r, L_s - активні та реактивні опори фвз ротора;

L_m - взаємощиндуктивність між обмотками статора і ротора;

$\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}$ - узагальненого вектору потокозчеплення ротора у трифазній системі координат;

ω_r - частота обертання ротора.

Структура системи диференціальних рівнянь яка описує систему ТПН-АД, є змінна. Система ТПН-АД, в довільний момент часу, може перебувати в одному з п'ятих станів: відкриті тиристори двох фаз (режим ВС); відкриті тиристори усіх трьох фаз (режим АВС); відкриті тиристорні елементи двох фаз (режим АС); відкриті тиристори двох фаз (режим АВ); закриті всі тиристорні елементи (режим нульової провідності).

В сукупності з рівняннями руху система рівнянь (2.22) має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{sa}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} (U'_{sa} - r_s i_{sa}); \\ \frac{di_{sb}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} (U'_{sb} - r_s i_{sb}); \\ \frac{di_{sc}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} (U'_{sc} - r_s i_{sc}); \\ \frac{d\psi_{ra}}{dt} &= k_r r_r i_{sa} - \frac{r_r}{L_r} \psi_{ra} - \omega_r (\psi_{rb} - \psi_{rc}) / \sqrt{3}; \\ \frac{d\psi_{rb}}{dt} &= k_r r_r i_{sb} - \frac{r_r}{L_r} \psi_{rb} - \omega_r (\psi_{rc} - \psi_{ra}) / \sqrt{3}; \\ \frac{d\psi_{rc}}{dt} &= k_r r_r i_{sc} - \frac{r_r}{L_r} \psi_{rc} - \omega_r (\psi_{ra} - \psi_{rb}) / \sqrt{3}; \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= (M_e \pm M_c) / J. \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Для кожного з п'яти режимів провідності рівняння фазних напруг визначаються за наступними виразами.

1. Режим трифазної провідності ABC тобто всі три фази АД увімкнені до мережі:

$$\left. \begin{aligned} U'_{sA} &= U_A - E_{rA}; \\ U'_{sB} &= U_B - E_{rB}; \\ U'_{sC} &= U_C - E_{rC}. \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

2. Режим двохфазної провідності BC тобто фаза А вимкнута з мережі:

$$\left. \begin{aligned} i_{sA} &= 0; & U'_{sA} &= 0; \\ U_{sB} &= -U'_{sC} = \frac{U_B - U_C}{2} - \frac{E_{rB} - E_{rC}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

3. Ввімкнутий режим AC тобто фаза В вимкнута з мережі:

$$\left. \begin{aligned} i_{sB} &= 0; & U'_{sB} &= 0; \\ U_{sA} &= -U'_{sC} = \frac{U_A - U_C}{2} - \frac{E_{rA} - E_{rC}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

4. Режим двохфазної провідності AB тобто фаза С вимкнута з мережі:

$$\left. \begin{aligned} i_{sC} &= 0; & U'_{sC} &= 0; \\ U_{sA} &= -U'_{sB} = \frac{U_A - U_B}{2} - \frac{E_{rA} - E_{rB}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

5 . Режим нульової провідності:

$$\left. \begin{aligned} i_{sA} &= i_{sB} = i_{sC} = 0; \\ U'_{sA} &= U'_{sB} = U'_{sC} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

Проти- е.р.с. E_{ra}, E_{rb}, E_{rc} визначається за наступними формулами:

$$\left. \begin{aligned} E_{ra} &= k_r \frac{d\psi_{ra}}{dt}; \\ E_{rb} &= k_r \frac{d\psi_{rb}}{dt}; \\ E_{rc} &= k_r \frac{d\psi_{rc}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Системи рівнянь (2.23)-(2.28) разом з логікою фазового та квазічастотного керування тиристорами охоплюють усі динамічні процеси системи ТПН-АД при керованому рушанні та пуску ЕП технологічного механізму.

2.4 Висновки

При аналізі складових моменту опору, що виникають в момент запуску технологічних механізмів, що працюють в важких умовах запуску дозволив встановити, що при розробці математичної моделі електропривода таких механізмів потрібно враховувати процес рушання, як початкову фази розгону, який супроводжується виявленням різних форм тертя при взаємодії робочого органу з робочим тілом, а також в передачах, підшипниках і направляючих.

При аналізі математичної моделі електротехнічного комплексу «лінія живлення– електропривод - технологічний механізм» було встановлено, що при використанні СКР забезпечується надійний запуск ЕП технологічного механізму, що працює в важких умовах рушання, за значного впливу параметрів мережі живлення та при одночасній дії цих факторів.

Встановлено, що КЧК як засіб керованого рушання дозволяє, шляхом зміни фазового кута між перемикальними функціями або зміною кута керування силовими тиристорами, контролювати амплітудні та інтегральні значення електромагнітного моменту АД, що дозволяє забезпечити необхідні режими рушання, а саме, форсування пускового моменту, реверсування, кроковий режим, рух на зниженій швидкості.

3 СИНТЕЗ СТРУКТУРНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

3.1 Розробка узагальненої структурної схеми механічної частини електропривода

По відношенню до електричної частини механічна частина автоматизованого електропривода є об'єктом управління, в функції якої входить: забезпечення режимів руху системи, які будуть оптимальні певними показниками технологічного процесу чи промислової установки, електротехнічного і механічного обладнання. Виходячи з цього має велике значення коректний опис фізичних властивостей механічної частини електропривода.

Проаналізуємо узагальнену структурну схему, що описує систему «механічна частина електропривода - технологічний механізм», в якій відображені всі описані вище особливості формування моменту опору при рушанні. Представлення механічної частини привода багатомасовою пружною механічною системою потрібно прийняти за основу, яка повинна принципово повно відображати фізичні особливості реальних систем і в той же час є максимально дозволено спрощеною. Подальше спрощення шляхом переходу до вивчення жорсткої зведеної ланки обумовлюється втратою моделлю ряду важливих динамічних властивостей об'єкта.

В більшості практичних випадків виникає необхідність перегляду динамічних навантажень реальних кінематичних ланцюгів з врахуванням діючих в них моментів втрат при терті. За певних параметрів механізму і конструктивних особливостях передач цей вплив потрібно враховувати. Вивчення впливу кінематичних похибок передач показав, що цей чинник, наявний майже в всіх реальних електроприводах, він впливає на динамічні навантаження механічного устаткування та на якість технологічного процесу механізму який приводиться в рух як наслідок виникає потреба в необхідності врахування наявності кінематичних похибок передач. При врахуванні всіх

перечислених факторів та припущень, система рівнянь руху механічної частини привода буде записана в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} M_{\partial} - M'_{c1} - M''_{c1} - M'''_{c1} - M_{p1} - M'_{12} &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M'_{12} - M'_{c1} - M''_{c2} - M'''_{c2} - M_{p2} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де M_{p1} і M_{p2} - моменти рушання;

M'_{12} - обертальний момент з урахуванням пружності та в'язкості тертя у передавальному механізмі;

M'_{c1} і M'_{c2} - активні постійні моменти навантаження;

M''_{c1} і M''_{c2} - момент сухого тертя на відповідних валах;

M'''_{c1} і M'''_{c2} - момент в'язкого тертя на відповідних валах.

Пружний момент M'_{12} визначається за виразом:

$$M'_{12} = M_{12} + \beta_{12}(dM_{12}/dt). \quad (3.2)$$

Момент сухого тертя M''_{c1} і M''_{c2} визначається як:

$$\left. \begin{aligned} M''_{c1} &= |M'_{c1}| \sin \omega_1; \\ M''_{c2} &= |M'_{c2}| \sin \omega_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Момент в'язкого тертя M'''_{c1} і M'''_{c2} може бути записаний як:

$$\left. \begin{aligned} M'''_{c1} &= \beta_1 \omega_1; \\ M'''_{c2} &= \beta_2 \omega_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Узагальнена структурна схема механічної частини електроприводам (рисунок 3.1) відповідає системі рівнянь (3.1)

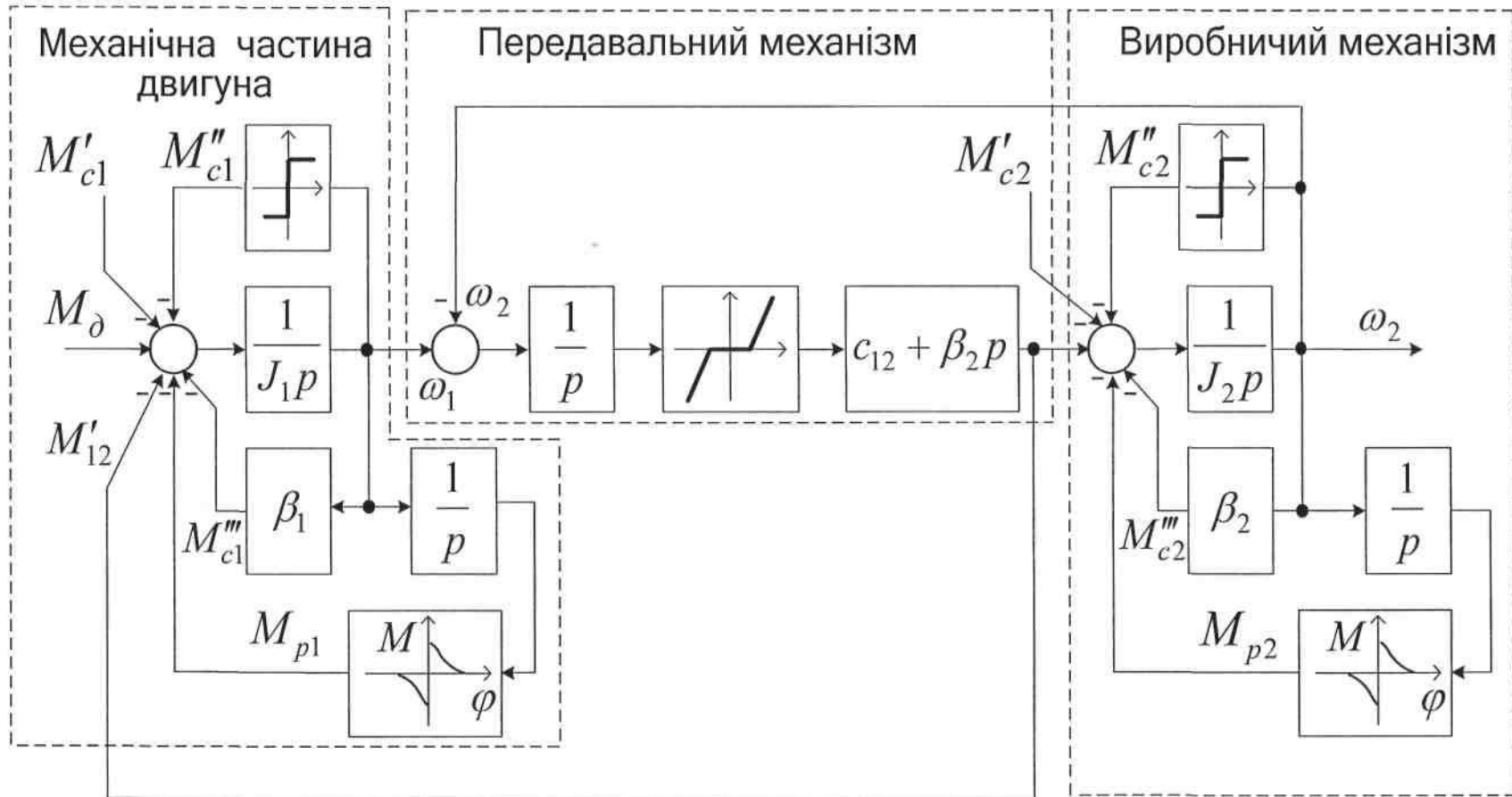


Рисунок 3.1 – Узагальнена структурна схема механічної частини електропривода

3.2. Визначення частот і форм власних крутильних коливань електромеханічної системи

Яскраво виражений змінний характер вібраційних навантажень усіх елементів електромеханічної системи визначає квазічастотне керування напругою живлення двигуна технологічного механізму. Вивчення наступних питань є важливим для безаварійної експлуатації технологічного обладнання:

- потрібно проаналізувати власні частоти крутильних коливань, що створюються елементами насосного агрегату;
- враховуючи особливості квазічастотного керування АД вивчити поведінку всіх елементів системи при вимушених крутильних коливаннях;
- обґрунтувати вибір режимів для квазічастотного керування.

Робочий орган технологічного механізму, який через валопровід та механічні передачі з'єднується з ротором електричної машини слід віднести до механічної частини узагальненої електромеханічної системи. Валопровід і окремі вузли робочого органа являють собою пружну систему, яка під впливом певних сил (моментів), які час від часу змінюються, здійснює вимушені пружні коливання. В зоні резонансу збуджуючих сил або моментів з власними коливаннями системи ці коливання стають особливо сильними. Не враховуючи те, що природне демпфування, що за рахунок внутрішнього тертя в матеріалі та за рахунок зовнішнього тертя, що виникає від взаємодії коливних вузлів із зовнішнім середовищем, послаблює амплітуду коливань, вони в свою чергу можуть приводити до деформацій деталей та їх повного руйнування.

Багатоступінчатий насос артезіанського типу (рисунок 3.2) розглянемо як багатомасову систему, в якій виділимо ротор електродвигуна з ділянкою валу до першого колеса та три колеса з прилягаючими ділянками валу, на якому вони закріплені.

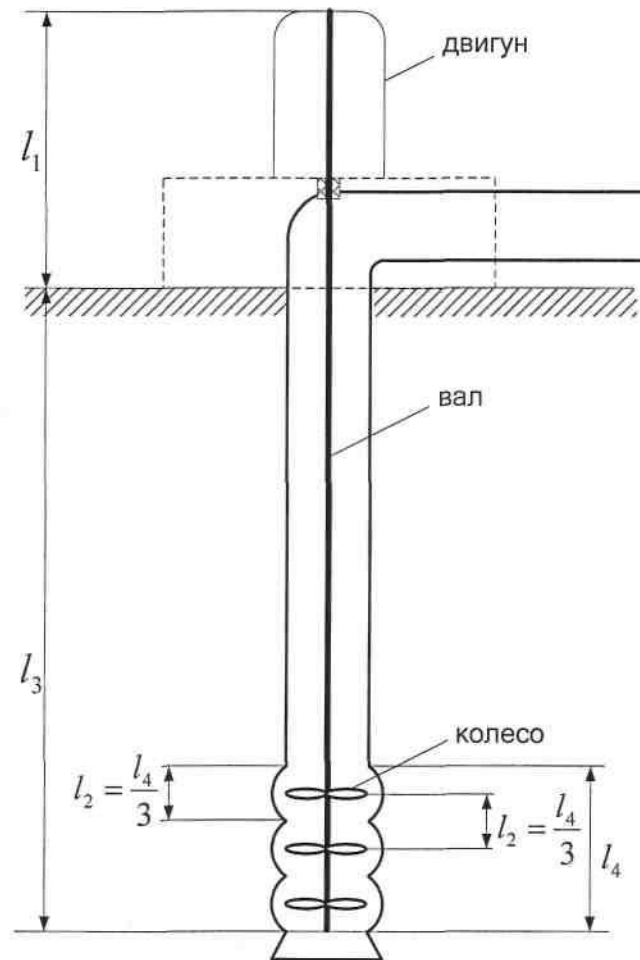


Рисунок 3.2 – схема насосної установки

Еквівалентна схема крутильно-коливної системи (рисунок 3.3) до складу якої входять чотири маси з моментами інерції $J_1 - J_4$, що сполучаються між собою безінерційним валом, який має на ділянках між масами значення податливості e_{12}, e_{23}, e_{34} . Величина податливості для i -ї ділянки валу пов'язана з величиною жорсткості обертання пропорційною залежністю $c_i = \frac{1}{e_i}$.

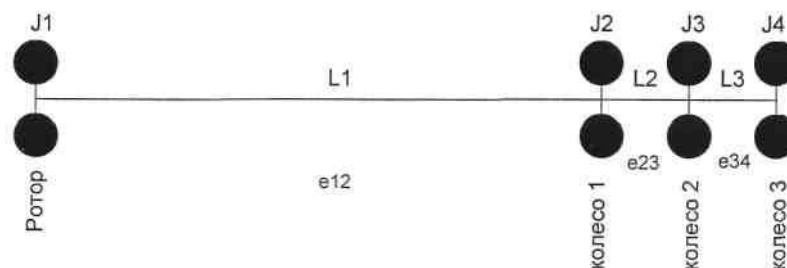


Рисунок 3.3 – Еквівалентна схема крутильно-коливальної системи

Для того щоб визначити частоту власних коливань і відносну амплітуду коливань мас пружної системи, а також щоб змодельовати роботу насосного агрегату, необхідно провести розрахунок значення моментів інерції всіх мас і податливості для всіх ділянок валу. Початковими параметрами виступають геометричні розміри елементів насосної установки (рисунок 3.2):

l_1 - довжина валу від опорного підшипника до поверхні;

l_3 - довжина валу від поверхні до кінцевої відмітки;

l_4 - довжина ділянки з робочими колесами;

l_2 - довжина валу між сусідніми колесами, $l_2 = l_4/3$;

d - діаметр валу;

d_k - зовнішній діаметр колеса насоса;

d_c - діаметр ступиці колеса насоса;

b_k - товщина тарілки колеса насоса;

b_c - товщина ступиці колеса насоса;

J_{rot} - момент інерції ротора електродвигуна.

Якщо довжина ділянок валів між масами відповідає наступним виразам (рисунок 3.3) $L_1 = l_1 + (l_3 - l_4)$; $L_2 = l_2$; $L_3 = l_2$; то момент інерції всіх мас визначається за наступними виразами.

Момент інерції для 1-ї маси визначається як сума моментів інерції ротора і 1-ої ділянки валу:

$$J_1 = J_{rot} + \frac{\pi \cdot \rho_1 \cdot L_1 \cdot d^4}{32}, \quad (3.1)$$

де ρ_1 - густина матеріалу. Для сталі $\rho_1 = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$.

Момент інерції для 2-гої маси J_2 визначається як сума інерції колеса J_{k1} і ділянки валу, яка примикає до колеса з двох сторін в межах секції кожуха J_{k2} :

$$J_2 = J_{k1} + J_{k2}; \quad (3.2)$$

$$J_{k2} = \frac{\pi \cdot \rho_2}{32} \cdot [b_c(d_c^4 - d^4) + b_k(d_k^4 - d_c^4)]; \quad (3.3)$$

$$J_{k2} = \frac{\pi \cdot \rho_1 \cdot L_2 \cdot d^4}{32}. \quad (3.4)$$

де ρ_2 - густина матеріалу. Для чавуна $\rho_2 = 7,25 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$.

Момент інерції для 3-ї та 4-ї мас дорівнює моменту інерції для 2-ї маси $J_3 = J_2 = J_4$.

Податливість усіх ділянок валів:

$$e_{12} = \frac{L_1}{G \cdot J_p}; \quad e_{23} = \frac{L_2}{G \cdot J_p}; \quad e_{34} = \frac{L_3}{G \cdot J_p}; \quad (3.4)$$

$$J_p = \frac{\pi \cdot d^4}{32}. \quad (3.5)$$

де G - модуль зсув. Для сталі $G = 8,1 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^3$;

J_p - полярний момент інерції перетину валу.

Жорсткість всіх ділянок відповідно:

$$c_{12} = \frac{1}{e_{12}}; \quad c_{23} = \frac{1}{e_{23}}; \quad c_{34} = \frac{1}{e_{34}}. \quad (3.6)$$

Якщо позначити амплітуду коливань 1-ї маси через A_i , а частоту власних коливань - ω_c , то система рівнянь для визначення власних частот і амплітуд коливань вузлів насосної установки буде мати наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= A_1 - \omega_c^2 \cdot e_{12} \cdot J_1 \cdot A_1; \\ A_3 &= A_2 - \omega_c^2 \cdot e_{23} \cdot (J_1 \cdot A_1 + J_2 \cdot A_2); \\ A_4 &= A_3 - \omega_c^2 \cdot e_{34} \cdot (J_1 \cdot A_1 + J_2 \cdot A_2 + J_3 \cdot A_3). \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

З системи рівнянь (3.7) визначають $n - 1$ з n амплітуд A_1, A_2, A_3, A_4 , вважаємо, що одна з амплітуд може бути прийнята довільною величиною. Зазвичай при розрахунках приймають $A_1 = 1$.

Тоді з системи рівнянь (3.7) визначаємо не амплітуди, а їхні відношення до A_1 : $\frac{A_1}{A_1=a_1} = 1; \frac{A_2}{A_1=a_2}; \frac{A_3}{A_1=a_3}; \frac{A_4}{A_1=a_4}$.

В n -масовій системі кількість коливань на одиницю менше кількості мас, тобто в розглянутому випадку число форм коливань буде дорівнювати 3. Кожній формі відповідає своя частота власних коливань.

Обчислення амплітуд і власних частот коливань проведемо за методом Толле. Метод полягає у тому, що при власних коливаннях сума моментів сил пружності і сил інерції коливних мас пружної системи $W_i = (A_1J_1 + A_2J_2 + A_3J_3 + A_4J_4) \cdot \omega_i^2$ повинна дорівнювати нулю. Тому за величиною залишку від суми моментів, що отримана при довільному виборі тугової частоти ω , можна оцінювати похибки, допущені при виборі ω .

Для насосу 20НА-22х3 частоти власних коливань дорівнюють: $\omega_{c1} = 7,67$ рад/с; $\omega_{c2} = 60,57$ рад/с; $\omega_{c3} = 103,81$ рад/с. Для розрахованих частот власних коливань $\omega_{c1}, \omega_{c2}, \omega_{c3}$ значення відносних амплітуд коливань a_x можна графічно зобразити по довжині еквівалентної системи увигляді ординат (рисунок 3.3). Таким чином, знаючи частоти власних коливань системи і порядок збудливих гармонік k , можна визначити резонансні числа оборотів валу двигуна (таблиця 3.1) за формулою:

$$\omega_{рез} = \left\{ \frac{\omega_{c1}}{k}; \frac{\omega_{c2}}{k}; \frac{\omega_{c3}}{k} \right\}. \quad (3.8)$$

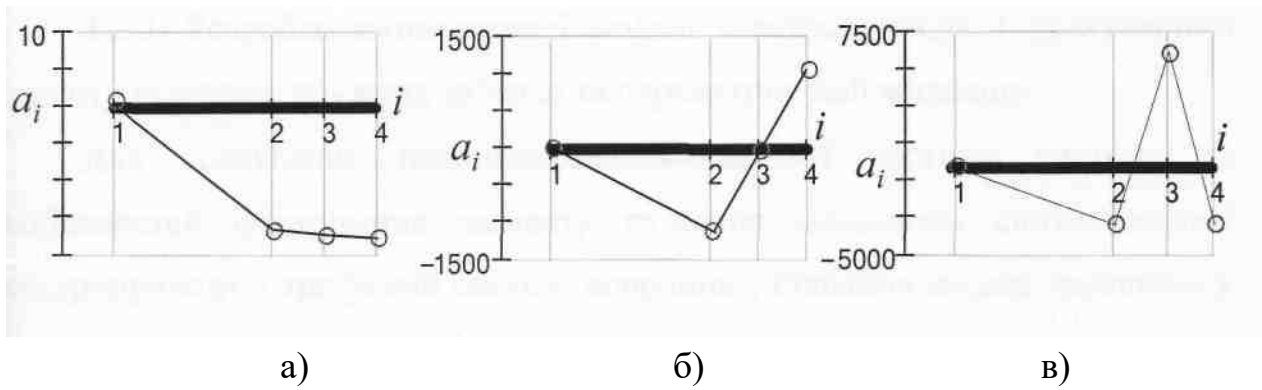


Рисунок 3.3 – Перша (а), друга(б), третя (в) форми коливань.

Таблиця 3.1 – Резонансні частоти обертання (рад/с)

Порядок гармоніки к	1	2	3	4	5	6
1 -а форма коливань	7,67	3,835	2,557	1,918	1,534	1,278
2-а форма коливань	60,57	30,285	20,19	15,143	12,114	10,095
3-я форма коливань	103,81	51,905	34,603	25,953	20,762	17,302

Система рівнянь, що відповідає механічній частині насосної установки за дослідження вимушених крутильних коливань виглядає як:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) &= M_{\hat{y}_1}(t); \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) &= 0; \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 - c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) &= 0; \\ J_4 \ddot{\varphi}_4 - c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Передавальна функція для і-ї ланки має наступний вигляд:

$$W_i(p) = \frac{\varphi_i(p)}{M(p)} = \frac{\frac{1}{c_i}}{1 + \frac{J_i}{c_i} p^2} = \frac{\frac{1}{c_i}}{1 + T^2 p^2}. \quad (3.10)$$

При моделюванні момент інерції двигуна потрібно приймати з урахуванням першої ділянки валу насоса ($J_{\partial e} = J_1$).

3.3 Розробка математичної моделі електропривода з урахуванням моменту рушання, пружних зв'язків та параметрів лінії живлення

Для того щоб врахувати нелінійність механічної частини системи та особливостей формування моменту рушання потрібно виконати синтез моделі електропривода для трифазної системи координат. Рівняння моделі запишемо у векторно-матричному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\vec{\psi}_s^r}{dt} &= \vec{U}_s - \vec{I}_s \vec{R}_s; \\ \frac{d\vec{\psi}_r^r}{dt} &= -\vec{I}_r \vec{R}_r; \\ M_e &= \frac{3}{2} p^2 L_\mu \text{Im}(\vec{I}_s \vec{I}_r^*); \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M_e - M_c, \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

де $M_c = f(T, \gamma, N, \varphi)$ - момент опору на валу насоса;

$\vec{\psi}_s, \vec{\psi}_r$ - вектори потокозчеплень статора і ротора;

\vec{I}_s, \vec{I}_r - вектори фазних струмів статора і ротора;

\vec{I}_r^* - сполучений комплекс струму ротора;

L_μ - взаємна індуктивність між обмоткаи статора і ротора.

Дослідження виконується для електроприводу насоса для мазутного резервуара НА22х3 з використанням асинхронного двигуна типу МА-37, паспортні дані якого наведені в таблиці 3.2.

Залежність $M_c = f(T, \gamma, N, \varphi)$ запишемо у вигляді (3.12) для насоса повністю заповненого технологічною рідиною ($\gamma = 1.0$).

$$\mu = A(T, \gamma) e^{a(T, \gamma) \cdot N}, \quad (3.12)$$

де A, α - коефіцієнти регресії.

Матиматична модель ускладнюється через врахування параметрів системи енергопостачання (рисунок 3.4) та жорстких і пружних з'єднань в електромеханічній системі.

Таблиця 3.2 – паспортні данні АД насоса для транспортування мазуту

Параметр	Вираз	Значення
Номінальна потужність, кВт	P_n	160
Номінальна напруга, В	U_n	380
Номінальний струм, А	I_n	300
Номінальне ковзання	s_n	0.002
Номінальний ККД	η_n	0.91
Номінальний коефіцієнт потужності	$\cos \varphi_n$	0.91
Перевантажувальна здатність	λ_m	2.5
Кратність пускового струму	k_i	6.5
Кратність пускового моменту	λ_n	1.6
Число пар полюсів	p	2
Схема з'єднання	Δ	Трикутник
Параметри схеми заміщення		
Активний опір фази статора, Ом	R_1	0.026
Приведений активний опір фази ротора, Ом	R_2'	0.064
Індуктивний опір фази статора, Ом	X_1	0.0127
Приведений індуктивний опір фази ротора, Ом	X_2'	0.013
Індуктивний опір контуру намагнічування, Ом	X_μ	3.253

До системи рівнянь (3.11) потрібно ввести рівняння лінії енергоживлення і рівняння механічної системи з врахуванням пружних з'єднань:

$$\vec{U}_n = \vec{U}_s - \vec{I}_s R_e - \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} L_e, \quad (3.13)$$

де \vec{U}_n - вектор напруги живлення на затискачах статора АД;

R_e, L_e - еквівалентний активний опір індуктивність мережі живлення.

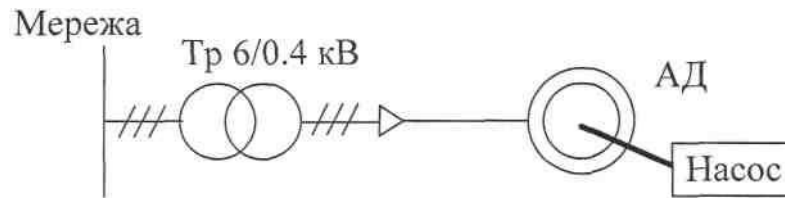


Рисунок 3.4 – Однолінійна схема енергопостачання електропривода насоса.

Рівняння механічної системи з урахуванням пружних з'єднань має вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\Delta\varphi_1}{dt} &= \omega_{\text{a}} - \omega_{k1}; \\
 M_{y1} &= c_{k1} \cdot \Delta\varphi_1; \\
 J_{k1} \frac{d\omega_{k1}}{dt} &= M_{y1} - M_c - M_{y2}; \\
 \frac{d\Delta\varphi_2}{dt} &= \omega_{k1} - \omega_{k2}; \\
 M_{y2} &= c_{k2} \cdot \Delta\varphi_2; \\
 J_{k2} \frac{d\omega_{k2}}{dt} &= M_{y2} - M_c - M_{y3}; \\
 \frac{d\Delta\varphi_3}{dt} &= \omega_{k2} - \omega_{k3}; \\
 M_{y3} &= c_{k3} \cdot \Delta\varphi_3; \\
 J_{k3} \frac{d\omega_{k3}}{dt} &= M_{y3} - M_c,
 \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

де $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3$ - кути скручування між двигуном і 1-м колесом, 1-м і 2-м та 2-м і 3-м колесами насоса відповідно;

$\omega_{k1}, \omega_{k2}, \omega_{k3}$ - частоти обертання відповідних ділянок валу;

M_{y1}, M_{y2}, M_{y3} - пружні моменти в механічних з'єднаннях;

c_{k1}, c_{k2}, c_{k3} - коефіцієнти жорсткості пружних з'єднань;

J_{k1}, J_{k2}, J_{k3} - моменти інерції валів і коліс насоса.

На рисунку 3.5 зображена схема досліджуваної системи з врахуванням нелінійної характеристики моменту опору при русанні.

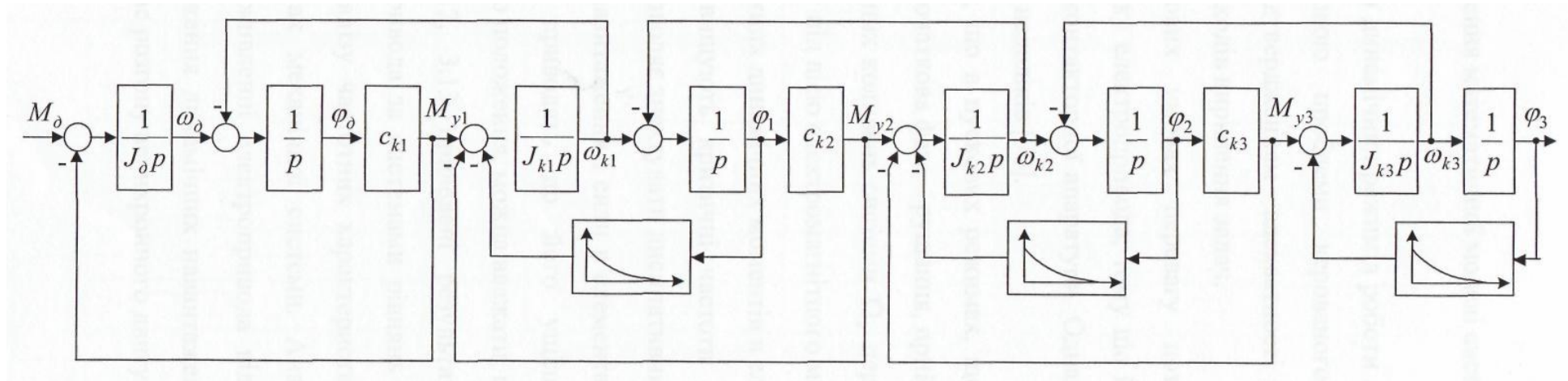


Рисунок 3.5 – Структурна схема механічної частини ЕП з урахуванням пружних зв'язків і нелінійної характеристики моменту опору при русанні

3.4 Дослідження математичної моделі системи керованого рушання

Дослідження динамічних режимів роботи АД електропривода насоса є важливою складовою проблеми керованого пуску і передстартової підготовки - підтвердженням адекватності розроблених моделей та запропонованих заходів вирішення задач.

В промислових найкраще використовувати прямий асинхронний пуск електропривода, оскільки його здійснення не потребує складної релейно-контакторної апаратури. Однак прямий асинхронний пуск має певні недоліки.

В пускових режимах, що аналізуються, найбільшу цікавість викликає початкова фаза – рушання, прийmemo ряд умов:

– бцдемо вважвти, що частота власних коливань системи Ω_b перевищує частоту вимушених коливань Ω_k під дією електромагнітного моменту: $\Omega_b \gg \Omega_k$;

– частоти пружних динамічних моментів в елементах механічної системи суттєво перевищують критичні частоти середовища, яке перекачує насос, як наслідок знехтуємо дисипативними силами ($\beta = 0$);

– динамічні навантаження та сили в елементах коліс насоса коли вони діють на середовище приводять до його ущільнення та враховуючи попереднє положення, можна прийняти, що $M_c = const$.

На рисунках 3.6, 3.7 зображені результати моделювання пускових режимів електропривода за системами рівнянь (3.11) - (3.14). В таблиці 3.3 записані дані аналізу частотних характеристик та показників механічних зусиль в елементах механічної системи. Аналіз отриманих результатів вказує на те, що при живленні електропривода від реальної мережі ($z_m \neq 0$) місце є для обмеження динамічних навантажень на елементи механічних конструкцій, але час розгону асинхронного двигуна значно підвищується:

Таблиця 3.3 – Моменти в елементах механічної схеми при русанні електропривода

В мережі необмеженої потужності ($Z_m = 0$)											
Електрорушійний момент АД			Пружний момент на 1-му колесі			Пружний момент на 2-му колесі			Пружний момент на 3-му колесі		
$\frac{dM}{dt}$	Частота коливань Гц	Амплітуда коливань Н·м	$\frac{dM}{dt}$	Частота коливань Гц	Амплітуда коливань Н·м	$\frac{dM}{dt}$	Частота коливань Гц	Амплітуда коливань Н·м	$\frac{dM}{dt}$	Частота коливань Гц	Амплітуда коливань Н·м
3.5·			2.9			8.4·			3.1·		
	100	3200		60.5	48.68		59.5	332.6		76	148.8
				181.5	218.4		2380	16793		2964	17137
				2420	105.5						
В мережі обмеженої потужності ($Z_m \neq 0$)											
Електромагнітний момент АД			Пружний момент на 1 - му колесі			Пружний момент на 2-му колесі			Пружний момент на 3-му колесі		
1.6 ·			6.6·			7.5·			5.4·		
	100	2200		51	64.7		51	20.5		48.9	14.6
				102	53.7		102	40.9		97.8	19.9
				153	18.4		153	24.7		146.7	10.4
				204	4.9		1734	7.2			

– для мережі необмеженої потужності $t_n = 1.25$ с;

– для реальної мережі $t_n = 5.73$ с.

Втрати енергії в двигуні (статорі і роторі) $W = \int_0^{t_n} I^2 R dt$ поділяються наступним чином (таблиця 3.4)

Таблиця 3.4 – Втрати енергії в АД при асинхронному пуску

В мережі необмеженої потужності ($z_m = 0$)		В мережі обмеженої потужності ($z_m \neq 0$)	
Втрати в статорі, Дж	Втрати в роторі, Дж	Втрати в статорі, Дж	Втрати в роторі, Дж
$5.6 \cdot 10^6$	$5.4 \cdot 10^6$	$1.8 \cdot 10^7$	$1.8 \cdot 10^7$

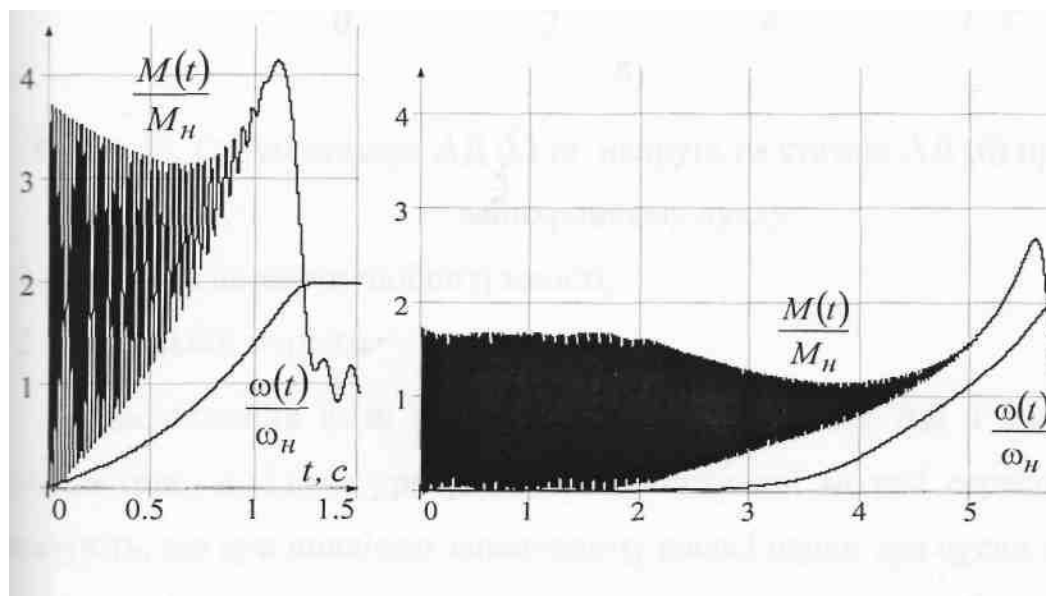


Рисунок 3.6 – Електромагнітний момент та кутова частота обертання АД при прямому асинхронному пуску

На рисунку 3.6 зображено: а) мережа необмеженої потужності; б) реальна мережа.

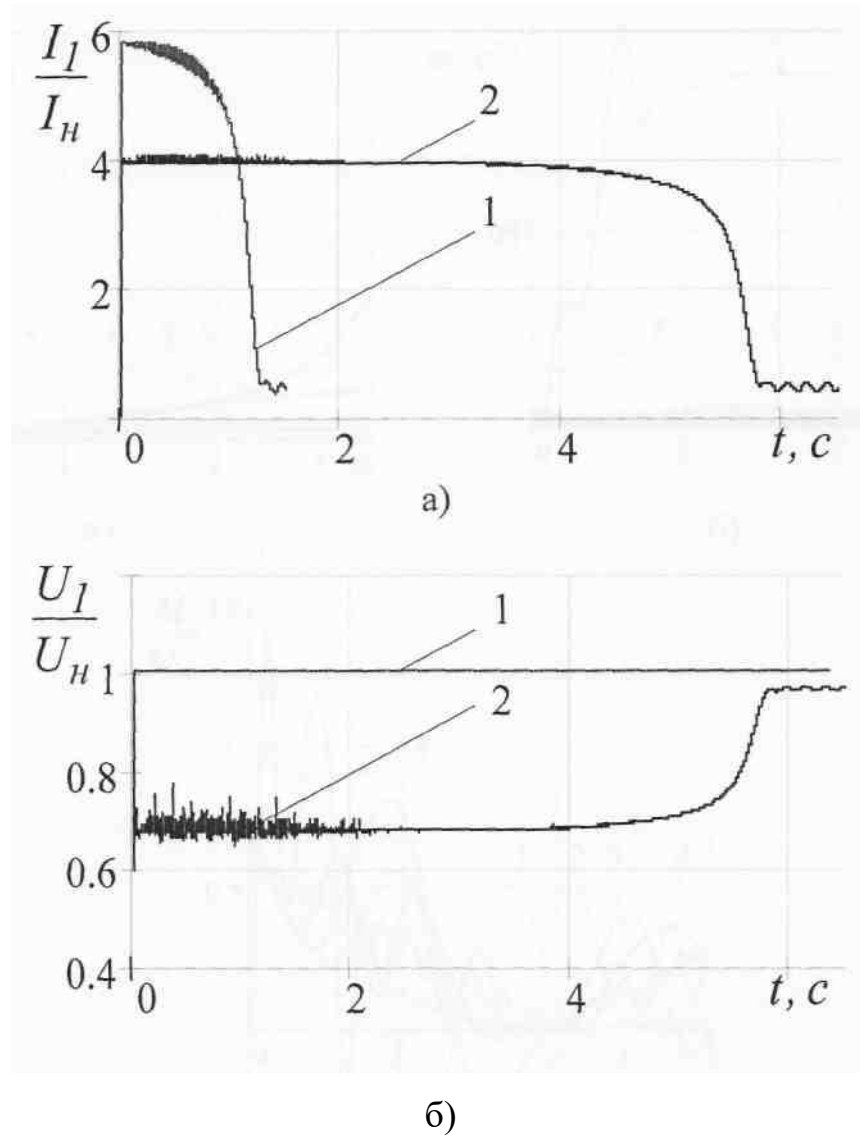


Рисунок 3.7 – Струм статора АД (а) та напруга статора АД (б) за прямого асинхронного пуску

На рисунку 3.7 зображено: 1- мережа необмеженої потужності; 2 - реальна мережі.

Дослідження фази рушання та початку розгону АД за використання моделі (рисунок 3.5) при врахуванням статистичної моделі середовища (3.12) вказують на те, що при повністю заповненому насосі перші три пуски не склалися і двигун був відключений системою захисту від перегріву або від невдалого гуску (рисунок 3.8, криві 1-3). За четвертого включення АД на 2-й секунді починається поступовий розгін двигуна і такий запуск можна вважати успішним (рис. 3.8, крива 4).

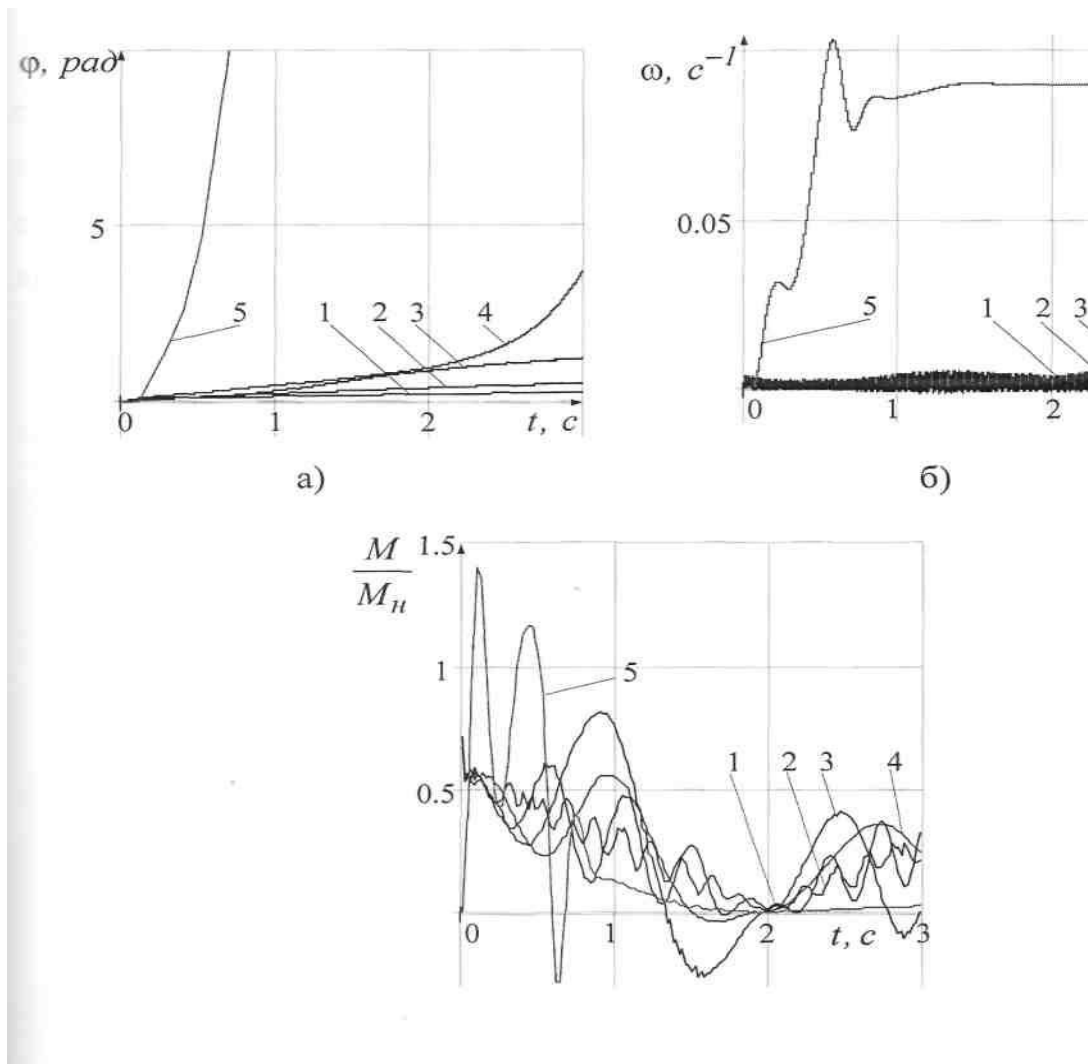


Рисунок 3.8 – Зображення кута обертання ротора (а), кутової частоти обертання (б) та динамічного моменту АД (в) на етапі рушання АД з урахуванням мережі

На рисунку 3.8 показано : 1- перший пуск з прямим підключенням до мережі; 2 - другий пуск з прямим підключенням до мережі; 3 - третій пуск з прямим підключенням до мережі; 4 - четвертий пуск з прямим підключенням до мережі; 5 - пуск від СКР з частотою модулювання напруги живлення 5.5 Гц.

Результати моделювання (рис. 3.8, крива 5) дозволяють стверджувати, що застосування системи керованого рушання на основі ТПН з режимі квазічастотного керування забезпечує рушання та пуск електропривода насоса навіть в найбільш складних умовах при першому включенні АД (рисунок 3.9).

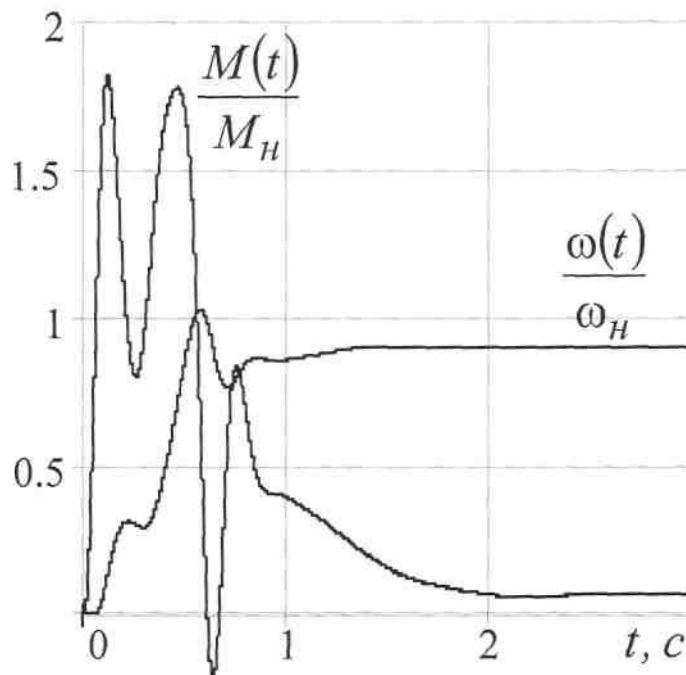


Рисунок 3.9 - Характеристика електромагнітного моменту і кутової частоти обертання АД при пуску електропривода при застосуванні системи керованого рушання (масштаб кутової частоти обертання 10:1)

При живленні АД від ТПН в режимі квазічастотного керування з частотою 4.5 Гц розгін до кутової частоти 28 c^{-1} здійснюється за 0.75 с, після чого частота підвищується до 50 Гц і привід досягає номінальної кутової частоти.

3.5 Висновки

1. Розгляд математичної моделі електротехнічної системи «лінія живлення - електропривод - технологічний механізм» вказує на те, що використання СКР забезпечує надійний запуск ЕП технологічного механізму при важких умовах пуску, значному впливі параметрів мережі живлення та при одночасній дії цих факторів.

2. Визначено, що КЧК використаний як засіб керованого рушання надає змогу контролювати амплітудні та інтегральні значення електромагнітного

моменту АД завдяки зміні фазового кута між перемикальними функціями або зміною кута керування силовими тиристорами, що забезпечує необхідні режими рушання, а саме, форсування пускового моменту, реверсування, кроковий режим, рух на зниженій швидкості.

3. При вибраних параметрах механізму і конструктивних особливостях передач створюється небезпека прояву резонансних коливань електромеханічної системи. Тому в багатьох практичних випадках виникає потреба аналізу динамічних навантажень реальних кінематичних ланцюгів з урахуванням пружних зв'язків з метою уникнення резонансних коливань під час рушання.

4. Розроблена методика визначення частот власних коливань системи дозволяє уникнути в режимі КЧУ руху на резонансних частотах обертання валу двигуна.

5. Дослідження математичної моделі фази рушання вказує на істотний вплив параметрів лінії живлення на характеристики рушання і пуску ЕП. У ході дослідження встановлена доцільність та ефективність використання системи керованого рушання на базі ТПН з КЧК як в умовах мережі живлення необмеженої потужності, так і в умовах значного віддалення технологічного об'єкту від джерела живлення.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ КЕРОВАНОГО РУШАННЯ

4.1 Оцінка впливу керованого рушання на збільшення строку служби ізоляції електричних машин

Згідно методики, що викладена у [3,7], тривалість строку служби ізоляції електричної машини

$$B = C e^{-b\vartheta}, \quad (4.1)$$

де B та C - параметри, що мають розмірність часу (роки, місяці, дні, часи, секунди);
 b - коефіцієнт, що характеризує стан та фізичні властивості ізоляції при постійній температурі ϑ (Прийmemo $b = 0.069 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Спрацювання ізоляції в одиницю часу при постійній температурі $\vartheta, ^\circ\text{C}$

$$\xi = \frac{1}{B} = \frac{1}{C} e^{b\vartheta}, \quad (4.2)$$

де ξ — параметр, що має розмірність час⁻¹.

Для визначення відносного збільшення або зменшення строку служби ізоляції будемо користуватися безрозмірною величиною $\xi C = z$.

Так, наприклад, спрацювання ізоляції за один рік при відсутності перевантажень (при $\xi_{ном} = 120^\circ \text{C}$) та щоденній роботі АД

$$z_{ном} = e^{b \cdot \xi} \cdot D \cdot C^\Sigma = e^{0.069 \cdot 120} \cdot D \cdot C^\Sigma = 122.68 \cdot 10^9, \quad (4.3)$$

де C^Σ – кількість секунд на добу роботи АД у номінальному режимі ($C^\Sigma = 24 \cdot 3600$);

D – кількість днів роботи АД на рік ($D = 365$).

Строк служби ізоляції електричної машини при відсутності перевантажень, у відповідності до рівнянь (5.1) та (5.2), визначаємо як обернену величину:

$$\frac{1}{z_{ном}} = 8,151 \cdot 10^{-12}. \quad (4.4)$$

Проаналізуємо спочатку прямий некерований пуск АД з позиції скорочення строку служби ізоляції його обмоток. Зробимо декілька припущень:

– у зв'язку з тим, що, під час кожної спроби пуску, час перевантаження $t_{пер}^N$ значно менше сталої часу нагрівання τ ($t_{пер}^N \ll \tau$ де N – номер спроби), а час між спробами також незначний, вважатимемо, що має місце тільки одна спроба пуску з загальним часом $t_{пер}^{\Sigma} = t_{пер}^1 + t_{пер}^2 + t_{пер}^3 + t_{пер}^4 = 10$ с.

– кратність пускового струму по відношенню до номінального складає $k=5$;

– стала часу нагрівання дорівнює $\tau = 150$ с;

– температура обмотки у номінальному режимі складає $\vartheta_{ном} = 120^{\circ}\text{C}$;

Нехтуючи тепловіддачею при короткочасних перевантаженнях, знаходимо спрацьовання ізоляції за час нагрівання струмом $I_n = kI_{ном}$ [7]:

$$z_{нагр} \int_0^{t_{пер}} e^{b\left[\vartheta_{ном} + \Delta(\Delta\vartheta)_{пер} \frac{t}{t_{пер}}\right]} dt = \frac{t_{пер} e^{b\vartheta_{ном}}}{b\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}} \left[e^{b\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}} - 1 \right], \quad (4.5)$$

де $\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}$ - збільшення перевищення температури за повний час перевантаження $t_{пер}^{\Sigma}$.

Визначимо збільшення перевищення температури обмоток статора щодо навколишнього середовища за рівнянням:

$$\Delta(\Delta\vartheta)_{пер} = \Delta\vartheta_{пер} - \Delta\vartheta_{нач} = \frac{k_R J_{ном}^2}{150} (k^2 - k_{нач}^2) t_{пер}^{\Sigma}, \quad (4.6)$$

де k_R – коефіцієнт, що враховує збільшення активного опору за рахунок витиснення струму (при перевантаженнях, що зменшують швидкість не більш ніж на 10-20%, $k_R \approx 1$, при нерухомому роторі $k_R = 3$);

$k_{нач}$ – початкове значення кратності пускового струму по відношенню до номінального (наприклад, при роботі до перевантаження у номінальному режимі, $k_{нач} = 1$ при нерухомому роторі $k_{нач} = 0$);

$J_{ном}$ – номінальна густина струму, що зазвичай приймає значення $J_{ном} \geq 5 \text{ А/мм}^2$ (приймаємо у розрахунках $J_{ном} \geq 5 \text{ А/мм}^2$).

При $k=5$, $k_{нач} = 0$, $k_R = 3$, $J_{ном} \geq 5 \text{ А/мм}^2$, $t_{пер}^{\Sigma} = 10 \text{ с}$ маємо:

$$\Delta(\Delta\vartheta)_{пер} = \frac{3 \cdot 5^2}{150} (5^2 - 0) \cdot 10 = 125(^{\circ}\text{C}).$$

Спрацювання ізоляції за час охолодження визначаємо за визазом [7]:

$$z_{охл} = \frac{\tau e^{b\vartheta_{ном}}}{b\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}} \left[e^{b\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}} + 4e^{\frac{b\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}}{2}} - 5 \right]. \quad (4.7)$$

Загальне спрацювання ізоляції за час одного циклу нагрівання та охолодження обмотки двигуна:

$$z = z_{нагр} + z_{охл} = \frac{\tau e^{b\vartheta_{ном}}}{b\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}} \left[4e^{b\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}} + e^{b\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}} \left(1 + \frac{t_{пер}}{\tau} \right) - 5 - \frac{t_{пер}^{\Sigma}}{\tau} \right]. \quad (4.8)$$

Якщо прийняти, що перевантаження відбувається один раз на добу, то додаткове спрацювання ізоляції при важких умовах рушання та пуску АД впродовж року буде дорівнювати:

$$z_1 = z \cdot D, \quad (4.9)$$

де D – кількість днів роботи АД на рік ($D = 365$).

Спрацювання ізоляції під час роботи АД в номінальному режимі впродовж року при температурі обмоток 120°C :

$$z_2 = e^{b \cdot \vartheta} \cdot D \cdot C = e^{0.069 \cdot 120} \cdot D \cdot C, \quad (4.10)$$

де C – кількість секунд на добу роботи АД у номінальному режимі за винятком часу перевантаження $t_{пер}^{\Sigma} = 10 \text{ с}$ та часу охолодження $3\tau = 450 \text{ с}$. ($C = 85940$).

Тоді спрацювання ізоляції за рік:

$$z_{\Sigma} = z_1 + z_2. \quad (4.11)$$

Загальний строк служби ізоляції АД з урахуванням перевантаження:

$$D_{пер}^{\Sigma} = \frac{1}{z_1 + z_2}. \quad (4.12)$$

Визначимо строк служби та спрацювання ізоляції АД за один рік при квазічастотному пуску з використанням СКР.

При $k=5$, $k_{нач} = 0$, $k_R = 3$, $J_{ном} = 5 \text{ А/мм}^2$, $t_{пер}^{\Sigma} = 2 \text{ с}$ за виразом (4.6) визначимо збільшення перевищення температури обмоток статора щодо навколишнього середовища:

$$\Delta(\Delta\vartheta)_{пер}^{КЧК} = \frac{3 \cdot 5^2}{150} (5^2 - 0) \cdot 2 = 25(^{\circ}\text{C}).$$

Використовуючи рівняння (5.5), (5.8), (5.9) визначимо спрацювання ізоляції за час нагрівання $z_{нагр}^{КЧК}$, спрацювання за час охолодження $z_{охл}^{КЧК}$ та загальне спрацювання ізоляції $z^{КЧК}$ за цикл «нагрівання - охолодження» при квазічастотному керуванні.

За виразами (5.10), (5.11) визначимо додаткове річне спрацювання ізоляції при керованому рушанні АД $z_1^{КЧК}$, та річне спрацювання ізоляції під час роботі АД в номінальному режимі $z_2^{КЧК}$. Загальне річне спрацювання ізоляції $z_{\Sigma}^{КЧК}$ визначимо як $z_{\Sigma}^{КЧК} = z_1^{КЧК} + z_2^{КЧК}$. Загальний строк служби ізоляції $D_{КЧК}^{\Sigma}$ при КЧК визначимо за рівнянням (5.12). Результати розрахунків зведемо у таблицю 5.1.

Таблиця 4.1 – Стан ізоляції АД в залежності від умов рушання

Пусковий режим АД	Спрацювання за час нагрівання	Спрацювання за час охолодження	Загальне спрацювання за цикл	Загальне спрацювання за рік	Строк служби ізоляції
Прямий пуск	$z_{наг} = 25,463 \cdot 10^6$	$z_{охл} = 402,148 \cdot 10^6$	$z = 427.611 \cdot 10^6$	$z_{\Sigma} = 275.967 \cdot 10^9$	$D_{пер}^{\Sigma} = 3.624 \cdot 10^{-12}$
Пуск з КЧК	$z_{нагр}^{КЧК} = 21.093 \cdot 10^3$	$z_{охл}^{КЧК} = 9.46 \cdot 10^6$	$z^{КЧК} = 3.481 \cdot 10^6$	$z_{\Sigma}^{КЧК} = 127.881 \cdot 10^9$	$D_{КЧК}^{\Sigma} = 7.82 \cdot 10^{-12}$

Відношення спрацювань при прямому пуску та при керованому рушанні: $z_{\Sigma} / z_{\Sigma}^{КЧК} = 2.158$. Таким чином, використання системи керованого рушання дозволяє збільшити строк служби ізоляції електричної машини більш ніж у 2 рази при щоденних перевантаженнях під час важкого пуску.

4.2 Економія електроенергії за рахунок зміни пускового режиму

Економію електроенергії за рахунок зміни пускового режиму АД визначимо, виходячи з вартості електроенергії $C_{кВт} = 0.9$ грн. за 1 кВт·год, кількості насосних агрегатів $N_{АД} = 4$, з паспортних даних АД (таблиця 3.3):

$$C_{пр} = (E_{nn} - E_{кчк}) C_{кВт} \cdot N_{АД}, \quad (4.13)$$

де E_{nn} - споживана на протязі року електроенергія, прямий пуск;

$E_{кчк}$ - споживана на протязі року електроенергія, квазічастотний пуск.

Значення E_{nn} визначимо з урахуванням кількості пусків на добу $n = 7$, кількості робочих днів на рік $D=365$, кратності пускового струму $k= 5$, загальної тривалості прямого пуску $t_{nn} = 10 \text{ с} = 0.002778 \text{ год}$:

$$E_{nn} = \sqrt{3} U_{nn} I_{nn} \cos \varphi D t_{nn} n, \quad (4.14)$$

де $U_{пп}$ - фазна напруга під час прямого пуску, $U_{пп} = 0,75U_H$;

$I_{пп}$ - фазний струм під час прямого пуску, $I_{пп} = kI_H$;

$$E_{пп} = \sqrt{3} \cdot 0,75 \cdot 380 \cdot 5 \cdot 300 \cdot 0,91 \cdot 365 \cdot 0,002778,10^{-3} \cdot 7 = 4782 \text{ (кВт}\cdot\text{год.)}$$

Для режиму керованого рушання визначимо споживану на протязі року електроенергію $E_{кчк}$ з урахуванням часу пуску $t_{кчк} = 2\text{с} = 0,000556 \text{ год}$:

$$E_{кчк} = \sqrt{3}U_{кчк}I_{кчк} \cos \varphi D t_{кчк} n, \quad (4.15)$$

де $U_{кчк}$ - фазна напруга під час керованого рушання, $U_{кчк} = \beta U_{пп}$;

$I_{кчк}$ - фазний струм під час керованого рушання, $I_{кчк} = kI_H$;

β – коефіцієнт, що враховує зниження напруги при КЧК, ($\beta=0,45$).

$$E_{пп} = \sqrt{3} \cdot 0,45 \cdot 285 \cdot 5 \cdot 300 \cdot 0,91 \cdot 365 \cdot 0,000556,10^{-3} \cdot 7 = 77 \text{ (кВт}\cdot\text{год.)}$$

Економія електроенергія за (5.13):

$$C_{пр} = (4782 - 77)0,9 \cdot 4 = 16938 \text{ (грн.)} \quad (4.16)$$

4.3 Економія коштів за рахунок зниження витрат на ремонт електричних машин та підшипникових вузлів насосного агрегату

Визначимо економію коштів за рахунок зниження частоти ремонтів АД шляхом використання СКР, що дозволяє збільшити строк служби ізоляції електричної машини: $z_{\Sigma}/z_{\Sigma}^{кчк} = 2.158$.

Таким чином, відомо, що при прямому пуску 70% аварійних відмов потребують капітального ремонту АД, а з використанням СКР - лише 35%.

Річні витрати на ремонт АД при прямому і полегшеному пуску відповідно:

$$\left. \begin{aligned} C_{pnn} &= \frac{T_0}{T_{nn}} C_{nni} \\ C_{pоn} &= \frac{T_0}{T_{on}} C_{oni} \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

де T_0 - кількість місяців у році, $T_0 = 12$;

T_{nn}, T_{on} - напрацювання на відмову, в місяцях, при прямому і полегшеному пуску;

C_{nn}, C_{on} - витрати на ремонт АД при прямому і полегшеному пуску;

$C_{кап}$ - вартість капітального ремонту АД, ($C_{кап} = 34200.56$ грн.);

$C_{ср}$ - вартість середнього ремонту АД, ($C_{ср} = 13680.23$ грн.).

$$C_{pnn} = \frac{12}{24} (34200,56 \cdot 0,7 + 136800,23 \cdot 0,3) = 14022,23 \text{ (грн.)};$$

$$C_{pоn} = \frac{12}{45} (34200,56 \cdot 0,35 + 136800,23 \cdot 0,65) = 5563,29 \text{ (грн.)}.$$

Економія витрат на ремонтах АД:

$$C_{p\Sigma} = (C_{pnn} - C_{pоn}) \cdot N_{АД}. \quad (4.18)$$

$$C_{p\Sigma} = (14022,23 - 5563,29) \cdot 4 = 33835,76 \text{ (грн.)}$$

Вартість комплексу підшипників для насосного агрегату розрахуємо за виразом:

$$C_n = C_{кп} \cdot N_{АД} \cdot \beta, \quad (4.19)$$

де - $C_{кп}$ вартість одного комплексу підшипників, ($C_{кп} = 1960$ грн.);

β - коефіцієнт, що враховує частоту виходу з ладу підшипникових вузлів, ($\beta = 1/1.2$);

$$C_n = 1360 \cdot 4 \cdot \frac{1}{1,2} = 6533 \text{ (грн.)}$$

Сумарний річний економічний ефект:

$$C_{\Sigma} = C_{np} + C_{p\Sigma} + C_n. \quad (4.20)$$

$$C_{\Sigma} = 3388 + 33863 + 6533 = 43757 \text{ (грн.)}$$

Затрати на впровадження системи керованого рушання:

$$C_c = C_{скр} k_3, \quad (4.21)$$

де $C_{скр}$ - вартість системи керованого рушання, ($C_{скр} = 35000$ грн.);

k_3 - коефіцієнт збільшення витрат з урахуванням транспортування, монтажу і наладки;

$$C_c = 35000 \cdot 1,2 = 42000 \text{ (грн.)}$$

Термін окупності витрат на впровадження СКР:

$$T_{окп} = 12 \cdot \frac{C_c}{C_{\Sigma}}. \quad (4.22)$$

$$T_{окп} = 12 \cdot \frac{42000}{43757} \approx 12 \text{ (місяців).}$$

Економічний ефект від впровадження СКР досягається зміною пускового режиму (3388 грн.); зниженням частоти ремонтів АД (33836 грн.); зниженням спрацювання підшипників (6523 грн.). Термін окупності системи керованого рушання 12 місяців, річний економічний ефект 43757 грн.

Розрахунок економічної ефективності показав, що застосування пристрою поліпшення пускових характеристик дозволяє отримати річний економічний ефект у 43,757 тис. грн. з терміном окупності в 1 рік. Економічний ефект обумовлений зменшенням витрат на ремонт електромеханічної системи та зменшенням кількості споживаної під час рушання та пуску електроенергії.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Магістерською роботою передбачено покращення пускових характеристик систем з електроприводом змінного струму. Усі металеві неструмоведучі частини (корпуса електродвигунів, шаф, світильників, тощо), які можуть опинитися під напругою в наслідок пошкодження ізоляції, заземлюються шляхом приєднання до нульового проводу живлячої мережі.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які впливають на оперативно-ремонтний персонал, що здійснює обслуговування обладнання електромеханічних систем, згідно ГОСТ 12.0.003-74:

Фізичні:

- підвищена та понижена рухомість повітря;
- підвищена та понижена температура повітря робочої зони;
- рухомі машини і механізми, незахищені рухомі елементи виробничого обладнання;
- підвищена та понижена вологість повітря;
- недостатнє освітлення робочої зони;
- недостатність природного освітлення;
- небезпечний рівень напруги електричного кола, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищена вологість повітря;
- психофізіологічні небезпечних та шкідливих виробничих фактори:
- фізичні перевантаження (динамічні);
- нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, монотонність праці).

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

Живлення силового обладнання та системи освітлення лабораторій ВНТУ здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – без підвищеної небезпеки, у зв'язку з відсутністю факторів підвищеної. Технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1. Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно:

- розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах;

- використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки;

- підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2. При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

3. Електрозахисні засоби захисту.

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

Роботи по обслуговуванню електрообладнання.

При роботі, яка зв'язана з доторканням до струмоведучих частин електрообладнання, необхідно на його пусковому пристрої або ключі керування повісити плакат "НЕ ВМИКАТИ, ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ".

Відключене положення комутаційних апаратів до 1000 В з недоступними для огляду контактами (автоматичні вимикачі, пакетні вимикачі, рубильники в закритому виконанні тощо) визначається перевіркою відсутності на їх затискачах або на відходячих шинах, проводах або затискачах обладнання, яке відключається цими комутаційними апаратами. В електроустановках до 1000 В при роботах на збірних шинах РУ, щитів, збірок напруга з шин повинна бути знята та шини (за винятком шин, які виконані ізольованим проводом) повинні бути заземлені. Необхідність та можливість встановлення на приєднання цих РУ, щитів, збірок та підключеного до них обладнання визначає працівник, який видає розпорядження.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат та повітря робочої зони

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних

діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення.

Таблиця 5.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт III.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості III	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Робочою зоною вважається простір, який обмежений огорожуючими конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем підлоги або площини, на яких знаходяться місця постійного або непостійного перебування працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу атмосферного повітря і впливу на нього ряду шкідливих виробничих факторів, утворених в процесі трудової діяльності людини. Склад повітря залишається постійним. Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³.

Таблиця 5.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів по очищенню області. Необхідно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (зернистість), тим вище небезпека.

Тому необхідно здійснювати наступні заходи:

- очищувати пил якнайчастіше.
- щодня протирати гарячі поверхні.
- принаймні, двічі в рік проводити генеральне прибирання всіх областей, включаючи кроквяні ноги, з використанням продувки або пилососа.
- при високих концентраціях обробляти області по частинам.

Низька вологість збільшує потенційну небезпеку.

5.2.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення

В залежності від джерела світла промислове освітлення поділяється на: - природне освітлення - освітленість приміщень світлом неба (прямого або відображеного), яке проникає через світлові пройми в зовнішніх огорожених конструкціях. По своєму спектральному складу воно є найбільш сприятливим. Природне освітлення характеризується коефіцієнтом природної освітленості КПО (ен). КПО - відношення природного освітлення, яке створюється в деякій точці заданої площини всередині приміщення світлом неба, до значення зовнішньої горизонтальної освітленості.

КЕО при природному та суміщеному освітленню.

Характеристика зорової роботи при виконанні - роботи високої точності;

Розряд - III;

Підрозряд зорової роботи - б;

Контраст об'єкту розпізнавання - середній;

Характеристика фону - темний;

Бокове КЕО, %:

- природне 2,0;
- суміщене 1,2.

Основною величиною для розрахунку і нормування природного освітлення є коефіцієнт природної освітленості (КПО). Прийняте роздільне нормування КЕО для бічного і верхнього освітлення. Ті місця, що освітлюється тільки бічним світлом, нормується мінімальне значення КЕО в межах робочої зони, що повинно бути забезпечене в точках, найбільше віддалених від вікна. Нормовані значення КЕО для будинків визначаються за формулою:

$$e_n = e_n \cdot m_n , \quad (5.1)$$

де e_n - значення КЕО для будинків;

m_n - коефіцієнт сонячності клімату ($m_n=0,85$ якщо вікна зорієнтовані на захід).

Природне:

$$e_n = 2,0 \cdot 0,85 = 1,7 \% , \quad (5.2)$$

Суміщене:

$$e_n = 1,2 \cdot 0,85 = 1,0 \% . \quad (5.3)$$

Штучне освітлення.

Штучне освітлення буває двох систем: загальне або комбіноване. Загальне освітлення - освітлення, при якому світильники розміщуються у верхній зоні приміщення рівномірно або пристосувальне до розташування обладнання. Комбіноване освітлення - додаткове освітлення, при якому до загального освітлення додається ще й місцеве. Місцеве освітлення - освітлення, яке створюється світильниками, які концентрують світловий потік безпосередньо на робочих місцях.

Штучне освітлення, лк:

- загальне - 300 лк; комбіноване – 1000 лк.

Для забезпечення нормативного значення e_{min} передбачено:

Штучне освітлення в приміщенні цеху забезпечується світильниками типу РСП08×250 (однолампові) з лампами ДРЛ-250

5.2.4 Виробничий шум

Рівень звука вимірюється в децибелах і визначається по формулі:

$$L = 20 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{U}{U_0}\right), \quad (5.4)$$

де L - рівень шуму, дБ;

P - звуковий тиск, Па;

U_0 - коливальна швидкість, ($U_0=5 \cdot 10^{-8}$ м/с);

P_0 - нульове значення звукового тиску на нижньому порозі чутності в октавній смузі зі середньгеометричною частотою 1000 Гц, умовно прийняте рівним $2 \cdot 10^{-5}$ Па

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки».

Таблиця 5.3 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Шум порушує нормальну роботу шлунка, особливо впливає на центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

5.2.5 Виробничі вібрації

Вібрація відноситься до факторів, які мають велику біологічну активність. Як загальна, так і локальна вібрація несприятливо впливає на організм людини, викликає зміну у функціональному стані вестибулярного апарату, центральної нервової, серцево-судинної систем, погіршує самопочуття та може призвести до розвитку професійних захворювань.

У нашому цеху присутня вібрація типу - За. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання.

Таблиця 5.4 - Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	$\frac{1,3}{108}$ *	$\frac{0,45}{99}$	$\frac{0,22}{93}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	-	-	-	-
Локальна вібрація	-	-	$\frac{2,8}{115}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, $\text{м/с} \cdot 10^{-2}$, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

- динамічне погашення вібрації - приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;
- зміна конструктивних елементів машин;
- застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

І на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

5.2.6 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори вибираються відповідно з Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, затвердженої Наказом Міністерства охорони здоров'я № 528 від 27 грудня 2001 року.

Фізичні перевантаження

Згідно вимог для умов важкості праці Ia: Величина статичного навантаження за зміну при утриманні вантажу з докладання зусиль однією рукою 18000 кгс, двома руками 36000 кгс та за участю м'язів корпусу та ніг 43000 кгс. Робоча поза вільна та зручна (зміна пози «сидячи-стоячи» за бажанням робітника). Нахили корпусу до 50 разів за зміну. Переміщення у просторі (переходи, обумовлені тех. процесом), до 4 км протягом зміни.

Інтелектуальні перевантаження

Тривалість зосередженого спостереження до 25% від часу зміни. Спостереження за екранами відеотерміналів до 2 годин на зміну. Розмір об'єкта розрідження при відстані від очей працюючого до об'єкта розрідження не більше ніж 0,5 м, при тривалості зосередженого спостереження > 5% часу зміни.

Кількість елементів (приймів), необхідних для реалізації простого завдання або в операціях, які повторюються багаторазово менше 10. Тривалість виконання простих виробничих завдань чи операцій, що повторюються >100 секунд.

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи системи керування електроприводом насосу в умовах надзвичайних ситуацій

При взаємодії гама-випромінювань з атомами і молекулами середовища останнім передаються імпульси енергії. Основна частина енергії витрачається на передачу поступального руху електронам і іонам, які утворилися в результаті іонізації. Володіючи великою енергією, первинні електрони виробляють подальшу іонізацію, яка також призводить до утворення полів і струмів. Виникаючі в результаті цього тимчасові електричні і магнітні поля являють собою електромагнітний імпульс (ЕМІ).

Приймачі енергії ЕМІ – тіла, що проводять електричний струм: всі повітряні і підземні лінії зв'язку, лінії керування, сигналізації, електропередачі, металеві щогли і опори, повітряні і підземні антенні пристрої, наземні і підземні трубопроводи, металеві дахи, тощо, виготовлені з металу.

В системі електропривода насосу найбільш чутливим до дії іонізуючого випромінювання є тиристорний перетворювач напруги. В апаратурі системи електропривода радіація викликає оборотні і необоротні процеси, внаслідок яких можуть бути порушення роботи елементів схеми, що приведе до пошкодження апаратури. В елементній базі системи електропривода внаслідок дії іонізуючих випромінювань можлива зміна всіх електричних та експлуатаційних характеристик, залежних від проходження процесу іонізації і порушення структури матеріалів.

Ступінь ураження ЕМІ залежить в основному від амплітуди наведеного імпульсу напруги чи струму та електричної міцності обладнання. ЕМІ пробиває ізоляцію, випалює елементи електросхем тощо. Найчастіше отримують пошкодження вхідні кола електронних пристроїв. Таким чином для стійкої роботи системи керування електроприводом вкрай необхідним є проведення оцінки стійкості її до впливу іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу.

5.3.1 Дослідження стійкості роботи системи керування електроприводом насосу в умовах дії іонізуючих випромінювань

За критерій стійкості роботи системи, що розробляється, приймається допустима доза $D_{дон}(P)$ або граничне значення рівня радіації $P_{гр} (P/год)$, при яких система буде нормально працювати.

Визначаємо граничні значення дози опромінення $D_{гр i}$ для елементної бази системи, при яких виникають незворотні зміни. Отримані данні заносимо в таблицю 9.2

Таблиця 5.5 – Граничні значення експозиційних доз системи керування електроприводом підйому пасажирського ліфта

Елементи системи керуванням електроприводу		$D_{грi}, P$	$D_{гр}, P$
Блок живлення	Мікросхема К90УД2	10^5	10^5
	Конденсатор К45-17	10^5	
	Діод КД523Б	10^5	
	Резистори СПЗ	10^5	
Блок управління	Мікро перемикач	10^7	10^7
	Мікросхема КР1553ЛА5	10^7	
	Транзистор МЛТ	10^7	
Операційна панель	Мікросхема К195КТП2П	10^5	10^8
	Кварц	10^{10}	
	Склотканина	10^8	

По мінімальному значенню допустимої дози, при якій в елементній базі виникають необоротні зміни, визначаємо границю стійкості роботи системи керування електроприводом підйому пасажирського ліфта в цілому. Проаналізувавши дані таблиці 9.2, робимо висновок, що самим уразливим елементом системи з мінімальною дозою $D_{cp}=10^5 P$ є операційна плата.

Визначаємо можливу дозу опромінення D_m за формулою [23]:

$$D_m = \frac{2 * P_{1max} * (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{k_{осл}} \quad (5.1)$$

де P_{1max} – максимальне значення рівня радіації ($P_{1max}=6,47 P/год$);

t_k – час наробки на відказ ($t_k=26280$ год);

t_n – час початку опромінення ($t_n=1$ год);

$k_{осл}$ – коефіцієнт послаблення радіації будинком ($k_{осл}=2$).

$$D_m = \frac{2 * 6,47 * \sqrt{26280} - \sqrt{1}}{1} = 2096,7(P)$$

Порівнюючи граничне значення дози опромінення з можливою, ми бачимо, що

$$D_{ep} > D_m (10^4 > 2096,7).$$

Отже, можна зробити висновок, що дана система керування електроприводом підйому пасажирського ліфта є не стійкою в умовах впливу іонізуючого випромінювання.

Визначимо допустимий час роботи системи блока живлення t_{d1} в заданих умовах за формулою [22]:

$$t_d = \left(\frac{D_{gp} * k_{ocл} + 2 * P_{1max} * \sqrt{t_n}}{2 * P_{1max}} \right)^2 \quad (5.2)$$

$$t_{d1} = \left(\frac{10^5 * 2 + 2 * 6,7 * \sqrt{1}}{2 * 6,47} \right)^2 = 238918 * 10^8 (\text{год})$$

Визначимо допустимий час роботи блок управління системи t_{d2} в заданих умовах за формулою:

$$t_{d2} = \left(\frac{10^7 * 2 + 2 * 6,7 * \sqrt{1}}{2 * 6,47} \right)^2 = 238887 * 10^{12} (\text{год})$$

Визначимо допустимий час роботи системи операційної плати t_{d3} в заданих умовах за формулою:

$$t_{d3} = \left(\frac{10^8 * 2 + 2 * 6,7 * \sqrt{1}}{2 * 6,47} \right)^2 = 238886 * 10^{14} (\text{год})$$

Висновки: можлива доза опромінення елементної бази $D_m = 2096,7(P)$, а $D_{ep} = 10^5 P$. Отже, система системи керування електроприводом підйому пасажирського ліфта є не стійкою в умовах дії іонізуючого

випромінювання. Допустимий час роботи системи керування в заданих умовах становить для блока живлення $238918 * 10^8$ год, для блока управління $238887 * 10^{12}$ год і для операційної плати $238886 * 10^{14}$ год.

5.3.2 Дослідження стійкості роботи системи керування електроприводом підйому насосу в умовах дії електромагнітного імпульсу

При оцінці впливу електромагнітного імпульсу (ЕМІ) на струмопровідні елементи необхідно врахувати, що ЕМІ має горизонтальну та вертикальну складові напруженостей електричного поля і тому повинні визначитися значення напруг на вертикальних та горизонтальних ділянках ліній. Так як для живлення силового обладнання використовується мережа живлення змінної напруги 380В, а кола управління – постійної 24В, то проведемо розрахунок стійкості роботи для обох мереж живлення. Напряга наводки в горизонтальній і вертикальній струмопровідній частині [23]:

$$U_{\Gamma} = E_{\text{в}} \cdot L_{\Gamma}, \quad (5.3)$$

де $E_{\text{в}} = 9,98$ – величина електромагнітного імпульсу (кВ/м);

L_{Γ} – довжина горизонтальної струмопровідної частини системи (м)

$$U_{\Gamma} = 9,98 \cdot 4 = 39,92 \text{ (кВ/м)}.$$

$$U_{\text{в}} = E_{\text{г}} \cdot L_{\text{в}}, \quad (5.4)$$

де $E_{\text{г}}$ – величина електромагнітного імпульсу (кВ/м);

$L_{\text{в}}$ – довжина вертикальної струмопровідної частини системи (м).

$$U_{\text{в}} = 9,98 \cdot 3 = 29,94 \text{ (кВ/м)}.$$

Допустиме коливання напруги живлення:

$$U_{\text{дод}} = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}}{100} * N \quad (5.5)$$

де N - відсоток допуску.

Для силового кола ($U_{\text{ж}}=380\text{В}$)

$$U_{\text{дод}} = 380 + \frac{380}{100} * (\pm 5) = \frac{399}{361} (\text{В})$$

Для кола управління ($U_{\text{ж}}=24\text{В}$)

$$U_{\text{дод}} = 24 + \frac{24}{100} * (\pm 5) = \frac{25,2}{22,8} (\text{В})$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для силового кола ($U_{\text{ж}}=380\text{В}$):

Вертикальної

$$K_{\text{БВ}} = 20 * \lg \left(\frac{361}{25500} \right) = -36,98 \text{ (дБ)},$$

Горизонтальної

$$K_{\text{БВ}} = 20 * \lg \left(\frac{361}{34000} \right) = -39,48 \text{ (дБ)},$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для кола управління ($U_{\text{ж}}=24\text{В}$):

Вертикальної

$$K_{\text{БВ}} = 20 * \lg \left(\frac{22,8}{25500} \right) = -60,97 \text{ (дБ)},$$

Горизонтальної

$$K_{\text{БВ}} = 20 * \lg \left(\frac{22,8}{34000} \right) = -63,47 \text{ (дБ)},$$

Так як для обох мереж живлення $K_{БВ} < 40$ дБ, $K_{БГ} < 40$ дБ, то периферійне обладнання не буде працювати стійко. Зведемо отримані результати в таблицю 9.3.

Таблиця 5.6 – Результати обчислення стійкості роботи системи керування електроприводом підйому пасажирського ліфта в умовах дії ЕМІ

Напруга живлення	L_1 , м	L_2 , м	$K_{БВ}$	$K_{БГ}$	Стійкість
Силове коло 380 В	3	4	-36,98	-39,48	нестійка
Коло управління 24 В	3	4	-60,97	-63,47	нестійка

Для підвищення стійкості роботи системи керування електроприводом підйому пасажирського ліфта слід застосувати екранування.

5.3.3 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи системи керування електроприводом насосу в умовах надзвичайних ситуацій

Робота системи керування електроприводом підйому пасажирського ліфта під дією іонізуючих випромінювань досить стійка, але для підвищення стійкості роботи електроприводу можна застосувати вибіркоче екранування систем керування і електроніки електроприводу підйому пасажирського ліфта до $K_{осл}=7$.

Для захисту від ЕМІ розрахуємо необхідний екран. Щоб визначити якої товщини необхідно застосувати екран, знайдемо перехідне затухання екрану:

$$A = K_{Бном} + K_{Бмін} \quad (5.6)$$

де $K_{Бном}$ – номінальний коефіцієнт безпеки ($K_{Бном} = 40$ дБ);

$K_{Бмін}$ – мінімальний розрахунковий коефіцієнт безпеки.

Для силового кола ($U_{ж}=380$ В)

$$A_{380B} = 40 + 36,98 = 76,98 \text{ (дБ)}$$

Для кола управління ($U_{ж}=24B$)

$$A_{380B} = 40 + 60,97 = 100,97 \text{ (дБ)}$$

Товщину захисного екрану знайдемо за формулою

$$t = \frac{A}{5.2\sqrt{f}} \quad (5.7)$$

де A – перехідне затухання екрану;

f – найбільш характерна частота (15 кГц).

Отже, для обладнання силового кола товщина екрану:

$$t_{380B} = \frac{76,98}{5.2*\sqrt{15000}} = 0,12 \text{ (см)}$$

Для обладнання кола управління товщина екрану:

$$t_{380B} = \frac{100,97}{5.2*\sqrt{15000}} = 0,16 \text{ (см)}$$

5.4 Висновки

Після проведених розрахунків визначено, що робота системи керування електроприводом підйому пасажирського ліфта стійка при заданому рівні радіації 6,47 P/год. До дії ЕМІ система керування електроприводом підйому пасажирського ліфта виявилась нестійкою. Застосування екранування РЕА суттєво підвищує її стійкість в умовах дії електромагнітного імпульсу.

В результаті застосування екранів система буде працювати стійко аж до значення напруженості вертикальної складової 9,98 кВ/м. Ще одним варіантом

підвищення стійкості апаратури до дії ЕМІ є зменшення струмопровідних провідників (їх довжини) шляхом вдосконалення схемокомпоновки РЕА. Крім цього необхідно екранувати кабелі живлення, а також застосувати прилади, які б вимикали радіотехнічні схеми на період впливу ЕМІ.

Отже, при екрануванні системи екраном товщиною не менше ніж 1,2 мм зі сталі, система керування електроприводом підйому пасажирського ліфта буде стійкою в умовах дії електромагнітного імпульсу.

ВИСНОВКИ

У магістерській дипломній роботі розглянуто проблему покращення характеристик рушання і пуску електроприводів технологічних механізмів з важкими умовами пуску. Під час дослідження було визначено, що існуючий математичний апарат для опису механічних характеристик технологічних механізмів враховує не всі важливі складові моменту опору, що має підвищені значення на етапі рушання електромеханічної системи. Перевірено, що момент рушання є одним з чинників інтенсивного зносу та старіння електротехнічного та технологічного обладнання. Зазначено вимоги до системи керованого рушання котра крім формування підвищеного пускового моменту двигуна, повинна забезпечувати реалізацію спеціальних алгоритмів руху вала (односпрямованих або коливальних на малих частотах обертання), що особливо важливо для ефективного подолання підвищеного моменту опору.

Аналіз фізико-хімічних властивостей технологічного структурованого середовища дозволив дати загальне визначення процесу рушання та сформулювати поняття передстартової підготовки електроприводів технологічних механізмів. Розроблена регресійна модель формування моменту рушання, яка враховує фізико-механічні властивості технологічного середовища та технологічні параметра електропривода, може бути покладена в основу синтезу законів та алгоритмів керування системами ЕП, що мають важкі умови рушання.

Розроблені закони квазічастотного керування забезпечують можливість збільшення пускового моменту АД на 35-40 %, роблять можливим використання тиристорного перетворювача напруги для реалізації необхідних режимів керованого рушання.

Аналіз математичної моделі електротехнічного комплексу «лінія живлення - електропривод - технологічний механізм» дозволяє стверджувати, що використання СКР забезпечує надійний запуск ЕП технологічного механізму при важких умовах рушання та значному впливі параметрів мережі живлення. Визначення частот власних коливань конструктивних елементів електромеханічної системи дозволяє уникнути руху на резонансних частотах обертання валу.

Розроблена система забезпечує формування процесу рушання з урахуванням технологічних і конструктивних особливостей конкретного механізму, у тому числі при аварійних зупинах, коли прямий запуск неможливий (запуск насоса на повний зумпф, запуск під завалом скребкового конвейера, кульового млина, дробарки тощо).

Проаналізовано вплив теплових перевантажень на строк служби ізоляції електричних машин при прямому пуску та при пуску, що починається з керованого рушання. Встановлено, що використання системи керованого рушання за умовою зниження теплового навантаження забезпечує збільшення строку служби ізоляції відносно некерованого прямого пуску у 2 рази.

Розрахунок економічної ефективності показав, що застосування пристрою поліпшення пускових характеристик дозволяє отримати річний економічний ефект у 43,757 тис. грн. з терміном окупності 12 місяців. Економічний ефект обумовлено зменшенням витрат на ремонт під час експлуатації електромеханічної системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гладырь Т.В., Родькин Д.И. Технологические предпосылки применения регулируемого и управляемого электропривода // Проблемы создания новых машин и технологий. – Кременчуг: КГПИ. – 2000. – Вып. 1/(8).- С. 25-27.
2. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высшая школа, 1988. – 230 с.
3. Петров И.И., Мейстрель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. – М.: Энергия, 1968 – 264 с.
4. Кесслер А. Расчет нагрева асинхронных двигателей при тяжелом пуске и торможении противовключением // Электричество. – 1963. - №6. – С. 12-16.
5. Гейлер Л.Б. Основы электропривода. – Мн.: Вышэйшая школа, 1972. – 608 с.
6. Справочник по автоматизированному электроприводу. / Под. ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
8. Ермолин Е.М., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
9. Гречко Э.Н., Родькин Д.И., Черний А.П., Тытюк Б.К., Павленко В.Е. Исследование и пути повышения эффективности пусковых систем синхронных двигателей в электроприводах промышленных механизмов: преп. / АН Украины. Ин-т проблем энергосбережения; 93-1. К.: 1993-48 с.
10. Назимов В.Б. Системы управления синхронными электроприводами с емкостными накопителями энергии в контуре возбуждения: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.09.03 – Днепродзержинск, 2001. – 454 с.
11. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях – М.: Недра, 1992. – 236с.

12. Виноградов С.Б. Оценка работоспособности электроприводов насосных станций горно-обогатительных комбинатов // Проблемы создания новых машин и технологий. – Кременчуг : КГПИ. – 1998. – Вып. 2/(5). – С.125 – 127.

13. Луговой А.В., Родькин Д.И., Черный А.П. и др. Энергосберегающее оборудование для систем нерегулируемого электропривода // Проблемы создания новых машин и технологий. – Кременчуг: КГПИ. – 1998 – Вып. 1/(4). – С. 15-23.

14. Коренькова Т.В., Костюк Ю.С. Анализ работоспособности оборудования насосных станций // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук : КДПУ. – 2003. – Вип. 2/(19). – С.78-73.

ДОДАТОК А

Технічне завдання

Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри ЕМСАПТ

д.т.н., професор В. М. Кутін

“ ____ ” _____ 20__ р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗМІННОГО
СТРУМУ

08-16.МКР.001.00.000 ТЗ

Керівник роботи

професор

В.М.Кутін

“ ____ ” _____ 2020 р.

Виконавець: ст. гр. ЕПА-18мс

І.С.Замазаний

“ ____ ” _____ 2020 р.

Вінниця ВНТУ 2020

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Вдосконалення пускових характеристик електромеханічних систем з електроприводом змінного струму».

Скорочене найменування розробки – «Вдосконалення пуску електроприводів змінного струму».

Замовник – кафедра електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем дипломного проектування.

3 Призначення розробки і галузь використання

Вдосконалення надійності і ефективності використання електромеханічних систем з електроприводом змінного струму в гірничорудній, вугільній і хімічній промисловості.

4 Вимоги до розробки

Вдосконалення пускових характеристик, зменшення втрат електроенергії, підвищення рівня надійності експлуатації, розробка на рівні побудови математичних моделей.

5 Комплектація розробки

Аналіз існуючих методів і засобів вдосконалення пускових характеристик. Побудова моделі процесу рушання з врахуванням властивостей середовища.

6 Технічні характеристики

Кількість насосів – 4 шт.; номінальна потужність 160 кВт; номінальна напруга 380 В; кратність пускового струму – 6,5; кратність пускового моменту – 1.6; номінальний ККД насоса – 91%.

7 Джерела розробки

1. Коренькова Т.В., Костюк Ю.С. Аналіз работоспособности оборудован ия насосных станций // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук : КДПУ. – 2003. – Вип. 2/(19). – С. 78-73.

2. Гейлер Л.Б. Основы электропривода. – Мн.: Вышэйшая школа, 1972. – 608 с.

8 Елементна база

Двигун, апаратура керування і захисту, провідники, кабелі і т.п. виробництва України чи країн близького зарубіжжя.

9 Конструктивне виконання

Двигуни асинхронні трифазні з короткозамкненим ротором вибухозахищені виготовляються для потреб народного господарства та для поставок на експорт у країни з помірно кліматом, призначені для комплектації електропривода вертикальних насосів, що застосовуються при перекачування нафтопродуктів у вибухонебезпечних приміщеннях всіх класів та в зовнішніх установках.

10 Показники технологічності

Обладнання виконується на сучасній елементній базі. Його монтаж, заземлення, струмопровід повинні відповідати правилам улаштування електроустановок.

11 Стадії і етапи розробки

Стадії і етапи розробки	Термін виконання
Основна частина пояснювальної записки	
Графічна частина	

12 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками відповідної кваліфікації. Технічний огляд пристрою здійснюється мінімум один раз на півроку. Ремонт здійснюється електромеханіками, фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

13 Живлення електропривода

Живлення електропривода повинно бути виконане трифазною напругою 0,4 кВ.

ДОДАТОК Б
ІЛЮСТРАТИВНІ МАТЕРІАЛИ