

УДК 681.5:502.174
№ держреєстрації 0113U004133
Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
(СумДУ)
40007, м. Суми, вул. Р.-Корсакова, 2;
тел (0542) 687-615, 333-458

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
д-р фіз.-мат. наук, професор
_____ Чорноус А.М.
25.01.2018 р.
м.п.

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

**РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ НА СТАДІЯХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ
АВТОМАТИЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**
(остаточний)

Начальник НДЧ,
канд. фіз.-мат. наук

25.01.18

Д.І. Курбатов

Науковий керівник НДР,
канд.тех.наук, доцент

25.01.18

В.А. Толбатов

2018

Рукопис закінчено 25 січня 2018 р.

Результати цієї роботи розглянуто науковою радою СумДУ,
протокол №6, від 22.02.2018 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, канд.тех.наук, доцент	_____	В.А. Толбатов (реферат; вступ; розділи 1-3; 6; висновки)
Відповідальні виконавці: Канд.тех. наук, доцент	_____	В.Д. Черв'яков (розділи 4-5; додаток А)
Канд.тех. наук, доцент	_____	Г.В. Кулінченко (розділ 6)
Канд.тех. наук, доцент	_____	Ю.Ф. Самедов (розділи 4-5; додаток А)

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	7
ПЕРЕДМОВА.....	9
ВСТУП.....	15
1. АВТОМАТИЗОВАНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПО ЦЕХАХ НА ПЛАН ТОВАРНОЇПРОДУКЦІЇ.....	18
1.1 Управління продажами.....	20
1.1.1 Характеристика об'єкта автоматизації.....	20
1.1.2 Опрацювання заявок.....	21
1.2 Технічна підготовка виробництва.....	22
1.2.1 Конструкторська підготовка виробництва.....	22
1.2.2 Технологічна підготовка виробництва.....	25
1.2.3 Розроблення технологічних процесів.....	27
1.2.4 Нормування трудових ресурсів для виготовлення виробів.....	28
1.2.5 Вимоги до ERP-системи на етапі технологічної підготовки виробництва.....	28
1.3 Формування плану випуску продукції.....	28
1.3.1 Характеристика об'єкта автоматизації.....	28
1.3.2 Вимоги до ERP-системи етапу планування виробництва.....	29
1.4 Планування та оперативне управління виробництвом.....	29
1.4.1 Характеристика об'єкта автоматизації.....	29
1.5 Планування енергоспоживання по цехах на план товарного випуску.....	30
1.6 Бюджетування.....	31
1.6.1 Характеристика об'єкта автоматизації.....	31
Висновки до розділу 1.....	32
2. СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ.....	33
2.1 Призначення і завдання АСКОЕ, АСТОЕ.....	33
2.2 Апаратні засоби АСКОЕ, АСТОЕ.....	35
2.2.1 Архітектура АСКОЕ, АСТОЕ.....	35

2.2.2	Вимірювальний рівень АСКОВЕ, АСТОВЕ.....	36
	Висновки до розділу 2.....	40
3.	ЕНЕРГЕТИЧНА ЕКОНОМІЧНІСТЬ РОБОТИ ЕНЕРГОСПОЖИВАЮЧИХ АГРЕГАТИВ.....	41
3.1	Режими роботи і продуктивність обладнання безперервної дії.....	41
3.2	Енергетична економічність роботи обладнання безперервної дії.....	44
3.2.1	Обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності.....	45
3.2.2	Обладнання з увігнутими характеристиками підведеної потужності.....	48
3.2.3	Обладнання з опуклими характеристиками підведеної потужності.....	51
3.3	Продуктивність і енергетична економічність роботи обладнання циклічної дії.....	53
3.4	Облік пускових витрат енергії при виборі режиму роботи агрегатів.....	56
	Висновки до розділу 3.....	59
4.	ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ГАЛЬМУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗА КРИТЕРІЄМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ.....	61
4.1	Поставлення задачі оптимального керування.....	62
4.2	Розв'язання задачі оптимального керування.....	66
	Висновки до розділу 4.....	69
5.	РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ РУХУ НЕСУЧОГО ОРГАНА В РОБОЧОМУ ЦИКЛІ ЛЕТУЧОЇ ПИЛИ.....	71
5.1	Постановка загальної задачі ресурсозберігаючого керування процесами руху несучого органу летучої пили.....	71
5.2	Декомпозиція загальної задачі оптимального за енерговитратами керування процесами руху несучого органу летучої пили та методи її розв'язання на етапах робочого циклу.....	79
5.2.1	Режим підготовки до запуску привода НО “на поріз”.....	79
5.2.2	Режим робочого ходу.....	85

Висновки до розділу 5.....	100
6. КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПУ	102
6.1 Регульований привід верстатів з ЧПУ.....	106
6.2 Приводи головного руху.....	108
6.3 Моделі та методи вирішення завдань.....	111
6.3.1 Аналіз процесу різання як об'єкта управління.....	114
6.3.2 Перетворювач енергії.....	118
6.3.3 Передавальний пристрій	118
6.3.4 Датчик зворотного зв'язку.....	118
6.3.5 Електричний двигун.....	118
6.3.6 Процес різання.....	119
6.3.7 Підсилювач.....	120
6.3.8 Коригуючий пристрій.....	121
6.3.9 Аналіз стійкості скорегованої системи.....	122
6.3.10 Побудова адаптивної АСУ.....	123
6.3.11 Адаптивна система процесом різання	124
6.3.12 Аналіз системи ЧПУ.....	126
Висновки до розділу 6.....	129
ВИСНОВКИ.....	130
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	133
ДОДАТОК А.....	139

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 140 с., 3 табл., 37 рис., 1 дод., 44 джерела.

РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ НА СТАДІЯХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМАТИЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, ОБЛАДНАННЯ, ВЕРСТАТ, ЧИСЛОВЕ ПРОГРАМНЕ УПРАВЛІННЯ, АДАПТИВНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ОБ'ЄКТ УПРАВЛІННЯ.

Об'єкт дослідження – промислова галузь.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування автоматизованих технологічних об'єктів на основі розробки та впровадження інтелектувальних ресурсозберігаючих технологій функціонування технічного обладнання на стадіях життєвого циклу.

Методи дослідження – метод статистичного аналізу, метод функціонального моделювання, методи експертних оцінок, імітаційне моделювання, а також метод аналітичного моделювання технологічних процесів для здійснення їх аналізу з наряду ресурсозбереження.

Здійснено отримання інформації про об'єкт ресурсоаудиту та вивчення ресурсозберігаючих потоків на об'єкті в цілому та в окремих напрямках, було проведено аналіз ефективності використання матеріальних ресурсів.

Важливими результатами роботи є теоретична підготовка та практичний досвід вирішення проблем в ресурсозбереженні:

- проведення аудиту з наряду, складання балансів, пошук резервів, розроблення і розрахунок економічної доцільності та оцінювання можливостей ресурсозбереження;
- вибір та впровадження сучасного енергоефективного устаткування автоматизованих систем управління підприємствами та локальними системами;
- розробка сучасних моделей та методів ресурсозбереження на стадіях життєвого циклу автоматизованих технологічних об'єктів.
- оптимізація режимів роботи технологічного обладнання.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ERP	- Enterprise Resource Planning, планування ресурсів підприємства
BC	- відомість специфікацій
BЗ	- відомість закупівельних виробів
ЗП	- запчастини, інструменти, приладдя
ПС	- промислові специфікації
ВПС	- відомість промислових специфікацій
КД	- конструкторська документація
ПД	- патентна документація
БД	- бази даних
АСКОЕ	- автоматизована система комерційного обліку енергоресурсів
АСТОЕ	- автоматизована система технічного обліку енергоресурсів
АРМ	- автоматизоване робоче місце
ВЧ	- висока частота
GSM	- Global System for Mobile Communications, глобальна система мобільного зв'язку
КО	- канал обліку
ГО	- група обліку
ЛП	- летуча пила
ТЛ	- технологічна лінія
НО	- несучий орган
МПНО	- механізм переміщення несучого органа
БКМПНО	- програмний блок механізму переміщення несучого органа
КП	- керуючистрій пристрій
СКЛП	- системи керування летучої пили
ОВ	- оброблюємий виріб
ЕП	- електропривод

МЗ	- механізм зчеплення
БКМЗ	- блок механізму зчеплення
ЧПУ	- числове програмне управління
ПЕ	- перетворювач енергії
ПП	- передавальний пристрій
ДЗЗ	- датчик зворотнього зв'язку
Д	- двигун
ПР	- процес різання
ПІ	- підсилювач
КП	- коригуючий пристрій

ПЕРЕДМОВА

Шляхи ресурсозбереження в промисловості

Промисловість споживає велику кількість електричної і теплової енергії, яка витрачається на безпосереднє проведення технологічних процесів, транспортування та інші допоміжні операції. Всі ці витрати електричної і теплової енергії є складовою частиною собівартості харчових продуктів, які необхідно знижувати на одиницю продукції і тим самим збільшувати прибутки підприємств [1].

Витрати всіх видів енергії характеризуються кількістю кіловат-годин на одиницю продукції - для електричної та кількістю палива і теплоти на одиницю продукції - для теплової енергії. Електрична енергія в промисловості використовується для приводу машин, насосів, редукторів; мішалок апаратів, транспортувальних, механічних, гідравлічних та пневматичних пристроїв, виробництва холоду і т.п., а на деяких підприємствах, для перетворення в теплову. Теплова енергія в промисловості у вигляді пари, гарячої води та сушильного агенту - використовується для технологічних операцій.

Теплові витрати на технологічні операції в промисловості визначаються за відомими формулами матеріального і теплового балансів, - проте вони в деякій мірі залежать від умов проведення процесу потоки матеріалів, товщини стінок, ізоляції тощо.

Впровадження у промисловість ресурсозберігаючих технологій значно знизить собівартість продукції і підвищить прибутки на підприємстві [1 – 44].

Застосування автоматизації у ресурсозберігаючих технологіях

Актуальність питання ресурсозбереження на підприємствах промисловості не викликає сумніву. Застарілий парк технологічного встаткування, недостатнє оснащення засобами обліку, регулювання й автоматизації, відсутність реальних економічних стимулів — далеко не повний перелік проблем, які необхідно вирішувати для підвищення рівня ресурсозбереження. Рівень втрат паливно-енергетичних ресурсів української економіки значно перевершує відповідні показники промислово розвинених країн, тому впровадження енергозберігаючих

технологій стає найбільш важливим завданням для всіх галузей промисловості.

Наявний на сьогодні арсенал ресурсозберігаючих технологій достатній для досягнення необхідного рівня економії, проте впровадження технологічних рішень відбувається не у повному обсязі та зі значним відставанням. У світлі цього, для українських підприємств більш актуальним є розробка нових методів ресурсозбереження та оптимальне використання існуючих технологій. Така оптимальність може бути досягнута за рахунок програмних засобів автоматизації керування [1, 21, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44].

Застосування автоматизації можливе на основі вже існуючих інженерних систем підприємства [1]. Автоматичне регулювання дозволить оптимально використовувати наявні енергетичні ресурси (уникати зайвих витрат та перевантажень системи), а також забезпечить численні додаткові переваги, у тому числі: автоматичне керування технологічним процесом у режимі реального часу та візуальне відображення протікання процесів з можливістю оперативного втручання в хід технологічного процесу; контроль і регулювання параметрів технологічного процесу; індикація збоїв і аварійних ситуацій; зберігання архівних даних про хід технологічного процесу тощо.

Можна виділити наступні основні напрямки застосування автоматизації у сфері енергозберігаючих технологій:

1. Запровадження інтелектуального, бажано індивідуально розробленого автоматизованого керування технологічними процесами з урахуванням особливостей кожного конкретного об'єкту;
2. Впровадження систем обліку теплової та електричної енергії;
3. Впровадження систем обліку теплової та електричної енергії;

Запровадження на об'єкті автоматизованого керування процесами передбачає виконання наступної послідовності дій: обстеження й аналіз об'єкту, на основі цього підготовка та розробка технічних завдань; розробка програмного забезпечення; підбір та поставка устаткування для автоматизації; збирання і монтаж устаткування: операторських пультів, шаф керування тощо; інтеграція

мережного устаткування та інших компонентів; навчання та консультації споживача або фахівців замовника; проведення пусконаладжувальних робіт; гарантійне і сервісне обслуговування.

Автоматичне управління — розгалужений процес вибору обґрунтованого рішення по керуванню кожним окремим елементом, що входить до складу енергетичного та енергозберігаючого обладнання на основі інформації від датчиків, що реєструють стан системи. До параметрів зовнішнього середовища відносяться температура, вологість, ентальпія повітря, швидкість та напрям вітру, інтенсивність сонячного випромінювання, наявність опадів. Головні параметри внутрішнього мікроклімату — температура, вологість, - ентальпія повітря, освітлення, стан дверей та вікон. До складу внутрішніх навантажень входять кількість людей та інтенсивність їх руху, тепловиділення від обладнання що знаходиться всередині, наявність та інтенсивність викидів шкідливих та відпрацьованих речовин.

Одержана від вказаних датчиків інформація опрацьовується програмою, що завантажена в мікропроцесор контролера. Результатом цього опрацювання є команди у вигляді фізичних сигналів або сигналів що передаються по мережі.

Причини великого споживання паливно-енергетичних ресурсів на підприємствах

Ресурсозбереження в промисловості можна організувати за допомогою багатьох способів. Успішно використовується модернізація проведених технологічних процесів, а також самої структури конкретних підприємств. Ефективний результат- приносить і реконструкція систем енергопостачання підприємств та окремих промислових об'єктів. Вибір шляху, що дозволяє організувати ефективне ресурсозбереження в промисловості, залежить від індивідуальних особливостей конкретних підприємств, енергозберігаючої політики регіону, положень програми про ресурсозбереження, зацікавленості керівництва підприємств і влади.

Головною мотивацією ресурсозбереження виступають грошові кошти та енергія. При лімітованому доступі до електроенергії додатково виникає мотив

економії. Дана проблема повинна розглядатися комплексно та ресурсозбереження в промисловості повинно сприйматися як один з основних напрямків по скороченню витрат. Відновлення вітчизняної промисловості призвело до зростання енергоспоживання, викликавши тим самим відчутний дефіцит енергетичних ресурсів. Тому введення спеціальних законів, розробка певних програм, які допомагають організувати ефективно ресурсозбереження в промисловості, є оптимальним варіантом вирішення енергетичних проблем, дозволяє більш раціонально використовувати енергетичні ресурси.

Крім організаційних важливо передбачити також і технічні заходи, спрямовані на підвищення енергоефективності в промисловості. До технічних заходів належать: монтаж вузлів обліку споживаного тепла і регулювання подачі теплоносія, заміна встановлених систем обігріву на локальні, установка електротеплогенераторів, застосування конденсаторних установок. Підвищені витрати на експлуатацію техніки пов'язані з недостатнім впровадженням ресурсозберігаючих технологій, а також якісних уніфікованих машин та підтриманням показників їх надійності за рахунок раціонального технічного обслуговування і поліпшення якості ремонту.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування автоматизованих технологічних об'єктів на основі розробки та впровадження інтелектуальних ресурсозберігаючих технологій функціонування технічного обладнання на стадіях життєвого циклу.

Поставлена мета досягається розв'язанням наступних взаємопов'язаних задач дослідження:

1. Провести аналіз сучасних моделей і методів побудови автоматизованих систем ресурсозбереження на стадіях життєвого циклу автоматизованих технологічних об'єктів.

2. Розробити комплекс функціональних організаційних та інформаційних моделей процесів ресурсозбереження на стадіях життєвого циклу автоматизованих технологічних об'єктів;

3. Розробити моделі аналітичного дослідження технологічних об'єктів промислового підприємства і метод їх вдосконалення з напрямку ресурсозбереження;

4. Провести аналіз конкретних технологічних процесів і механізмів промислових підприємств, їх удосконалення на основі запропонованих моделей і методів з напрямку ресурсозбереження.

Об'єкт дослідження є процеси побудови інформаційного середовища автоматизованих систем життєвого циклу з напрямку ресурсозбереження.

Методи дослідження – метод статистичного аналізу, метод функціонального моделювання, методи експертних оцінок, а також метод аналітичного моделювання технологічних процесів для здійснення їх аналізу з напрямку ресурсозбереження.

Висновки

Підводячи підсумок, можна сказати, що в сформованій економічній ситуації проблема ресурсозбереження внаслідок низького самозабезпечення ресурсоносіями, різкого збільшення цін на їх імпорт та значної долі енергоємних галузей промисловості в народному господарстві набуває все більшої гостроти і вимагає свого рішення.

Основні тенденції розвитку світової економіки свідчать про постійне зниження енергоємності промислової продукції як за рахунок зростання обсягів виробництва, так і шляхом широкого впровадження малозатратних організаційно-економічних заходів щодо зниження витрат паливно-енергетичних ресурсів переважно у сфері їх споживання.

З використанням системного підходу та експертних оцінок встановлені найбільш значущі функції енергетичного менеджменту на підприємстві, що включають: моніторинг, облік і стимулювання раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів. Визначено зміст цих функцій, шляхи їх реалізації у відповідності з нормативними актами державних органів. Таким чином, основними напрямками економії енергоресурсів у промисловості є: вдосконалення технологічних процесів, вдосконалення обладнання, зниження прямих втрат

паливно-енергетичних ресурсів, структурні зміни в технології виробництва, структурні зміни у виробленій продукції, поліпшення якості палива та енергії, організаційно-технічні заходи. Проведення цих заходів викликається не тільки необхідністю економії енергетичних ресурсів, але й важливістю обліку питань охорони навколишнього середовища при вирішенні енергетичних проблем.

Результатами застосування автоматизації стане відчутне зниження витрат виробництва завдяки більше ефективному використанню ресурсів, також підвищиться рівень безпеки технологічного процесу, знизиться ризик аварій; доступною стане технологічна інформація (реєстрація подій і діагностика устаткування) для оперативного контролю стану устаткування, для аналізу, оптимізації й планування роботи устаткування і його ремонту.

Впровадження комплексу ресурсозберігаючих технологій дозволяє досягти наступних результатів:

- застосування приладів обліку теплової енергії дозволяє заощадити 20 — 35 % коштів при розрахунках;
- впровадження частотно-регульованого приводу для керування мережними насосами дає економію електричної енергії до 10 — 30 %;
- впровадження більш точних і динамічних автоматичних систем локального регулювання для підтримки режимних параметрів найбільш оптимальним чином дозволяє збільшити економію теплової енергії до 10 — 15 %.

ВСТУП

На розвиток господарюючих суб'єктів в нашій країні істотний негативний вплив робить висока частка енергетичних та матеріальних витрат у витратах виробництва, яка на промислових підприємствах становить у середньому 8-12% і має стійку тенденцію до зростання у зв'язку з великим моральним і фізичним зносом основного обладнання та значними втратами при транспортуванні енергетичних та матеріальних ресурсів.

Одним з визначальних умов зниження витрат на промислових підприємствах і підвищення економічної ефективності виробництва в цілому є раціональне використання енергетичних та матеріальних ресурсів.

Ресурсозбереження на стадіях життєвого циклу автоматизованих технологічних об'єктів є одним з найбільш ефективних напрямів науково-технічного прогресу і засобом активізації структурної перебудови, визначальним чинником довгострокової дії, які мають економічний ефект для всього народного господарства країни. Воно сприяє прискоренню темпів зростання виробництва, зниження цін на промислову продукцію, досягненню високих кінцевих господарських результатів, вирішення соціальних і екологічних завдань. Обсяги ресурсозбереження залежать від рівня технологічної бази та культури виробництва.

Незаперечна роль енергетичних та матеріальних ресурсів у підтримці і подальшому розвитку цивілізації. У сучасному суспільстві важко знайти хоча б одну область людської діяльності, яка не вимагала б прямо або побічно енергії. За час існування нашої цивілізації багато разів відбувалася зміна традиційних джерел енергії на нові, більш досконалі.

На початку XXI ст. почався новий значний етап земної енергетики. З'явилася енергетика "щадна", побудована так, щоб людина не рубав сук, на якому він сидить, дбав про охорону вже сильно пошкодженої біосфери.

На шляху широкого запровадження альтернативних джерел енергії стоять важко розв'язні економічні та соціальні проблеми. По-перше, це висока

капіталомісткість, викликана необхідністю створення нової техніки і технології. Друге, висока матеріаломісткість. Використання альтернативних джерел енергії стримується також браком фахівців. Комплексний підхід до вирішення цих проблем на національному та міжнародному рівні дозволить прискорити їх реалізацію. Проблема економії ресурсів є актуальною в наш час. У сучасних умовах раціональне використання ресурсів стає одним з найважливіших факторів рентабельності і конкурентоспроможності промислових підприємств. Економія ресурсів в даний час стає одним з найважливіших напрямків перекладу економіки на шлях інтенсивного розвитку та раціонального природокористування.

Питання ресурсозбереження та енергоефективності з кожним роком стають все більш актуальними. При цьому напрямок викликає інтерес не тільки у держави та власників бізнесу, а також у представників " простих домогосподарств. Цьому служать ряд причин, серед яких можна виділити :

- дефіцит і постійне зменшення природних ресурсів;
- питання енергетичної безпеки України;
- висока енергоємність української економіки;
- поступове збільшення споживання;
- щорічне зростання цін на імпортовані Україною енергоресурси (газ, нафта).

Висока енергоємність галузей економіки пояснюється низкою факторів, серед яких найвпливовішими є:

- 1) значна частка витрат паливно-енергетичних ресурсів у загальній структурі собівартості продукції;
- 2) високий ступінь фізичного зносу основних фондів, у тому числі виробничого обладнання (65-70 %);
- 3) дефіцит інформації про програми і технології ресурсозбереження;
- 4) порівняно невеликий досвід фінансування таких проектів і, як результат, неактивна їх реалізація.

Представники великих виробничо-промислових компаній України вже сьогодні приділяють велику увагу показникам ресурсозбереження та підвищення

енергоефективності виробництва. Значний крок вперед зробили провідні компанії України, що представляють металургійний сектор, видобувну та машинобудівну галузі. З метою виявлення потенціалу ресурсозбереження в різних регіонах України був розроблений і розрахований спеціальний індекс (Ukrainian Energy Index, UEI), - що дає можливість порівнювати ефективність використання енергоресурсів в регіонах України з урахуванням структури національної економіки.

Найбільш енергоємними галузями народного господарства є:

- металургійна, машинобудівна, хімічна і нафтохімічна промисловості (потенціал ресурсозбереження, за оцінками експертів даного ринку, становить 62-64%),
- житлово-комунальна сфера (35-38%);
- сектор послуг (5%);
- сільське господарство (3-5%).

Також існує потенціал ресурсозбереження в транспортному секторі і в харчовій промисловості.

1 АВТОМАТИЗОВАНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПО ЦЕХАХ НА ПЛАН ТОВАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Для машинобудівних підприємств, що мають в своєму використанні інтегровану автоматизовану систему управління на рис.1.1 наведена блок-схема розрахунку питомих норм витрати енергоресурсів. Розрахунок питомих витрат згідно з блок-схемою призводить до найбільш оптимальних витрат енергоресурсів.

Автоматизація процесу «Планування енергоспоживання по цехах на план товарної продукції» дозволить:

- забезпечити ефективне і оптимальне функціонування бізнес-процесів щодо формування енергоспоживання цехами підприємства;
- керівництву підприємства і користувачам системи отримати повну, оперативну і достовірну інформацію для проведення поглибленого аналізу і оцінки енергоспоживання цехами підприємства і ухвалення рішень;
- виконати оперативний контроль споживання енергоресурсів підприємства, оперативно реагувати на зміни виробничих ситуації за рахунок інформаційної узгодженості роботи цехів і виробничих майданчиків підприємства;
- своєчасно надавати в систему «Бюджетування» інформацію про потребу в енергоресурсах цехами підприємства.

Вищезазначені цілі досягаються за рахунок:

- забезпечення комплексного автоматизованого обліку всіх ділянок діяльності підприємства в рамках єдиної інформаційної бази;
- впровадження сучасних стандартів і концепцій управління ресурсами підприємства (ERP, MRPII), планування виробництва, фінансового планування і бюджетування;
- підвищення оперативності збору, передачі та обробки інформації, а також обміну її між ланками інформаційної системи;
- підвищення продуктивності праці персоналу в результаті звільнення його від трудомістких ручних робіт;

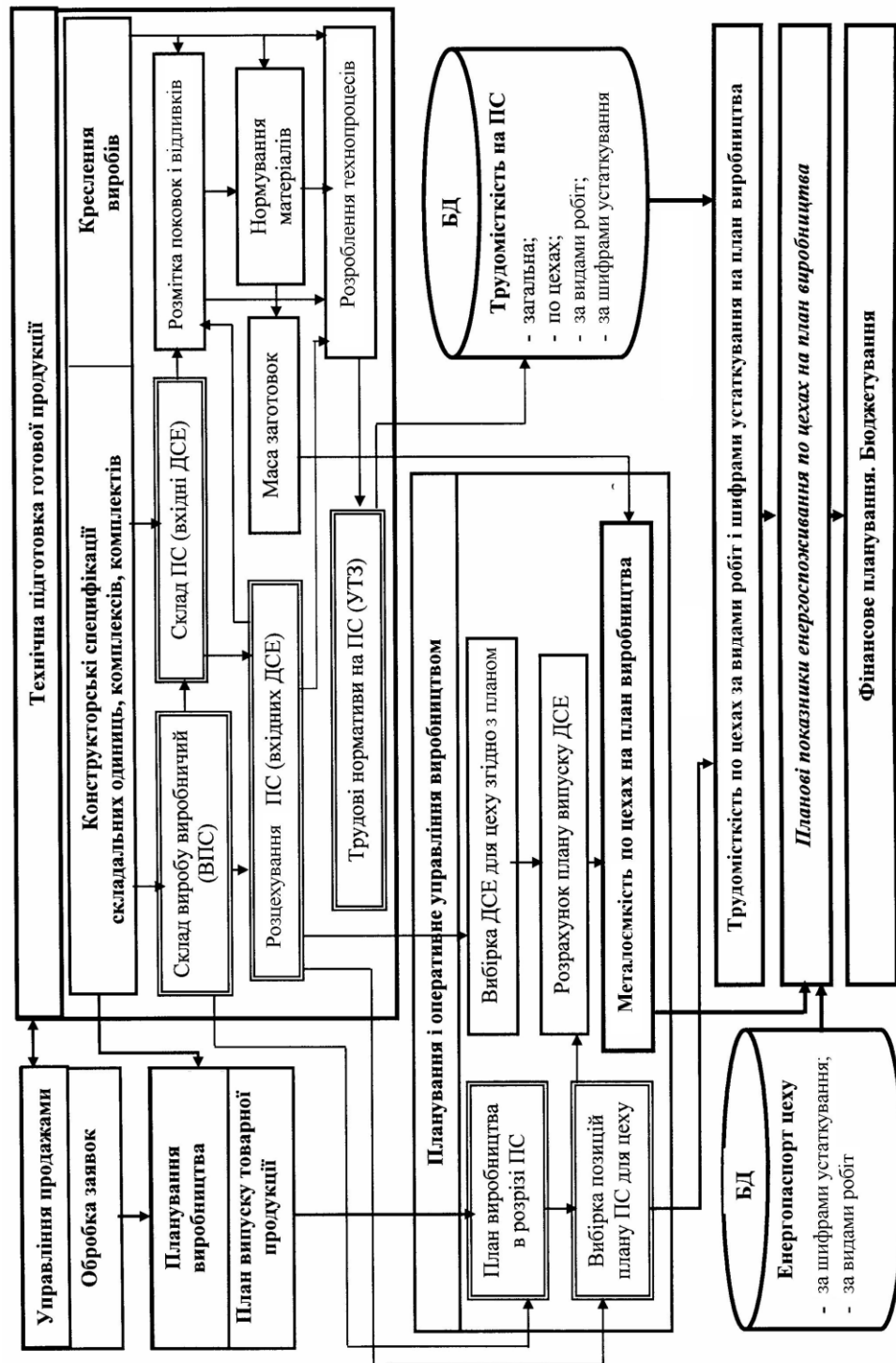


Рисунок 1.1 – Планування енергоспоживання цехами на план випуску товарної продукції

- підвищення достовірності інформації;
- підвищення якості розрахунку фінансових показників і узагальнених числових характеристик результатів діяльності підприємства;
- підвищення наочності, зручності використання та інформативності отримуваних даних;

- одержання доступу керівного персоналу підприємства до всіх інформаційних ресурсів системи;
- проведення автоматизації інформаційного пошуку, отримання інформації безпосередньо на робочих місцях кінцевих користувачів; автоматизація контролю помилок та інших перекручень;
- єдиної бази даних підприємства.

Модель процесу «Планування енергоспоживання по цехах на план товарного випуску» наведена в розділі 1.

1.1 Управління продажами

1.1.1 Характеристика об'єкта автоматизації

Об'єктом автоматизації є діяльність з управління продажами продукції підприємства, що передбачає взаємини з покупцями (замовниками) і внутрішніми службами в частині висновку і контролю виконання договорів і планування продажів.

Власник бізнес-процесу «Управління продажами» - директор з продажів.

Учасники процесу:

- працівники структурного підрозділу «Управління продажів»;
- працівники інших підрозділів, що беруть участь в бізнес-процесі.

Підрозділ Управління продажів забезпечує:

- укладання договорів із замовниками на постачання продукції для підприємства;
- відкриття заводських замовлень на виготовлення продукції на підприємстві;
- формування попередніх графіків запуску, випуску, відвантаження продукції;
- формування остаточного графіка відвантаження продукції;
- складання графіка надходження грошових коштів за укладеними договорами;
- взаємодія із споживачами продукції підприємства за взаєморозрахунками;
- формування бюджету реалізації продукції на місяць, квартал, рік.

Мета бізнес-процесу «Управління продажами» — забезпечення ефективності продажів і отримання доходів (прибутку).

Процес «Управління продажами» містить п'ять основних блоків:

- опрацювання заявок;
- ведення бази даних «Портфель замовлень»;
- планування відвантажень;
- контроль виконання замовлень;
- контроль виконання контракту.

1.1.2 Опрацювання заявок

Всі заявки на виготовлення продукції і оформлення контракту у вигляді факсимільного повідомлення або листа надходять в Управління продажами для розгляду.

Прийнята до розгляду заявка аналізується відповідальним виконавцем із залученням відповідних фахівців з інших підрозділів підприємства, а за необхідності - Замовника. Якщо раніше на заявку, що поступила, не розроблявся «Опитний лист», то він надходить на оцінне збільшене нормування службам.

Під час надходження заявки на продукцію, що вже є в наявності, або постійно вироблювану серійну продукцію і за відсутності від Замовника додаткових умов до тих вимог, які вже закладені в технічній документації на виготовлювану продукцію, і за наявності раніше оформлених «опитних листів», новий «опитний лист» на заявку не оформляється.

«Опитний лист» оформляється для визначення можливості виготовлення продукції і формування ціни. Оформлення можливості виготовлення продукції проводиться на підставі висновків конструкторських підрозділів, виробничо-диспетчерського управління, управління праці і заробітної плати, управління головного технолога, відділу матеріального нормування, відділу стандартизації, планово-економічного управління, управління Головного металурга, Дирекції з постачання. Остаточне рішення про доцільність замовлення до виконання ухвалює

Управління продажами.

1.2 Технічна підготовка виробництва

Машинобудівне підприємство розробляє, виготовляє і поставляє продукцію за проектною документацією, власні розробки, креслення замовникам або замовляє у сторонніх організацій (науково-дослідні та проектні інститути).

Продукція містить компоненти (деталескладальних одиниць і матеріалів) як власного виготовлення (з тривалим, різноманітним і багатоплановим циклом виготовлення), так і ті, що надбані на стороні (велика номенклатура закупівельних виробів і матеріалів). Закупівельні вироби і матеріали можуть піддаватися додатковій обробці на підприємстві. Частина деталескладальних одиниць може виготовлятися в кооперації (заготовки і (або) окремі операції на стороні). Виготовлення деяких компонентів як на підприємстві, так і на стороні вимагає застосування складного технологічного оснащення, яке так само може виготовлятися як на підприємстві, так і на стороні.

Технічна підготовка виробництва зосереджена в управлінні Технічного директора і передбачає:

- конструкторську підготовку виробництва;
- технологічну підготовку виробництва;
- забезпечення виробництва інструментом і технологічним оснащенням.

1.2.1 Конструкторська підготовка виробництва

Конструкторську документацію і дані для оперативної організації закупівель і управління виробництвом створюють конструкторські підрозділи підприємства.

Документація розробляється у міру укладання контрактів (замовлень). При проектуванні конструкторської документації використовуються нормалі уніфікованих і стандартних деталескладальних одиниць, загальнозаводська номенклатура матеріалів, в основу якої покладений класифікатор ОКП.

Розробляються такі основні документи: креслення деталей і складальних одиниць; специфікації; експлуатаційна документація; відомість специфікацій (ВС);

відомість закупівельних виробів (ВЗ); відомість ЗПП; сповіщення про зміни; відомість комплектування; виробнича документація.

Розроблення конструкторської документації і виробничої документації ведеться автоматизовано із застосуванням інформаційних технологій.

Особливістю конструкторської підготовки виробництва є те, що для складних виробів з тривалим циклом проектування видача конструкторської документації у виробництво може виконуватися у міру готовності проектів окремих агрегатів.

Виробнича документація розробляється на вироби, для яких відкриті замовлення на їх виготовлення і є комплекти документів, що містять інформацію:

- про виробничий склад виробу, який формує конструктор у взаємодії із службами директора з продажу;
- про дані конструкторської підготовки виробництва;
- про дані технологічних маршрутів виготовлення виробів і всіх складових його компонентів (всі вхідні деталекладальної одиниці, матеріалів), так само про види робіт (заготовчі, механообробні, складальні), які виконуються в цехах;
- про дані подетальних матеріальних нормативів і зведених норм потреб в матеріалах для виготовлення виробів;
- про дані закупівельних виробів, що комплектують основний виріб;
- інші дані, необхідні для організації виготовлення виробу.

До складу виробничої документації належать документи:

- основна відомість виробничих специфікацій;
- основна відомість виробничих специфікацій рознарядки;
- відомості виробничих специфікацій;
- виробничі специфікації.

ПС – набір відомостей, в яких зазначаються деталі, складальні одиниці, комплекти, матеріали, тобто компоненти складової частини виробу, який підлягає виготовленню для комплектації основного виробу. Кожна відомість є вибіркою деталей і (або) вузлів, об'єднаних за ознакою єдиних правил закупівлі, виготовлення, контролю і т. ін.

ОВПС – відомість, яка приводить у відповідність позиції товарної

специфікації і запозичені і/або такі, що знов розробляються ВПС. Випускається до початку розроблення КД. У ряді випадків випускається ОВПС-Р – відомість другого рівня, в якій перелічуються ВПС, які складають окрему позицію товарної специфікації (рознарядки замовлення).

ВПС – відомість, яка є переліком виробів і (або) їх частин, тобто перелік ВПС першого нижнього рівня тієї, що входить, і (або) ПС, які відповідають складу однієї позиції ОВПС або ОВПС-Р. У ВПС другого і нижче за рівнем тієї, що входить, можуть входити свої ВПС і (або) ПС.

Комплект виробничих документів на виріб, який постачається, а також документи є складовою і структурою (дерево) виробу, що виготовляється замовникові згідно з контрактом.

Дерево структури виробу на рівні виробничої документації відрізняється від дерева структури виробу на рівні конструкторської документації, але складова цих дерев за номенклатурою і кількістю компонентів відповідають один одному.

Вимоги до ERP-системи на етапі конструкторської підготовки виробництва

При впровадженні ERP-системи необхідно забезпечити:

– введення даних про конструкторський і виробничий склад в обсязі, який реалізований в існуючих інформаційних системах підприємства. Введення даних забезпечити засобами ERP, при цьому трудомісткість введення не повинна перевищувати ту, що існує в інформаційних системах підприємства. На початковому етапі введення даних може здійснюватися шляхом імпорту даних з інформаційних систем підприємства;

– виведення даних (за необхідності) у форматах, прийнятих на підприємстві;

– повторне застосування введених даних при формуванні надалі комплектів документів для інших проектів/виробів;

– автоматичне формування конструкторських специфікацій і виробничих документів (ОВПС, ОВПС-Р, ВПС, ПС) та отримання суміжними службами необхідної інформації з виробничого складу і окремих компонентів виробів.

1.2.2 Технологічна підготовка виробництва

До складу технологічних підрозділів входять:

Управління головного технолога забезпечує розроблення технологічних процесів на механічні, слюсарні, фарбувальні роботи і захисні покриття, визначення номенклатури і об'єму оснащення, необхідного для виготовлення виробу. Розроблення збільшених наскрізних маршрутів виготовлення виробів, проектування засобів технологічного оснащення, розроблення керуючих програм для верстатів з ЧПК.

Управління головного зварника забезпечує розроблення технологічних процесів на заготовчі і котельно-зварювальні роботи, визначення номенклатури і об'єму оснащення, необхідного для виготовлення виробу, проектування засобів технологічного оснащення.

Управління головного металурга, яке забезпечує розроблення технологічних процесів на ковальські, ливарні і термічні роботи, визначення номенклатури і об'єму оснащення, необхідного для виготовлення виробу, проектування засобів технологічного оснащення.

Відділ стандартизації забезпечує розроблення КД і ПД, розроблення альбомів робочих креслень на стандартні і уніфіковані деталі, а також типових і одиничних технологічних процесів на заготовчі, котельно-зварювальні, механічні і слюсарні роботи, виготовлення пружин, визначення номенклатури і об'єму оснащення, необхідного для виготовлення виробу, проектування засобів технологічного оснащення, сертифікацію продукції, розроблення стандартів.

Відділ матеріального нормування забезпечує основні виробництва економічно і технічно обґрунтованими нормами витрат матеріалів на всі вироби, що виготовляються об'єднанням. Здійснює роботи з підготовки, тиражування і видачі технічної документації цехам і службам.

Розроблення технологічних маршрутів виготовлення виробів

Робота виконується технологічними управліннями головного технолога з використанням інформаційних технологій. Бюро розцехівки забезпечує розроблення маршруту виготовлення виробів на всі види виробу по основних виробничих замовлень за всіма видами робіт.

Планова група бюро розцехівки отримує комплект конструкторської документації і конструкторські специфікації в паперовому вигляді. Проводить прийом, перевірку комплектації і завантаження в електронному вигляді з системи конструкторської підготовки виробництва. Після цього відбувається передача документації на розцехівку.

До системи вноситься збільшений наскрізний маршрут виготовлення, який складається з точок «цех-вид робіт».

Матеріальне нормування

Конструкторська документація і виробнича документація, яка пройшла розцехівку, надходить в управління головного металурга для виконання розмітки припусків початкових заготовок, а потім у відділ матеріального нормування для встановлення норм витрати матеріалів. Інформація, отримана при розмітці і нормуванні матеріалів, доповнює базову інформацію для розроблення техпроцесів виготовлення заготовок і є підставою для закупівлі матеріалів.

Розрахунок норм здійснюється автоматично і забезпечує вирішення таких завдань: нормування основних матеріалів (ручне, типове); нормування допоміжних матеріалів (ручне, типове); нормування матеріалів власного виготовлення (ручне, типове); автоматичне нормування (перенесення норм з раніше створених ПС в ті, що розробляються); формування вихідних документів.

Способи нормування основних матеріалів:

– за типовими методиками - автоматичний розрахунок норм за введеними параметрами деталі і ручний.

Перелік вбудованих у систему типових методик:

- розрахунок норм витрати на деталі, що виготовляються з сортового прокату (круга, шестигранника, кутика, швелера, двотавра, гнутого профілю, труби);
- розрахунок норм витрати на деталі, що виготовляються з листа (кільця, виготовлені з секторів);
- розрахунок норми витрати на деталі, що виготовляються з листа (конус, зрізаний горизонтальною площиною).

Технолог може стати до виконання робіт з нормування допоміжних матеріалів паралельно з роботою з нормування основних матеріалів, але деякі методики розрахунку норм з допоміжних матеріалів вимагають знання норми витрати основного матеріалу.

Види нормування допоміжних матеріалів: захисні покриття; лакофарбові покриття; слюсарні роботи; складально-зварювальні роботи; інші роботи.

Після закінчення матеріального нормування відбувається тиражування документації, потім надходження в планові групи управління головного технолога, управління головного зварника, управління головного металурга, відділу стандартизації для передання на розроблення технологічних процесів.

1.2.3 Розроблення технологічних процесів

Планові групи управління головного технолога, управління головного зварника, управління головного металурга, відділу стандартизації передають конструкторську і виробничу документацію на розроблення технологічних процесів в технологічні бюро відповідно до спеціалізації бюро. Начальник бюро розподіляє роботу між співробітниками бюро відповідно до кваліфікації співробітника.

При розробленні техпроцесів у системі заповнюються реквізити: операція; шифр устаткування; розряд робіт; підготовчо-завершальний час; основний час; інструкції з техніки безпеки; переходи; режими термообробки; оснащення; кількість оснащення; пріоритет виготовлення технологічного устаткування; ескіз заготівки; операційний ескіз.

Система налагодження для випуску технологічної документації за такими

видами робіт: заготовчі; ковальські; термообробка; котельно-зварювальні; мехоброблення; слюсарні.

1.2.4 Нормування трудових ресурсів для виготовлення виробів

Розрахунок трудовитрат виконується в ході розроблення технологічних процесів і випуску технологічної документації.

1.2.5 Вимоги до ERP-системи на етапі технологічної підготовки виробництва

При впровадженні ERP-системи необхідно забезпечити введення даних технологічної підготовки виробництва засобами ERP-системи і при цьому трудомісткість введення не повинна перевищувати існуючу під час роботи із застосуванням інформаційних систем підприємства або шляхом автоматичного імпорту даних з систем підготовки конструкторської документації підприємства після виконання робіт технологічної підготовки.

1.3 Формування плану випуску продукції

1.3.1 Характеристика об'єкта автоматизації

Дирекція із зовнішньоекономічної діяльності і маркетингу формує номенклатурний план виробництва на рік, використовуючи інформацію з таких документів:

- карток відкриття і закриття замовлень;
- виробничої документації;
- службових записок про отримання авансу, оплати;
- заявок підрозділів підприємства на виготовлення устаткування для власних потреб.

Службових записок про зміну умов контракту:

- замовлень споживачів;
- замовлень підрозділів підприємства;

- службових записок підрозділів підприємства з коректування планів;
- визначення потреб в устаткуванні, матеріальних і трудових ресурсів.

На підставі номенклатурного плану формуються:

- номенклатурний план на квартал;
- номенклатурний план на місяць;
- план випуску продукції на місяць.

На підставі плану випуску продукції на місяць формуються:

- план надходження грошових коштів;
- план відвантаження устаткування (готової продукції).

1.3.2 Вимоги до ERP-системи етапу планування виробництва

При впровадженні ERP-системи необхідно забезпечити:

- введення вхідних даних в існуючі інформаційні системи підприємства;
- виведення даних (за необхідності) у форматах, прийнятих на підприємстві.

1.4 Планування та оперативне управління виробництвом

1.4.1 Характеристика об'єкта автоматизації

Формування основного виробничого плану займає одне з основних місць в плануванні діяльності підприємства. Від правильності його розрахунку залежить ритмічна діяльність всього підприємства, починаючи від діяльності збуту, постачання і виробництва, закінчуючи діяльністю фінансової служби.

Власник бізнес-процесу «Планування і оперативне управління виробництвом» - директор з виробництва.

Учасники процесу:

- працівники планово-диспетчерського управління;
- директори виробництв;
- працівники цехових служб, що беруть участь у бізнес-процесі.

Мета бізнес-процесу «Планування і оперативне управління виробництвом» - ефективна організація виробництва, раціональне

завантаження виробничих потужностей, ритмічний випуск продукції з цехів, забезпечення відвантаження продукції в заплановані терміни і заданої кількості.

Планування і оперативне управління виробництвом передбачає шість основних блоків:

- планування потужностей виробництва;
- планування запуску, випуску продукції;
- планування випуску виробів по цехах;
- оперативно-календарне планування виробництва;
- оперативний облік і контроль виконання планів виробництва;
- аналіз виконання плану виробництва.

У планово-диспетчерському управлінні на підставі номенклатурного плану виробництва (рік, квартал, місяць), картки відкриття замовлення, службової записки про оплату замовлення, складу виробів, технологічних маршрутів, норми витрати матеріалів, норми використання устаткування, норми часу і розцінки здійснюється вибірка позицій плану з розбиттям по цехах. Проводиться аналіз забезпеченості матеріалами, устаткуванням і трудовими ресурсами цих позицій плану.

На цеховому рівні розробляються графіки роботи цехів, змінне завдання по цехах, графіки проміжних кооперативних поставок. Проводиться аналіз забезпеченості матеріалами, розрахунок дефіциту матеріалів на виготовлення замовлень, розрахунок тоннажу, розрахунок плану, поставок матеріалів, оформлення карток дозволу на заміну матеріалу.

1.5 Планування енергоспоживання по цехах на план товарного випуску

Планове споживання (на рис. 2.1 розміщене зліва) складається з двох складових:

Планові показники споживання енергоресурсів (електроенергії, природного газу, води, стисненого повітря і т. д.), що витрачаються на виготовлення продукції по цеху, плануються виходячи з плану випуску готової продукції, опису технологічного процесу видів робіт, шифрів устаткування і наявності в базі даних

енергопаспорта цеху, де зазначені параметри вживання енергоресурсів для кожної одиниці устаткування.

Загальноцехові планові витрати енергоресурсів не нормуються на одиницю випуску продукції і є постійній складовою. У основному це освітлення цехів, опалювання, вентиляція, питна і технічна вода і таке інше. Ці величини прораховуються з обліку етапів року: зима/літо.

1.6 Бюджетування

1.6.1 Характеристика об'єкта автоматизації

Бюджетування підприємства розглядається як технологія управління, заснована на розробці Бюджету підприємства, який є основним інструментом планування, регулювання, контролю, аналізу і оцінки діяльності центрів відповідальності і підприємства в цілому.

Мета процесу «Бюджетування» — створення ефективної системи управління ресурсами підприємства і забезпечення на цій основі стабільного поліпшення фінансово-економічних результатів його діяльності (*зростання прибутку, підвищення рентабельності активів, збільшення операційного грошового потоку, капіталу і ін.*).

Основними завданнями бюджетування є:

- планування майбутнього фінансово-економічного стану підприємства;
- планування структури і об'ємів доходів;
- планування структури і об'ємів витрат;
- планування витрат бюджетного періоду і забезпечення їх покриття грошовими коштами з доступних джерел фінансування;
- управління грошовими потоками, контроль об'ємів і напрямів витрачання грошових коштів;
- контроль виконання Бюджету підприємства, оперативна діагностика відхилень фактичних показників від планових, аналіз і оцінка їх впливу на результати діяльності центрів відповідальності і підприємства в цілому, підготовка даних для ухвалення рішень;

– оцінка ефективності діяльності центрів відповідальності і підприємства в цілому.

З системи «Планування енергоспоживання по цехах на план товарного випуску» в систему «Бюджетування» передається план витрати грошових коштів за енергоресурсів по цехах на план товарного випуску.

Висновки до розділу 1

Підводячи підсумок, можна сказати, що автоматизація процесу «Планування енергоспоживання по цехах на план товарної продукції» дозволить:

- забезпечити ефективне і оптимальне функціонування бізнес-процесів щодо формування енергоспоживання цехами підприємства;
- керівництву підприємства і користувачам системи отримати повну, оперативну і достовірну інформацію для проведення поглибленого аналізу і оцінки енергоспоживання цехами підприємства і ухвалення рішень;
- виконати оперативний контроль споживання енергоресурсів підприємства, оперативно реагувати на зміни виробничих ситуації за рахунок інформаційної узгодженості роботи цехів і виробничих майданчиків підприємства;
- своєчасно надавати в систему «Бюджетування» інформацію про потребу в енергоресурсах цехами підприємства.

2 СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

Механізм ведення обліку і контролю споживання енергоресурсів цехами, дільницями і виробництвами подані на схемі контролю використання енергоресурсів (рис. 2.1).

Фактичні відомості споживання енергоресурсів по цехах (на схемі справа) знімаються з лічильників енергоресурсів, і за каналами передачі даних збігаються в базі даних (БД) автоматизованої системи комерційного та технічного контролю обліку енергоресурсів (АСКОЕ, АСТОЕ).

2.1 Призначення і завдання АСКОЕ, АСТОЕ

АСКОЕ, АСТОЕ призначені для виконання функцій:

- комерційного і технічного обліку споживання електроенергії для кожної точки обліку;
- забезпечення персоналу оперативною інформацією для управління споживанням електроенергії;
- складання балансів електроенергії і потужності;
- побудова графіків навантаження;
- ведення тарифів, диференційованих за часом;
- передача інформації в енергозабезпечувальну організацію;
- передача інформації на АРМ-користувача.

АСКОЕ, АСТОЕ реалізують такі завдання:

- збір інформації про параметри електроспоживання з контрольованих об'єктів;
- формування оперативної бази даних електроспоживання;
- оперативний контроль і управління режимами електроспоживання;
- контроль і аналіз технологічного електроспоживання;
- статистична обробка графіків електроспоживання;

- діагностика стану всіх приладів, що входять в систему;
- формування відомостей і звітних документів про споживання потужності й енергії;
- контроль відхилення частоти і напруги;
- контроль перетікань реактивної потужності;
- набуття моментних значень активної і реактивної потужності, частоти напруги;
- отримання і аналіз коефіцієнта потужності.

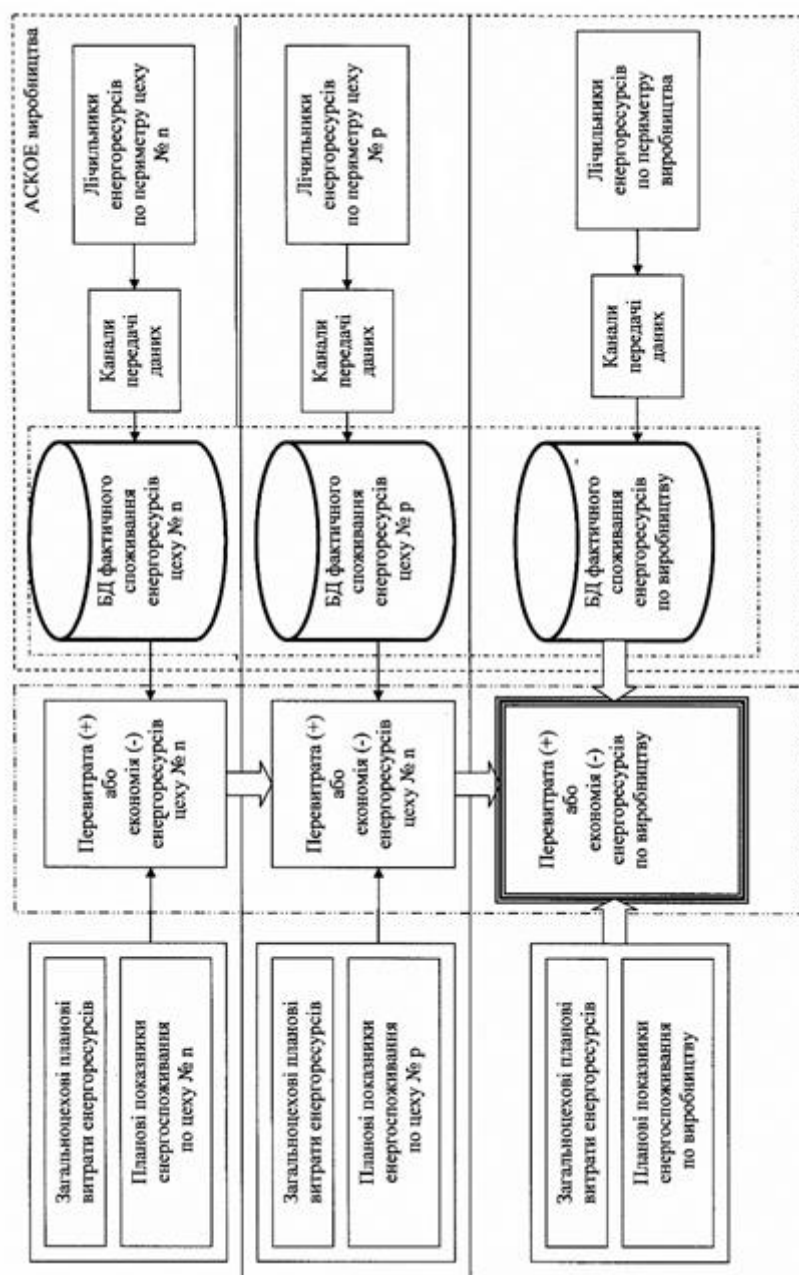


Рисунок 2.1 – Схема контролю використання енергоресурсів

2.2 Апаратні засоби АСКОЕ, АСТОЕ

2.2.1 Архітектура АСКОЕ, АСТОЕ

Архітектура АСКОЕ, АСТОЕ забезпечує точність, достовірність і одночасність отримання даних про облік електроенергії.

В основу АСКОЕ, АСТОЕ покладено принципи відкритості архітектури, відкритості комунікацій і розподіленого функціонування. Це забезпечує незалежність від технічних засобів обліку і систем зв'язку, легку інтеграцію в існуючі системи обробки даних, поетапне розширення АСКОЕ, АСТОЕ і адаптація до поточних вимог з мінімальними витратами. У той самий час, кожна компонента АСКОЕ, АСТОЕ забезпечує узгоджений захист даних від несанкціонованого доступу, а також їх безпеку й цілісність.

Архітектура АСКОЕ, АСТОЕ, що зображена на рис. 2.2, складається з трьох системних компонентів:

- *вимірювального рівня;*
- *комунікаційного середовища;*
- *рівня обробки даних і управління використанням енергії.*

Вимірювальний рівень містить вимірювальні трансформатори струму і напруги, лічильники електроенергії, пристрої обліку і лінії, що сполучають їх, і канали зв'язку. Результатом роботи даного рівня є значення параметрів споживання енергії, забезпеченої ознаками якості (початкове, достовірне, введене вручну, виправлене і т. ін.), тимчасовими позначками їх отримання.

Комунікаційне середовище забезпечує надійне транспортування інформації між вимірювальним рівнем і рівнем обробки й управління без порушення її достовірності.

Як середовище, що передає, використовуються: телефонні виділені або комутаційні канали, радіоканали, ВЧ-канали, розподільні мережі, оптоволокно, канали надтональної частоти, канали тракінгового зв'язку, GSM та інші.

Рівень обробки й управління виконує збір, зберігання, обробку облікової інформації, аналіз, планування й управління споживанням електроенергії. На цьому рівні здійснюються взаємозв'язок з енергозабезпечувальною компанією (ЕЗК), інтеграція з іншими програмно-технічними комплексами автоматизації.

2.2.2 Вимірювальний рівень АСКОЕ, АСТОЕ

Засоби вимірювання параметрів електроенергії, вживані в АСКОЕ, АСТОЕ, містить: вимірювальні трансформатори струму і напруги, лічильники електроенергії (разом з вимірювальними трансформаторами утворюють вимірювальну схему) і пристрої обліку.

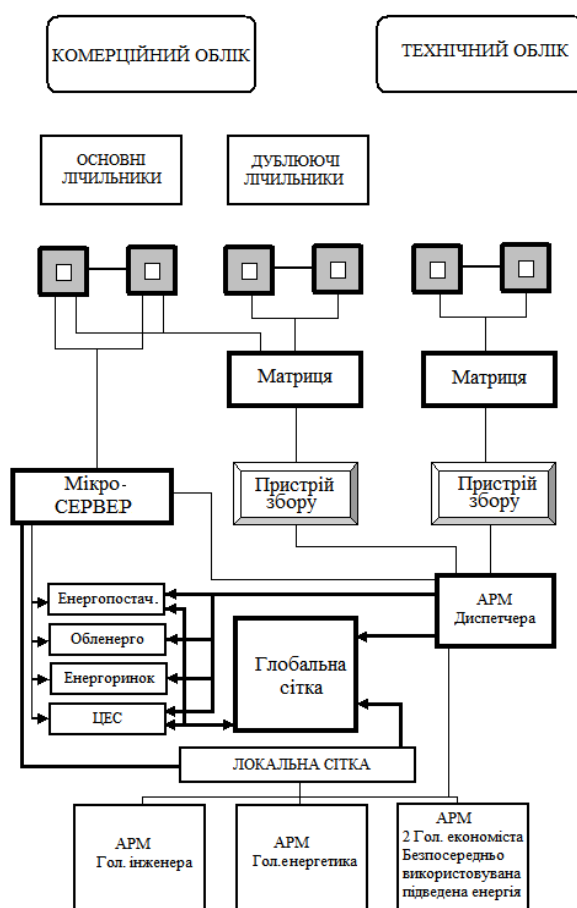


Рисунок 2.2 – Структура АСКОЕ, АСТОЕ

З метою зменшення погрішності розсинхронізації на вимірювальному рівні повинні бути передбачені технічні засоби, що забезпечують синхронність виконання вимірювань всіма вимірювальними схемами (рис.2.2).

Для АСКОЕ, АСТОЕ можуть бути застосовані лічильники електроенергії

індукційні з імпульсним виходом або багатofункціональні електронні з послідовним інтерфейсом або імпульсним виходом. Основні вимоги до лічильників наведені в «Концепції побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку». При виборі типів і марок лічильників слід брати до уваги вже сформовану в Енергетично забезпечуючій компанії інфраструктуру з обслуговування лічильників, наявність перевірного устаткування, сертифікацію персоналу ЕЗК виробниками лічильників. Це дозволить знизити витрати на установлювання і подальшу їх експлуатацію (рис.2.3).

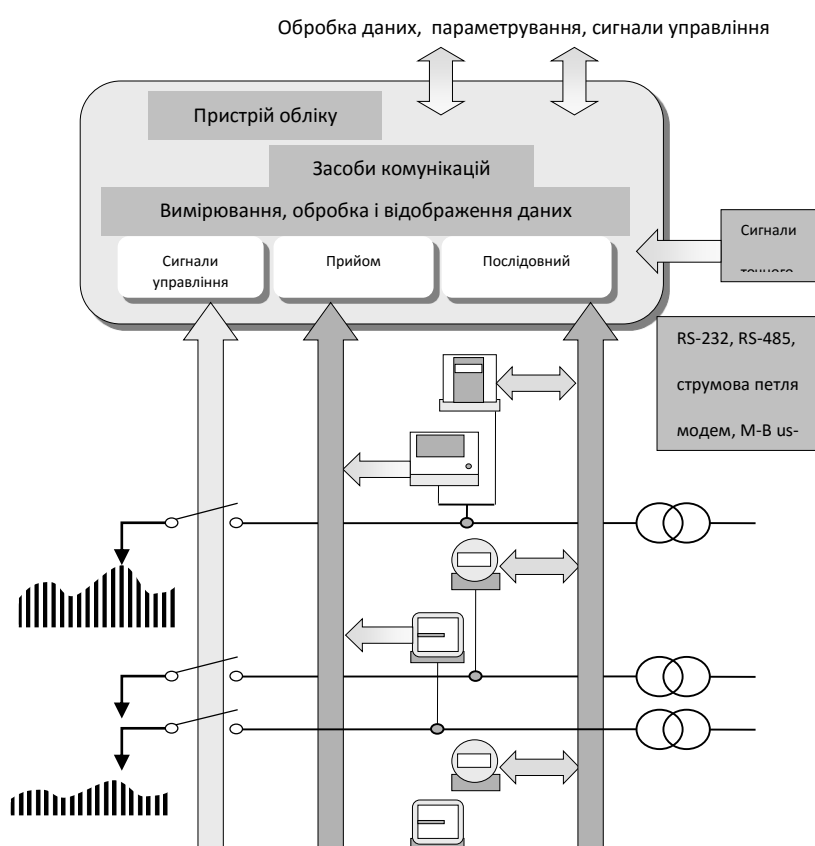


Рисунок 2.3 - Структурна схема вимірювального рівня

Програмне забезпечення є набір взаємодіючих паралельних процесів під керуванням операційної системи реального часу. Основними програмними компонентами є:

- система управління базою даних реального часу - забезпечує надійне і достовірне зберігання даних у темпі вимірювання;
- системний диспетчер - забезпечує синхронізацію ходу внутрішнього

годинника з сигналами точного часу і формує тимчасові інтервали, за якими виконуються процедура вимірювання, обробка і зберігання даних;

- ядро розподільної системи, відповідальне за маршрутизацію інформації в розподільних системах обліку й управління;
- блок обліку й управління — реалізує функції обліку й управління відповідно до конфігурації об'єкта і тимчасових інтервалів, які формуються службою часу (рис.2.4).

Система обліку забезпечує збір даних з первинних приладів обліку (канал обліку КО).

Вторинний об'єкт обліку - група обліку (ГО) - містить зведену інформацію за екранними каналами обліку.

Характеристика об'єкта обліку - параметри вимірювальних трансформаторів, електролічильників, закони групування, договірні значення потужності і енергії, тарифні зони задаються користувачем і можуть бути оперативно змінені в процесі експлуатації.

За всіма каналами обліку вимірюється, обчислюється і зберігається інформація про таке:

- поточну потужність (за 1, 3, 30 хвилин), плинну потужність (за останніх 30 хвилин);
- споживання за розрахункові періоди (доба, місяць, квартал, календарні дні) з урахуванням тарифних зон;
- потужність (прогноз, фіксація максимумів і перевищень, 30-хвилинні графіки навантаження з мінімальною глибиною зберігання 5 діб).

Система обліку повинна реалізувати такі сервісні функції:

- фіксацію запусків, зміни часу, внесення нових значень параметрів, збоїв вимірювальних каналів, ідентифікацію оператора;
- фіксацію тривалості простоїв з коригуванням змісту бази даних при пуску;
- підтримку переходу на літньо/зимовий час;
- ведення і звірення показань лічильників;
- самодіагностику в процесі роботи;

- виведення параметрів на індикатор у режимі перегляду або стеження.

У базі даних проводяться необхідна обробка отриманої інформації й угруповання споживачів по виробництвах. На підставі отриманих даних формується відомість про споживання по окремих цехах, виробництвах і підприємстві у цілому.

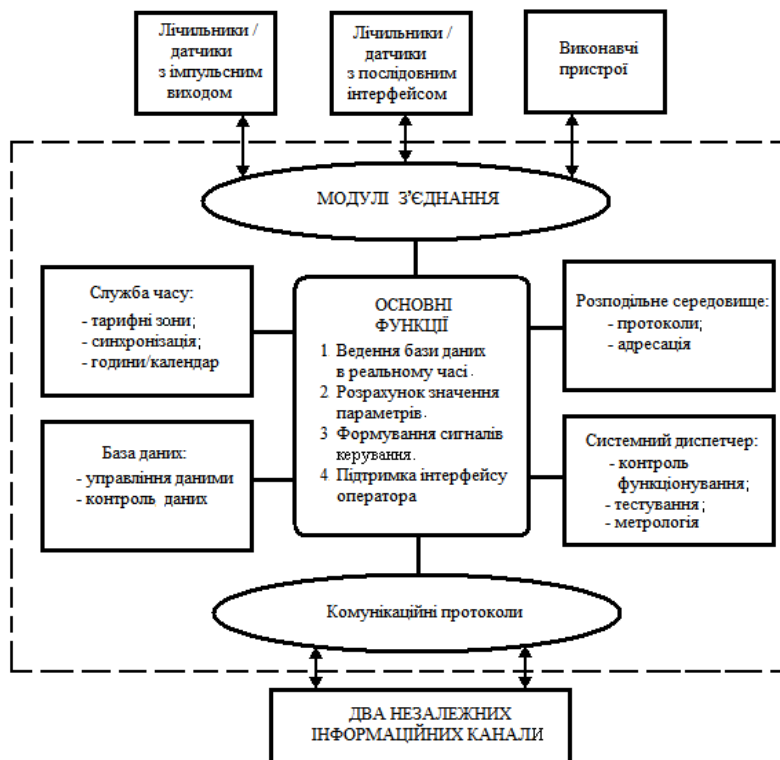


Рисунок 2.4 – Структура програмного забезпечення приборів АСКОЕ, АСТОЕ

Різниця планового і фактичного споживань є показником ефективності контролю використання кожного окремо взятого енергоресурсу. Чим менше модуль цього значення, тим точніше проведено планування витрат енергоресурсів і менше відхилення від плану на виробництві. В ідеальному випадку різниця дорівнює нулю (враховуючи похибки вимірювань), а значення планового і фактичного споживань рівні. Якщо значення цієї різниці виходить із знаком «+», це означає, що проаналізований цех перевитрачав встановлений плановий ліміт із споживання енергоресурсів, а якщо із знаком «-» – зекономив.

Такий аналіз проводиться як на рівні окремого взятого цеху (корпусу), так і

по всьому підприємству. Ця диференціація дозволяє бачити, у якому саме цеху виникли відхилення від плану. Аналізуючи ці дані, виявляються причини дисбалансу, і проводиться низка заходів щодо попередження таких відхилень в майбутньому.

Автоматизовані системи контролю обліку інших енергоресурсів (газ, теплоенергія, стиснене повітря, технічна та питна вода) за своєю побудовою аналогічні автоматизованій системі контролю обліку електроенергії.

Висновки до розділу 2

Підводячи підсумок, можна сказати, що архітектура АСКОЕ, АСТОЕ забезпечує точність, достовірність і одночасність отримання даних про облік електроенергії.

В основу АСКОЕ, АСТОЕ покладено принципи відкритості архітектури, відкритості комунікацій і розподіленого функціонування. Це забезпечує незалежність від технічних засобів обліку і систем зв'язку, легку інтеграцію в існуючі системи обробки даних, поетапне розширення АСКОЕ і адаптація до поточних вимог з мінімальними витратами. У той самий час, кожна компонента АСКОЕ забезпечує узгоджений захист даних від несанкціонованого доступу, а також їх безпеку й цілісність.

3 ЕНЕРГЕТИЧНА ЕКОНОМІЧНІСТЬ РОБОТИ ЕНЕРГОСПОЖИВАЮЧИХ АГРЕГАТІВ

3.1 Режими роботи і продуктивність обладнання безперервної дії

Під обладнанням безперервної дії [2] зазвичай розуміють такі технологічні агрегати, виробництво продукції на яких пов'язане тільки з витратами часу на корисну роботу (до таких агрегатів належать, наприклад, металообробка обладнання, компресори, насоси).

Режим роботи обладнання пов'язаний з характером його навантаження в часі. Агрегат може працювати безперервно або з перервами протягом деякого періоду часу. При цьому його продуктивність (навантаження) під час роботи може бути незмінною або змінюватися в часі. У зв'язку з цим розрізняють такі режими роботи обладнання безперервної дії (рис. 3.1):

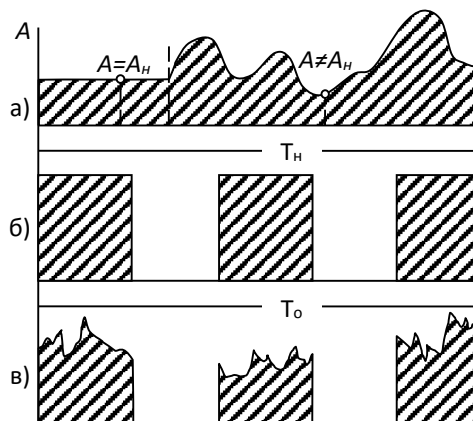


Рисунок 3.1 - Режими роботи обладнання:

- а) неперервна робота з постійною і змінною продуктивністю;
- а) переривиста робота з постійною продуктивністю;
- в) переривиста робота зі змінною продуктивністю;
 - режим безперервної роботи;
 - режим роботи з перервами (переривистий режим);
 - режим постійної продуктивності (навантаження) агрегату;
 - режим змінної продуктивності (навантаження) агрегату.

Розглядаючи режим роботи обладнання з перервами, необхідно знати, що вони можуть характеризуватися чергуванням періодів корисної роботи з холостими

ходами або чергуванням корисної роботи з періодами зупинки (повного вимкнення) обладнання.

Під продуктивністю технологічного обладнання розуміють обсяг випущеної на ньому продукції (або виконаної корисної роботи) за одиницю часу. Для обладнання безперервної дії характерне те, що його продуктивність може бути віднесена до скільки завгодно малих відрізків або навіть моментів часу роботи агрегату. Інакше кажучи, продуктивність такого обладнання має миттєве значення і є синонімом навантаження агрегату. Проте найчастіше при визначенні поточної продуктивності обладнання безперервної дії як елементарний відрізок часу беруть одну годину. Годинна продуктивність обладнання безперервної дії, як і його миттєва продуктивність, є змінною величиною, яка належить до певних умов виробництва, параметрів технологічного процесу, а також до певного періоду часу.

Величина миттєвої і годинної продуктивності обладнання збігаються у тому разі, коли агрегат працює безперервно з постійним навантаженням. При безперервній роботі, але зі змінним навантаженням продуктивність обладнання в деякому відрізку часу характеризується її середньогодинною величиною A_n , що дорівнює:

$$A_n = \frac{Q_n}{T_n}, \quad (3.1)$$

де T_n - час безперервної роботи обладнання;

Q_n - обсяг випуску продукції агрегатом за час T_n .

Значення годинної (або середньогодинної) продуктивності агрегату при безперервній роботі залежать тільки від навантаження обладнання за потужністю. Як відомо, для характеристики відносного завантаження обладнання за потужністю використовується коефіцієнт навантаження (коефіцієнт використання обладнання за потужністю), визначений як відношення середньогодинної продуктивності агрегату до його максимально можливої продуктивності за той самий відрізок часу T_n в конкретних умовах виробництва:

$$K_n = \frac{A_n}{A_{max}}. \quad (3.2)$$

Показники годинної продуктивності обладнання належать до часу його безперервної роботи T_n . Вони є необхідними і достатніми для характеристики режиму роботи обладнання тільки в тому випадку, якщо в деякому календарному періоді часу T_o відсутні перерви в роботі агрегату.

Загалом же календарний період T_o містить не тільки час безперервної роботи T_n , але також і час перерв і простоїв обладнання T_c . При цьому для характеристики продуктивності обладнання у всьому календарному періоді T_e застосовують величину, середньокалендарну продуктивності A_o (за зміну, добу, місяць і тому подібне), яка визначається так:

$$A_o = \frac{Q_o}{T_o}, \quad (3.3)$$

де Q_o - випуск продукції за час T_o .

Показник A_o пов'язаний з величиною A_n через відносну тривалість безперервної роботи (ввімкнення) обладнання, яка може бути також названа коефіцієнтом використання обладнання в часі і визначається за такою формулою:

$$K_t = \frac{T_n}{T_o} = \frac{T_n}{T_n + T_c}. \quad (3.4)$$

При цьому величина $T_e = T_n / K_t$, звідки:

$$A_o = \frac{Q \cdot K_t}{T_n} = A_n \cdot K_t. \quad (3.5)$$

На підставі (5.5) і (5.2) отримуємо залежність:

$$A_o = A_n \cdot K_t = A_{max} \cdot K_n \cdot K_t = A_{max} \cdot K_i, \quad (3.6)$$

де K_i - інтегральний коефіцієнт, що характеризує використання обладнання як за потужністю, так і в часі.

Таким чином, як буде показано далі, енергетична економічність роботи технологічного обладнання безперервної дії істотно залежить від режиму його роботи, тобто від навантаження обладнання в часі. Причому навантаження на агрегат залежно від режиму його роботи необхідно оцінювати за допомогою різних показників його продуктивності (черговий, середньогодинний або середньокалендарний). Величина навантаження агрегату значною мірою

визначається показниками його навантаження за потужністю і використання в часі, які відіграють важливу роль також і для аналізу використання і нормалізації витрат енергії технологічним обладнанням.

3.2 Енергетична економічність роботи обладнання безперервної дії

Як уже було сказано, обладнання безперервної дії може працювати протягом деякого періоду часу як безперервно, так і з перервами. Причому його навантаження під час роботи може бути як постійним, так і змінним.

При безперервній роботі обладнання енергетична економічність його роботи є однозначною функцією продуктивності. Для кожного конкретного значення продуктивності енергоекономічність роботи агрегату оцінюється за допомогою його енергетичної характеристики величиною підведеної потужності або питомої витрати енергії.

Під час роботи обладнання з перервами протягом деякого проміжку часу T_o , при незмінній середньокалендарній продуктивності агрегату A_o середня підведена потужність P_o і середня питома витрата енергії d_o можуть бути різними. Вони можуть мінятися залежно від характеру зміни навантаження агрегату в часі. Проте, при цьому енергетичні характеристики обладнання не втрачають свого значення. На їх основі можна побудувати енергетичні діаграми, що відображають всі практично можливі режими роботи агрегату і відповідні ним області зміни значення P_o і d_o .

Для деякого спрощення спочатку проаналізуємо ефективність використання енергії обладнанням безперервної дії без обліку пускових витрат і додаткових втрат енергії нестационарного процесу (тобто втрат енергії, виникаючих при переході з одного навантаження агрегату на інший). При цьому перш за все потрібно пам'ятати, що енергетична економічність роботи обладнання в різних режимах істотно залежить від форми його характеристики підведеної потужності. Тому розглянемо окремо кожен з відомих нам груп агрегатів, виявлених залежно від форми зазначеної характеристики.

3.2.1 Обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності

При безперервній роботі такого обладнання з постійним навантаженням величина підведеної до нього потужності при будь-якому значенні продуктивності відповідно до залежності (3.9) визначається з рівняння:

$$P = P_{x,x} + d_q \cdot A. \quad (3.7)$$

Розділивши обидві частини рівняння (3.7) на A , отримаємо рівняння характеристики питомої витрати енергії:

$$d = \frac{P_{x,x}}{A} + d_q. \quad (3.8)$$

У зазначених вище умовах витрата енергії за будь-який проміжок часу безперервною робота обладнання T_n дорівнює:

$$W_n = P \cdot T_n = P_{x,x} \cdot T_n + d_q \cdot Q_n. \quad (3.9)$$

Розділивши обидві частини виразу (3.9) на T_n , отримаємо:

$$P_n = \frac{W_n}{T_n} = P_{x,x} + d_q \cdot A_n. \quad (3.10)$$

Далі, розділивши обидві частини останнього рівняння на A_n , отримуємо рівняння характеристики питомої витрати енергії:

$$d_n = \frac{P_{x,x}}{A_n} + d_q. \quad (3.11)$$

У рівняннях (3.10) і (3.11), на відміну від залежностей (3.7) і (3.8), фігурують вже не поточні (миттєві), а середньогодинні значення продуктивності обладнання і підведеної потужності, визначені за весь період безперервної роботи агрегату. Проте характер залежності між цими параметрами залишився незмінним, тобто константи в рівняннях підведеної потужності і питомої витрати енергії залишилися колишніми (рис. 3.2).

Таким чином, на підставі викладеного можна зробити такі висновки:

1. При безперервній роботі обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності енергетичні характеристики режиму постійного навантаження агрегату одночасно є і характеристиками режиму його роботи зі

змінним навантаженням.

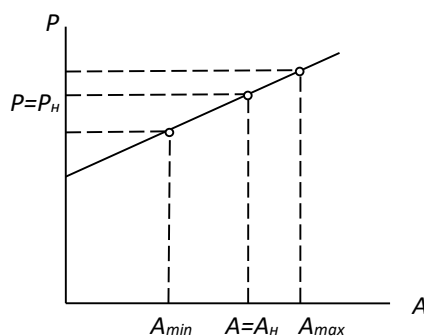


Рисунок 3.2 - Збіг поточної і середньої підведеної потужності для агрегатів з прямолінійною характеристикою

2. Робота такого обладнання при однаковій продуктивності (поточною або середньогодинною) енергетично Дорівнює економічній як у постійному, так і змінному режимах навантаження, причому в останньому випадку - незалежно від характеру зміни навантаження агрегату за час його роботи (якщо при переході від одного значення навантаження до іншого не виникає додаткових витрат енергії).

Проте, як уже було сказано, режим роботи обладнання в деякому календарному періоді може характеризуватися не тільки часом безперервної роботи, але також перервами і простоями. В цьому випадку оцінка енергетичної економічності роботи агрегату базується на середньокалендарних значеннях підведеної потужності і питомої витрати енергії.

Витрата енергії за час T_o (без урахування пускових витрат), як і раніше, визначається виразом, аналогічним залежності (3.9):

$$W_o + P_{x.x} \cdot T_y + d_x \cdot Q, \quad (3.12)$$

оскільки при простоях і перервах з вимкненням обладнання енергія не витрачається. При цьому характеристика середньокалендарної підведеної потужності і питомої витрати енергії матиме такий вигляд:

$$P_o = P_{x.x} \frac{T_n}{T_o} + d_q \frac{Q}{T_o} = K_t \cdot P_{x.x} + d_q \cdot A_o;$$

$$d_o = \frac{P_o}{A_o} = \frac{K_t \cdot P_{x.x}}{A_o} + d_q. \quad (3.13)$$

Рівняння (3.13) відрізняються від отриманих раніше тим, що вони містять дві

змінні величини: A_o і K_t . Отже, вони визначають собою вже не лінії, а області зміни значень P_o і d_o . Ці області є енергетичними діаграмами обладнання.

Енергетична діаграма роботи обладнання безперервної дії з прямолінійними характеристиками підведеної потужності має такий вигляд (рис. 3.3). Пряма $P_{x,x} - P_{max}$ на діаграмі відповідає випадку, коли $K_t=1$, тобто характеризує безперервну роботу обладнання протягом усього періоду часу T_o і є характеристикою залежності $P_n=f(A_n)$. У точці P_{max} цієї прямої агрегат працює з максимальною годинною продуктивністю. Таким чином, робота агрегату по прямій $P_{x,x} - P_{max}$ характеризується умовами:

$$T_o = T_n; A_o = A_n; K_t = 1; K_n = var. \quad (3.14)$$

Зазначеній прямій на діаграмі питомої витрати енергії відповідає крива $d_1 - d_2$. У точці d_2 , відповідно умові $A_o - A_{max}$, питома витрата енергії має найменшу величину.

Пряма $0 - P_{max}$ відповідає переривистому режиму роботи обладнання з постійною годинною продуктивністю, що дорівнює A_{max} , і з повним вимкненням агрегату на час перерв. Цей режим роботи обладнання характеризується умовами:

$$T_o = \frac{T_n}{K_t}; A_o = K_t \cdot A_n = K_t \cdot A_{max}; K_n = 1; K_t = var. \quad (3.15)$$

На діаграмі (рис. 3.3) питомої витрати енергії цьому режиму відповідає пряма $d_3 - d_2$. Прямі $P_{x,x} - P_{max}$ і $0 - P_{max}$ є примежовими прямими енергетичної діаграми обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності і визначають собою найбільш характерні режими роботи таких агрегатів.

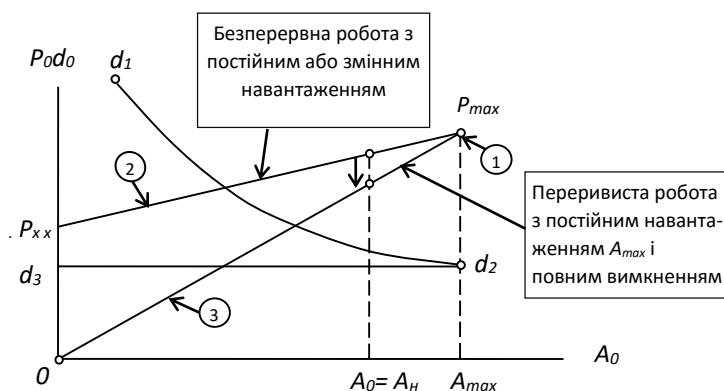


Рисунок 3.3 - Енергетична діаграма для обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності

Розглянута енергетична діаграма дозволяє зробити такі висновки щодо

режимів роботи обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності:

1. За відсутності обмежень за програмою випуску продукції таке обладнання з погляду витрати енергії найдоцільніше експлуатувати в режимі безперервної роботи з постійним навантаженням, що дорівнює A_{max} , при якій забезпечується найменша величина питомої витрати енергії.

2. Якщо за умовами програми випуску продукції обладнання не може бути максимально навантажене протягом всього календарного періоду часу T_0 (тобто $A_0 < A_{max}$) і в той же час виробництво не допускає переривистого режиму роботи агрегату, то з погляду витрати енергії байдуже, буде обладнання працювати безперервно з постійною пониженою продуктивністю A_0 чи воно працюватиме зі змінним навантаженням, забезпечуючи середньогодинну продуктивність $A_H = A_0$. В обох випадках робота агрегату проходить за однією і тією самою характеристикою (пряма $P_{x,x}-P_{max}$). (Проте при нагоді вибору постійного або змінного режиму навантаження перевага завжди повинна віддаватися режиму постійного навантаження. Це пов'язано як із додатковими втратами енергій, що виникають іноді при змінному навантаженні, так і з метою збереження обладнання і зручності його експлуатації).

3. Якщо в тих самих умовах неповного навантаження обладнання випуском продукції виробництво допускає роботу агрегату з перервами, то з погляду витрати енергії доцільно переходити на переривистий режим роботи, чергуючи періоди роботи при максимальній годинній продуктивності з перервами в роботі з повним вимкнення агрегату. В цьому випадку робота обладнання проходить по прямій $0-P_{max}$ на діаграмі підведеної потужності і по лінії d_3-d_2 на діаграмі питомої витрати енергії.

3.2.2 Обладнання з увігнутими характеристиками підведеної потужності

Енергетична економічність безперервної роботи такого обладнання з постійним навантаженням також однозначно оцінюється за допомогою енергетичних характеристик. Інакше відбувається при змінному режимі навантаження агрегату.

Тут при одному і тому самому виробленні продукції показники енергоекономічності роботи обладнання зі змінним і постійним навантаженням не збігаються (рис. 3.4). На підставі наведеного рисунка видно, що середня величина підведеної потужності P_n за період безперервної роботи обладнання зі змінним навантаженням не збігатиме з поточним значенням підведеної потужності P , відповідним середньогодинному значенню продуктивності агрегату A_n .

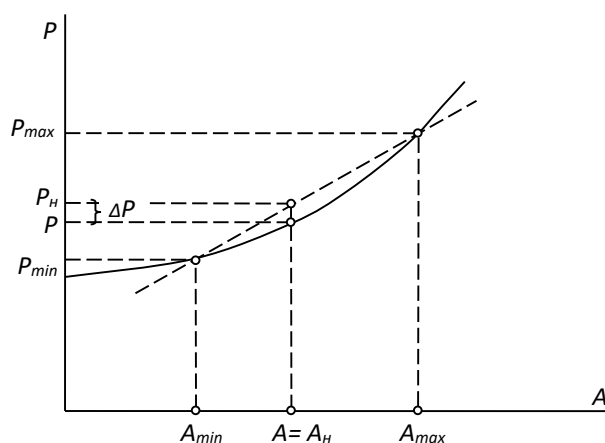


Рисунок 3.4 - Незбігання поточної і середньогодинної підведених потужностей для агрегатів з увігнутою характеристикою

Величина різниці між значеннями P_n і P характеризує додаткові втрати енергії змінного режиму навантаження в порівнянні з режимом постійного навантаження, які залежать від ступеня кривизни характеристики підведеної потужності і від діапазону зміни годинної продуктивності агрегату за час його безперервної роботи.

Енергетична діаграма обладнання з увігнутими характеристиками підведеної потужності може бути подана у вигляді такого графіка (рис. 3.5). Заштрихована область тут відповідає безперервній роботі агрегату з різними режимами навантаження протягом календарного періоду часу T_o . Точка P_{max} відповідає роботі обладнання в постійному режимі навантаження при максимальній годинній продуктивності A_{max} . Проте найменша питома витрата енергії при безперервній роботі агрегату спостерігається в точці b , відповідній роботі обладнання в постійному режимі навантаження з так званою економічною продуктивністю $A_{ек}$.

Крива $P_{x,x}-b-P_{max}$ характеризує режим постійного навантаження обладнання, найбільш вигідний в умовах безперервної роботи. Пряма $P_{x,x}-P_{max}$ відповідає

найменш вигідному з енергетичної точки зору режиму безперервної роботи агрегату, характеризується чергуванням періодів роботи при максимальній годинній продуктивності з холостими ходами.

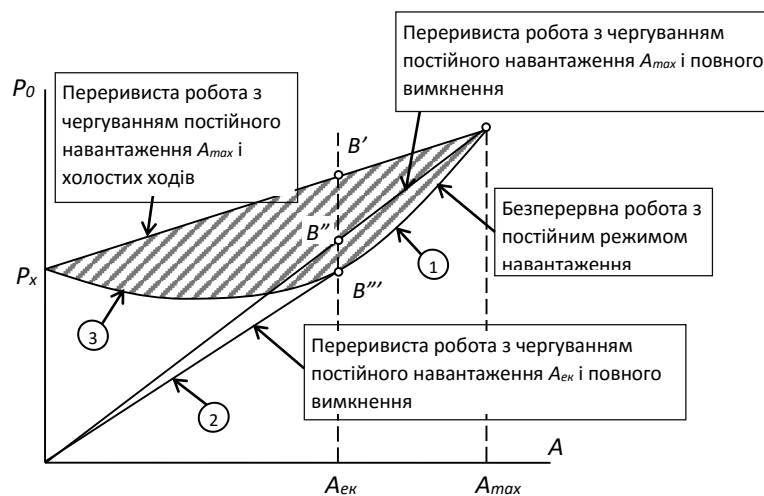


Рисунок 3.5 - Енергетична діаграма для обладнання з увігнутими характеристиками підведеної потужності

Переривисті режими роботи агрегату характеризуються на графіку прямими $0-P_{max}$ і $0-b$. Перша з них відповідає режиму чергування періодів роботи агрегату при максимальній годинній продуктивності A_{max} з повним вимкненням обладнання на час перерв, а друга - режиму чергування перерв з повним вимкненням агрегату з періодами роботи обладнання при економічній годинній продуктивності A_{ek} . Останній режим є найвигіднішим з точки зору витрати енергії, оскільки йому при заданій середньокалендарній продуктивності A_o відповідає найменша величина середньокалендарної підведеної потужності P_o , а отже, і найменша величина середньокалендарної питомої витрати енергії d_o .

Розглянута енергетична діаграма (рис.3.5) дозволяє зробити такі висновки щодо енергетичної економічності роботи обладнання з увігнутими характеристиками підведеної потужності:

1. Якщо за умовами виробничої програми такому обладнанню може бути задана середньокалендарна продуктивність, що дорівнює або більша, ніж його економічна продуктивність (тобто $A_o \geq A_{ek}$), то з точки зору витрати енергії обладнання повинно працювати в режимі безперервної роботи з постійною

годинною продуктивністю.

2. Якщо виробнича програма не забезпечує середньокалендарного навантаження обладнання за його економічною годинною продуктивністю (тобто $A_o < A_{ек}$), то з точки зору витрати енергії найвигідніше переходити на переривистий режим роботи агрегату з чергуванням періодів роботи при постійному навантаженні, що дорівнює економічній годинній продуктивності $A_{ек}$, з повним вимкненням обладнання.

3. Якщо в тих самих умовах навантаження обладнання випуском продукції ($A_o < A_{ек}$) виробництво не допускає переривистого режиму роботи агрегату, то з точки зору витрати енергії обладнання слід експлуатувати в режимі безперервної роботи з постійним навантаженням, що дорівнює заданій середньокалендарній продуктивності A_o .

3.2.3 Обладнання з опуклими характеристиками підведеної потужності

Для обладнання з такими характеристиками під час роботи зі змінним навантаженням середньогодинна величина підведеної потужності і середньогодинна питома витрата енергії при заданій середньогодинній продуктивності A_n також не дорівнюють підведеній потужності і питомій витраті енергії під час роботи агрегату з постійною годинною продуктивністю $A=A_n$ (рис. 3.6). Різниця між вказаними значеннями підведеної потужності характеризує в даному випадку не додаткові витрати, а економію енергії при змінному режимі навантаження в порівнянні з режимом роботи з постійним навантаженням.

Енергетична діаграма роботи обладнання з опуклими характеристиками підведеної потужності може бути подана у вигляді такого графіка (рис. 3.7). Заштрихована область тут характеризує безперервну роботу агрегату з різними режимами навантаження. Точка P_{max} відповідає безперервній роботі з постійним навантаженням, що дорівнює максимальній годинній продуктивності обладнання A_{max} , при якій спостерігається найменше значення питомої витрати енергії.

Крива $P_{x,x}-b-P_{max}$ відповідає безперервній роботі обладнання в режимі

постійного навантаження, який тут є найменш вигідним з енергетичної точки зору за будь-яких умов, оскільки йому при будь-якій заданій середньокалендарній продуктивності відповідає найбільше значення середньокалендарної підведеної потужності P_o .

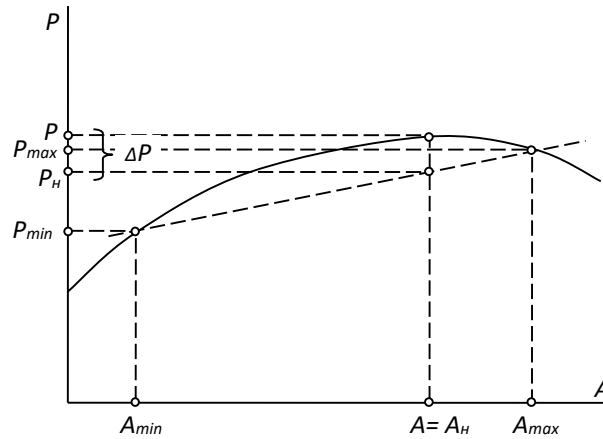


Рисунок 3.6 – Не збігання поточної і середньої підведених потужностей для агрегатів з опуклою характеристикою

Пряма $P_{x,x}-P_{max}$ характеризує безперервну роботу агрегату з чергуванням корисної роботи при максимальній годинній продуктивності A_{max} з холостими ходами обладнання. Цей режим в умовах безперервної роботи агрегату при будь-якій заданій середньокалендарній продуктивності з погляду споживання енергії вигідніший, ніж робота з постійним навантаженням, що дорівнює тій самій середньо-календарній продуктивності A_o .

Пряма $0-P_{max}$ відповідає переривистому режиму роботи обладнання з чергуванням періодів корисної роботи при максимальній годинній продуктивності A_{max} і перерв з повним вимкненням агрегату. Цей режим є з енергетичної точки зору найвигіднішим при будь-якій заданій середньокалендарній продуктивності, меншій, ніж його максимальна годинна продуктивність.

На підставі розглянутої енергетичної діаграми можна зробити такі висновки, що належать до роботи обладнання з опуклими характеристиками підведеної потужності:

1. Безперервна робота агрегату з постійним навантаженням з погляду витрати енергії вигідна тільки тоді, коли виробнича програма дозволяє навантажити обладнання на величину його максимальної годинної продуктивності A_{max} протягом

усього календарного періоду часу T_o .

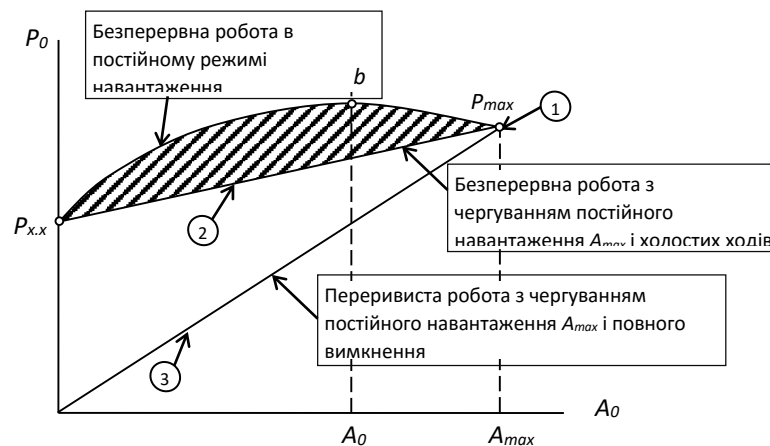


Рисунок 3.7 - Енергетична діаграма для обладнання з опуклими характеристиками підведеної потужності

2. При безперервній роботі обладнання, встановленій умовами виробництва, і заданій неповній середньокалендарній продуктивності агрегату $A_o < A_{max}$, з погляду витрати енергії найвигідніше експлуатувати його в режимі чергування періодів роботи при максимальній годинній продуктивності з холостими ходами або з роботою при мінімальній годинній продуктивності обладнання.

3. У тих самих умовах неповного завантаження обладнання випуском продукції ($A_o < A_{max}$), але допустимості переривистої роботи, з енергетичної точки зору найвигідніше переходити на переривистий режим роботи агрегату з чергуванням періодів корисної роботи при максимальній годинній продуктивності і перерв з повним вимкненням обладнання.

3.3 Продуктивність і енергетична економічність роботи обладнання циклічної дії

До обладнання циклічної дії належать, наприклад, металорізальні верстати, прокатні стани, молоти, преси, печі й таке інше.

Виробництво продукції на такому обладнанні зв'язане не тільки з часом ефективної (корисної) роботи, але і з допоміжним часом, що є складовою частиною робочого циклу таких агрегатів. Допоміжний час містить, наприклад, час установки

і знімання деталей, підведення і відведення різальних інструментів та інші витрати часу, обумовлені технологічними і конструктивними чинниками. У зв'язку із зазначеним обставинами час безперервної роботи обладнання циклічної дії T_n можна розглядати тільки як якусь подібність того самого часу для обладнання безперервної дії. Час T_n для агрегатів циклічної дії є сумою тривалості повних циклів його роботи, що здійснюються за даний період:

$$T_n = \sum_{i=1}^n T_{p_i} = \sum_{i=1}^n (T_n + T_e)_i = \sum_{i=1}^n (T_n + T_{x.x} + T_c)_i, \quad (3.16)$$

де T_p - тривалість одного робочого циклу агрегату;

n - число повних циклів роботи за даний період часу;

T_n - тривалість корисної роботи обладнання;

T_e - допоміжний час, що складається в загальному випадку з часу холостого ходу $T_{x.x}$ і тривалості перерви в роботі з повним вимкненням агрегату T_c .

Для обладнання циклічної дії випуск продукції може бути вимірний тільки за повний цикл його роботи або за ряд повних циклів. Тому поточна величина годинної продуктивності A агрегату циклічної дії є фіктивною величиною, відповідною годинній продуктивності обладнання, допоміжний час для якого становить нескінченно малу величину в порівнянні з часом його корисної роботи.

Середньогодинна продуктивність A_n обладнання циклічної дії може розглядатися також тільки як якась подібність даного показника для обладнання безперервної дії. При цьому, якщо за кожний робочий цикл проводиться Q_p одиниць продукції, то середньогодинна продуктивність агрегату циклічної дії за час безперервної його роботи становитиме

$$A_n = \frac{Q_p}{T_p} = \frac{Q_p}{T_n + T_e}, \quad \text{або} \quad A_n = \frac{n \cdot Q_p}{\sum_{i=1}^n T_{p_i}}. \quad (3.17)$$

З формул (3.17) виходить, що середньогодинна продуктивність обладнання циклічної дії залежить не тільки від кількості продукції, що виробляється, але також і від тривалості робочого циклу агрегату. Тому добиватися підвищення середньогодинної продуктивності обладнання циклічної дії потрібно не тільки шляхом збільшення його навантаження за потужністю, але і шляхом

поліпшення його використання в часі (подібно до того, як може бути підвищена середньокалендарна продуктивність обладнання безперервної дії). Це може досягатися як шляхом збільшення одночасно оброблюваних виробів (наприклад, на багатопшпіндельних верстатах), так і шляхом зменшення часу корисної роботи і скорочення допоміжного часу в робочому циклі агрегату.

Показники середньокалендарної продуктивності A_o обладнання циклічної дії не відрізняються від аналогічних показників для обладнання безперервної дії, оскільки ця величина як у першому, так і в другому випадках відображає відносну тривалість безперервної роботи, перерв і простоїв агрегату, що виходять за межі їх робочих циклів.

Хоча для відрізків часу $T_o \leq T_n$ можна говорити про безперервну роботу обладнання циклічної дії, побудувати для нього характеристику підведеної потужності, відповідну цьому режиму, неможливо, оскільки за час T_n не можна визначити продуктивність агрегату. Отже, енергетична характеристика для такого обладнання може бути побудована тільки на відрізьку часу $T_e \geq T_p$.

Якщо розглядати роботу агрегату циклічної дії за час $T_o \leq T_n$ (тобто за час, що не містить тривалість перерв, пов'язаних з режимом роботи підприємства), то, очевидно, можливі два стани обладнання протягом допоміжного часу:

- холостий хід агрегату;
- повне вимкнення обладнання.

Ті ж два стани обладнання, в принципі, можливі і під час перерв, пов'язаних з режимом роботи підприємства (міжзмінні перерви, вихідні, святкові дні та ін.).

Таким чином, енергетична діаграма роботи обладнання циклічної дії (рис. 3.8) зовні нагадує енергетичну діаграму для обладнання безперервної дії з прямолінійними характеристиками підведеної потужності (рис. 3.3). Проте енергетична діаграма для обладнання циклічної дії не містить характеристики, відповідної безперервній роботі агрегату з постійним навантаженням. Отже, можливі тільки два режими, в яких з енергетичної точки зору доцільно

використовувати обладнання циклічної дії:

– переривистий режим із чергуванням роботи при максимальній або економічній продуктивності з холостими ходами агрегату протягом допоміжного часу або часу перерв;

– переривистий режим із чергуванням роботи при максимальній або економічній продуктивності з повним вимкненням обладнання протягом допоміжного часу або часу перерв.

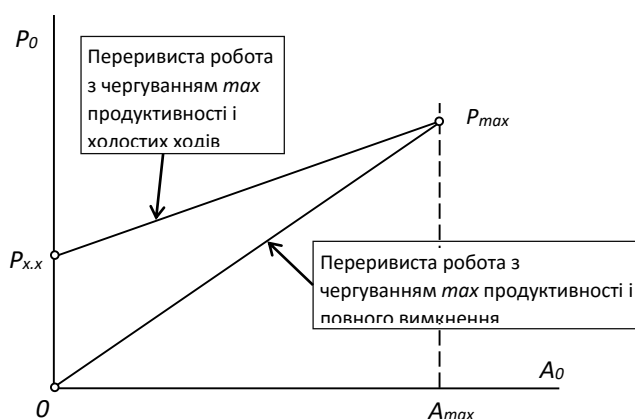


Рисунок 3.8 - Енергетична діаграма для обладнання циклічної дії

Якщо не брати до уваги додаткові витрати енергії, пов'язані з вимкненням обладнання і подальшим його включенням у роботу, то з погляду ресурсозбереження, очевидно, перевагу слід віддавати переривистому режиму роботи агрегатів циклічної дії з повним їх вимкненням протягом допоміжного часу або часу перерв. Проте остаточний вибір між зазначеними двома режимами роботи (як, втім, і для обладнання безперервної дії) необхідно здійснювати з урахуванням додаткових витрат і втрат енергії, що виникали в результаті вимкнення і подальшого включення агрегатів у роботу.

3.4 Облік пускових витрат енергії при виборі режиму роботи агрегатів

У роботі будь-якого обладнання практично завжди необхідні перерви. Як вже було сказано, під час роботи з перервами можливі два режими:

– повне вимкнення обладнання на час перерви;

– холостий хід агрегату.

Кожна зупинка обладнання і його подальше включення в роботу пов'язані з появою додаткових пускових втрат і втрат енергії нестационарного режиму роботи агрегату. Скорочено їх називають пусковими витратами енергії. Режим холостого ходу обладнання, у свою чергу, завжди пов'язаний з додатковими витратами енергії на холостий хід. Таким чином, у кожному конкретному випадку завжди виникає питання про доцільність вибору одного з двох зазначених режимів.

У загальному випадку пускові витрати енергії для деякого агрегату складаються зі:

– втрат акумульованої в устаткуванні енергії під час його зупинки, які повинні бути відшкодовані при подальшому пуску агрегату (наприклад, втрати тепла в результаті охолодження печі під час простою);

– втрат, що виникають у результаті розсіяння енергії в навколишнє середовище за час пуску обладнання, тобто до моменту його включення в корисну роботу (наприклад, втрати на випромінювання тепла поверхнею печі при її розігріванні);

– втрат енергії у зв'язку з нестационарністю процесу в початковий період після ввімкнення обладнання і в період між припиненням подачі енергії і повною зупинкою агрегату.

Для частини обладнання пускові витрати енергії невеликі і не залежать від тривалості простою (наприклад, для електроприводу). Для інших же видів обладнання ці витрати енергії дуже значні й істотно залежать від тривалості простою (наприклад, печі, сушильні й холодильні установки, камери вулканізації та ін.). Таким чином, питання про режим увімкнення обладнання на час перерв у його роботі має неоднакове значення для установок з різною величиною пускових витрат енергії. Вирішити це питання можна тільки шляхом зіставлення величини додаткових втрат енергії, що виникають у кожному з даних режимів перерви в роботі обладнання.

Нехай під час перерви в роботі з повним вимкненням агрегату додаткові втрати енергії дорівнюватимуть деякій величині $W_{\text{пуск}}$. При перерві з холостим ходом

обладнання додаткові втрати енергії визначаються виразом:

$$W_{x-x} = P_{x-x} \cdot T_c, \quad (3.18)$$

де P_{x-x} - потужність холостого ходу агрегату;

T_c - тривалість перерви в роботі обладнання.

Прирівнюючи зазначені втрати енергії і вирішуючи відповідне рівняння щодо T_c , отримаємо тривалість перерви, що називається критичною, при якій обидва режими дають однакові додаткові втрати енергії:

$$T_{c.кр} = \frac{W_{пуск}}{P_{x-x}}. \quad (3.19)$$

При цьому, якщо тривалість перерви не перевищує величини $T_{c.кр}$, не слід вимикати обладнання на час перерви в його роботі. Якщо ж тривалість перерви більше $T_{c.кр}$, то з енергетичної точки зору доцільне повне вимкнення агрегату на час перерви.

Для обладнання, пускові витрати енергії якого залежать від тривалості перерви, питання вибору режиму вимкнення агрегату на час перерв у його роботі вирішується на підставі порівняння додаткових втрат енергії холостого ходу із залежністю $W_{пуск}=f(T_c)$ (рис. 3.9). Визначення залежності пускових витрат енергії від тривалості перерви в роботі агрегату засноване на проведенні спеціальних випробувань обладнання. Воно зводиться до встановлення величини пускових витрат енергії на одну зупинку-простій-пуск агрегату для випадків різної тривалості його простоїв.

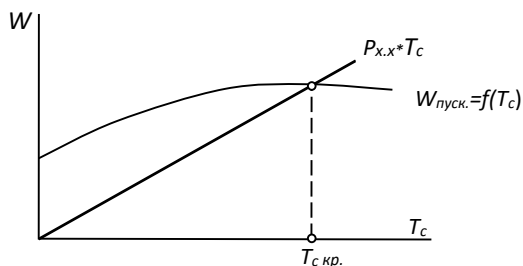


Рисунок 3.9 - Вибір режиму ввімкнення обладнання на час перерви в роботі

Розглянуте питання має практичне значення в організації роботи обладнання як безперервної, так і циклічної дії. Для перших це питання може виникнути в змінному, добовому, тижневому або навіть місячному розрізі, а для других, крім

того, також і в межах тривалості робочого циклу агрегату. Класифікація енергозберігаючого функціонального обладнання приведена на рис. 3.10.



Рисунок 3.10 – Класифікація енергозберігаючого функціонального обладнання

Висновки до розділу 3

Таким чином, підбиваючи підсумки всьому сказаному про енергетичну економічність роботи обладнання безперервної дії, можна стверджувати, що незважаючи на різноманітність можливих режимів його роботи, практично доцільними є тільки такі чотири режими:

1. Безперервна робота з постійним навантаженням агрегату. Цей режим допустимий для обладнання з прямолінійними й увігнутими характеристиками при будь-якому заданому значенні його середньокалендарної продуктивності, а для обладнання з опуклими характеристиками - тільки при постійному навантаженні, що дорівнює максимальній годинній продуктивності агрегату.

2. Безперервна робота зі змінним навантаженням. Цей режим допустимий тільки для обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності.

3. Переривистий режим, що характеризується чергуванням періодів корисної

роботи при максимальній годинній продуктивності агрегату з холостими ходами обладнання або роботою з мінімальною годинною продуктивністю. Цей режим допустимий в умовах обов'язкової безперервної роботи для обладнання з прямолінійними й опуклими характеристиками підведеної потужності і протипоказаний для агрегатів з увігнутими характеристиками.

4. Переривистий режим, що характеризується чергуванням періодів корисної роботи при максимальній або економічній годинній продуктивності агрегату і перерви в роботі з повним вимкненням обладнання.

У всіх розглянутих режимах, окрім безперервної роботи обладнання із змінним навантаженням, питома витрата енергії є сталою величиною при будь-якій заданій середньокалендарній продуктивності агрегату. Таким чином, встановивши конкретний режим роботи обладнання, легко визначити за його енергетичною характеристикою норму питомої витрати енергії, точно відповідну вибраному режиму і заданій середньокалендарній продуктивності агрегату.

Якщо за умовами виробництва годинна продуктивність обладнання не може бути зафіксована незмінною, слід передбачити деякий діапазон можливого її коливання щодо встановленої середньої величини. В цьому випадку енергетична характеристика або діаграма агрегату дозволяє встановити відповідний діапазон допустимих коливань середньої питомої витрати енергії. При цьому норму питомої витрати енергії можна задати за його середнім значенням у зазначеному діапазоні.

4. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ГАЛЬМУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗА КРИТЕРІЄМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Наводяться матеріали теоретичного дослідження процесів перетворення енергії в енергетичному каналі електропривода механізма переміщення зі зворотно-поступальним рухом робочого органа на ділянці гальмування в процесі реверсування, при реалізації режиму зворотного ходу. Поставлена математична задача оптимального керування рухом механічної частини електропривода за критерієм енергоефективності. Науковим результатом розв'язання поставленої задачі є синтезований оптимальний процес гальмування.

Задачам зниження енерговитрат в системах привода робочих органів технологічних машин приділяється велика увага [3 – 7]. Методи вирішення завдань ресурсозбереження мають особливу значимість для приводів механізмів переміщення зі зворотно-поступальним рухом робочого органа (РО), що працюють з високою частотою технологічних циклів (наприклад, механізмів переміщення несучих органів летучих пил дрібносортних прокатних станів). Методам синтезу оптимальних законів руху приводів механізмів переміщення в режимах пуску і розгону РО механізма до заданої швидкості, слідкування та переслідування, гальмування до зупину та позиціонування присвячено багато робіт [7 – 12 та ін.]. У відомих роботах задача мінімізації енерговитрат відображується цільовими функціями, якими визначається мета мінімізації втрат або споживання енергії в енергетичному каналі системи привода, без врахування можливості повернення частини кінетичної енергії інерційних мас джерелу живлення (рекуперації енергії) в режимах гальмування при застосуванні електричного приводу (ЕП).

Метою дослідження, матеріали якого подані у цієї статті, є синтез енергоефективного процесу руху електропривода механізма переміщення робочого органа технологічної машини в режимі гальмування, який є першою (за часом) складовою режиму зворотного ходу (повернення робочого органу у вихідне положення).

4.1 Поставлення задачі оптимального керування

Технологічний цикл механізму зворотно-поступального переміщення РО технологічної машини, незалежно від її функціонального призначення, містить два основних, послідовних у часі режими. Першим з них є режим прямого ходу (“вперед”), на прикінці якого кутлова швидкість обертання двигуна має значення ω_0 , а положення РО в технологічній лінії визначається значенням s_0 координати відстані від фіксованого початку відліку. Наступним за часом є режим зворотного ходу, технологічним завданням якого є повернення РО у вихідне положення з координатою св. Цей режим, у свою чергу, поділяється на два послідовних у часі режими: гальмування РО і подальшого його руху у зворотному напрямку, причому процеси гальмування і розгону РО у зворотному напрямку паузою в часі не розділяються, тобто реалізуються в режимі реверсування електропривода. В режимі гальмування величини ω_0 і s_0 є початковими значеннями змінних стану (ω, s) одномасової автономної (стаціонарної) динамічної системи (об’єкта керування), якою є механічна частина ЕП, а електромагнітний момент M двигуна є керуючим діянням.

Процеси зміни поточного стану механічної частини ЕП під впливом керуючого діяння M та статичного моменту M_c відносяться до категорії механічних перехідних процесів, тому вони цілком описуються рівняннями руху та механічної характеристики електропривода [13]:

$$M - M_c = J \dot{\omega}, \quad (4.1)$$

$$\omega = \omega_x - M/\beta, \quad (4.2)$$

де J – момент інерції механічної частини електроприводу, приведений до швидкості ω ; $\dot{\omega} = d\omega/dt$ – похідна швидкості за часом; β – модуль жорсткості механічної характеристики електропривода; ω_x – швидкість ідеального холостого ходу.

Для визначеності нами прийнято, хоча це не має принципового значення, що ЕП має лінійну механічну характеристику (4.2). Лінійну (або практично лінійну) механічну характеристику мають регульовані ЕП на базі двигуна постійного

струму з незалежним збудженням або асинхронного. У таких системах ЕП для механізмів класу, що розглядається, використовується однозонне регулювання швидкості [3, 13] в межах $\pm \omega_x$ (шляхом змінення напруги в колі якоря двигуна постійного струму або шляхом змінення частоти напруги в колі статора двигуна змінного струму), внаслідок чого має місце постійність модуля жорсткості механічної характеристики ($\beta = \text{const}$). Можливість застосування однозонного регулювання швидкості забезпечується правильним вибором двигуна за параметром номінальної швидкості.

Рівняння (4.2) після множення всіх його членів на M перетворюється у рівняння балансу потужностей:

$$M\omega = M\omega_x - M2/\beta, \quad (4.3)$$

де $M\omega = P_{\text{мех}}$ – механічна потужність двигуна, $M\omega_x = P_{\text{ел}}$ – потужність процесу обміну енергією між джерелом живлення і енергетичним каналом електропривода (з абсолютною точністю для ЕП постійного струму та з несуттєвою погрішністю для ЕП змінного струму [13]), $M2/\beta = \Delta P_{\text{ел}}$ – потужність електричних (теплових) втрат в електричній частині енергетичного каналу ($\Delta P_{\text{ел}} > 0$).

В залежності від способу реалізації процесу гальмування потужність $M\omega_x$ може бути знакоперемінною. Незважаючи на цю обставину, в подальшому будемо називати її потужністю споживання енергії (електроенергії) електроприводом від джерела живлення.

Ліва частина (4.3) після заміни перемінної M її виразом із (4.1) набуває вигляду

$$M\omega = J\omega \dot{\omega} + M\omega, \quad (4.4)$$

або

$$P_{\text{мех}} = P_k + P_c, \quad (4.5)$$

де $P_k = J\omega \dot{\omega} = d(J\omega^2/2)/dt$ – потужність змінення запасу кінетичної енергії рухомих мас електропривода; $P_c = M\omega$ – потужність розходу енергії на подолання сил статичного опору. На всьому протязі процесу гальмування потужності P_k і P_c постійні за знаком:

$$P_k < 0; P_c > 0, t \in [t_0, t_T], \quad (4.6)$$

де t_0 і t_T – час початку і закінчення процесу гальмування.

Таким чином, ми отримали рівняння балансу потужностей:

$$P_{ел} = P_k + P_c + \Delta P_{ел}. \quad (4.7)$$

Інтегруючи обидві частини (4.7) на інтервалі часу гальмування, отримуємо рівняння енергетичного балансу динамічної системи:

$$\int_{t_0}^{t_T} P_{ел} dt = \int_{t_0}^{t_T} P_k dt + \int_{t_0}^{t_T} P_c dt + \int_{t_0}^{t_T} \Delta P_{ел} dt. \quad (4.8)$$

Ліва частина (4.8) уявляє собою кількість енергії, споживаної електроприводом за весь час $T = t_T - t_0$ гальмування. Перший член правої частини (4.8) при будь-якої функції $\omega(t)$ на інтервалі часу T за величиною дорівнює початковому запасу кінетичної енергії рухомих мас електроприводу, а за знаком – негативний, тобто

$$\int_{t_0}^{t_T} P_k dt = - J\omega_{02}/2 = - W_k(0). \quad (4.9)$$

Отже, задача мінімізації споживання енергії електроприводом у процесі гальмування зводиться до мінімізації суми другого і третього членів (4.8), яка характеризує безповоротні витрати енергії, що погоджується з фізичними уявленнями про енергетичні процеси в механічних системах.

Проведений аналіз енергетичних процесів дає підстави визначити критерій якості процесу керування електроприводом у процесі гальмування:

$$I = \int_{t_0}^{t_T} P_k dt + \int_{t_0}^{t_T} \Delta P_{ел} dt \rightarrow \min. \quad (4.10)$$

Критерій якості I у вигляді суми функціоналів в цільовій функції (4.10) придатний до застосування в задачах оптимального керування процесами гальмування електропривода до зупину, без наступного реверсування та руху у зворотному напрямку в задану позицію. Однак, у нашому випадку ЕП механізму переміщення в режимі зворотного ходу виконує технологічну функцію пересування робочого органу із позиції s_0 в позицію s_1 . Тому при формуванні критерія якості слід врахувати можливість зменшення безповоротних витрат енергії при русі у зворотному напрямку за рахунок скорочення величини $s_T = s_1 - s_0$ переміщення РО у процесі гальмування. Це можна зробити введенням в критерій (4.10) ще одного доданку у вигляді інтегралу потужності P_c механічної

роботи на шляху переміщення РО на відстань s_T у зворотному напрямку. Критерій (4.10) зі збільшеною в такий спосіб складової механічної роботи набуває вигляду:

$$I = \int_{t_0}^{t_T} (P_{c1} + P_{c2}) dt + \int_{t_0}^{t_T} \Delta P_{ел} dt, \quad (4.11)$$

де $P_{c1} = M_{c1}\omega$; $P_{c2} = M_{c2}\omega$; M_{c1} і M_{c2} – величини статичного моменту при русі РО вперед і назад (статичний момент типу “сухе тертя” з можливою відмінністю його величини для різних напрямків руху).

Після підстановки виразів $P_{c1} = M_{c1}\omega$; $P_{c2} = M_{c2}\omega$ та $\Delta P_{ел} = (1/\beta)M^2$ у праву частину (4.11) критерій якості перетворюється до вигляду:

$$I = (1/\beta) \int_{t_0}^{t_T} (M^2 + \beta^* M_{c1} \omega) dt, \quad (4.12)$$

де $\beta^* = \beta(M_{c1} + M_{c2})/M_{c1}$ (розмірність коефіцієнтів β і β^* – Н·м·с/рад).

Процес гальмування ЕП з мінімізацією функціоналу (4.12) не є оптимальним з енергоспоживання, через те що другий доданок підінтегральної функції $P_{c1} + P_{c2}$ в (4.11) не відноситься до процесу гальмування. Також помітимо, що скорочення величини s_1-s_B заздалегідь невідомо і не враховується скорочення електричних втрат при переміщенні РО у зворотному напрямку через невизначеність функції $M(t)$ у цьому режимі. У той же час задача керування електроприводом з цільовою функцією $I \rightarrow \min$ є задачею оптимального керування за критерієм якості (4.12). Результатом розв’язання цієї задачі буде процес руху динамічної системи (4.1), також оптимальний за критерієм (4.12).

Рівняння (4.1) руху електропривода та критерій (4.12) доцільно подати у відносних одиницях, з метою отримання результату розв’язання задачі оптимального керування, незалежного від технічних параметрів конкретного ЕП. У відносних одиницях рівняння (4.1), з урахуванням рівності $M_c = M_{c1}$ на інтервалі $t \in (0, T)$ наглядно процесу гальмування, має вигляд

$$\mu - \mu_{c1} = \dot{v}, \quad (4.13)$$

де $\mu = M/M_n$, $\mu_{c1} = M_{c1}/M_n$, $v = \omega/\omega_n$, $\dot{v} = dv/d\tau$, $\tau = t/T_m$, M_n і ω_n – номінальні значення електромагнітного моменту і кутової швидкості двигуна, $T_m = J\omega_n / M_n$ – механічна постійна часу.

Рівняння (4.13) еквівалентно замінимо рівнянням стану одновимірної динамічної системи у загальноприйнятих [10 - 12] позначеннях:

$$\dot{x}(\tau) = u(\tau) - u_0 \quad (4.14)$$

де $x(\tau) = v(\tau)$, $u(\tau) = \mu(\tau)$, $u_0 = \mu_{c1} = \text{const}$.

Критерій якості (4.12) з використанням відносних одиниць набуває вигляду

$$I = (M_n 2 T_m / \beta) \int_0^{\theta} (\mu^2 + \alpha \mu_{c1} v) d\tau, \quad (4.15)$$

де $\alpha = \beta^* \omega_n / M_n$ – безрозмірний коефіцієнт; $M_n 2 T_m / \beta$ – базове значення кількості енергії в натурних одиницях. Динамічна система (4.14) є автономною, тому в (4.15) прийняті границі інтегрування $\tau_0 = 0$ і, відповідно, $\tau_T = T/T_m = \Theta$.

Постійний множник перед інтегралом в (4.15) можна виключити, і критерій якості, з урахуванням зміни позначень, подати у такому вигляді:

$$L = \int_0^{\theta} (u^2(\tau) + \alpha u_0 x(\tau)) d\tau. \quad (4.16)$$

На керування $u(\tau)$ накладено обмеження

$$|u(\tau)| \leq u_{\text{доп}}, \quad (4.17)$$

де $u_{\text{доп}} = \mu_{\text{доп}} = M_{\text{доп}} / M_n$; $M_{\text{доп}}$ – максимально допустиме значення електромагнітного моменту, що обумовлено вимогами до експлуатаційної надійності двигуна.

Задача оптимального керування процесом гальмування електропривода в режимі реверсу формулюється наступним чином:

серед допустимих керувань $u(\tau)$, $0 < \tau \leq \Theta$, тобто кусочно-неперервних функцій $u(\tau)$, обмежених за модулем умовою (4.17), які переводять фазову точку автономної системи (4.14) із початкового стану $x(0) = v_0$ в кінцевий $x(\Theta) = 0$ при нефіксованому кінцевому моменті часу Θ , знайти такі керування $u(\tau)$ і траєкторію $x(\tau)$, що надають мінімум функціоналу (4.16).

4.2 Розв'язання задачі оптимального керування

Для розв'язання поставленої задачі керування скористуємось принципом мінімуму Понтрягіна [10, с. 263 – 282]. Для лінійної автономної системи першого порядку (4.14) гамільтоніан задачі [10, с. 583].

$$H = u^2(\tau) + \alpha u_0 x(\tau) + p(\tau)(u(\tau) - u_0). \quad (4.18)$$

Додаткова перемінна $p(\tau)$ задовольняє рівнянню

$$\dot{p}(\tau) = -\partial H / \partial x(\tau) = -\alpha u_0, \quad (4.19)$$

звідки слідує:

$$p(\tau) = p(0) - \alpha u_0 \tau. \quad (4.20)$$

Згідно до принципу мінімуму, при оптимальному керуванні $u(\tau)$ гамільтоніан (4.18) має бути тотожно дорівнювати нулю на усьому інтервалі часу $[0, \Theta]$:

$$H \equiv 0, \tau \in [0, \Theta]. \quad (4.21)$$

Вважаючи процес $(u(\tau), x(\tau))$ оптимальним, при $\tau = 0$ має виконуватись рівність

$$u^2(0) + \alpha u_0 x_0 + p(0)(u(0) - u_0) = 0, \quad (4.22)$$

що можливо при $p(0) = -u(0)$. Після підстановки цього значення $p(0)$ в (4.22) отримуємо

$$u(0) = -\alpha x_0, \quad (4.23)$$

тоді

$$p(\tau) = \alpha x_0 - \alpha u_0 \tau. \quad (4.24)$$

Керування $u(\tau)$, що абсолютно мінімізує H , для систем виду (4.14) знаходиться у класі кусочно-постійних функцій [10, с. 428 – 429], тому в нашому випадку воно дорівнює

$$u(\tau) = u(0) = -\alpha x_0, \tau \in [0, \Theta] \quad (4.25)$$

і цим керуванням зазначається фазова тректорія

$$x(\tau) = x_0 - (\alpha x_0 + u_0)\tau. \quad (4.26)$$

Дійсно, підстановкою виразів (4.24 – 4.26) у (4.18) отримуємо (4.21), чим підтверджується оптимальність процесу $(u(\tau), x(\tau))$ за критерієм якості (4.16).

Таким чином, оптимальний процес гальмування є рівноприскореним. Оптимальне значення електромагнітного моменту двигуна у цьому процесі в натурних одиницях:

$$M = -\alpha v_0 M_H = -\beta^* \omega_0 = -\beta \omega_0 (M_{c2} + M_{c1}) / M_{c1}. \quad (4.27)$$

Кількісну оцінку величини моменту можемо зробити наступним чином.

Припустимо, що $\omega_0 = \omega_n$, $M_{c2} = M_{c1}$. Тоді $M = -2\beta\omega_n$. Оцінку величини β можна отримати із рівняння (4.2) статичної механічної характеристики ЕП: $\beta = M_n/(\omega x^* - \omega^*(M_n))$, де $\omega x^* > 0$ і $\omega^*(M_n) > 0$ – значення швидкості при роботі ЕП в усталеному режимі з номінальним навантаженням двигуна ($M = M_n$). Отже, отримуємо таку кількісну оцінку гальмовного моменту двигуна:

$$M^* = -2M_n\omega_n/(\omega x^* - \omega^*(M_n)). \quad (4.28)$$

Вираз (4.28) свідчить про можливість порушення обмеження (4.17). Більш того, для сучасних систем регульованого ЕП з високою жорсткістю механічних характеристик таке порушення буде мати місце практично завжди. Тому формування завдання моменту в гальмовному режимі слід здійснювати у вигляді функції

$$M_T = -\text{sat}(\beta\omega_0(M_{c2} + M_{c1})/M_{c1}), \quad (4.29)$$

що означає:

$$M_T = -M_{\text{доп}}, \text{ якщо } \beta\omega_0(M_{c2} + M_{c1})/M_{c1} > M_{\text{доп}}, \quad (4.30)$$

$$M_T = -\beta\omega_0(M_{c2} + M_{c1})/M_{c1}, \text{ якщо } \beta\omega_0(M_{c2} + M_{c1})/M_{c1} \leq M_{\text{доп}}. \quad (4.31)$$

Отриманий результат у вигляді (4.29 – 4.31), з певним корегуванням, відноситься і до випадку, коли ставиться задача оптимального з енергоефективності керування процесом гальмування ЕП до зупину. Дійсно, в такому випадку критерій якості (4.12) має бути зкорегованим підстановкою $\beta^* = \beta$, у всіх наведених вище розсудження коефіцієнт α буде мати значення $\alpha = \beta\omega_n/M_n$, і відповідно до цього у виразах (4.27, 4.29 – 4.30) слід покласти $M_{c2} = 0$.

Розглянемо енергетичні показники оптимального процесу гальмування електропривода. Тривалість процесу визначимо із (4.26) при $\tau = \Theta$, $x(\Theta) = 0$, $M_T = -M_{\text{доп}}$: $\Theta = x_0/(\alpha x_0 + u_0) = v_0/(\mu_{\text{доп}} + \mu_{c1})$, або в натурних одиницях $T = \Theta T_m = J\omega_0/(\mu_{\text{доп}} + \mu_{c1})$. Шлях переміщення РО у позитивному напрямку, у кутовому вимірі, $\varphi_T = \omega_0 T/2 = (J\omega_0^2/2)/(\mu_{\text{доп}} + \mu_{c1}) = W_k(0)/(\mu_{\text{доп}} + \mu_{c1})$. Енергія, що витрачається на механічну роботу, дорівнює $W_c(T) = M_{c1}\varphi_T = W_k(0)M_{c1}/(\mu_{\text{доп}} + \mu_{c1})$. Енергія електричних втрат дорівнює $\Delta W_{\text{ел}}(T) = M_{\text{доп}}^2 T/\beta = 2W_k(0)M_{\text{доп}}^2/\beta\omega_0(\mu_{\text{доп}} + \mu_{c1})$. Кількість

енергії, що споживається електроприводом за час гальмування,

$$W_{\text{ел}}(T) = -W_{\text{к}}(0) + \Delta W_{\text{ел}}(T) + W_{\text{с}}(T) = \\ = -W_{\text{к}}(0)(1 - (M_{\text{с}1} + 2M_{\text{доп}}^2/\beta\omega_0)/(M_{\text{доп}} + M_{\text{с}1})). \quad (4.32)$$

Розглянемо наступний приклад. Припустимо, що ЕП має механічну характеристику (4.2) з відносним падінням швидкості при номінальному навантаженні $(\omega_{\text{х}} - \omega_{\text{н}})/\omega_{\text{н}} = 0,05$, статичний момент $M_{\text{с}1} = 0,1M_{\text{н}}$, допустиме значення електромагнітного моменту двигуна $M_{\text{доп}} = 2M_{\text{н}}$. Для оптимального за критерієм якості (4.16) гальмування з початковим значенням швидкості $\omega_0 = \omega_{\text{н}}$ із (4.2) слідує: $\beta\omega_0 = \beta\omega_{\text{н}} = M_{\text{н}}\omega_{\text{н}}/(\omega_{\text{х}} - \omega_{\text{н}}) = 20M_{\text{н}}$. Тоді із (4.32) отримуємо:

$$W_{\text{ел}}(T) = -W_{\text{к}}(0)(1 - (0,1M_{\text{н}} + 8M_{\text{н}}^2/20M_{\text{н}})/(2M_{\text{н}} + 0,1M_{\text{н}})) = -0,24W_{\text{к}}(0).$$

Це означає, що оптимальний за критерієм якості (16) процес $(M(t), \omega(t))$ гальмування як до зупину, так і в режимі реверсування забезпечує мінімізацію енерговитрат в енергетичному каналі електропривода, при цьому можливе повернення частини початкового запасу кінетичної енергії рухомих мас джерелу живлення.

Висновки до розділу 4

Науково-технічна проблема ресурсозбереження в системах електроприводу механізмів переміщення зі зворотно-поступальним рухом робочих органів, що працюють з високою частотою технологічних циклів, на цей час є актуальною. В аспекті цієї проблеми поставлено задачу синтезу енергоефективного процесу руху електропривода механізма переміщення робочого органа технологічної машини в режимі гальмування, який є першою за часом складовою режиму реверсування електропривода. Обґрунтовано подання критерія якості процесу гальмування у вигляді функціоналу, який враховує безповоротні витрати енергії, сформульовано математичну задачу оптимального керування електроприводом за

цим критерієм. Особливою рисою критерія якості є те, що він передбачає зменшення безповоротних витрат енергії за рахунок скорочення величини переміщення робочого органу технологічної машини в процесі руху у зворотному напрямку.

Результат розв'язання задачі оптимального керування електроприводом подано у двох формах, що відповідають випадкам гальмування електропривода в режимі реверсування та до зупину без реверсування. Для обох з цих варіантів реалізації оптимального процесу гальмування доведено факт мінімізації енерговитрат в енергетичному каналі електропривода і можливість часткового повернення кінетичної енергії рухомих мас джерелу живлення електропривода, що є фактором енергоефективності.

Результати проведеного дослідження відображені в публікації [14] та захищені патентом [15].

5. РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ РУХУ НЕСУЧОГО ОРГАНА В РОБОЧОМУ ЦИКЛІ ЛЕТУЧОЇ ПИЛИ

Функціональний аналіз робочого циклу летючої пили (ЛП) [16] дає підстави для вирішення задач автоматизації ресурсозберігаючого керування процесами руху її несучого органа (НО). Технічним засобом керування процесами руху НО є автоматизований привод у складі механізму переміщення цього робочого органу (МПНО). Тому керування процесами руху НО здійснюється шляхом формування певних законів руху його електропривода, які формуються алгоритмічно - програмним блоком БКМПНО в алгоритмі роботи керуючого пристрою (КП) системи керування (СКЛП) летючої пили. У даному розділі наводяться матеріали розробки ресурсозберігаючих законів руху електропривода несучого органа летючої пили.

5.1 Постановка загальної задачі ресурсозберігаючого керування процесами руху несучого органа летючої пили

Загальна технологічна задача ЛП полягає в порізі довгомірного профілю, що рухається зі швидкістю V_1 , на відрізки мірної довжини L_m . Практично в будь-якій технологічній лінії (ТЛ), у складі якої працює ЛП, швидкість V_1 руху оброблюємого виробу (ОВ) може мати значення в діапазоні від V_{1min} до V_{1max} . Причому, визначене умовами технології значення швидкості V_1 змінюється протягом серії робочих циклів ЛП (при порізі однієї полоси профілю) лише в межах флуктуаційних відхилень. У зв'язку із цим ми будемо розглядати процес мірного порізу ОВ при постійному значенні швидкості V_1 . Зміна швидкості ОВ протягом робочого циклу ЛП є перехідним режимом, здійснюваним, наприклад, при запуску ТЛ. Такі режими виникають рідко, у зв'язку із чим їх слід розглядати окремо. При порізі однієї полоси довгомірного матеріалу може змінюватися завдання L_m мірної довжини, установлюване в межах від $L_{m.min}$ до $L_{m.max}$, якщо СК технологічної лінії вирішує задачу оптимального розкрою полоси профілю. Це означає, що об'єктно-орієнтована СКЛП, зокрема, БКМПНО в її складі повинні

передбачати адаптованість до поточних значень V_1 і L_M .

Тривалість поточного робочого циклу ЛП

$$t_{\text{PC}} = L_M / V_1. \quad (5.1)$$

Мінімально можливий час циклу $t_{\text{PCmin}} = L_{M.\text{min}} / V_{1\text{max}}$. З іншого боку, час виконання робочого циклу дорівнює сумі часових інтервалів виконання окремих етапів, тобто $t_{\text{PC}} = t_{E1} + t_{E2} + t_{E3} + t_{E4} + t_{E5}$. Таким чином, величини V_1 і L_M визначають вимоги до швидкодії, а значення $L_{M.\text{min}}$ і $V_{1\text{max}}$ – найбільш напружений тепловий режим електропривода НО.

Швидкість руху НО протягом всього другого етапу циклу повинна дорівнюватись нулю. Тривалість t_{E2} цього етапу (режиму вистою НО) не менше заданого, достатнього за величиною часу t_0 здійснення обчислювальних операцій, пов'язаних з розв'язанням задачі визначення закону руху НО на третьому етапі циклу (в режимі розгону – синхронізації) та визначення положення чергового перерізу різання, при якому БКМПНО має видавати сигнал запуску привода НО “вперед” (на поріз). Тому тривалість робочого циклу, а виходить, і співвідношення L_M / V_1 мають задовольняти умові

$$t_{\text{PC}} = L_M / V_1 > t_{E1} + t_0 + t_{E3} + t_{E4} + t_{E5}. \quad (5.2)$$

Дотримання умови (5.2) забезпечується технологічним регламентом, який розробляється з урахування законів руху НО на етапах 1, 3, 4, і 5 робочого циклу ЛП.

Характеристики міцності ОВ накладають обмеження на зусилля $F_{\text{нат}}$ взаємодії НО з ОВ, яке повинне бути в межах $0 \leq F_{\text{нат}} \leq F_{\text{нат.доп}}$, де $F_{\text{нат.доп}}$ – максимально допустиме значення зусилля $F_{\text{нат}}$, відповідне до натягу ОВ без його ушкодження (задається технологічними умовами). Для привода НО летучої пили правомірне допущення незмінності величини M_c статичного моменту (приведеного до швидкості обертання двигуна) протягом робочого циклу. Відповідно до цього на четвертому етапі циклу при $F_{\text{нат}} = 0$ буде мати місце рівність $M = M_c$, де M – момент (електромагнітний), розвиваний двигуном привода НО, а якщо $F_{\text{нат}} > 0$, то $M = M_c + M_{\text{нат}}$, де $M_{\text{нат}} = F_{\text{нат}} \cdot \rho$ – момент, який відповідає силі $F_{\text{нат}}$ натягу ОВ, $\rho = V_2 / \omega$ – радіус приведення швидкості V_2 поступального руху НО до кутової швидкості ω

обертання двигуна. Практично обмеження сили натягу здійснюється шляхом обмеження величини моменту на протязі четвертого етапу робочого циклу ЛП: $M_{\text{нат}} < M_{\text{нат.доп}} = F_{\text{нат.доп}} \cdot \rho$.

Аспекти ресурсозбереження враховуються у постановці задачі керування електроприводом НО в такий спосіб. Енерговитрати в електроприводі НО за час $t_{\text{РЦ}}$ мінімізуються завданням цільової функції $Q_{\text{РЦ}} \rightarrow \min$. Величина $Q_{\text{РЦ}}$ являє собою сумарну витрату електроенергії за час робочого циклу: $Q_{\text{РЦ}} = Q_1 + \dots + Q_i + \dots + Q_5$, де $Q_i, i=1, \dots, 5$ – витрата електроенергії на i -му етапі. Допустима погрішність мірного порізу враховується обмеженням $l_1(t_4) - \Delta L_M \leq l_2(t_4) \leq l_1(t_4) + \Delta L_M$, де t_4 – момент часу, що відповідає завершенню третього та початку четвертого етапу (зчепленню НО з ОВ), t_5 – момент часу, що відповідає завершенню четвертого та початку п'ятого етапу, $l_1(t_4)$ – положення перерізу різання ОВ в момент зчеплення з НО, ΔL_M – допустима погрішність мірного порізу (може змінюватись в залежності від сортаменту ОВ та заданої величини L_M).

Операції обробки ОВ в мають здійснюватись в межах зони обробки, тому мають виконуватись умови: $l_2(t_4) \geq l_{\text{пзо}}$ і $t_{\text{ОВ}} \cdot V_2 \leq l_{\text{кзо}} - l_2(t_4)$, де $t_{\text{ОВ}} = t_5 - t_4$ – сукупний час обробки ОВ від його затискання до розтискання (звільнення), $l_{\text{пзо}}$ і $l_{\text{кзо}}$ – координати початку і кінця допустимої зони обробки в ТЛ. Однак, враховуючи можливий сортамент ОВ та значення $V_{1\text{max}}$ для конкретної ТЛ, координати $l_{\text{пзо}}$ й $l_{\text{кзо}}$ завжди такі, що друга з цих умов виконується навіть при $V_2 = V_{1\text{max}}$, тобто $l_{\text{кзо}} > l_2(t_4) + t_{\text{ОВ max}} \cdot V_{1\text{max}}$, де $t_{\text{ОВ max}}$ – максимальний час виконання операції порізу ОВ.

Крім того, аспект безаварійності передбачає накладення обмеження на крайнє положення НО виду $l_2(t_{10}) \geq l_{\text{min}}$, де t_{10} – момент часу, коли швидкість руху НО досягає значення $V_2 = 0$ по завершенні процесу зворотного ходу (“назад”) на п'ятому етапі циклу (при продовженні процесу мірного порізу полоси ОВ поточний час початку першого етапу чергового робочого циклу $t_1 = t_{10}$). Виконання цього обмеження забезпечується, з урахуванням можливої погрішності зупинення НО в позиції $l = l_0$ при завершенні п'ятого етапу робочого циклу, достатньо великим значенням відстані $l_0 - l_{\text{min}}$. Можливість незначного переміщення НО у напрямі “вперед” на першому етапі чергового циклу ми не виключаємо, тобто можливе

короткочасне змінення напрямку руху НО по завершенні п'ятого етапу робочого циклу ЛП.

Аспект збереження працездатності МПНО вимагає накладення обмежень $|M| \leq M_{\text{доп}}$ та $|\dot{M}| \leq \dot{M}_{\text{доп}}$ по допустимих значеннях моменту двигуна та його першої похідної за часом, а також $|\dot{V}_2| \leq \dot{V}_{2\text{доп}}$ та $|\ddot{V}_2| \leq \ddot{V}_{2\text{доп}}$ кутового прискорення НО та “ривка” (відомих технічних характеристик двигуна і механічної частини ЛП). Обмеження прискорення та ривка технічно реалізуються відповідними обмеженнями моменту M двигуна та його похідної. Отже, збереження працездатності МПНО в процесі експлуатації потребує обмеження моменту M двигуна та його похідної значеннями $M_{\text{доп}} = \min(M_{\text{доп}}, (M_c + J\dot{V}_{2\text{доп}}))$, $\dot{M}_{\text{доп}} = \min(\dot{M}_{\text{доп}}, (J\ddot{V}_{2\text{доп}}))$, де J – момент інерції рухомих мас МПНО, приведений до швидкості обертання двигуна.

Будемо вважати, що номінальна потужність двигуна привода НО достатня для реалізації будь-яких законів руху НО у робочих циклах ЛП з урахуванням зазначених вище обмежень, а його номінальна швидкість $\omega_n \geq V_{1\text{max}}/\rho$. При цьому ми приймаємо до уваги, що в системі привода реалізується однозонне регулювання швидкості в межах основної (номінальної) швидкості двигуна, що є раціональним для приводів механізмів з високою частотою пускагальмівних режимів, до числа яких відноситься і МПНО. Викладену обставину ми повинні врахувати ще одним обмеженням: $|\omega| \leq \omega_n$.

Задача ресурсозберігаючого керування приводом НО летучої пили формулюється у вигляді задачі оптимізації з цільовою функцією

$$Q_{\text{РЦ}} = Q_1 + \dots + Q_i + \dots + Q_5 \rightarrow \min \quad (5.3)$$

при обмеженнях:

$$l_2(t_4) \geq l_{\text{пзо}} \quad (5.4)$$

$$l_1(t_4) - \Delta L_M \leq l_2(t_4) \leq l_1(t_4) + \Delta L_M; \quad (5.5)$$

$$l_2(t_6) \geq l_{\text{min}}; \quad (5.6)$$

$$V_2(t_4) = V_1(t_4); \quad (5.7)$$

$$|\omega| \leq \omega_n, \quad t \in [t_1, t_6]; \quad (5.8)$$

$$M_{\text{нат}} < M_{\text{нат.доп}} = F_{\text{нат.доп}} \cdot \rho, \quad t \in [t_4, t_5]; \quad (5.9)$$

$$|M| \leq M_{\text{доп}}, \quad t \in [t_1, t_6]; \quad (5.10)$$

$$\left| \dot{M} \right| \leq \dot{M}_{\text{доп}}, \quad t \in [t_1, t_6]; \quad (5.11)$$

Для забезпечення застосовності результатів розробки ресурсозберігаючих законів руху НО (привода НО) у системах автоматизації будь-яких ЛП зі зворотно-поступальним рухом НО необхідно представляти фізичні перемінні у відносних одиницях. Тому наведемо опис загальноприйнятої в задачах електромеханіки системи відносних одиниць та подамо у цієї системі загальну задачу керування (3 – 11).

Приводи НО летучих пил мають компактне конструктивне виконання без довгих валів, завдяки чому механічну частину привода правомірно вважати жорсткою (одномасовою) і застосовувати її математичну модель у вигляді основного рівняння руху електропривода

$$M - M_c = J \dot{\omega}. \quad (5.12)$$

Базові значення основних фізичних величин вибирають на основі рівняння руху (12), а саме: M_n і ω_n – номінальні значення моменту і кутової швидкості двигуна; $T_m = J \omega_n / M_n$ – механічна стала часу електроприводу НО. Тоді рівняння (12) у відносних одиницях буде мати вигляд:

$$\mu - \mu_c = \dot{v}, \quad (5.13)$$

де $\mu = M / M_n$, $\mu_c = M_c / M_n$, $v = \omega / \omega_n$, $\dot{v} = dv/d\tau$, $\tau = t / T_m$ – фізичні перемінні M , M_c , ω , $\dot{\omega}$, t у відносних одиницях.

За базове значення швидкості лінійних переміщень приймемо добуток $\rho \cdot \omega_n$. Тоді відносні значення лінійних швидкостей переміщення НО і ОВ будуть такими: $v_2 = V_2 / \rho \cdot \omega_n$, $v_1 = V_1 / \rho \cdot \omega_n$, причому має місце рівність $v_2 = v$.

Базове значення відстані виберемо рівним $S_B = \rho \cdot \omega_n \cdot T_m$. Тоді лінійні координати ТЛ, положень перерізу різання та НО, мірної довжини у відносних одиницях будуть мати вигляд $\lambda = l / S_B$, $\lambda_1 = l_1 / S_B$, $\lambda_2 = l_2 / S_B$, $\lambda_M = L_M / S_B$, а лінійні переміщення s_1

перерізу різання та s_2 несучого органу з позначеннями ξ_1 та ξ_2 у відносних одиницях будуть визначатись, відповідно, часовими інтегралами з підінтегральними функціями $\nu_1(\tau)$ і $\nu(\tau)$, причому кутове переміщення валу двигуна дорівнює лінійному переміщенню $\xi_2(\tau)$ несучого органу, оскільки $\nu(\tau) = \nu_2(\tau)$.

Процеси зміни поточного стану механічної частини ЕП під впливом керуючого діяння M та статичного моменту M_c відносяться до категорії механічних процесів, тому вони цілком описуються рівняннями руху (5.12) та механічної характеристики електропривода :

$$\omega = \omega_0 - M/\beta, \quad (5.14)$$

де $\beta = M_H/(\omega_0 - \omega_H)$ – модуль жорсткості механічної характеристики електропривода; ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу.

Для визначеності будемо вважати, хоча це не має принципового значення, що ЕП має лінійну механічну характеристику (14). Лінійну (або практично лінійну) механічну характеристику мають регульовані ЕП на базі двигуна постійного струму з незалежним збудженням або асинхронного. У таких системах ЕП для механізмів класу МПНО, що розглядається, використовується однозонне регулювання швидкості, в межах $\pm \omega_0$ (шляхом змінення напруги в колі якоря двигуна постійного струму або частоти напруги в колі статора двигуна змінного струму), внаслідок чого має місце постійність модуля жорсткості механічної характеристики ($\beta = const$). Можливість застосування однозонного регулювання швидкості забезпечується правильним вибором двигуна за параметром ω_H .

Рівняння (14) після множення всіх його членів на M перетворюється у рівняння балансу потужностей:

$$M\omega = M\omega_0 - M^2/\beta, \quad (5.15)$$

де $M\omega = P_{\text{мех}}$ – механічна потужність двигуна, $M\omega_0 = P_{\text{ел}}$ – потужність процесу обміну енергією між джерелом живлення і енергетичним каналом електропривода (з абсолютною точністю для ЕП постійного струму та з несуттєвою погрішністю для ЕП змінного струму), $M^2/\beta = \Delta P_{\text{ел}}$ – потужність електричних (теплових) втрат в електричній частині енергетичного

каналу ($\Delta P_{\text{ел}} > 0$). В залежності від способів реалізації процесів гальмування на початку та в кінці п'ятого етапу потужність $P_{\text{ел}} = M\omega_0$ може бути знакоперемінною. Незважаючи на цю обставину, в подальшому будемо називати її потужністю споживання енергії (електроенергії) електроприводом від джерела живлення.

Ліва частина (5.15) після заміни перемінної M її виразом із (5.12) набуває вигляду

$$M\omega = J\omega \dot{\omega} + M_c\omega, \quad (5.16)$$

або

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{к}} + P_{\text{с}}, \quad (5.17)$$

де $P_{\text{мех}} = M\omega$ – механічна потужність двигуна; $P_{\text{к}} = J\omega \dot{\omega} = d(J\omega^2/2)/dt$ – потужність змінення запасу кінетичної енергії рухомих мас електропривода; $P_{\text{с}} = M_c\omega$ – потужність розходу енергії на подолання сил статичного опору (механічну роботу).

Таким чином, ми отримали рівняння балансу потужностей:

$$P_{\text{ел}} = P_{\text{к}} + P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{ел}}. \quad (5.18)$$

Інтегруючи обидві частини (18) на інтервалі $t_{\text{рц}}$ тривалості робочого циклу, отримаємо рівняння енергетичного балансу динамічної системи

$$Q_{\text{рц}} = \int_0^{t_{\text{рц}}} P_{\text{ел}} dt = \int_0^{t_{\text{рц}}} P_{\text{к}} dt + \int_0^{t_{\text{рц}}} P_{\text{с}} dt + \int_0^{t_{\text{рц}}} \Delta P_{\text{ел}} dt, \quad (5.19)$$

де $Q_{\text{рц}}$ – кількість енергії, споживаної електроприводом НО від джерела живлення за час робочого циклу ЛП.

Базові значення потужності будь-якого процесу перетворення енергії та кількості витраченої (або накопиченої) енергії виберемо рівними, відповідно, $P_{\text{Б}} = M_{\text{Н}} \cdot \omega_{\text{Н}}$ та $Q_{\text{Б}} = T_{\text{М}} \cdot M_{\text{Н}} \cdot \omega_{\text{Н}}$. Тоді рівняння енергетичного балансу (19) можна подати у відносних одиницях:

$$q_{\text{рц}} = \int_0^{\tau_{\text{рц}}} p_{\text{ел}} d\tau = \int_0^{\tau_{\text{рц}}} p_{\text{к}} d\tau + \int_0^{\tau_{\text{рц}}} p_{\text{с}} d\tau + \int_0^{\tau_{\text{рц}}} \Delta p_{\text{ел}} d\tau, \quad (5.20)$$

де $\tau_{\text{рц}} = t_{\text{рц}}/T_{\text{М}}$, $p_{\text{ел}} = P_{\text{ел}}/P_{\text{Б}} = \mu \cdot v_0$, $v_0 = \omega/\omega_{\text{Н}}$; $p_{\text{к}} = P_{\text{к}}/P_{\text{Б}} = J\omega \dot{\omega}/(M_{\text{Н}} \cdot \omega_{\text{Н}}) = v \cdot \dot{v}$; $p_{\text{с}} = P_{\text{с}}/P_{\text{Б}} = \mu_{\text{с}} \cdot v$; $\Delta p_{\text{ел}} = \Delta P_{\text{ел}}/P_{\text{Б}} = M^2/(\beta \cdot M_{\text{Н}} \cdot \omega_{\text{Н}}) = \gamma_{\text{ел}} \cdot \mu^2$; $\gamma_{\text{ел}} = (\omega_0 - \omega_{\text{Н}})/\omega_{\text{Н}}$; $q_{\text{рц}} = Q_{\text{рц}}/(T_{\text{М}} \cdot M_{\text{Н}} \cdot \omega_{\text{Н}})$.

Визначена тут система відносних одиниць є функціонально повною, всі фізичні перемінні та константа $\gamma_{ел}$ безрозмірні. Загальна постановка задачі ресурсозберігаючого керування електроприводом (3 – 11) у відносних одиницях подається у наступному вигляді:

$$q_{рц} \rightarrow \min; \quad (5.21)$$

$$\lambda_1(\tau_4) - \Delta\lambda_m \leq \lambda_2(\tau_4) \leq \lambda_1(\tau_4) + \Delta\lambda_m; \quad (5.22)$$

$$\lambda_1(\tau_4) \geq \lambda_{пзо} + \Delta\lambda_m; \quad (5.23)$$

$$\lambda_2(\tau_6) \geq \lambda_{\min}; \quad (5.24)$$

$$v(\tau_4) = v_1(\tau_4); \quad (5.25)$$

$$|v| \leq 1, \tau \in [\tau_1, \tau_6]; \quad (5.26)$$

$$\mu_{нат} \leq \mu_{нат. доп}; \quad (5.27)$$

$$|\mu| \leq \mu_{доп}, \tau \in [\tau_1, \tau_6]; \quad (5.28)$$

$$\left| \dot{\mu} \right| \leq \dot{\mu}_{доп}, \tau \in [\tau_1, \tau_6]. \quad (5.29)$$

Отже, на підставі аналізу аспектів ресурсозбереження у робочому циклі ЛП отримано математичну постановку загальної задачі ресурсозберігаючого керування процесами руху НО з цільовою функцією мінімізації витрат енергії та обмеженнями технологічних параметрів і координат стану електропривода НО, дотриманням яких забезпечується потрібна точність мірного порізу ОВ (довгомірного профілю) та надійна робота електромеханічної системи привода НО.

Завдяки використанню системи відносних одиниць задача ресурсозберігаючого керування процесами руху НО набула додаткові ознаки об'єктної орієнтовності, тому що розв'язання задачі у відносних одиницях забезпечує застосовність результатів до будь-яких СК летучих пил зі зворотно-поступальним рухом НО.

На підставі поставленої задачі, з урахування відрізних особливостей технологічних завдань слід розробити математичні постановки задач ресурсозберігаючого керування процесами руху НО на кожному з п'яти етапів робочого циклу ЛП та методи їх розв'язання.

5.2 Декомпозиція загальної задачі оптимального за енерговитратами керування процесами руху несучого органу летучої пили та методи її розв'язання на етапах робочого циклу

Задача (5.21 – 5.29) підлягає декомпозиції по етапах робочого циклу ЛП, оскільки вони відрізняються постановкою технологічних завдань щодо процесів руху НО. З технологічних міркувань МПНО послідовно працює у трьох режимах:

- 1) режим підготовки до запуску привода НО на поріз (вперед);
- 2) режим робочого ходу НО;
- 3) режим гальмування та зворотного ходу НО .

На підставі загальної постановки (5.21 – 5.29) задачі ресурсозберігаючого керування процесами руху НО летучої пили здійснимо її конкретизацію для указаних режимів роботи механізму переміщення НО, а виходить, і електропривода НО.

5.2.1 Режим підготовки до запуску привода НО “на поріз”

У цьому режимі привод НО працює на протязі першого і другого етапів робочого циклу ЛП. Технологічним завданням першого етапу є приведення НО в нерухомий стан при відсутності люфтів у кінематичному колі привода, тобто переведення МПНО із вихідного стану, коли відбувається зміна значень сигналів x_5 з 1 на 0 та x_1 з 0 на 1 згідно алгоритму, в початковий (коли відбувається зміна значень сигналів x_1 з 1 на 0 та x_2 з 0 на 1). Приймаючи початок першого етапу за початок відліку $\tau = \tau_1$ часу в робочому циклі, можемо визначити задачу енергозберігаючого керування приводом НО таким чином:

$$q_{E1} \rightarrow \min; \quad (5.30)$$

$$0 \leq \mu(\tau_2) < \mu_c; \quad (5.31)$$

$$v(\tau_2) = 0; \quad (5.32)$$

$$|\mu| \leq \mu_{доп}, \tau \in [\tau_1, \tau_2]; \quad (5.33)$$

$$\left| \dot{\mu} \right| \leq \dot{\mu}_{доп}, \tau \in [\tau_1, \tau_2], \quad (5.34)$$

де τ_2 – часовий відлік моменту переходу до другого етапу циклу, q_{E1} – кількість споживаної електроприводом енергії на протязі першого етапу циклу.

Визначимо форму цільового функціоналу оптимального за енерговитратами керування для задачі (30 – 34). Розрахункову кінематичну схему одномасової механічної частини електроприводу та механічну характеристику статичного навантаження подано на рис. 5.1.

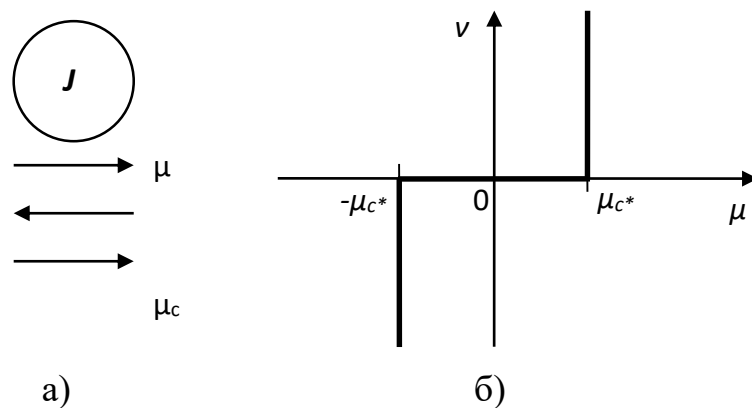


Рисунок 5.1 – а) розрахункова кінематична схема одномасової механічної частини електроприводу; б) механічна характеристика $\mu_c(v)$ статичного навантаження типу “сухе тертя”

Вектор стану електромеханічної системи (ЕМС) має координати: $y_1=v$, $y_2=\dot{v}=\mu-\mu_c$. Математична модель динамічної системи “одномасова ЕМС” подається у вигляді системи диференціальних рівнянь

$$\dot{y}_1(\tau) = y_2(\tau); \quad (5.35)$$

$$\dot{y}_2(\tau) = u(\tau), \quad (5.36)$$

де $u(\tau)$ – управління (в термінах теорії оптимального управління), тобто сигнал, формування якого визначає закон руху системи.

Реактивний статичний момент при $|v|>0$, якщо знехтувати складовими в'язкого тертя, є функцією швидкості (рис.1) у вигляді:

$$\mu_c = \mu_c^* \cdot \text{sign}(v), \quad (5.37)$$

тому в нашому випадку

$$u(\tau) = d(\mu - \mu_c) / d\tau = \dot{\mu}(\tau), \quad (5.38)$$

з обмеженням (34) у вигляді:

$$|u| \leq \dot{\mu}_{\text{доп}}. \quad (5.39)$$

Помітимо, що тривалість першого етапу надто мала, щоб він помітно впливав на розхід енергії в робочому циклі ЛП.

Приймемо до уваги, що п'ятий етап попереднього робочого циклу завершується, а перший етап наступного циклу починається у часи при $\mu(\tau_1) \geq 0$, $v(\tau_1) = 0$, коли програмний блок БСА формує сигнал спостереження $x_1 = 1$. Тому доцільно технологічним завданням керування вважати переведення системи (35 – 36) із початкового стану $(y_1(\tau_1), y_2(\tau_1))$ в кінцевий $(y_1(\tau_2), y_2(\tau_2))$ шляхом змінення моменту μ від початкового значення $\mu(\tau_1)$ до кінцевого $\mu(\tau_2) = 0$. При такій постановці технологічного завдання мінімізація енерговитрат досягається, якщо цільовий функціонал (для нашого випадку)

$$I_{E1} = \int_0^{\tau_{E1}} \mu^2(\tau) d\tau, \quad (5.40)$$

а керування системою (35 – 36) має бути оптимальним за швидкодією, шляхом формування управління $u(\tau)$ у вигляді сигнатурної функції

$$u(\tau) = \dot{\mu}(\tau) = \begin{cases} -\dot{\mu}_{\text{доп}} \operatorname{sign}(\mu - \mu_\delta) \text{ при } \mu \neq \mu_\delta; \\ 0 \text{ при } \mu = \mu_\delta, \end{cases} \quad (5.41)$$

де $\mu_\delta < \mu_c^*$ – величина моменту, достатня для утримання закритими люфтів у кінематичному ланцюзі привода НО. Строга нерівність $\mu_\delta < \mu_c^*$ обумовлена тим, що точне значення статичного моменту M_c невідоме і мають місце його флуктуаційні коливання.

Дійсно, кінетична енергія рухомих мас буде рівною нулю як на початку, так і наприкінці даного етапу циклу, а величина енергії, що витрачається на механічну роботу (якщо на деякому інтервалі часу в межах часу протікання даного етапу буде $v > 0$), мінімізується при керуванні, оптимальному за швидкодією. Тому форма (40) цільового функціоналу є обґрунтованою.

Технічна реалізація оптимального за енерговитратами керування

електроприводом на першому етапі робочого циклу ЛП здійснюється наступним чином. За появою сигналу $x_1=1$, що означає початок першого етапу циклу, програмний блок БКМПНО переключає СК електропривода в режим регулювання моменту для відпрацювання завдання $M_{\text{зад}}=M_\delta$ з максимальною швидкістю. Закінчення процесу відроблення завдання розпознається за станом $M=M_\delta$ і $\omega=0$, при виявленні якого блок БКМПНО формує сигнал $x_6=1$, що використовується в алгоритмі як ознака завершення першого етапу робочого циклу.

Помітимо, що на першому і другому етапах робочого циклу теоретично може бути задано значення $M_{\text{зад}}=0$, що є розв'язком задачі ресурсозбереження на цих етапах. Однак, враховуючі можливість флуктуаційних коливань моменту M двигуна у статичному (квазістатичному) режимі, навіть при застосуванні сучасного високоякісного електропривода, доцільно вибрати задане значення моменту на першому етапі рівним $M_\delta=M_{\delta \text{ min}}$. Величину $M_{\delta \text{ min}}$ визначають експериментально такою, що флуктуаційні коливання моменту M в статичному режимі не приводять до порушення рівності $\omega(t_2)=0$ і не приводять до розкриття люфтів у кінематичному ланцюзі привода НО. За умови $M_{\text{зад}}=M_{\delta \text{ min}} < M_c^*$ здійснюється гальмування привода НО, навіть з якихось причин мало місце $\omega(t_1) \neq 0$ або відбувається флуктуаційне коливання моменту навколо значення $M_{\delta \text{ min}}$, і за деякий (невеликий) час привод НО заспокоюється у нерухомому стані. Цим визначається момент закінчення першого етапу робочого циклу і сигналу x_1 присвоюється значення 0, а сигналу x_2 – значення 1.

Другий етап робочого циклу починається з моменту появи сигналу $x_2 = 1$ і закінчується в момент часу $\tau = \tau_3$ зі зміною значень сигналів x_2 з 1 на 0 та x_3 з 0 на 1. Технологічним завданням другого етапу є утримання НО в нерухомому стані (“вистою”) на протязі інтервала часу τ_{E2} , необхідного для розрахунку параметрів закону руху ЕП в режимі робочого ходу і очікування появи сигналу $x_3=1$ запуску електропривода НО на поріз, коли координата λ_1 положення чергового перерізу різання на ОВ, що рухається зі швидкістю v_1 , приймає деяке значення $\lambda_{1п}$. Обчислення значення $\lambda_{1п}$ здійснюється у програмному блоці

БКМПНО керуючого пристрою системи автоматизації ЛП за алгоритмом, який визначається при розв'язанні задачі ресурсозберігаючого керування приводом НО в режимі розгону-синхронізації.

Ціль ресурсозбереження на другому етапі циклу, як і на першому, віроджується в задачу мінімізації електричних втрат, тому можемо визначити задачу керування приводом НО наступним чином:

$$q_{E2} \rightarrow \min; \quad (5.42)$$

$$0 \leq \mu(\tau) < \mu_c, \tau \in [\tau_2, \tau_3], \quad (5.43)$$

$$|\dot{\mu}| \leq \dot{\mu}_{\text{дон}}, \tau \in [\tau_2, \tau_3] \quad (5.44)$$

з цільовим функціоналом у формі

$$I_{E2} = \int_0^{\theta} \mu^2(\tau) d\tau, \quad (5.45)$$

де $\theta < \tau_{E2}$ – невизначений час (з перенесенням початку відліку часу в точку $\tau = \tau_2$, що допустимо, оскільки динамічна система є автономною).

На протязі інтервалу часу $\tau_{E2} = \tau_3 - \tau_2$ має місце рівність $v=0$. Тому задача (5.42 – 5.44) є задачею керування одномірною системою

$$\dot{y}_1(\tau) = u(\tau), \quad (5.46)$$

де $y_1 = \mu$, а управлінням $u(\tau)$ є, як і на першому етапі робочого циклу, похідна (5.38) моменту μ з обмеженням (5.39).

Очевидно, фактором мінімізації функціоналу (5.45) буде завдання $y_1(\theta) = 0$, тобто метою керування є зміна координати y_1 від початкового значення $y_1(0)$ до кінцевого $y_1(\theta) = 0$ при нерухомому стані ($v = 0$) інерційної маси ЕМС (тут ми ввели позначення $\mu = y_1$, щоб указати на одномірність системи (5.46)). Ця задача відноситься до класу задач керування з закріпленими кінцями фазової траєкторії $y_1(\tau)$ і невизначеним часом θ руху системи. Рішення такої задачі відомо [17]:

$$u(\tau) = \dot{\mu}(\tau) = \begin{cases} -\dot{\mu}_{\text{дон}} \text{sign}(\mu) \text{ при } \mu \neq 0; \\ 0 \text{ при } \mu = 0, \end{cases} \quad (5.47)$$

Технічна реалізація оптимального за енерговитратами керування

електроприводом на другому етапі робочого циклу ЛП здійснюється наступним чином. За появою сигналу $x_2=1$, що означає початок цього етапу, програмний блок БКМПО утримує СК електропривода в режимі регулювання моменту для відпрацювання завдання $M_{зад}=0$ з максимальною швидкістю. Закінчення процесу відпрацювання завдання в момент часу $\tau_2+\theta$ розпізнається за станом $M=0$ і $\omega=0$, при виявленні якого в алгоритмі передбачено перехід в режим очікування появи сигналу $x_7=1$, що використовується як ознака завершення другого етапу з наступним формуванням команди $x_3=1$ запуску ЕП “на поріз”.

Отже, вперше обгрунтовані і поставлені у математичній формі задачі ресурсозберігаючого керування електроприводом НО летучої пили на двох перших етапах робочого циклу, що є складовими режиму підготовки МПО до запуску “на поріз”. Доведено, що ці задачі зводяться до задач оптимального керування електроприводом НО за критерієм мінімуму втрат енергії в енергетичному каналі ЕП при реалізації технологічного завдання цього режиму – усунення люфтів у кінематичному ланцюзі привода НО, зниження величини електромагнітного моменту двигуна до нуля та наступного за цим очікування появи командного сигналу запуску МПО “на поріз” (вперед). Отримані результати розв’язання поставлених задач методами теорії оптимального управління показують, що фазова траєкторія керованої фізичної перемінної – електромагнітного моменту двигуна на цих етапах робочого циклу ЛП повинна бути оптимальною за швидкістю, чим забезпечується мінімізація цільових функціоналів як критеріїв енергоефективності процесів керування.

В режимі підготовки МПО до запуску “на поріз” ЕП несучого органа повинен працювати в режимі регулювання моменту, оскільки при роботі ЕП в режимі регулювання швидкості не може бути гарантованою рівність моменту нулю на другому етапі робочого циклу ЛП, у зв’язку з реактивним характером статичного навантаження електропривода. Система автоматизованого ЕП забезпечує можливість технічної реалізації розробленого методу ресурсозберігаючого керування електроприводом НО на першому та другому етапах робочого циклу ЛП.

5.2.2 Режим робочого ходу

Цей режим уявляє собою послідовність двох режимів: розгону – синхронізації та обробки (порізу) ОВ, яким відповідають, відповідно, третій та четвертий етапи робочого циклу ЛП. Початок третього етапу визначається зміною значення сигналу x_3 з 0 на 1, а його закінчення (у момент часу t_4) – зміною значень сигналів x_3 з 1 на 0 та x_4 з 0 на 1. Технологічним завданням електропривода в режимі розгону – синхронізації є розгін НО із нерухомого стану до швидкості V_1 руху ОВ зі співпадінням площини різального диску з черговим перерізом різання на ОВ та кінцевим значенням моменту M двигуна $M=M_c+M_{нат}$. Режим розгону-синхронізації є енергоємним та найбільш відповідальним у робочому циклі ЛП з точки зору одержання потрібної точності мірного порізу ОВ.

Задачу ресурсозберігаючого керування приводом НО в режимі розгону – синхронізації можемо визначити, з використанням системи відносних одиниць, наступним чином:

$$q_{E3} \rightarrow \min; \quad (5.48)$$

$$\lambda_1(\tau_4) - \Delta\lambda_m \leq \lambda_2(\tau_4) \leq \lambda_1(\tau_4) + \Delta\lambda_m; \quad (5.49)$$

$$\lambda_1(\tau_4) \geq \lambda_{пзо} + \Delta\lambda_m; \quad (5.50)$$

$$v(\tau_4) = v_1(\tau_4); \quad (5.51)$$

$$0 \leq v \leq 1, \tau \in [\tau_3, \tau_4]; \quad (5.52)$$

$$\mu^*_c < \mu(\tau_4) \leq \mu^*_c + \mu_{нат.доп}; \quad (5.53)$$

$$0 \leq \mu \leq \mu_{доп}, \tau \in [\tau_3, \tau_4]; \quad (5.54)$$

$$\left| \dot{\mu} \right| \leq \dot{\mu}_{доп}, \tau \in [\tau_3, \tau_4]. \quad (5.55)$$

Умови (49 – 51) і (53) означають, що на прикінці етапу розгону-синхронізації двигун привода НО повинен розвивати момент, достатній для того, щоб після зчеплення НО з ОВ не створювати зусилля підпору, діючого на ОВ, при рівності лінійних швидкостей переміщення НО і ОВ та співпадінні площини різального диску з наміченим перерізом різання на ОВ (з допустимою погрішністю $\Delta\lambda_m$), причому в момент зчеплення ($\tau = \tau_4$) координата $\lambda_2(\tau_4)$ положення НО (площини

піляльного диску) має бути не меншою, ніж координата $\lambda_{пзо}$ початку зони обробки в ТЛ. Тому тривалість режиму розгону – синхронізації доцільно прийняти такою:

$$\tau_{ЕЗ} = \tau_4 - \tau_3 = (\lambda_{пзо} + \Delta\lambda_m - \lambda_{1п}) / \nu_1, \quad (5.56)$$

де $\nu_1 = \nu_1(\tau_2)$ – результат виміру швидкості руху ОВ на початку 2-го етапу робочого циклу (з урахуванням допущення $\nu_1 = const$ при $\tau \geq \tau_2$).

Процес зміни поточного стану динамічної системи “електропривод НО” поділяється на дві часові ділянки, для яких система подається різними математичними моделями. На першій ділянці здійснюється виведення НО із нерухомого стану, шляхом збільшення величини моменту двигуна від початкового значення $\mu(\tau_3) = 0$ до кінцевого $\mu(\tau_{31}) = \mu^*$. На протязі цього процесу має місце рівність $\nu = 0$. Тому задача (48 – 55) є задачею керування одномірною системою (46) з цільовим функціоналом, що мінімізується, у формі

$$I_{ЕЗ1} = \int_0^{\theta} \mu^2(\tau) d\tau, \quad (5.57)$$

де $\theta = \theta_{ЕЗ1}$ – невизначена тривалість процесу (з перенесенням початку відліку часу в точку $\tau = \tau_3$ на підставі автономності динамічної системи).

У [18] доведено, що рішенням цієї задачі є управління

$$u(\tau) = \dot{\mu}(\tau) = \dot{\mu}_{доп}. \quad (5.58)$$

При оптимальному керуванні (58) тривалість першої ділянки процесу розгону-синхронізації дорівнюватиме

$$\theta_{ЕЗ1} = \mu^* / \dot{\mu}_{доп}. \quad (5.59)$$

Технічна реалізація оптимального за енерговитратами керування електроприводом на цій ділянці процесу розгону-синхронізації здійснюється наступним чином. За появою сигналу $x_3 = 1$, що означає початок третього етапу циклу, програмний блок (БКМПНО) утримує СК електропривода в режим регулювання моменту для відпрацювання завдання $M_{зад} = M_c^*$. Закінченню процесу виведення НО із нерухомого стану відповідають момент часу $\tau_{31} = \tau_3 + \theta_{ЕЗ1}$ та стан системи $\mu(\tau_{31}) = \mu^*$, $\nu(\tau_{31}) = 0$, після чого система переходить у стан

механічного руху (друга ділянка процесу розгону-синхронізації).

На другій ділянці процесу розгону – синхронізації ЕМС подається як розгонний привод [17, с. 38-39], оскільки за заданий час θ_{E32} має бути здійснено розгін двигуна (та, відповідно, НО) із нерухомого стану до швидкості $v = v_1$. Математичною моделлю ЕМС буде автономна динамічна система

$$\dot{y}_1(\tau^*) = y_2(\tau^*) - u_0; \quad (5.60)$$

$$\dot{y}_2(\tau^*) = u(\tau^*), \quad (5.61)$$

де $\tau^* = \tau - \tau_{31}$ – час зі зсувом; $y_1(\tau^*) = v(\tau^*)$, $y_2(\tau^*) = \mu(\tau^*)$, $u_0 = \mu_c^*$, а управлінням $u(\tau^*)$ є похідна моменту μ з обмеженням (5.55).

Критерій енергоефективності процесу розгону – синхронізації на його другій ділянці сформуємо за аналогією з (57):

$$I_{E32} = \int_0^{\theta} y_2^2(\tau^*) d\tau^*, \quad (5.62)$$

де $\theta = \theta_{E32}$ – тривалість процесу (з перенесенням початку відліку часу в точку $\tau = \tau_{31}$ на підставі автономності динамічної системи).

Правомірність визначення цільового функціоналу у формі (4.62) слідує з того, що величини приросту швидкості руху та переміщення НО за час θ_{E32} мають детерміновані значення, відповідно $v(\theta_{E32}) = v_2(\theta_{E32}) = v_1$ і $\xi_2(\theta_{E32}) = \lambda_{пзо} + \Delta\lambda_m - \lambda_2(\tau_2)$, $\lambda_2(\tau_2)$ – вимірюване положення НО на початку другого етапу робочого циклу, а це означає детермінованість приросту кінетичної енергії рухомих мас $q_{K32} = v_1^2/2$ та витрат енергії на механічну роботу $q_{C32} = \mu_c^* \cdot \xi_2(\theta_{E32})$. Тому оцінкою енергоефективності є лише теплові втрати в електричній частині енергетичного каналу електропривода.

Ставиться задача пошуку процесу $(y_1(\tau^*), y_2(\tau^*), u(\tau^*))$, що надає мінімум цільовому функціоналу (62). Ця задача відноситься до класу задач оптимального керування автономною динамічною системою з закріпленими кінцями фазової траєкторії $(y_1(\tau^*), y_2(\tau^*))$ і часом θ_{E32} руху системи від початкового стану $y_1(0) = 0$, $y_2(0) = \mu_c^*$ до кінцевого $y_1(\theta_{E32}) = v_1$, $y_2(\theta_{E32}) = \mu_c^* + \mu_{нат}$. При розв'язанні задачі

обмеження (54) з допустимої величини моменту враховувати не будемо, його дотримання забезпечується відповідним достатньо великим значенням співвідношення L_M/V_1 , що відноситься до технологічного регламенту.

Відомо [17, с. 39], що для автономної системи (5.60 – 5.61), лінійної відносно фазових координат $y_1(\tau^*)$, $y_2(\tau^*)$ і управління $u(\tau^*)$ та з обмеженням лише на управління, останнє є кусочно-постійної в часі функцією, що послідовно приймає значення $u = \dot{\mu}_{\text{доп}}$, $u = 0$, $u = -\dot{\mu}_{\text{доп}}$ на інтервалі часу $\tau^* \in [0, \theta_{E32}]$, тому що екстемалью є лінійна функція $v(\tau^*)$, вихід на яку із початкового стану та перехід до кінцевого стану здійснюються з максимальною швидкістю, тобто при $u = \pm \dot{\mu}_{\text{доп}}$ [17, с. 17].

Оскільки в нашому випадку $\dot{v} \geq 0$ на всьому інтервалі $\tau^* \in [0, \theta_{E32}]$, то інтервал часу θ_{E32} поділяється, відповідно до указаних значень $u(\tau^*)$, на три підінтервали: $\Delta\tau_1 = \tau_{32} - \tau_{31}$; $\Delta\tau_2 = \tau_{33} - \tau_{32}$; $\Delta\tau_3 = \tau_4 - \tau_{33}$, $\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3 = \theta_{E32}$. При умовах $v_1 = \text{const}$, $\xi_2(\theta_{E32}) = \lambda_{\text{пзо}} + \Delta\lambda_M - \lambda_2(\tau_2)$ та $\tau^* \in [0, \theta_{E32}]$ час протікання процесу

$$\theta_{E32} = \tau_{E3} - \theta_{E31} = (\lambda_{\text{пзо}} + \Delta\lambda_M - \lambda_{1\text{п}}) / v_1 - \mu^* / \dot{\mu}_{\text{доп}}, \quad (5.63)$$

що надає умови для визначення тривалості вказаних трьох підінтервалів часу, величин моменту μ , прискорення \dot{v} , приростів швидкості Δv та переміщення $\Delta \xi_2$ на підінтервалах часу $\Delta\tau_1$, $\Delta\tau_2$, $\Delta\tau_3$, а також законів змінення координат μ , \dot{v} , ξ_2 руху ЕП на всьому інтервалі часу $\tau \in [\tau_3, \tau_4]$ протікання процесу розгону-синхронізації та визначення значення $\lambda_{1\text{п}}$ положення чергового перерізу різання, при досягненні якого здійснюється перехід до третього етапу робочого циклу ЛП.

З метою побудови конструктивного алгоритму розрахунку часових та фізичних параметрів оптимального процесу руху електропривода НО будемо розглядати описаний процес з додавання наступного за часом інтервалу $\Delta\tau_4 = \mu_{\text{нат}} / \dot{\mu}_{\text{доп}}$, причому з'єднаний інтервал часу $\Delta\tau_5 = \Delta\tau_3 + \Delta\tau_4 = \Delta\tau_1$. у такому (розрахунковому) процесі часова діаграма моменту $\mu(\tau)$ на інтервалі $\tau^* \in [0, \theta^*]$, де $\theta^* = \theta_{E32} + \Delta\tau_4$, буде рівнобічною трапецевидною (або трикутною). Графічну ілюстрацію часових діаграм $\mu(\tau)$, $v(\tau)$, $\lambda_2(\tau)$ процесу руху електропривода в режимі

розгону-синхронізації подано на рис. 5.2.

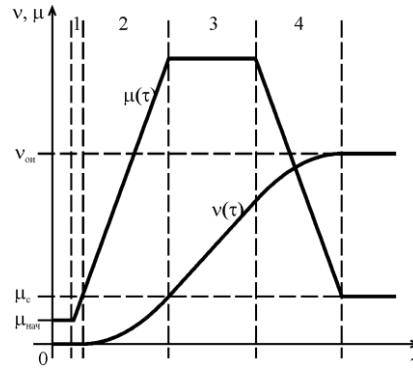


Рисунок 5.2 – Часові діаграми закону руху електропривода НО в режимі розгону-синхронізації

Аналітичні вирази інтервалів часу, електромагнітного моменту, швидкості та прискорення двигуна, переміщення НО і приростів швидкості та переміщення зведені у таблицю 5.1. Останні два (12 і 13) рядки таблиці 5.1 відносяться до інтервалу $\Delta\tau_5$, тобто об'єднують опис процесу по інтервалах $\Delta\tau_3$ і $\Delta\tau_4$ у рядках 10 і 11 відповідно.

Таблиця 5.1 – Закони змінення координат руху електропривода НО в режимі розгону-синхронізації

$\tau; \tau^*;$ $\Delta\tau$	μ	$\dot{\nu}$	$\Delta\nu$	ν	$\Delta\xi_2$	ξ_2
$\tau = \tau_3$	0	0	0		0	
$\tau \in [\tau_3,$ $\tau_{31}];$ $\tau_{31} -$ $\tau_3 = \theta_{E31} = \mu_c^* /$ $\dot{\mu}_{\text{доп}}$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $(\tau - \tau_3)$	0	0		0	
$\tau = \tau_{31};$ $\tau^* = 0$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\theta_{E31} = \mu_c^*$	0	0		0	
$\tau \in [\tau_{31},$ $\tau_{32}];$ $\tau^* \in [0,$ $\Delta\tau_1];$ $\Delta\tau_1 = \tau_{32}$ $-\tau_{31}$	μ_c^* $+$ $\dot{\mu}_{\text{доп}} \tau^*$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}$ τ^*	$\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\cdot (\tau^*)^2 / 2$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\cdot (\tau^*)^2 / 2$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\cdot (\tau^*)^3 / 6$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\cdot (\tau^*)^3 / 6$
$\tau = \tau_{32};$ $\tau^* = \Delta\tau_1 =$	μ_c^* $+$ $\dot{\mu}_{\text{доп}}$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\Delta\tau_1 =$	$\Delta\nu_1 =$ $\dot{\mu}_{\text{доп}}$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\cdot (\Delta\tau_1)^2 / 2 =$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\Delta\xi_{21} = \dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\cdot (\Delta\tau_1)^3 / 6 =$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\cdot (\Delta\tau_1)^3 / 6 =$

	$\dot{v}^*/\mu_{доп}$	$\Delta\tau_1 = \mu_c$ $+ \dot{v}^* = \mu^*$	$= \mu^*$ $-\mu_c = \dot{v}^*$	$\cdot(\Delta\tau_1)^2/2 =$ $= (\dot{v}^*)^2/2 \mu_{доп}$	$= (\dot{v}^*)^2/2 \mu_{доп}$	$= (\dot{v}^*)^3/6(\mu_{доп})^2$	$= (\dot{v}^*)^3/6(\mu_{доп})^2$
	$\tau \in [\tau_{32}, \tau_{33}]$; $\tau^* \in [\Delta\tau_1, \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2]$; $\Delta\tau_2 = \tau_{33} - \tau_{32} = \theta^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_3)$	μ^*	\dot{v}^*	$\dot{v}^* \cdot (\tau^* - \Delta\tau_1)$	$(\dot{v}^*)^2/2 \mu_{доп} + \dot{v}^* \cdot (\tau^* - \Delta\tau_1)$	$(\dot{v}^*)^2(\tau^* - \Delta\tau_1)/2 \mu_{доп} + \dot{v}^* \cdot (\tau^* - \Delta\tau_1)^2/2$	$(\dot{v}^*)^3/6(\mu_{доп})^2 + (\dot{v}^*)^2(\tau^* - \Delta\tau_1)/2 \mu_{доп} + \dot{v}^* \cdot (\tau^* - \Delta\tau_1)^2/2$
	$\tau = \tau_{33}$; $\tau^* = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2$; $\Delta\tau_2 = \theta^* - 2\dot{v}^*/\mu_{доп} = v^*/\dot{v}^* - \dot{v}^*/\mu_{доп}$; $\Delta\tau_2 \geq 0 \Rightarrow \theta^* \geq 2\dot{v}^*/\mu_{доп}$	μ^*	\dot{v}^*	$\Delta v_2 = \dot{v}^* \Delta\tau_2 = v^* - (\Delta v_1 + \Delta v_3) = v^* - (\dot{v}^*)^2/\mu_{доп}$; $v^* = v_1 + (\mu_{нат})^2/2$; $\Delta v_2 \geq 0 \Rightarrow (\dot{v}^*)^2 \leq v^*$	$(\dot{v}^*)^2/2 \mu_{доп} + \dot{v}^* \Delta\tau_2 = v^* - (\dot{v}^*)^2/2 \mu_{доп} = v^*$; $-\dot{v}^*/2 \mu_{доп}$; $\mu_{доп}$; $\dot{v}^* \theta^* = v^* + (\dot{v}^*)^2/2 \mu_{доп}$; $\theta^* = v^*/\dot{v}^* + \dot{v}^*/\mu_{доп}$; $\theta_{E32} = \theta^* - \mu_{нат}/\mu_{доп}$	$\Delta\zeta_{22} = (\dot{v}^*)^2 \Delta\tau_2/2 \mu_{доп} + \dot{v}^* \cdot (\Delta\tau_2)^2/2 = ((\dot{v}^*)^2/\mu_{доп} + \dot{v}^*) \Delta\tau_2/2 = v^* \Delta\tau_2/2 = (v^*)^2/2 \dot{v}^*$; $-\dot{v}^* v^*/2 \mu_{доп} = \zeta_2(\theta^*) - (\Delta\zeta_{21} + \Delta\zeta_{23}) = \zeta_2(\theta^*) - \dot{v}^* v^*/\mu_{доп}$	$(\dot{v}^*)^3/6(\mu_{доп})^2 + (\dot{v}^*)^2 \Delta\tau_2/2 \mu_{доп} + \dot{v}^* \cdot (\Delta\tau_2)^2/2 = (\dot{v}^*)^3/6(\mu_{доп})^2 + v^* \Delta\tau_2/2 = (\dot{v}^*)^3/6(\mu_{доп})^2 + (v^*)^2/2 \dot{v}^* - \dot{v}^* v^*/2 \mu_{доп}$
	$\tau \in [\tau_{33}, \tau_4]$; $\tau^* \in [\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2, \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3]$; $\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3 = \theta_{E32}$	μ^* $\mu_{доп} \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))$	\dot{v}^* $\mu_{доп} \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))$	$\dot{v}^* \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)) - \mu_{доп} \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))^2/2$	$v^* - (\dot{v}^*)^2/2 \mu_{доп} + \dot{v}^* \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)) - \mu_{доп} \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))^2/2$	$v^* \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)) - (\dot{v}^*)^2(\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))/2 \mu_{доп} + \dot{v}^* \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))^2/2 - \mu_{доп} \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))^3/6$	$(\dot{v}^*)^3/6(\mu_{доп})^2 + (\dot{v}^*)^2(\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))/2 \mu_{доп} + \dot{v}^* \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))^2/2 - \mu_{доп} \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))^3/6$

					$^2/2$		$\begin{aligned} & \dot{\mu}_{\text{доп}} + \\ & + \dot{v} \\ & \cdot (\tau^* - \\ & (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))^2/2 \\ & - \\ & \dot{\mu}_{\text{доп}} \\ & (\tau^* - \\ & (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2))^3/6 \end{aligned}$
	$\begin{aligned} \tau &= \tau_4; \\ \tau^* &= \Delta\tau_1 + \\ \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3 &= \theta_{E32}; \\ \Delta\tau_3 &= (\dot{v} \\ \cdot - \mu_{\text{нат}}) / \mu_{\text{доп}} &= \\ = \Delta\tau_1 - \\ \mu_{\text{нат}} / \mu_{\text{доп}} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \mu^* - \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} \\ \cdot \Delta\tau_3 &= \\ = \mu_c \\ * + \mu_{\text{нат}} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \dot{v} \\ - \\ \mu_{\text{доп}} \\ \Delta\tau_3 &= \\ = \mu \\ \text{нат} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \Delta v_4 &= \\ \dot{v}^* \Delta\tau_3 - \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} \\ \cdot (\Delta\tau_3)^2/2 &= \\ = (\dot{v} \\ \cdot)^2/2 \mu_{\text{доп}} - \\ (\mu_{\text{нат}})^2/2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} \end{aligned}$	$\begin{aligned} v^* - (\\ \dot{v}^*)^2/2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} + \\ + \dot{v} \\ \cdot \Delta\tau_3 - \\ - \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} \\ (\Delta\tau_3)^2/2 &= \\ = v^* \\ - (\mu_{\text{нат}})^2/2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} = v_1; \end{aligned}$	$\begin{aligned} \Delta\zeta_{23} &= v^* \Delta\tau_3 \\ - \\ - (\dot{v} \\ \cdot)^2 \Delta\tau_3/2 \mu_{\text{доп}} + \\ + \dot{v} \\ \cdot (\Delta\tau_3)^2/2 - \\ - \dot{\mu}_{\text{доп}} \\ (\Delta\tau_3)^3/6 &= \\ = v^* \dot{v}^* / \\ \mu_{\text{доп}} - v^* \mu_{\text{нат}} / \mu_{\text{доп}} \\ - \\ - (\dot{v}^*)^3/6 (\\ \dot{\mu}_{\text{доп}})^2 + \\ + (\mu_{\text{нат}})^3/6 (\\ \mu_{\text{доп}})^2 \end{aligned}$	$\begin{aligned} (\dot{v} \\ \cdot)^3/6 (\mu_{\text{доп}})^2 + \\ + (v^*)^2 / \\ 2 \dot{v}^* - \dot{v}^* v^* / 2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} + \\ + v^* \Delta\tau_3 \\ - (\dot{v}^*)^2 \Delta\tau_3/2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} + \\ + \dot{v} \\ \cdot (\Delta\tau_3)^2/2 - \\ - \dot{\mu}_{\text{доп}} \\ (\Delta\tau_3)^3/6 &= \\ = (v^*)^2 / \\ \mu_{\text{доп}} - \\ 2 \dot{v}^* + \dot{v}^* v^* / 2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} - \\ - \\ v^* \mu_{\text{нат}} / \mu_{\text{доп}} + \\ + (\mu_{\text{нат}})^3 \\ / 6 (\mu_{\text{доп}})^2 &= \\ = \zeta_2 (\theta_{E3} \\ 2) = \lambda_{\text{пз0}} + \Delta\lambda_{\text{м}} - \\ \lambda_2(\tau_2) \end{aligned}$
0	$\begin{aligned} \tau \in [\tau_4, \\ \tau_{34}]; \\ \tau^* \in [\Delta\tau_1 \\ + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3, \\ \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 \\ + \Delta\tau_3 + \Delta\tau_4]; \\ \Delta\tau_4 = \tau_{34} \\ - \tau_4 = \\ = \theta^* - \\ \theta_{E32} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \mu_c^* \\ + \mu_{\text{нат}} - \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} \cdot (\tau^* - \\ - \\ (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 \\ + \\ + \Delta\tau \\ 3)) \end{aligned}$	$\begin{aligned} \mu_{\text{нат}} \\ \tau - \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} \cdot (\tau^* - \\ - \\ (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 \\ + \\ + \Delta \\ \tau_3)) \end{aligned}$	$\begin{aligned} \mu_{\text{нат}} \cdot (\tau \\ \cdot - \\ (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau \\ 3)) - \\ - \dot{\mu}_{\text{доп}} \\ \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \\ + \Delta\tau_2 + \\ \Delta\tau_3))^2/2 \end{aligned}$	$\begin{aligned} v^* - \\ (\mu_{\text{нат}})^2/2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} + \\ + \mu_{\text{нат}} \\ \tau \cdot (\tau^* - \\ - \\ (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \\ \Delta\tau_3)) - \\ - \end{aligned}$	$\begin{aligned} v^* (\tau^* - \\ (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3) - \\ - (\mu_{\text{нат}})^2 (\tau^* - \\ (\Delta\tau_1 + \\ + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3) / \\ 2 \mu_{\text{доп}} + \\ + \mu_{\text{нат}} \cdot (\tau^* - \\ (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3))^2 / \\ 2 - \end{aligned}$	$\begin{aligned} (v^*)^2/2 \\ \dot{v}^* + \dot{v}^* v^* / 2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}} - \\ - \\ v^* \mu_{\text{нат}} / \mu_{\text{доп}} + \\ + (\mu_{\text{нат}})^3 \\ / 6 (\mu_{\text{доп}})^2 + \end{aligned}$

					$\dot{\mu}_{\text{доп}} \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3))^2 / 2$	$-\dot{\mu}_{\text{доп}} \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3))^3 / 6$	$+\nu^*(\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3)) - (\mu_{\text{нат}})^2 (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3)) / 2 + \mu_{\text{нат}} \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3))^2 / 2 - \dot{\mu}_{\text{доп}} \cdot (\tau^* - (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3))^3 / 6$
1	$\tau = \tau_{34} = \tau_4 + \Delta\tau_4;$ $\Delta\tau_4 = \mu_{\text{на}}$ $\tau / \dot{\mu}_{\text{доп}} = \theta^* - \theta_{\text{E32}};$ $\theta^* = \theta_{\text{E32}}$ $+ \mu_{\text{нат}} / \dot{\mu}_{\text{доп}}$	$\mu_{\text{с}}^*$ $+ \mu_{\text{нат}}$ $\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\cdot \Delta\tau_4 = \mu_{\text{с}}^*$	$\mu_{\text{на}}$ τ^- $\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\cdot \Delta\tau_4 = 0$	$\Delta v_5 = \mu_{\text{нат}} \cdot \Delta\tau_4 - \dot{\mu}_{\text{доп}} \cdot (\Delta\tau_4)^2 / 2 = (\mu_{\text{нат}} \cdot \Delta\tau_4 - \dot{\mu}_{\text{доп}} \cdot (\Delta\tau_4)^2 / 2)$	$\nu^* - (\mu_{\text{нат}})^2 / 2$ $\dot{\mu}_{\text{доп}} + \mu_{\text{на}}$ $\tau \cdot \Delta\tau_4 - \dot{\mu}_{\text{доп}} \cdot (\Delta\tau_4)^2 / 2 = \nu^* - (\mu_{\text{нат}})^2 / 2$ $\nu^* = \nu_1 + (\mu_{\text{нат}})^2 / 2 \dot{\mu}_{\text{доп}}$	$\Delta \zeta_{24} = \nu^* \Delta\tau_4 - (\mu_{\text{нат}})^2 \Delta\tau_4 / 2 + \mu_{\text{нат}} \cdot (\Delta\tau_4)^2 / 2 - \dot{\mu}_{\text{доп}} \cdot (\Delta\tau_4)^3 / 6 = \nu^* \mu_{\text{нат}} / \dot{\mu}_{\text{доп}} - (\mu_{\text{нат}})^3 / 6 (\dot{\mu}_{\text{доп}})^2$	$(\nu^*)^2 / 2$ $\dot{\nu}^* + \nu^* \dot{\nu}^* / 2$ $\dot{\mu}_{\text{доп}}$ $\nu^* \mu_{\text{нат}} / \dot{\mu}_{\text{доп}} + (\mu_{\text{нат}})^3 / 6 (\dot{\mu}_{\text{доп}})^2 + \nu^* \Delta\tau_4 - (\mu_{\text{нат}})^2 \Delta\tau_4 / 2 + \mu_{\text{нат}} \cdot (\Delta\tau_4)^2 / 2 - \dot{\mu}_{\text{доп}} \cdot (\Delta\tau_4)^3 / 6 = (\nu^*)^2 / 2$ $2 \dot{\nu}^* + \nu^* \dot{\nu}^* / 2$ $\dot{\mu}_{\text{доп}} = \zeta_2(\theta^*);$ $\zeta_2(\theta^*) = \zeta_2(\theta_{\text{E32}}) + \Delta \zeta_{24} = \zeta_2(\theta_{\text{E32}}) + \nu^* \mu_{\text{нат}} / \dot{\mu}_{\text{доп}}$

							$\frac{-(\mu_{\text{нат}})^3/6(\dot{\mu}_{\text{доп}})^2}{\dot{v}^*}$
2	$\begin{aligned} \tau \in [\tau_{33}, \tau_{34}]; \\ \tau^* \in [\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2, \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_5]; \\ \Delta\tau_5 = \Delta\tau_3 + \Delta\tau_4 = \Delta\tau_1 \end{aligned}$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}^* \cdot (\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \cdot (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)$	$\dot{v}^* \cdot (\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \cdot (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)$	$\dot{v}^* \cdot (\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \cdot (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)^2/2$	$\dot{v}^* \cdot (\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \cdot (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)^2/2$	$\begin{aligned} v^* - (\dot{v}^*)^2/2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}}^* + \dot{v}^* \cdot (\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \\ (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2) \\ + \dot{\mu}_{\text{доп}}^* (\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \\ (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)^2/2 \\ - \dot{\mu}_{\text{доп}}^* (\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \\ (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)^3/6 \end{aligned}$	$\begin{aligned} (\dot{v}^*)^3/6(\dot{\mu}_{\text{доп}}^*)^2 + (v^*)^2/2 \\ \dot{v}^* \cdot \dot{v}^* \cdot v^*/2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}}^* + v^* \cdot (\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \cdot (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2) - (\dot{v}^*)^2(\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \cdot (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)/2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}}^* + \dot{v}^* \cdot (\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \cdot (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)^2/2 - \dot{\mu}_{\text{доп}}^* (\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \cdot (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)^2/2 \\ - \dot{\mu}_{\text{доп}}^* (\tau^* - \mu_{\text{доп}}^*) \cdot (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2)^3/6 \end{aligned}$
3	$\begin{aligned} \tau = \tau_{34} = \tau_4 + \mu_{\text{нат}}/\dot{\mu}_{\text{доп}}; \\ \tau^* = \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_5 = \theta^*; \\ \Delta\tau_5 = \Delta\tau_1 = \dot{v}^*/\dot{\mu}_{\text{доп}} \end{aligned}$	$\dot{\mu}_{\text{доп}}^* \cdot \Delta\tau_5 = \mu_c^*$	$\dot{v}^* \cdot \Delta\tau_5 = 0$	$\dot{v}^* \cdot \Delta\tau_3 = (\Delta\tau_5)^2/2 = (\dot{v}^*)^2/2 = \Delta v_1$	$\dot{v}^* \cdot \Delta\tau_3 = v^* - (\dot{v}^*)^2/2$	$\begin{aligned} \Delta\zeta_{25} = v^* \cdot \Delta\tau_5 \\ - (\dot{v}^*)^2 \Delta\tau_5/2 \\ + \dot{v}^* \cdot (\Delta\tau_5)^2/2 - \dot{\mu}_{\text{доп}}^* (\Delta\tau_5)^3/6 = \dot{v}^* \cdot v^*/\dot{\mu}_{\text{доп}}^* - (\dot{v}^*)^3/6(\dot{\mu}_{\text{доп}}^*)^2 \end{aligned}$	$\begin{aligned} (\dot{v}^*)^3/6(\dot{\mu}_{\text{доп}}^*)^2 + (v^*)^2/2 \\ \dot{v}^* \cdot \dot{v}^* \cdot v^*/2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}}^* + v^* \cdot \Delta\tau_5 - (\dot{v}^*)^2 \Delta\tau_5/2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}}^* + \dot{v}^* \cdot (\Delta\tau_5)^2/2 - \dot{\mu}_{\text{доп}}^* (\Delta\tau_5)^3/6 = \dot{\mu}_{\text{доп}}^* (\Delta\tau_5)^3/6 = (v^*)^2/2 \\ \dot{\mu}_{\text{доп}}^* = \zeta_2(\theta^*) \end{aligned}$

Визначений в аналітичній формі (табл. 5.1) закон руху електропривода НО

має єдиний регульований параметр $\mu^* = \dot{v}^* + \mu^*_c$, відхилення якого від оптимального значення приводить до зміни часу θ_{E32} та одночасно до відхилення величини переміщення $\xi_2(\theta_{E32})$ від заданого. Тому отримане рішення задачі оптимального керування електроприводом НО є єдиним.

Параметри кінцевого стану системи (60, 61) у розрахунковому процесі, що наведені у табл. 1, визначаються такими аналітичними виразами:

$$v^* = v(\theta^*) = v_1 + (\mu_{\text{нат}})^2 / 2 \dot{\mu}_{\text{доп}} ; \quad (5.64)$$

$$\xi_2(\theta_{E32}) = \lambda_{\text{пзо}} + \Delta \lambda_{\text{м}} - \lambda_2(\tau_2); \quad (5.65)$$

$$\xi_2(\theta^*) = \xi_2(\theta_{E32}) + v^* \mu_{\text{нат}} / \dot{\mu}_{\text{доп}} - (\mu_{\text{нат}})^3 / 6 (\dot{\mu}_{\text{доп}})^2; \quad (5.66)$$

$$\xi_2(\theta^*) = (v^*)^2 / 2 \dot{v}^* + \dot{v}^* v^* / 2 \dot{\mu}_{\text{доп}} ; \quad (5.67)$$

$$\theta^* = v^* / \dot{v}^* + \dot{v}^* / \dot{\mu}_{\text{доп}} ; \quad (5.68)$$

$$\theta_{E32} = \theta^* - \mu_{\text{нат}} / \dot{\mu}_{\text{доп}} . \quad (5.69)$$

Рівняння (5.64), (5.65) і (5.66) дозволяють обчислити параметри v^* , $\xi_2(\theta_{E32})$ і $\xi_2(\theta^*)$. Розглядаючи їх як константи, рівняння (67) подамо у вигляді квадратного рівняння відносно перемінної \dot{v}^* :

$$(\dot{v}^*)^2 - b \dot{v}^* + c = 0, \quad (5.70)$$

де $b = 2 \dot{\mu}_{\text{доп}} \xi_2(\theta^*) / v^*$, $c = v^* \dot{\mu}_{\text{доп}}$.

Рішення рівняння (70) має вигляд

$$\dot{v}^* = b/2 - \sqrt{b^2/4 - c} . \quad (5.71)$$

Вибір негативного за знаком другого члена правої частини (5.71) обумовлено метою мінімізації цільового функціоналу (5.62).

Обчислення параметру θ_{E32} здійснюється на підставі рівняння (5.69), яке з урахуванням (68) набуває вигляду

$$\theta_{E32} = v^* / \dot{v}^* + (\dot{v}^* - \mu_{\text{нат}}) / \dot{\mu}_{\text{доп}} . \quad (5.72)$$

Порівнюючі праві частини (5.72) і (5.63), отримаємо формулу для обчислення значення $\lambda_{1\text{п}}$ положення чергового перерізу різання як ситуаційної ознаки запуску

електропривода НО “на поріз”:

$$\lambda_{1п} = \lambda_{пзо} + \Delta\lambda_m - (\theta_{Е32} + \mu^* / \dot{\mu}_{доп}) \nu_1. \quad (5.73)$$

Користуючись формулою (73), можна визначити обмеження швидкості ν_1 руху ОВ для тримання умови $\theta^* \geq 2\dot{\nu}^* / \dot{\mu}_{доп}$ (табл. 5.1, рядок 7, стовбчик другий), еквівалентної умові $(\dot{\nu}^*)^2 \leq \nu^* \dot{\mu}_{доп}$ (табл. 5.1, рядок 7, стовбчик четвертий). Для цього покладемо $\theta^* = 2\dot{\nu}^* / \dot{\mu}_{доп}$, $\dot{\nu}^* = \mu_{доп} - \mu_c^*$, $\mu_{нат} = 0$, $\lambda_{1п} = 0$. Тоді $\nu^* = \nu_1$, $\zeta_2(\theta_{Е32}) = \max(\zeta_2) = \lambda_{пзо} + \Delta\lambda_m$, $\theta_{Е32} = \theta^* = 2(\mu_{доп} - \mu_c^*) / \dot{\mu}_{доп}$ і на підставі (5.73) отримаємо технологічне обмеження:

$$\nu_1 \leq \min(1, \dot{\mu}_{доп} (\lambda_{пзо} + \Delta\lambda_m) / (2\mu_{доп} - \mu_c^*)). \quad (5.74)$$

Для реалізації алгоритму керування приводом НО в режимі розгону-синхронізації потрібні значення координат стану ОВ та НО в точках супряження послідовних інтервалів часу, що відображено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Значення координат стану НО та ОВ в точках супряження інтервалів часу режиму розгону-синхронізації

№	τ	μ	ν	λ_2	λ_1
1	τ_3	0	0	$\lambda_2(\tau_2)$	$\lambda_{1п}$
2	$\tau_{31} = \tau_3 + \theta_{Е31};$ $\theta_{Е31} = \mu_c^* / \dot{\mu}_{доп}$	μ_c^*	0	$\lambda_2(\tau_2)$	$\lambda_{1п} + \nu_1 \theta_{Е31}$
3	$\tau_{32} = \tau_{31} + \Delta\tau_1;$ $\Delta\tau_1 = \dot{\nu}^* / \dot{\mu}_{доп}$	$\mu^* = \mu_c^* + \dot{\nu}^*$	$(\dot{\nu}^*)^2 / 2 \dot{\mu}_{доп}$	$\lambda_2(\tau_2) + (\dot{\nu}^*)^3 / 6(\dot{\mu}_{доп})^2$	$\lambda_{1п} + \nu_1 \cdot (\theta_{Е31} + \dot{\nu}^* / \dot{\mu}_{доп})$
4	$\tau_{33} = \tau_{32} + \Delta\tau_2;$ $\Delta\tau_2 = \theta^* - 2\dot{\nu}^* / \dot{\mu}_{доп}$	$\mu^* = \mu_c^* + \dot{\nu}^*$	$\nu^* - (\dot{\nu}^*)^2 / 2 \dot{\mu}_{доп}$	$\lambda_2(\tau_2) + (\dot{\nu}^*)^3 / 6(\dot{\mu}_{доп})^2 + (\nu^*)^2 / 2 \dot{\nu}^* - \dot{\nu}^* \nu^* / 2 \dot{\mu}_{доп}$	$\lambda_{1п} + \nu_1 (\theta_{Е31} + \theta_{Е32})$
5	$\tau_4 = \tau_{33} + \Delta\tau_3;$ $\Delta\tau_3 = (\dot{\nu}^* - \mu_{нат}) / \dot{\mu}_{доп}$	$\mu_c^* + \mu_{нат}$	ν_1	$\lambda_{пзо} + \Delta\lambda_m$	$\lambda_{пзо} + \Delta\lambda_m$

Результати визначення координат руху привода НО дозволяють скласти алгоритм обчислення цих координат і положення $\lambda_{1п}$ перерізу різання, при

досягненні якого здійснюється запуск привода НО на поріз. Цей алгоритм може бути таким:

початок. Виявлення зміни значення сигналу спостереження x_2 з 0 на 1);

крок 1. Обчислення параметрів v^* , $\xi_2(\theta_{E32})$ і $\xi_2(\theta^*)$ за формулами (64 – 66);

крок 2. Обчислення коефіцієнтів $b=2 \dot{\mu}_{\text{доп}} \xi_2(\theta^*)/v^*$, $c=v^* \dot{\mu}_{\text{доп}}$ та величини \dot{v}^* прискорення на ділянці рівноприскореного руху за формулою (5.71);

крок 3. Обчислення тривалості θ_{E31} процесу виведення привода НО із нерухомого стану за формулою (5.59);

крок 4. Обчислення тривалості θ_{E32} процесу розгону НО із нерухомого стану до швидкості v_1 руху ОВ за формулою (5.72);

крок 5. Обчислення тривалості τ_{E3} режиму розгону-синхронізації шляхом сумування тривалостей θ_{E31} та θ_{E32} ;

крок 6. Обчислення значення параметра $\lambda_{1п}$ за формулою (5.73);

крок 7. Обчислення значень координат $\mu(\tau)$, $v(\tau)$, $\lambda_2(\tau)$ та $\lambda_1(\tau)$, або деяких з них, що використовуються в алгоритмі керування електроприводом (блок БКМПНО), в точках супряження $\tau=\tau_{32}$ і $\tau=\tau_{33}$, за відповідними формулами в табл. 5.2;

кінець. Передавання результатів обчислень у магістральний канал.

Обчислювальний процес за цим алгоритмом виконується у блоці БКМПНО на другому етапі робочого циклу ЛП. Після завершення обчислень БКМПНО видає сигнал $x_7=1$ переходу до очікування появи ситуації $\lambda_1(\tau)=\lambda_{1п}$, коли формується сигнал $x_3=1$ початку режиму розгону-синхронізації, тобто запуску електропривода НО “на поріз”.

Розглянемо можливі способи керування електроприводом НО в режимі розгону-синхронізації шляхом формування потрібної часової діаграми змінення моменту двигуна. Перший спосіб заключається в тому, що при виявленні події $x_3=1$, тобто на початку режиму розгону-синхронізації, СК електропривода переводиться в режим регулювання швидкості і на вхід регулятора швидкості подається сигнал завдання швидкості $v_{\text{зад}}=v_1$. Завдяки цьому, при використанні пропорційного регулятора швидкості та задатчика інтенсивності на вході

регулятора моменту чітко реалізується діаграма $\mu(\tau)$ на інтервалі часу $\tau \in [\tau_3, \tau_{33}]$, який включає процеси виведення ЕП із нерухомого стану, досягнення прискорення $\dot{v} = \dot{v}^*$ та рівноприскореного руху НО. Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості має бути таким, щоб на прикінці ділянки рівноприскореного руху на його виході зберігалось завдання моменту μ^* . При програмній реалізації контурів регулювання в мікропроцесорній СК електропривода це може бути виконано, однак з порушенням оптимальної настройки регулятора швидкості на інтервалі часу $\tau \in [\tau_3, \tau_{33}]$.

Другій спосіб відрізняється від першого тим, що без зміни оптимальної настройки регулятора швидкості на його вхід подається сигнал $v_{\text{зад}}$ завдання швидкості суттєво більше v_1 , щоб на всьому інтервалі часу $\tau \in [\tau_3, \tau_{33}]$ регулятор швидкості працював у режимі обмеження вихідного сигналу на рівні $\mu_{\text{зад}} = \mu^*$. Тоді при наявності задатчика інтенсивності на вході регулятора моменту буде чітко реалізовуватись діаграма $\mu(\tau)$ на інтервалі часу $\tau \in [\tau_3, \tau_{33}]$. Обидва ці способи передбачають переведення ЕП в режим регулювання моменту двигуна у момент часу $\tau = \tau_{33}$, для реалізації лінійної функції зниження моменту до значення $\mu_{\text{нат}}$. По суті, за цими способами ЕП працює у режимі регулювання моменту на протязі інтервалу часу $\tau \in [\tau_3, \tau_{33}]$ при формуванні кусочно-лінійної діаграми $\mu_{\text{зад}}(\tau)$ за допомогою регулятора швидкості та задатчика інтенсивності.

Третій спосіб заключається в тому, що на протязі всього режиму розгону-синхронізації ЕП працює в режимі регулювання швидкості, відтворюючи розраховану за табл. 5.2 тахограму $v_{\text{зад}}(\tau)$, $\tau \in [\tau_3, \tau_4]$. У розглянутому прикладі комплектного ЕП цей спосіб реалізовується засобами програмування кусочно-пліноміальної тахограми. Однак, слід мати на увазі, що в такий спосіб задана тахограма відпрацьовується двохконтурною САР з передатною функцією виду фільтра Баттерворта другого або третього порядку, з меншою швидкодією і точністю, ніж внутрішній контур регулювання моменту, у зв'язку з чим можуть бути суттєвими відхилення реальної тахограми від заданої.

Розглянуті вище способи не мають переваг в порівнянні зі способом

безпосереднього формування потрібної часової діаграми $\mu(\tau)$ при роботі ЕП в режимі регулювання моменту. Такий спосіб заключається в тому, що в режимі розгону-синхронізації СК електропривода продовжує працювати в режим регулювання моменту. На вхід регулятора моменту подається розрахований по табл.4.2 сигнал завдання моменту і регулятор моменту чітко реалізує потрібну діаграму $\mu(\tau)$ на інтервалі часу $\tau \in [\tau_3, \tau_{33}]$. Визначення моменту закінчення процесу рівноприскореного руху (при будь-якому з розглянутих способів) доцільно здійснювати за умови виявлення ситуації рівності відхилення $\nu_1(\tau) - \nu(\tau)$ від розрахункового приросту швидкості на наступній (останній) ділянці процесу, який дорівнює:

$$\Delta v_3 = \dot{\nu}^* \Delta \tau_3 - \dot{\mu}_{\text{доп}} \cdot (\Delta \tau_3)^2 / 2 = ((\dot{\nu}^*)^2 - (\dot{\mu}_{\text{нат}})^2) / \dot{\mu}_{\text{доп}}. \quad (5.75)$$

При виявленні згаданої події змінюється завдання моменту на значення $\mu_{\text{зад}} = \mu_c^*$ для збереження лінійності діаграми $\mu(\tau)$ при завершенні процесу синхронізації. При досягненні рівності $\nu(\tau) = \nu_1(\tau)$ завдання моменту встановлюється рівним $\mu_{\text{нат}}$, одночасно має здійснитись зчеплення НО з ОВ, після чого блок БСА видає сигнал $x_4 = 1$ і розпочинається четвертий етап робочого циклу ЛП.

Помітимо, що механізм зчеплення (МЗ) дискретної дії має визначений час θ_c спрацювання при виконанні операції зчеплення НО з ОВ, на підставі якого в БКМЗ здійснюється обчислення значення швидкості v_3 руху НО, при досягненні якої МЗ розпочинає цю операцію, закінчуючі її при $\nu = \nu_1$. Значення v_3 швидкості руху НО обчислюється виходячі з того, що має місце рівність

$$v_3 - \nu_1 = ((\dot{\mu}_{\text{нат}} + \dot{\mu}_{\text{доп}} \theta_c)^2 - (\dot{\mu}_{\text{нат}})^2) / \dot{\mu}_{\text{доп}} = 2\dot{\mu}_{\text{нат}}\theta_c + \dot{\mu}_{\text{доп}} (\theta_c)^2. \quad (5.76)$$

Режим обробки (порізу) ОВ, якому відповідає четвертий етап робочого циклу ЛП, відносно функцій електропривода НО заключається в тому, що останній продовжує працювати в режимі регулювання моменту з новим завданням $\mu_{\text{зад}} = \mu_{\text{нат}}$ на протязі всього етапу, закінчення якого фіксується (сформованим в БКМЗ) сигналом $x_9 = 0$ завершення обробки ОВ та наступним сигналом $x_5 = 1$ початку

п'ятого етапу циклу. Задачі ресурсозбереження на четвертому етапі робочого циклу вирішуються за рахунок вибору $\mu_{\text{нат}} > 0$ для запобігання подпору ОВ в результаті зчеплення його з НО, а мінімізація енерговитрат досягається мінімізацією значення $\mu_{\text{нат}}$ експериментальним шляхом у процесі експлуатації ТЛ.

Отже, режим робочого ходу ЛП уявляє собою послідовність двох режимів: розгону – синхронізації та обробки (порізу) ОВ, яким відповідають, відповідно, третій та четвертий етапи робочого циклу ЛП. Автоматизоване керування процесами руху НО летучої пили в режимі робочого ходу здійснюється шляхом формування ресурсозберігаючих законів руху його привода (електропривода).

Режим розгону-синхронізації є енергоємним та відповідальним у робочому циклі ЛП з точки зору одержання потрібної точності мірного порізу ОВ. Він поділяється на послідовні в часі ділянки виведення привода НО із нерухомого стану та розгону до швидкості руху ОВ за умови співпадіння площини піляльного диску з перерізом різання в момент синхронізації швидкостей руху НО і ОВ. Тривалість $\tau_{\text{ЕЗ}}$ режиму розгону – синхронізації визначається значеннями координати $\lambda_{\text{пзо}}$ початку зони обробки ОВ з доданням допустимої величини $\Delta\lambda_{\text{м}}$ погрішності мірного порізу, положенням $\lambda_{\text{пч}}$ чергового перерізу різання в момент запуску привода НО на поріз та поточною швидкістю v_1 руху ОВ.

Динамічна система “електропривод НО” на першій та другій ділянках режиму розгону-синхронізації подається різними математичними моделями, відповідно одномірної та двомірної автономних динамічних систем. Обґрунтовані та подані в математичній постановці задачі ресурсозберігаючого керування електроприводом НО на цих часових ділянках, що адекватно задачам керування процесами руху НО завдяки використанню системи відносних одиниць. Задачі ресурсозберігаючого керування зведені до задач оптимального керування за критерієм мінімізації енерговитрат в енергетичному каналі електропривода з обмеженнями координат руху ЕП за умов точності мірного порізу, технологічного регламенту та збереження надійності системи привода НО.

Базуючись на відомому факті [17] зниження енерговитрат в локальних

процесах зміни електромагнітного моменту μ двигуна при збільшенні значення $\dot{\mu}$ його першої похідної за часом, процеси виведення електропривода НО з нерухомого стану та зміни прискорення на ділянках механічного руху здійснюються з максимальним значенням $\dot{\mu}_{\text{доп}}$ похідної моменту, допустимим за умов збереження експлуатаційної надійності двигуна та механічної системи МПНО (як і в режимі підготовки до запуску електропривода НО на поріз).

Висновки до розділу 5

Вперше отримано рішення задачі ресурсозберігаючого керування процесом механічного руху привода НО в режимі розгону-синхронізації з адаптацією до заданого значення мірної довжини та поточної швидкості руху ОВ. Показано, що ця задача відноситься до класу задач оптимального за енерговитратами керування автономною динамічною системою з визначеним часом руху та закріпленими кінцями фазової траєкторії від початкового стану (початку руху) до кінцевого (синхронізації НО і ВО за швидкістю). Часовий інтервал θ_{E32} механічного руху поділяється на послідовні ділянки нарощування прискорення, рівноприскореного руху НО з оптимальним значенням прискорення та зниження прискорення до значення, що забезпечує зчеплення НО з ОВ в момент їх синхронізації за швидкістю з незначним зусиллям натягу ОВ. Отримано формули для обчислення тривалості режиму розгону-синхронізації, координат стану електропривода НО в точках супряження послідовних інтервалів часу, величини переміщення НО, оптимального значення електромагнітного моменту двигуна на ділянці рівноприскореного руху, максимального значення швидкості руху ОВ за умови реалізованості оптимального закону руху ЕП, положення чергового перерізу різання, при досягненні якого здійснюється запуск привода НО “на поріз”. Розроблено алгоритм визначення цього положення перерізу різання в ТЛ та закону руху електропривода НО в режимі розгону-синхронізації, який виконує БКМПНО на протязі вистою НО в режимі підготовки привода НО до запуску “на поріз”.

Керування електроприводом НО в режимі розгону-синхронізації доцільно здійснювати шляхом формування кусочно-лінійної діаграми $\mu(\tau)$ змінення моменту двигуна, слідкуючі за чергуванням часових інтервалів руху НО по вимірюваних положеннях НО у вузлах їхнього супряження та досягненню швидкості $v=v_1$.

У режимі обробки (порізу) ОВ, якому відповідає четвертий етап робочого циклу ЛП, електропривод НО повинен працювати в режимі регулювання моменту на рівні, не меншому величини статичного моменту для запобігання подпору ОВ в результаті зчеплення його з НО. Мінімізація енерговитрат в режимі обробки ОВ досягається мінімізацією значення моменту двигуна експериментальним шляхом у процесі експлуатації ТЛ.

Механізм зчеплення має визначений час спрацювання, на підставі якого в БКМЗ здійснюється обчислення значення швидкості руху НО (у відносних одиницях вона дорівнює кутової швидкості обертання двигуна), при досягненні якої МЗ розпочинає операцію зчеплення НО з ОВ, закінчуючі її при $v=v_1$. Отримано формулу для обчислення цього значення швидкості руху НО.

Складено опис процедури керування електроприводом НО в режимі робочого ходу, на підставі якого має бути розроблений відповідний фрагмент алгоритму роботи БКМПНО.

6 КЛАСИФІКАЦІЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПУ

У СЧПУ програма роботи верстата задається у вигляді певного комплексу чисел або знаків, записаних на програмоносій (перфстрічці, магнітній стрічці, перфокарті, ОЗУ і т.д.). Системами з програмуванням циклу і режимів роботи оснащуються верстати автомати і напіваавтомати, а також верстати з автоматичною зміною режимів роботи.

За принципом управління рухами: позиційні і контурні. Позиційні системи управління, в свою, чергу поділяються на:

а) системи з установкою координат без певного лінійного переміщення між окремими точками обробки із заданою точністю. При цьому всі виконавчі вузли можуть переміщатися у будь-якому напрямку одночасно, але не взаємопов'язано. Траєкторія руху інструменту при цьому істотного значення не має і визначається в основному конструкцією верстата і його кінематичною схемою. Наприклад, у верстатах свердлильно-розточної групи необхідно спочатку встановити вісь свердла над центром майбутнього отвору, що може здійснюватися одночасним, але неузгодженим рухом свердла по осях X і Y , тобто в площині, перпендикулярній осі свердла, а потім дати робочий рух (тобто подачу) по осі Z , уздовж осі свердла. Переміщення в таких системах задають в абсолютних координатах або приращеннях, а робота систем основана на порівнянні показань абсолютних і неабсолютних датчиків переміщення з координатними даними, заданими програмою.

б) системи з прямокутним послідовним переміщенням виконавчих органів від пункту до пункту в процесі формоутворення деталі. Такі системи можна назвати системами з програмуванням прямих, паралельних напрямку руху виконавчих органів. Переміщення в позиційній системі з необхідною точністю, яка визначається її роздільною здатністю, як правило, задають в абсолютній системі координат, що має фіксований початок відліку, яка може змінюватися за програмою або вручну.

Робітничий рух в позиційних системах ПУ, тобто рух подачі, завжди здійснюється по одній координаті. Системами з програмуванням прямих можуть

вважатися токарні, карусельні та фрезерні верстати.

Системи контурного (безперервного) управління є функціональними. В таких системах виробляється безперервний, одночасний і узгоджений рух виконавчих органів і заготовки, що забезпечує обробку криволінійних контурів і поверхонь на верстатах токарної, фрезерної, стругальної та ін. груп. Програма задається у відносних координатах або в прирощеннях, визначення яких на криволінійних ділянках контуру проводиться автоматично, за допомогою спеціальних пристроїв - інтерполятором.

Зрозуміло, що контурні СПУ в принципі можна застосовувати замість позиційних, тому що вони також забезпечують прихід інструменту в задану точку з високою точністю, хоча координати у них зазвичай задані у відносній системі. Однак через наявність інтерполятора контурні СПУ завжди були набагато складніші та дорожчі за позиційні і в зв'язку з цим їх застосовували тільки в верстатах, призначених для обробки деталей з криволінійними утворюючими натомість копіювальних верстатів, де ефект від застосування СПУ був особливо великий.

Поява інструментальних магазинів в середньому на 30-40 інструментів, необхідність в зв'язку з цим автоматично змінювати частоту обертання шпинделя в широких межах, мати корекцію розмірів інструментів і індикацію положень робочих органів верстата, спрощення програмування за рахунок введення стандартних циклів, перехід на стежачий режим позиціонування для забезпечення високої точності - все це призвело до різкого ускладнення позиційних СПУ. Додавання в таку СПУ інтерполятора не на багато збільшує її складність і вартість, але робить її універсальною.

У зв'язку з цим більшість сучасних СПУ виконують як універсальні. І тільки найпростіші СПУ до деякої міри зберігають цей поділ.

Підрозділ СПУ на позиційні, контурні, універсальні призвів до деяких, змін в нумерації і позначенні верстатів з ЧПУ. Так, в позначенні верстатів з ЧПУ позначають додатковим індексом в кінці: Ф1 - верстати з цифровою індикацією і перед набором координат, Ф2 - з позиційними системами ПУ, Ф3 - з контурними

системами ПУ, Ф4 - з універсальними системами для позиційної і контурної обробки, С1, С2, С3 - кількість керованих координат. Наприклад, токарний верстат з контурною СПУ і управлінням по 2-х координатах позначають 1А616Ф3С2.

Залежно від наявності або відсутності зворотного зв'язку СПУ поділяються на замкнуті і розімкнуті системи управління. Система управління з розімкненим контуром значно простіша і дешевша у виготовленні, але в ній відсутній контроль виконання команди, що знижує показники її точності. В СПУ із замкнутим контуром датчик зворотного зв'язку стежить за становищем виконавчого органу і вносить необхідні корективи в роботу СПУ. Такі системи мають більшу точність, але вони складніші, менш надійні і відповідно дорожчі за СПУ з розімкненим контуром.

За характером інформації, вираженої в програмі розрізняють системи безперервні, дискретні і дискретно-безперервні.

Програма в СПУ з фазовою модуляцією зчитується з магнітної стрічки у вигляді синусоїдальної напруги, що має кут зсуву фази щодо опорної напруги, пропорційний заданому переміщенню, а відтворений рух контролюється датчиками переміщення також в кут зсуву фаз синусоїдальних напруг. Фаза напруги, що характеризує задане і фактичне переміщення, порівнюються в так званому фазовому індикаторі, який видає сигнал стежачому приводу у вигляді випрямленої напруги. Фазова система ПУ в порівнянні з іншими СПУ має мінімальний обсяг електронного устаткування і надійні в роботі датчики положення.

Дискретна (імпульсна) система - це такі СПУ, в яких інформація про переміщення інструменту або виробу виражена відповідним числом імпульсів.

У розімкнутих імпульсних системах в якості виконавчих пристроїв застосовують крокові двигуни, тому їх часто називають кроково імпульсними. В таких системах кожен імпульс перетворюється в поворот валу крокового двигуна на визначений строго фіксований кут. Число імпульсів визначає величину переміщення, а частота їх проходження - швидкість руху робочого органу верстата.

Замкнені імпульсні системи називають лічильно-імпульсними, тому що в них

використана рахункова схема. У лічильно-імпульсних підсумкових системах величина переміщення робочого органу задається у вигляді суми імпульсів. Кожному імпульсу відповідає переміщення, наприклад, на 0,01 мм. Задане число імпульсів фіксується і порівнюється з числом імпульсів, що надходять у міру переміщення робочого органу від датчика зворотного зв'язку. Коли число імпульсів, що надійшли від датчика зворотного зв'язку зрівняється з заданим числом імпульсів, подається команда для припинення руху робочих органів.

Однак імпульсні СПУ мають і недоліки:

1. Можливість втрати інформації (зникнення імпульсів програми), що призводить до зміни розмірів деталі.
2. Завдання розмірів в зприрошеннях призводить до накопичення помилки.
3. Введення в систему зворотного зв'язку з метою підвищеної точності обробки ускладнює конструкцію верстата, знижує їх надійність і довговічність.

Системи ж з фазовою модуляцією в значній мірі вільні від цих недоліків завдяки безперервному характеру керуючої інформації, що має вигляд фазомодульованих синусоїдальних сигналів змінного струму. Для отримання інформації в імпульсних системах застосовують перетворювач унітарного коду в фазовий, що забезпечує простоту і надійність управління.

Кроково імпульсні системи застосовують у верстатах з точністю обробки не вище ± 0.1 мм і шорсткості поверхні 5-6 при максимальному часі обробки деталей в циклі не більше 30-40 хв.

Лічильно-імпульсні системи зі зворотним зв'язком знаходять застосування в верстатах для обробки великогабаритних деталей з циклом обробки до 2-3 годин, точністю до ± 0.1 мм і 5. Верстати 6441Пр, ГФ-628, СФП-1, СФП-2 та ін.

Дискретно-безперервні системи підрозділяються на аналого потенціометричні (АПСП) і імпульсно-фазові.

У АПСП відбувається безперервно відтворення і обробка поточних значень координатних точок траєкторії центру фрези, обчислених щодо початку координат, прийнятих для системи. АПСП є системою абсолютного відліку з вбудованим лінійним інтерполятором електромеханічного типу. В системі передбачений

датчик зворотного зв'язку потенціометричного типу. Програмоносієм зазвичай є 80-колонкові перфокарти. В таких системах порівнювальний пристрій порівнює число імпульсів, заданих програмою з числом імпульсів системи зворотного зв'язку (з числом фактично відпрацьованих імпульсів) і видає аналоговий сигнал, пропорційний відхиленню швидкості і величини переміщення робочих органів верстата від заданих програмою. Цей сигнал утворюється в результаті відхилення від нульового положення реверсивного лічильника, в якому виконується одночасне додавання імпульсів програми і віднімання імпульсів зворотного зв'язку.

В імпульсно-фазових системах аналоговий сигнал управління утворюється в результаті зсуву по фазі послідовності імпульсів зворотного зв'язку по відношенню до послідовності імпульсів програми.

АПСП забезпечує виконання таких функцій: роботу верстата в позиційному і контурному режимі, одночасну подовжню і поперечну подачу при включеній вертикальній подачі, лінійну інтерполяцію контуру деталі, зміна положення початку координат в системі відтворення.

Таким чином АПСП характеризується безперервним управлінням приводами подовжньої і поперечної подачі і позиційним керуванням приводом вертикальної подачі верстата.

Системи ПУ, в яких крім основного потоку інформації на переміщення будь-якого виконавчого вузла за певними напрямками з корекцією або без корекції цього переміщення, є ряд додаткових впливів в залежності від факторів випадкового характеру (стану ріжучої кромки інструменту, фізичні властивості оброблюваного матеріалу, теплові коливання і інші силові дії на систему СПД), називаються самоналаштуванням або адаптивними системами ПУ. Такі системи можна віднести до систем з програмуванням циклу і режиму обробки.

6.1 Регульований привід верстатів з ЧПУ

Регульований привід застосовують в механізмах головного руху верстатів з ЧПУ, а крім того він є головним структурним компонентом слідкуючого приводу подачі верстатів з ЧПУ. Регульований привід для верстатів з ЧПУ виконують за

схемою "тиристорний перетворювач - двигун" (ТП - Д) і регулюють напругою в ланцюзі якоря при незмінному збудженні, що забезпечує постійний максимально - допустимий момент на всьому діапазоні регулювання рис. 6.1

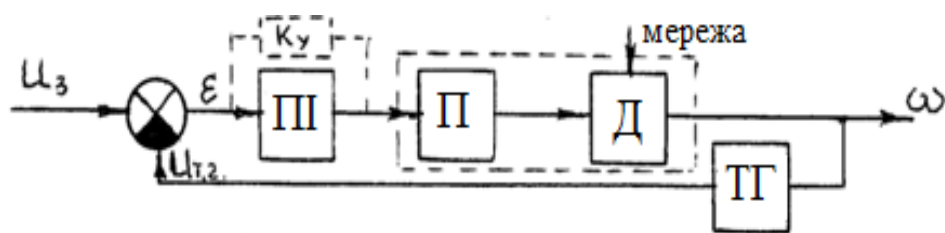


Рисунок 6.1 – Структурна схема регульованого приводу

Особливістю цих приводів є широкий діапазон регулювання частоти обертання від $D = 1: 1000$ до $D = 1: 50000$, що дозволяє повністю забезпечити не тільки робочі рухи, пов'язані з технологічним процесом обробки, але також і швидкі установочні переміщення без застосування проміжних механічних передач. Мінімальна частота обертання приводу повинна становити 1 об / хв, а в деяких випадках 0,1 об / хв.

При малих швидкостях привід повинен забезпечити рівномірне переміщення. Сучасний регульований привід повинен володіти високою швидкодією при переході з однієї установочної частоти на іншу.

Силова частина регульованого приводу повинна складатися з двигуна Д і силового перетворювача П, який перетворює змінну напругу на якорі двигуна.

Для збільшення діапазону регулювання привід охоплюється жорстким зворотним зв'язком по частоті обертання. Для цього на валу двигуна Д встановлюється тахогенератор ТГ, напруга якого пропорційна кутовий швидкості. Ця напруга порівнюється з задаючою. Різниця напруг задаючої і тахогенератора посилюється підсилювачем У і подається на силовий перетворювач П. Точність роботи приводу і діапазон регулювання збільшуються в міру зростання загального коефіцієнта передачі К. Однак надмірне збільшення К може призвести до втрати стійкості системи. Щоб уникнути цього і для забезпечення необхідної швидкодії в приводі застосовуються спеціальні коригуючі пристрої.

Точність роботи приводу в більшій мірі залежить від точності і стабільності характеристик ланцюга зворотного зв'язку по частоті обертання і в першу чергу від

стабільності коефіцієнта передачі тахогенератора. До решти елементів приводу, охоплених зворотним зв'язком, таких жорстких вимог по стабільності характеристик не пред'являється.

6.2 Приводи головного руху

В приводах головного руху верстатів з ЧПУ переважно застосовують регульовані приводи з двигуном постійного струму і тиристорним перетворювачем. Необхідна потужність приводу головного руху металорізального верстата змінюється в функції частоти обертання шпинделя. При цьому повністю номінальна потужність не використовується при високих і низьких частотах обертання. До 0,5 діапазону регулювання потужність зростає приблизно пропорційно частоті обертання і регулювання потрібно робити з постійним моментом M . Потім потужність досягає максимуму і потім незначно знижується при найбільшій частоті обертання. На цій ділянці привід можна регулювати з постійною максимально допустимою потужністю. Таким чином, привід головного руху верстата потребує двозонного регулювання, яке забезпечують різними способами рис. 6.2.

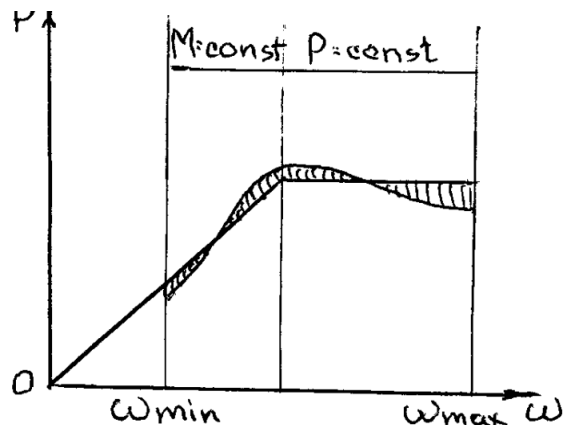


Рисунок 6.2 – Залежність потужності від частоти обертання

Регулювання з постійною максимально допустимою потужністю здійснюється шляхом зміни струму збудження при постійній напрузі на якорі. При цьому частота обертання змінюється вгору від номінальної в невеликому діапазоні, який визначається комутаційними можливостями двигунів постійного струму. Для двигунів постійного струму серії 2П цей діапазон $D_p = \text{const} = 1:4$. У цьому випадку,

коли за технологічними вимогами діапазон D_r необхідно збільшити, вводять додаткову коробку швидкостей з автоматичним перемиканням ступенів за допомогою електромагнітних муфт.

Для регулювання з постійним максимально допустимим моментом необхідно змінювати напругу на якорі при незмінному збудженні. Частота обертання при цьому регулюється вниз від номіналу і діапазон регулювання може бути досить великим, зазвичай за технологічними вимогами необхідно мати $D_m = \text{const} = 1:20$. Однак в багатоопераційних верстатах цей діапазон може бути значно збільшений. Це пов'язано з необхідністю точного позиціонування шпинделя при зміні інструменту.

У зв'язку з цим привід головного руху повинен мати два тиристорних перетворювачі: один для живлення ланцюга якоря, інший - для ланцюга збудження. Відповідно до цього утворюються два контури управління.

Регулювання частоти обертання зміною напруги на якорі і зміною потоку збудження можна робити незалежно. Однак, для уникнення пуску двигуна при зниженому збудженні в сучасних приводах головного руху застосовують двозонне залежне керування. При залежному управлінні магнітний потік залишається номінальним до тих пір, поки частота обертання двигуна менше за основну. Підвищення частоти обертання двигуна забезпечується шляхом ослаблення магнітного потоку. Схема управління має один задатчик швидкості загальний на обидві зони регулювання. Система управління напругою якоря (ТП1 - тиристорний перетворювач цього ланцюга) має замкнутий контур по швидкості двигуна з регулятором швидкості (РС) і підлеглий йому контур струму з регулятором струму (РТ) рис. 6.3.

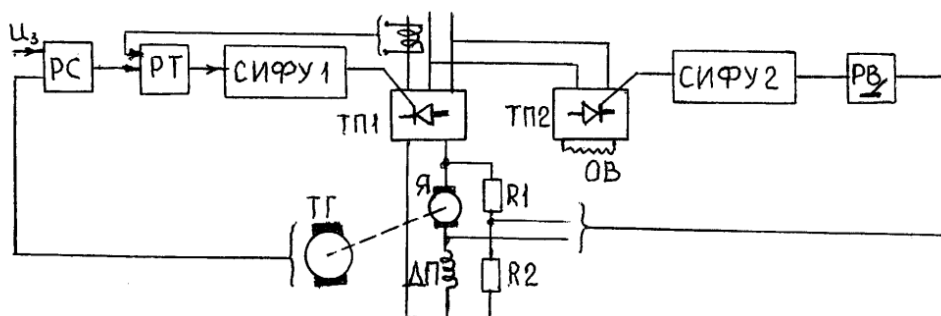


Рисунок 6.3 - Система керування напругою якоря

У деяких випадках такий контур може бути замінений системою струмообмежень. В цілому ця система збігається з системою регульованого приводу і оптимізується тими ж методами. Деяка відмінність полягає в тому, що привід головного руху має велику [16] потужність і більший момент інерції. Внаслідок цього вхідний ланцюг приводу зазвичай має задатчик інтенсивності, що обмежує швидкість наростання керуючого сигналу; це необхідно, щоб уникнути різких поштовхів струму при великих значеннях задання, оскільки повільно наростаюча ЕРС двигуна не може забезпечити ефективного струмообмеження рис. 6.4.

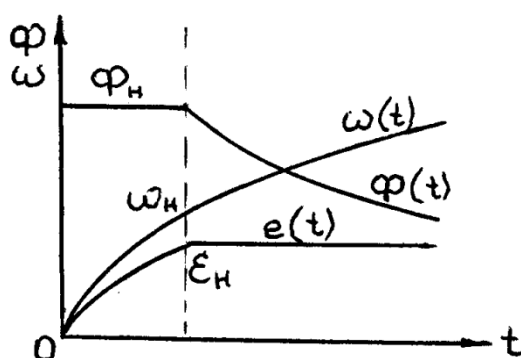


Рисунок 6.4 - Система струмообмежень

Система управління струмом збудження пов'язана з системою управління напругою якоря через ЕРС двигуна. Сигнал пропорційний ЕРС знімається з діагоналі тахометричного моста утвореного якорем двигуна, обмоткою додаткових полюсів (ДП) і резисторами R1 і R2. Цей сигнал подається на регулятор збудження (РВ), що має зони насичення, і далі через СІФУ-2 керує роботою тиристорного перетворювача ТП-2, який живить обмотку збудження (ОВ) двигуна. Оскільки потужність збудження не велика застосовують спрощений однофазний перетворювач.

Крім сигналу, пропорційного ЕРС двигуна, на вхід регулятора (РВ) подається опорна напруга, відповідна до номінальної частоти обертання двигуна. До тих пір поки частота обертання двигуна менше номінальної, регулятор РВ знаходиться в стані насичення, і по обмотці насичення протікає номінальний струм. При великих частотах обертання регулятор вступає в роботу і починає зменшувати потік збудження двигуна. Спільна дія регуляторів швидкості та збудження призводить

до того, що в другій зоні регулювання ЕРС залишається весь час незмінною. Тому систему регулювання збудження вважають контуром регулювання ЕРС, залежним від контуру швидкості.

У першій зоні регулювання за рахунок зміни напруги на якорі двигуна ЕРС зростає при незмінному потоці.

У другій зоні регулюється струм в області збудження. При цьому стабілізується ЕРС, а магнітний потік зменшується.

6.3 Моделі та методи вирішення завдань

В процесі обробки в зоні різання виникає підвищена температура, що дає істотний вплив на стійкість інструменту:

$$T = \left(\frac{C_T}{\theta} \right)^{\alpha_T} \quad (6.1)$$

де α_T , C_T - показник ступеня і коефіцієнт, що залежать від матеріалів інструменту, заготовки, а також виду обробки; θ – температура різання, °С.

Затуплення інструменту, надходження більш інтенсивного охолодження, зміна твердості деталі, зміна швидкості різання негайно впливають на температуру різання. Якщо при обробці температура різання навіть трохи перевищить максимально допустиме значення для даного інструменту, то відбувається підвищений знос останнього, що завершується, як кажуть, «тепловою посадкою інструменту». Найбільш сильно на температуру різання впливає швидкість, дещо менше - величина подачі і ще менше - глибина різання. Зв'язок між температурою різання і перерахованими параметрами може бути описано емпіричною степенною залежністю.

За температурою (термо-ЕРС) різання можна судити про швидкість зносу інструменту. Для різних поєднань інструменту і матеріалу деталі існують температури, при яких швидкість зносу інструменту виявляється оптимальною з точки зору собівартості обробки, або продуктивності обробки. Для вимірювання цієї температури і управління процесом обробки найбільшого поширення знайшов метод природної термопари, утвореної інструментом і

деталлю.

Розвиваєма природною термопарою термо-ЕРС дозволяє побудувати АСУ ТП, що підтримує заданий температурний режим з точністю 2 ... 3%. Для успішної побудови системи стабілізації температури різання (СТР) необхідно, щоб конструкція станка не шунтувала цю термо-ЕРС, різець був би ізольований від маси верстата, а твердосплавний різець охолоджувався мастильно-охолоджувальною рідиною (МОР) для того, щоб «холодна» ділянка пластини мала температуру навколишнього середовища і були зведені до мінімуму температурні похибки вимірювань.

Вимірювання температури в зоні контакту в процесі різання

Вимірювання здійснюється за допомогою методу природної термопари. Термоелементом в даному випадку є матеріал різця і деталі. А гарячим спаєм є зона контакту різця із заготовкою.

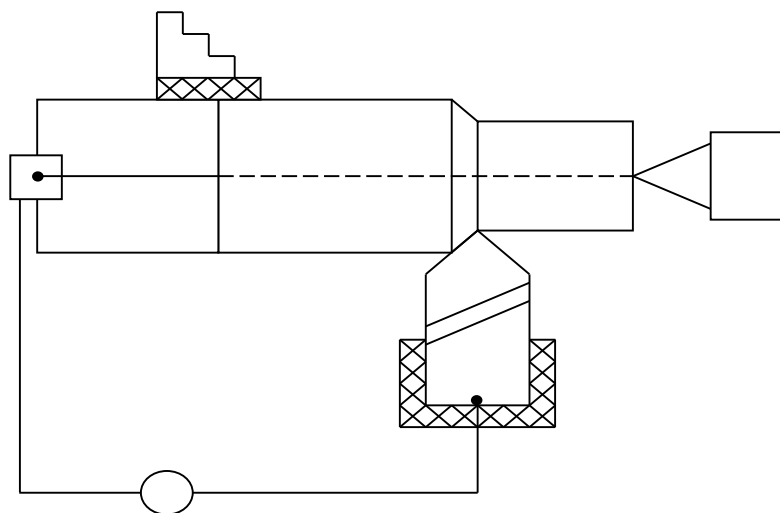


Рисунок 6.5 – Зона контакту різця з деталлю

Переваги методу: конструктивно простий, може застосовуватися для різних видів ріжучого інструменту та обладнання, зручний для САУ процесом різання.

Недоліки: необхідність градування для кожного поєднання різця і деталі, метод не дає розподіл температур на передній і задній поверхні, а тільки середньо-інтегральну температуру.

Таблиця 6.1- Вихідні дані

Режим різання				Умова різання	Допуск на температуру різання – T_{θ}
V , м/мм	S_z , мм/об	$t_{\dot{r}} = t_{\dot{r}_{\max}}$, мм	$t_{\dot{r}} = t_{\dot{r}_{\min}}$, мм		
45	0,11	1,7	1,3	$S_z = S_{z\zeta}$ $S_{z\zeta} = const$	$\pm 5^{\circ}C$

Двигун 2ПН180ЛУХЛ4:

- потужність, кВт - 10
- напруга, В - 380
- частота обертання, об / хв номінальна - 1000
- максимальна - 3000
- ККД,% - 82,5
- опір обмотки при 15 0С, Ом якоря - 0,168
- додаткових полюсів - 0,11
- збудження - 72,5 / 20,1
- індуктивність ланцюга якоря, мГн - 5,6

ПЭ: ланка 1 $T_1 = 0,142$ с

ланка 2 $T_2 = 0,341$ с

ДУ: $T_{дв} = 0,0$ с

ПУ: $T_{пв} = 0,0$ с

Оптимальна температура в зоні різання забезпечує мінімум інтенсивності зношування ріжучого інструменту. При точінні жароміцного сплаву ХН77ТЮР різцем ВК6М з параметрами заточки $r_A = 1$ мм; $\gamma = 0$; $\alpha = \alpha_1 = 10^{\circ}$; $\varphi = \varphi_1 = 45^{\circ}$ оптимальна температура θ_0 дорівнює $720^{\circ}C$. Температура в зоні різання для даної пари «інструмент-деталь» визначається виразом:

$$\theta = 267 \cdot V^{0,384} \cdot S^{0,132} \cdot t_n^{0,098}, \quad {}^{\circ}C \quad (6.2)$$

Коливання напруги в мережі може викликати відхилення розрахункових значень швидкості обертання шпинделя $n_{A\emptyset}$ і швидкості обертання двигуна

механізму подачі n_{AI} на $(+10\% \div -15\%)$ заданого розрахункового значення, в результаті чого температура в зоні різання може відхилитися від розрахункової. Крім того, зміна величини припуску t_I в межах $t_{I \max} \div t_{I \min}$ так само може викликати відхилення температури в зоні різання. Для підтримки температури в зоні різання на рівні θ_0 з заданою точністю змінюємо V , регулюючи швидкість обертання двигуна шпинделя $n_{A\emptyset}$, при незмінному завданні S_c , однак при цьому величина S коливається через напругу мережі на $(+10\% \div -15\%) S_c$ заданого.

6.3.1 Аналіз процесу різання як об'єкта управління

Аналіз процесу різання як об'єкта управління здійснюється в кілька етапів. Визначення складу вихідних координат ОУ. В якості вихідної координати можна прийняти температуру в зоні різання, параметри стружки, силу різання, знос інструменту, рівень шорсткості обробленої поверхні і т.д.

Вибір вихідної координати, кількісно визначає якість ходу ПР. В якості вихідної координати приймемо температуру в зоні різання, тому що при оптимальній температурі різання відбувається мінімальний знос інструменту, що забезпечує високу якість ПР.

Виконання математичного опису ОУ. Рівняння $\theta = 267 \cdot V^{0,384} \cdot S^{0,132} \cdot t_{II}^{0,098}$, $^{\circ}C$, визначає зв'язок між вихідній координатою θ і впливами V , ΔS , t_{II} .

Визначення обмежень, за умови яких [19] повинен проводитися ПР. Таким обмеженням є швидкість, яка може регулюватися тільки вниз від номінальної, тобто зменшуємо вхідну координату ПР.

Визначення складу керуючих координат. На ОУ впливають швидкість різання V , глибина різання t_I , подача S .

Вибір керуючої координати, яка надає найефективнішу дія на вихідну координату. З рівняння випливає, що найефективніше на температуру впливає швидкість різання $0,384 > 0,132 > 0,098$, тому V - управляюча координата.

Визначення складу збурень. Зміна величини припуску t_i в межах $t_{i \max} \div t_{i \min}$ викликає відхилення температури в зоні різання. Величина S так само є збуренням, тому що вона коливається через напругу мережі на $(+10\% \div -15\%) S_3$ заданого.

Визначення діапазону зміни збурень.

$t_{i \max}$ змінюється в межах від 1,3 до 1,7 мм, тобто $\Delta t_i = 1,5$ мм.

S коливається на $(+10\% \div -15\%) S_3$ заданого, тобто змінюється в межах від 0,0825 до 0,1375 мм / об, тому $\Delta S = 0,25 \cdot S_3 = 0,0275$ мм/об.

Визначення відхилення вихідної координати при спільній дії збурень.

Температура в зоні різання змінюється в наступних межах :

$$\theta_{\max} = 267 \cdot 45^{0,384} \cdot 0,0825^{0,132} \cdot 1,3^{0,098} = 850,1258776 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{\min} = 267 \cdot 45^{0,384} \cdot 0,1375^{0,132} \cdot 1,7^{0,098} = 933,6515383 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta = 83,52566 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Таким чином процес різання як ОУ можна представити у вигляді наступного «чорного ящика»

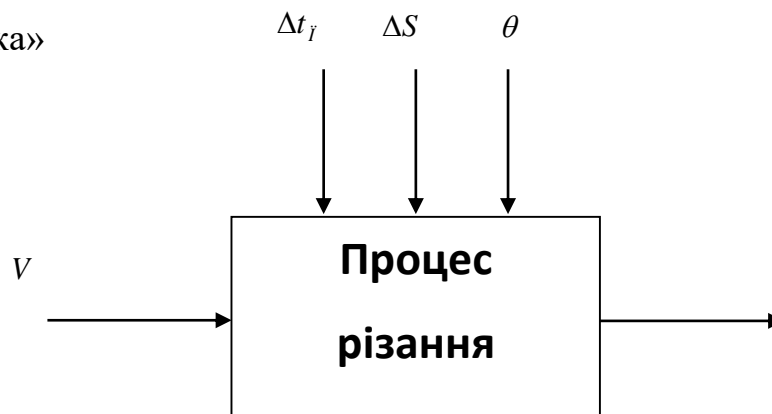


Рисунок 6.6 - Модель процесу різання

SAR регулює вихідну координату процесу різання із заданою точністю. Процес різання на схемі позначений функціональним блоком ПР, керуюча координата ПР позначена - X , збурюючий вплив - f . ПУ - передавальний пристрій, це механічна система, що перетворює механічну енергію вала двигуна в механічну енергію керуючого впливу процесу різання. ПУ є лінійною ланкою. З точки зору динаміки є аперіодичною ланкою першого порядку з постійною часу

T_{i0} . Двигун Д перетворює електричну енергію в механічну енергію обертання валу. Двигун є машиною постійного струму з незалежним збудженням. Збудження машини здійснюється обмоткою ОВД. Потік порушення в процесі регулювання не змінюється і залишається рівним його номінальному значенню. Регулювання швидкості двигуна здійснюється зміною напруги якоря U .

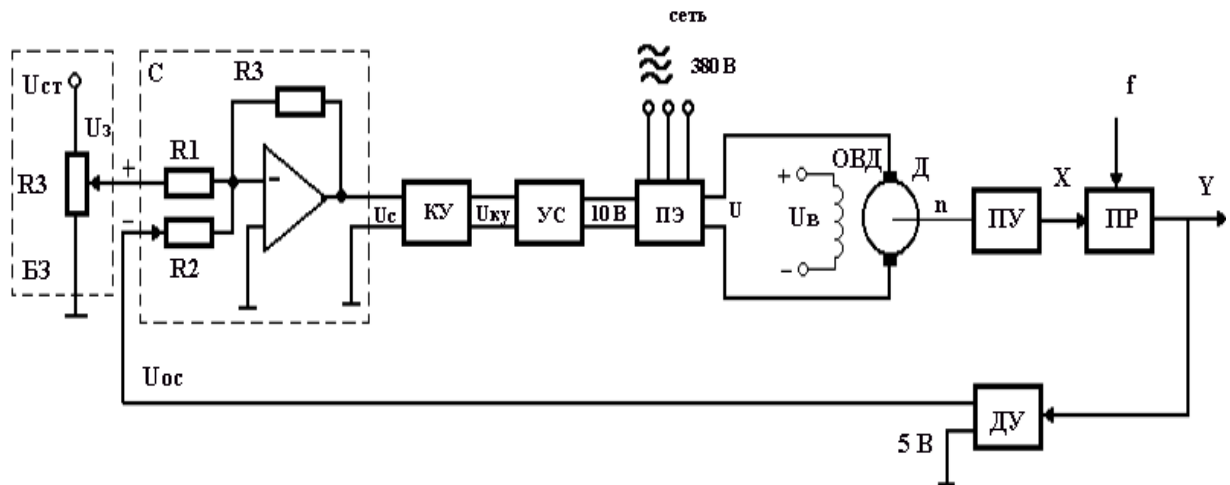


Рисунок 6.7 - Функціональна схема системи автоматичного регулювання (АСР) вихідної координати

ПЕ - перетворювач електричної енергії, перетворює електричну енергію промислової мережі трифазного змінного струму в електричну енергію постійного струму і регулює величину вихідної напруги U , яка живить ланцюг якоря двигуна Д. Перетворювач електричної енергії є лінійною ланкою. Вихідна напруга U дорівнює номінальному значенню при напрузі керування 10 В. З точки зору динаміки процесу ПЕ являє собою апериодичну ланку другого порядку з постійними часу T_1 і T_2 .

ПІ - підсилювач, є безінерційним ланкою, підсилює напругу, що надходить від коригуючого пристрою.

КП - коригуючий пристрій, коригує динамічні властивості АСР. Статичний коефіцієнт передачі КП дорівнює 1.

БЗ - блок завдання. Блоком завдання задається напруга U_c , його величина визначає величину завдання вихідній координати АСР. БЗ містить в собі джерело стабілізованої напруги $U_{\tilde{0}}$ і резистор R_3 . $U_{\tilde{0}} = 5$ В.

ДЗЗ - вимірювальна система вихідній координати процесу різання. З точки зору динаміки являє собою апериодическое ланка першого порядку з постійною часу $T_{\lambda 0}$. При номінальному значенні вихідної координати видає напругу $U_{i\bar{n}} = 5$.

С - сумматор на базе операционного усилителя и на резисторах R1, R2, R3. Является безынерционным звеном с коэффициентом передачи равным 1.

Додавання відбувається за алгоритмом $U_{\bar{n}} = U_{\zeta} - U_{i\bar{n}}$

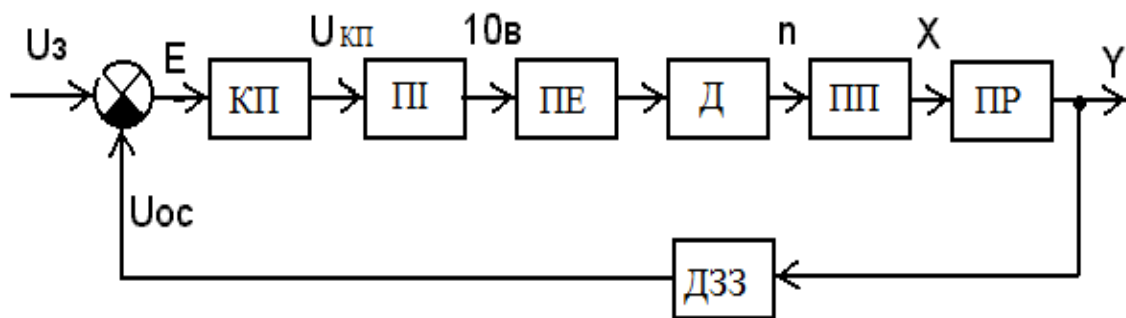


Рисунок 6.8 - Функціональна схема САР

За алгоритмом функціонування дана САР є стежачою [20-22]. У ній вихідна величина - температура в області різання - регулюється із заданою точністю при зміні напруги на вході, тобто система управляє вихідною координатою. На вхід системи подається напруга U_{ζ} , відповідне заданої температури в області різання. Ця напруга порівнюється з напругою $U_{i\bar{n}}$, що надходить з датчика зворотного зв'язку - наприклад, природної термопарі. Якщо існує ненульова різниця цих напруг - помилка регулювання ε , то вона з відповідним знаком надходить на КП, УС, ПЕ. ПЕ таким чином змінює напругу на своєму виході, щоб звести помилку регулювання шляхом зміни швидкості обертання двигуна до мінімуму або нуля. Якщо на систему діють збурення, то система зі зворотним зв'язком буде компенсувати ці збурення, підтримуючи температуру в області різання постійною. Знайдемо передаточні функції для елементів схеми.

6.3.2 Перетворювач енергії

З точки зору динаміки процесу ПЕ являє собою аперіодичну ланку другого порядку з постійними часу $T_1 = 0,142$ та $T_2 = 0,341$. Його передаточна функція має вигляд:

$$W_{ПЭ}(p) = \frac{K_{ПЭ}}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}, \quad (6.3)$$

де $K_{ПЭ} = \frac{U_d}{U_{ПЭ}} = \frac{220}{10} = 22 \Rightarrow W_{ПЭ}(p) = \frac{22}{(0,142p + 1) \cdot (0,341p + 1)}$

6.3.3 Передавальний пристрій

ПП є лінійною ланкою. З точки зору динаміки є аперіодичною ланкою першого порядку з T_{i0} постійною часу. Тоді маємо:

$$W_{ПУ}(p) = \frac{K_{ПУ}}{T_{ПУ} p + 1}, \quad (6.4)$$

де $K_{ПУ} = \frac{V}{n} = \frac{45}{1000} = 0,045$ та $T_{ПУ} = 0 \Rightarrow W_{ПУ}(p) = K_{ПУ} = 0,045$

6.3.4 Датчик зворотного зв'язку

Є аперіодичною ланкою першого порядку з постійною часу $T_{д0}$, тоді:

$$W_{ДУ}(p) = \frac{K_{ДУ}}{T_{ДУ} p + 1} \quad (6.5)$$

де $K_{ДУ} = \frac{U_{ос}}{\theta_{опт}} = \frac{5}{720} = 0,00694$ та $T_{ДУ} = 0 \Rightarrow W_{ДУ}(p) = K_{ДУ} = 0,00694$

6.3.5 Електричний двигун

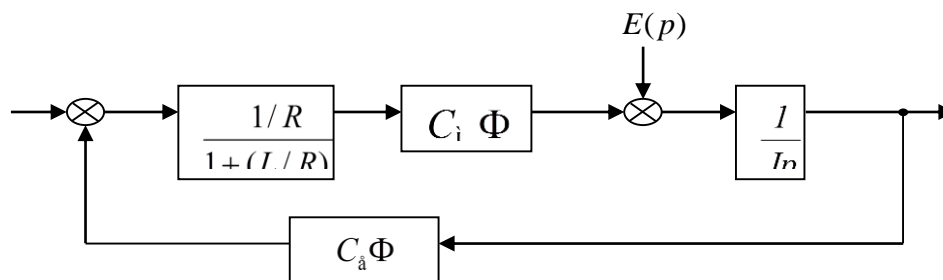


Рисунок 6.9 – Модель електричного двигуна в середовищі MathLab

Електричний двигун складається з двох частин: електричної та механічної.

$$U = E + I \cdot R + L \frac{dI}{dt} \quad (6.6)$$

$$I_H = \frac{P}{\eta \cdot U_H} = \frac{10 \cdot 10^3}{0,825 \cdot 220} = 55,0964 \text{ А}$$

$$J_{\text{пп}} = J_H \cdot 3 = 0,23 \cdot 3 = 0,69 \text{ кг*м}^2$$

$$\omega_H = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1000}{60} = 104,719 \text{ рад/с}$$

$$C_e \Phi = \frac{U_H - I_H \cdot R}{\omega_H} = \frac{220 - 55,0964 \cdot 0,168}{104,719} = 2,012469 \text{ В*с/рад}$$

$$P = M \cdot \omega_H \Rightarrow M_H = \frac{P}{\omega_H} = \frac{10 \cdot 10^3}{104,719} = 95,4936 \text{ Н*м}$$

$$C_M \Phi = \frac{M_H}{I_H} = \frac{95,4936}{55,0964} = 1,71332 \text{ Н*м/А}$$

$$W_d(p) = \frac{W_{\Pi}(p)}{1 + W_{\Pi}(p) \cdot W_{\text{oc}}(p)} = \frac{\frac{1/R}{1 + (L/R)p} \cdot C_M \Phi \cdot \frac{1}{Jp}}{1 + \left(\frac{1/R}{1 + (L/R)p} \cdot C_M \Phi \cdot \frac{1}{Jp} \right) \cdot C_e \Phi} =$$

$$= \frac{5,952 \cdot 1,71332 \cdot 1,4492}{(0,0333 p + 1)p} = \frac{0,496902}{1 + \frac{5,952 \cdot 1,71332 \cdot 1,4492}{(0,0333 p + 1)p} \cdot 2,012469} = \frac{0,496902}{0,0011206 p^2 + 0,033619 p + 1}$$

6.3.6 Процес різання

Процес різання описується рівнянням:

$$\theta = 267 \cdot V^{0,384} \cdot S^{0,132} \cdot t_i^{0,098}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (6.7)$$

$$t_{\Pi} = \frac{t_{\text{max}} + t_{\text{min}}}{2} = \frac{1,7 + 1,3}{2} = 1,5 \text{ мм}$$

$$\theta = 267 \cdot V^{0,384} \cdot 0,11^{0,132} \cdot 1,5^{0,098} = 207,602 \cdot V^{0,384} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Лінеаризуємо цю залежність. Складемо рівняння дотичної до рівняння (6.7) в точці $V = 45$, яке має вигляд:

$$\theta(V) = f(V) + f'(V) \cdot (V - 45), \quad (6.8)$$

$$\text{де } f(V) = 207,602 \cdot 45^{0,384} = 895,499$$

$$\frac{d\theta}{dV} = f'(V) = 207,602 \cdot 0,384 \cdot V^{0,384-1} = 79,719168 \cdot V^{-0,616} = 7,64$$

$$\Rightarrow \theta = 7,64 \cdot V + 551,627 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Лінеаризувавши, отримали рівняння дотичної, $\theta = 7,64 \cdot V + 551,627 \text{ } ^\circ\text{C}$,
де $K = 7,64$ - тангенс кута нахилу дотичної в робочій точці,
 $\theta_0 = 551,627$ - відхилення дотичній від початку координат.

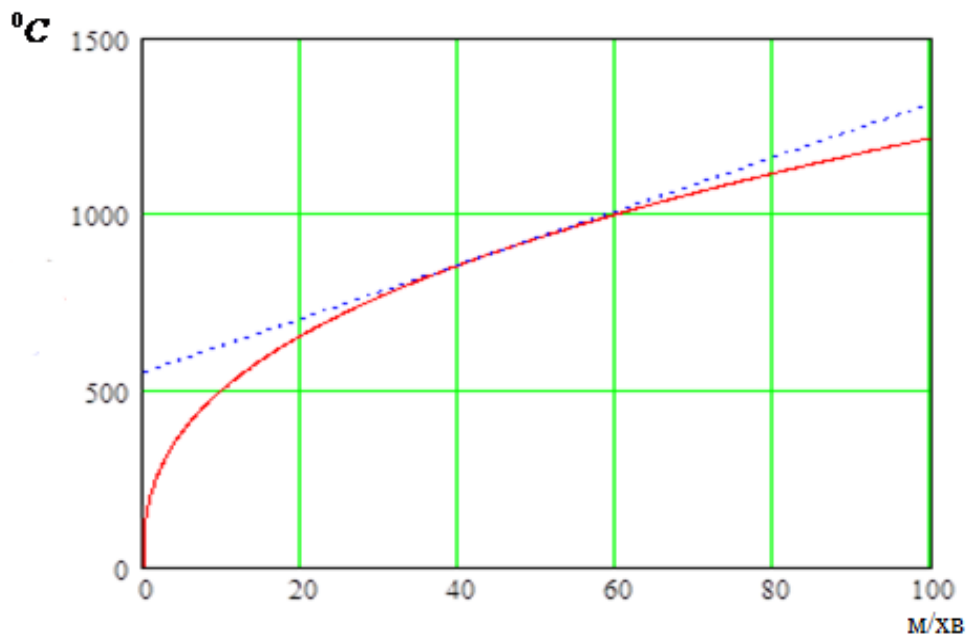


Рисунок 6.10 - Рівняння дотичної

$$W_{\text{ПР}}(p) = K_{\text{ПР}} = \frac{\Delta\theta}{\Delta V} = 7,64 \quad (6.9)$$

6.3.7 Підсилювач

Є безінерційною ланкою, його передавальну функцію знаходимо з умови:
де знаходимо з умови:

$$K_{\text{РС}} = K_{\text{КВ}} \cdot K_{\text{УС}} \cdot K_{\text{ПЭ}} \cdot K_{\text{Д}} \cdot K_{\text{ПВ}} \cdot K_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{ДУ}} \quad (6.10)$$

де K_{PC} знаходимо з умови: $\Delta z = \frac{\Delta p}{1 + K_{PC}}$,

де $\Delta z = 5$ и $\Delta p = \Delta \theta = 83,52566$

$$\Rightarrow K_{PC} = \frac{\Delta p - \Delta z}{\Delta z} = \frac{83,52566 - 5}{5} = 15,705$$

$$\Rightarrow K_{UC} = \frac{K_{PC}}{K_{КУ} \cdot K_{ПЭ} \cdot K_{Д} \cdot K_{ПУ} \cdot K_{ПР} \cdot K_{ДУ}} = \frac{15,705}{1 \cdot 22 \cdot 0,4969 \cdot 0,045 \cdot 7,64 \cdot 0,00694} = 602,117$$

6.3.8 Корируючий пристрій

Для того, щоб забезпечити необхідні [16] властивості як КП виберемо ПІ-регулятор, передавальна функція якого в загальному вигляді має вигляд:

$$W(p) = k \cdot \frac{Tp + 1}{p} \quad (6.11)$$

Таким чином, передавальна функція КУ має вигляд:

$$W(p) = 0,15 \cdot \frac{0,3p + 1}{p} \quad (6.12)$$

Таким чином структурна схема процесу різання має такий вигляд:

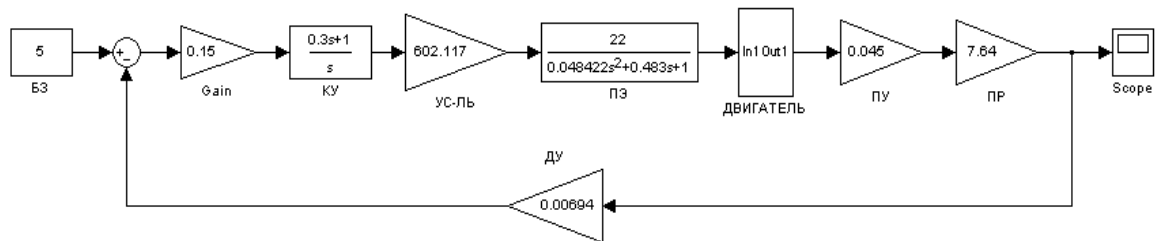


Рисунок 6.11 - Структурна схема процесу різання, де subsystem «ДВИГУН»

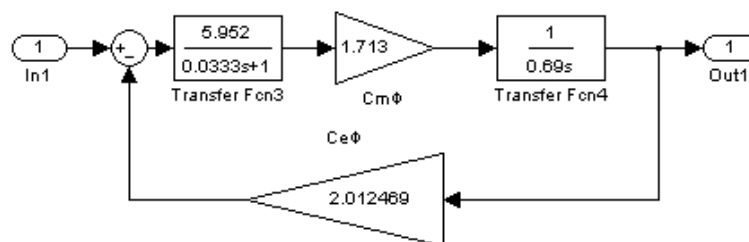


Рисунок 6.12 – Елемент середовища matlab (subsystem) в ролі двигуна
Перехідний процес даної системи представляє такий вигляд:

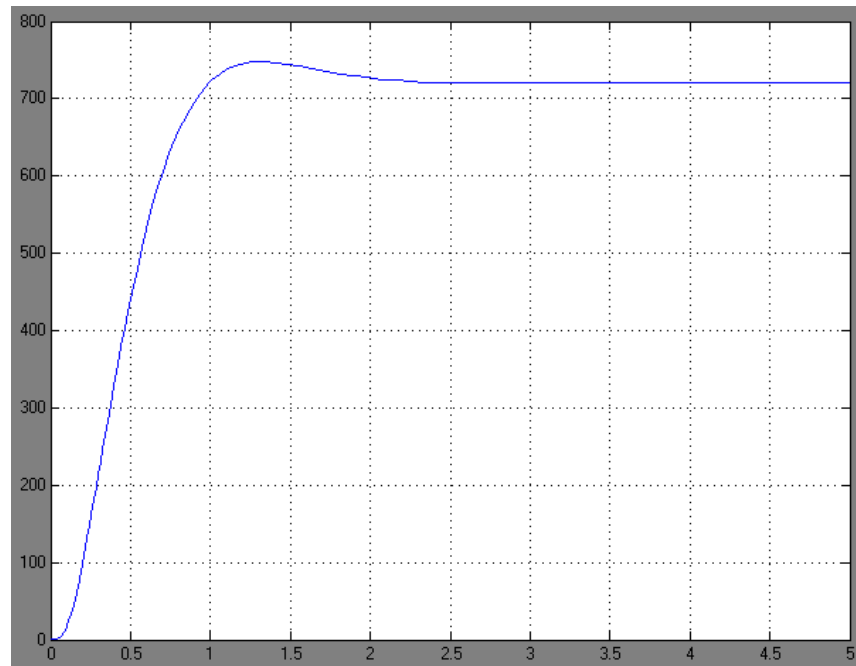


Рисунок 6.13 - Перехідний процес

Перерегулювання:

$$\delta = \left(\frac{y_{\max} - y_{\text{обд}}}{y_{\text{обд}}} \right) \cdot 100\% \quad \delta = \left(\frac{748 - 720}{720} \right) \cdot 100\% \approx 3,8\%$$

6.3.9 Аналіз стійкості скорегованої системи

ЛАХ має вигляд:

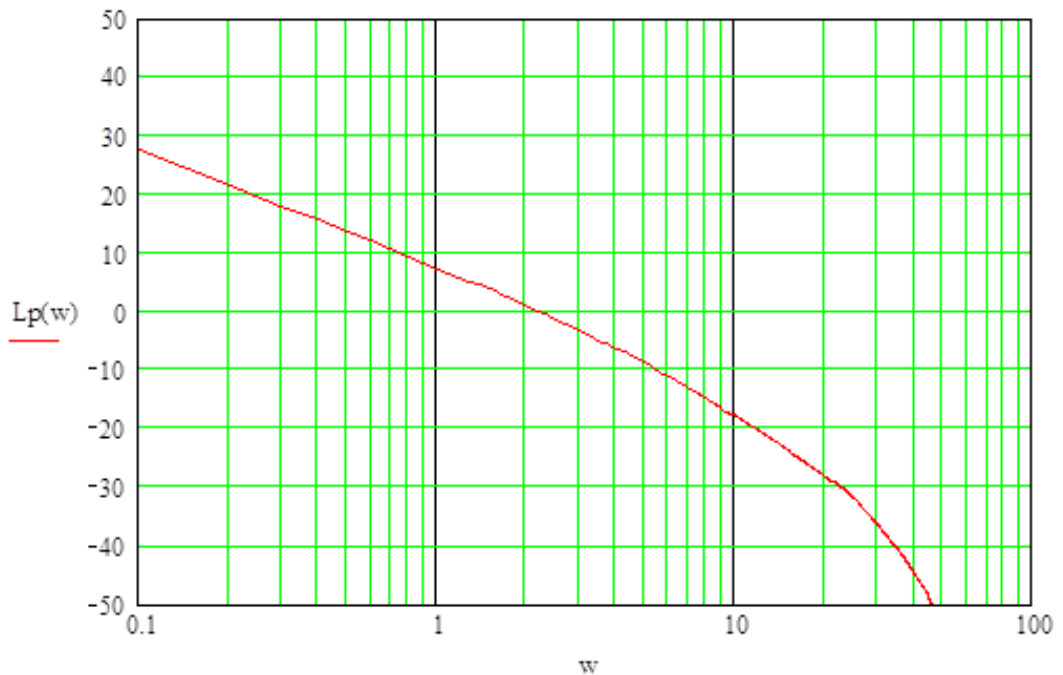


Рисунок 6.14 - ЛАХ

ЛФХ має вигляд:

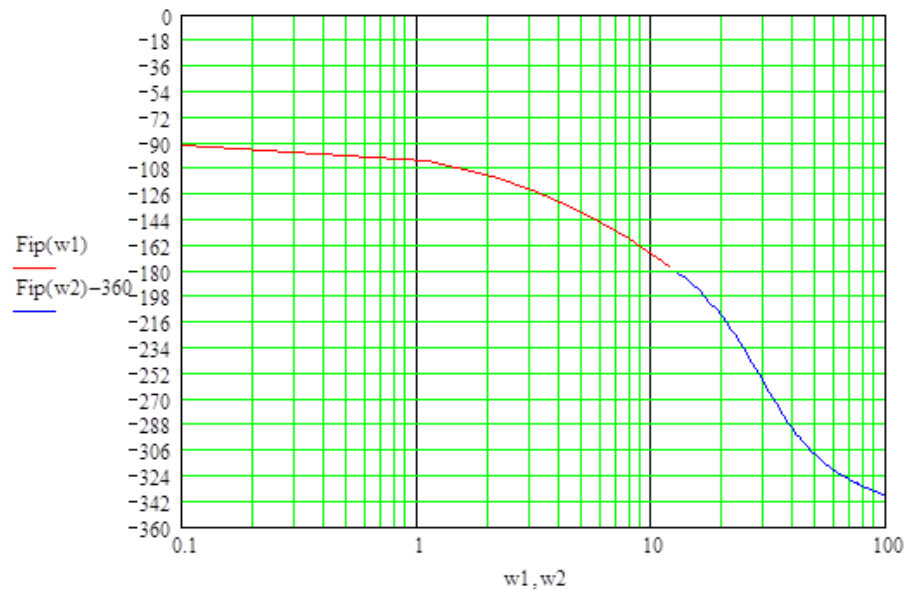


Рисунок 6.15 - ЛФХ

З графіків видно, що САР є стійкою, тому що ЛФХ перетинає -180° пізніше, ніж Лах перетинає 0 (логарифмічний критерій стійкості). Система має запаси стійкості по фазі $\Delta\varphi = 70^{\circ}$, по модулю $\Delta L = 22$ дБ.

6.3.10 Побудова адаптивної АСУ

Процеси механічної обробки, як і більшість інших технологічних процесів, підпадають під вплив значних внутрішніх і зовнішніх сигнальних і параметричних збурень. Одним з ефективних підходів до побудови систем управління такими процесами є реалізація їх в класі адаптивних систем.

При точінні більшості конструкційних сталей і сплавів показники ступеня мають значення: $m = 0,25 \div 0,35$; $\delta = 0,1 \div 0,15$; $q = 0,07 \div 0,1$. При практично застосовуваних швидкостях різання для цих матеріалів значення термоЕРС E лежить в межах 10-30 мВ, тобто $E_{0 \max} / E_{0 \min} = 3$.

Прийнявши практично можливі межі $S_{\max} / S_{\min} = 5$; $t_{\max} / t_{\min} = 5$; $d_{\max} / d_{\min} = 10$; $\sin(\varphi_{\max}) / \sin(\varphi_{\min}) = 3$. При $m = 0,3$; $\delta = 0,15$ отримаємо зміну коефіцієнту посилення процесу різання:

$$\frac{K_{iD}^{\delta \max}}{K_{iD}^{\delta \min}} = 138$$

Таким чином, коефіцієнт передачі процесу різання може змінюватися більш ніж в 100 разів. Крім розглянутих факторів на зміну КПП можуть впливати і інші чинники: зміна умов середовища, в якій відбувається обробка (зміна властивостей МОР), зміна фізико-хімічних властивостей оброблюваного та інструментального матеріалу.

При таких варіаціях коефіцієнта передачі процесу різання звичайні САУ температурою різання з постійними параметрами коригувальних і керуючих елементів не зможуть забезпечити необхідні умови точності в умовах, що змінюються підчас процесу різання.

Для забезпечення необхідних властивостей системи необхідно синтезувати АдСУ, інваріантну до зміни коефіцієнта передачі об'єкта управління.

Інваріантність до зміни коефіцієнта передачі об'єкта управління можна забезпечити введенням в основний контур управління сигналу, зворотно пропорційного зміні цього коефіцієнта. Застосуємо систему з еталонною моделлю. В даному випадку АдСУ по типу контуру адаптації - з замкнутим контуром адаптації; за способом адаптації - з прямою адаптації (тому що ми знаємо математичну модель процесу різання); за характером налаштування основного контуру системи - СНС.

6.3.11 Адаптивна система процесом різання

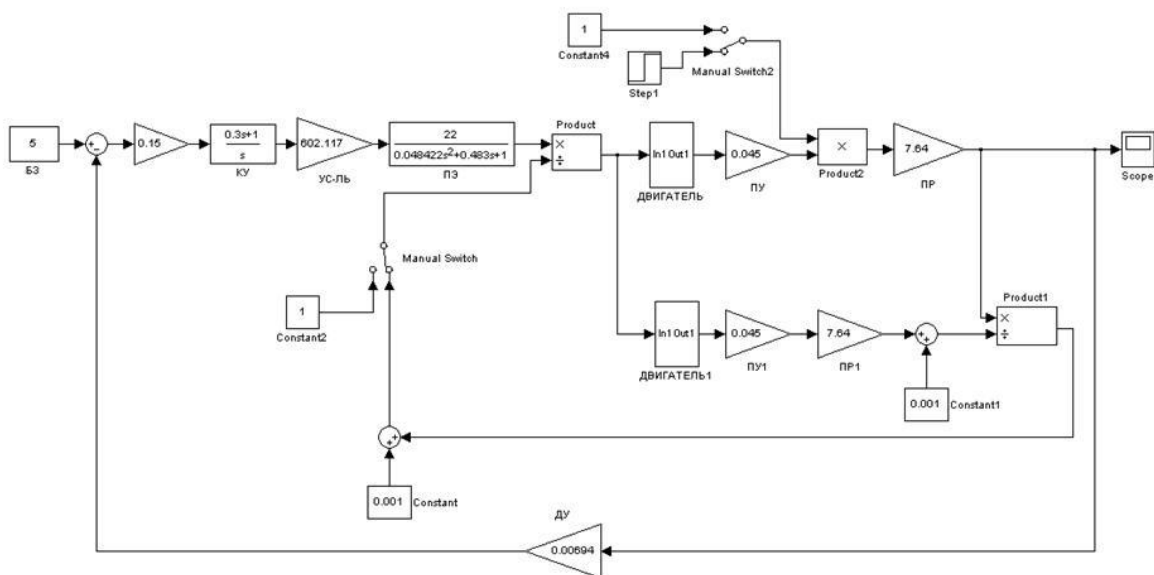


Рисунок 6.16 – Схема адаптивної системи управління процесом різання

При відсутності збурень і вимкненому контурі адаптації:

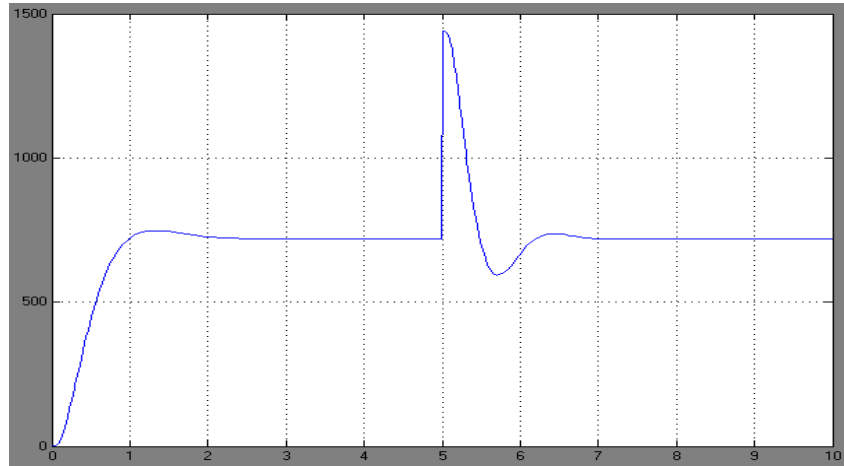


Рисунок 6.17 - Перехідний процес при збільшенні КПР в 2 рази на 5 секунд і відключеному контурі адаптації

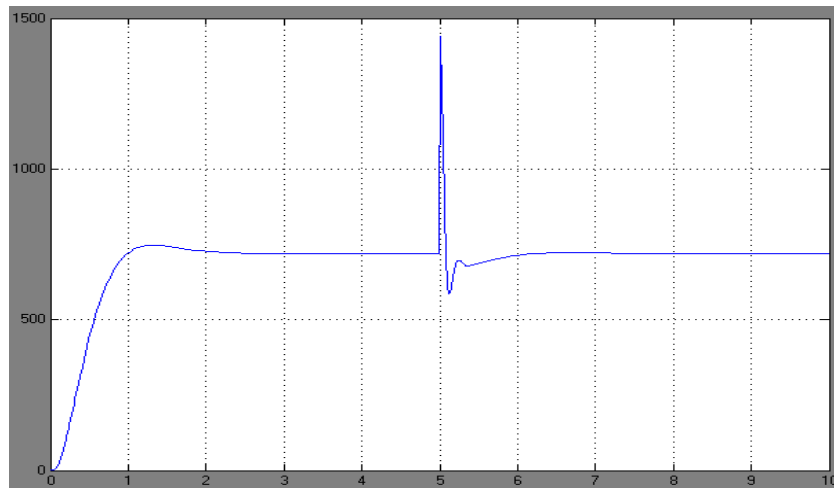


Рисунок 6.18 - Перехідний процес при збільшенні КПР в 2 рази, включених збуреннях на 5 секунд і включеному контурі адаптації

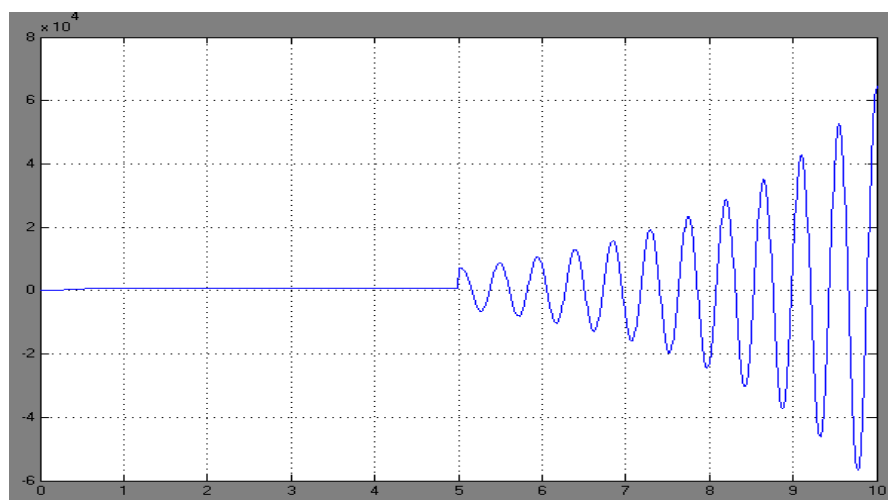


Рисунок 6.19 - Перехідний процес при збільшенні КПР в 10 разів на 5 секунд і відключеному контурі адаптації

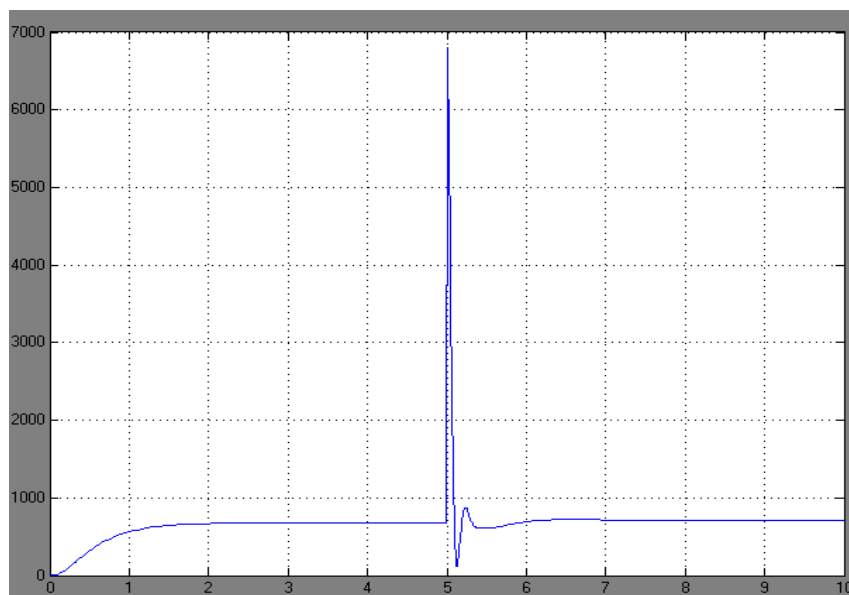


Рисунок 6.20 - Перехідний процес при збільшенні КПР в 10 разів, включених збуреннях на 5 секунді і включеному контурі адаптації

В результаті досліджень була синтезована адаптивна система управління процесу різання по температурі. Проаналізувавши отримані в результаті моделювання на ЕОМ в пакеті MatLab перехідні процеси, з'ясували, що система при введенні збурення і при відключеному контурі адаптації стає нестійкою. При підключенні контуру адаптації система не втрачає стійкість, а повертається в початковий стан, стрибкоподібні збурення швидко відпрацьовуються.

6.3.12 Аналіз системи ЧПУ

Числове програмне управління (ЧПУ) - комп'ютеризована система управління, керуюча приводами технологічного обладнання, включаючи верстатне оснащення. Устаткування з ЧПУ може бути представлено:

- Верстатним парком, наприклад верстатами (верстати, обладнані числовим програмним управлінням, називаються верстатами з ЧПУ):
 - Для обробки металів (наприклад, фрезерні або токарні), дерева, пластмас,
 - Для різання листових заготовок,
 - Для обробки тиском і т.д.
- Приводами асинхронних електродвигунів, що використовують векторне

управління;

– Характерною системою управління сучасними промисловими роботами.

Класичні системи CNC [23 – 44] до сих пір випускаються лише фірмами з багатими традиціями виробництва високоякісної власної мікроелектронної апаратури. Але і ці фірми під тиском кінцевих користувачів, що бажають мати гнучкий інтерфейс оператора, пропонують модифікацію з персональним комп'ютером в якості терміналу (другий варіант). З багатьох причин перші системи типу PCNC відносились до двухкомп'ютерної архітектури (третій варіант); вони і сьогодні дуже популярні і найбільш широко поширені. Трохи згодом з'явилися системи PCNC, ядро яких реалізовано на окремій платі, яка встановлюється в корпусі промислового персонального комп'ютера (четвертий варіант). Нарешті, у міру підвищення потужності мікропроцесорів все більшого поширення набуває однокомп'ютерний варіант системи PCNC (п'ятий). Всі варіанти відображають сумарний досвід розробників систем ЧПУ і перспективні тенденції. У зв'язку з цим їх розгляд досить повчальний, особливо для тих, хто займається розробкою нових моделей у нас в країні.

Система ЧПУ класу PCNC-4 демонструє яскравий приклад чисто однокомп'ютерної архітектури PCNC, в рамках якої всі завдання управління (геометрична, логічна, термінальна) вирішені чисто програмним шляхом, без будь-якої додаткової апаратної підтримки.

Зовнішній інтерфейс побудований на базі будь-якої стандартної (за вибором) периферійної шини Fieldbus, зокрема на базі шини Lightbus фірми Beckhoff. Ця шина виконана у вигляді кільцевого каналу для передачі сигналів управління автономними стежачими приводами, а також сигналів електроавтоматики. Вихід до об'єктів здійснюється за допомогою периферійних терміналів введення-виведення. Операційне середовище являє собою комбінацію Windows для підтримки процесів машинного часу і системи TwinCat.

Операційна система TwinCat фірми Beckhoff інтегрована в Windows, додає їй функції реального часу, не змінюючи самої Windows. Переміщення даних і доступ до прикладних функцій API програмних модулів здійснюється через

програмну шину ADS (Automation Device Specification).

Системний менеджер, який є підсистемою TwinCat, служить центром системної конфігурації, які підтримують синхронну або асинхронну взаємодію всіх процесів, а також введення-виведення сигналів управління. На прикладному рівні в потоках управління працюють програмні модулі ЧПУ і програмовані контролери, які мають клієнтську (для підготовки даних) і серверну (для роботи в реальному часі) частини. ЧПУ-клієнт інтерпретує кадри керуючої програми в стандарті DIN 66025, а ЧПУ-сервер виконує інтерполяцію в групах приводів - по три координати в групі. Групи формуються системним менеджером. Для безеквідистантних програм можна обійтися без інтерпретації, яку замінює компілятор клієнта контролера автоматики. Одночасно працюють до чотирьох контролерів (віртуальних процесорів, виконаних в стандарті IEC 1131-3), кожен з яких вирішує чотири завдання, що мають свій пріоритет і свій часу циклу.

Система ЧПУ класу PCNC-4 будується на основі промислового персонального комп'ютера з PCI-шиною операційною системою Windows і ядром реального часу (власної розробки). Операційна система Windows підтримує роботу інтерфейсу оператора, в тому числі системи програмування ЧПУ і контролера електроавтоматики, вбудовану САМ-систему (що опирається на бази даних інструментів, матеріалів і технологічних циклів), додатки кінцевого користувача. Ядро реального часу синхронізує завдання ЧПУ з електроавтоматикою, диспетчеризує роботу інтерпретатора, інтерполятора і модуля управління стежачими приводами. Одночасно можуть працювати до восьми каналів ЧПУ і два програмно реалізованих контролера електроавтоматики з різними пріоритетами.

Система має відкриту архітектуру, яка допускає розширення функцій ядра ЧПУ за рахунок спеціальних функцій користувача і виключно потужне мережеве оточення, як зовнішнє (Ethernet-TCP / IP, Novell), так і периферійне (вісім оптоволоконних SERCOS-кілець для 64 стежачих приводів, InterBus-S, Profibus DP, CAN-Bus, ASI-BUS). Крім того, передбачені власна периферійна SUPERBUS-шина для віддалених входів-виходів електроавтоматики а також

віддалені входи-виходи. На SUPER шині можуть бути встановлені чотири інтерфейсних плати для управління 32 аналоговими приводами.

Висновки до розділу 6

Дана система ЧПУ як найкраще підходить для вирішення завдань ресурсозбереження на стадіях життєвого циклу розглянутих автоматизованих технологічних об'єктів.

ВИСНОВКИ

Для проведення досліджень з тематики «Ресурсозбереження на стадіях життєвого циклу автоматизованих технологічних об'єктів» необхідно визначити етапи проведення робіт, які складаються із:

- одержання інформації про об'єкт ресурсоаудиту;
- вивчення ресурсо-зберігаючих потоків на об'єкті в цілому та в окремих напрямках;
- аналізу ефективності використання матеріальних ресурсів;
- проведення поглибленого аудиту окремих технологічних процесів з напряму ресурсозбереження.

Важливими результатами роботи є теоретична підготовка та практичний досвід вирішення проблем в ресурсозбереженні:

- проведення аудиту з напряму, складання балансів, пошук резервів, розроблення і розрахунок економічної доцільності та оцінювання можливостей ресурсозбереження;
- вибір та впровадження сучасного енергоефективного устаткування автоматизованих систем управління підприємствами та локальними системами;
- оптимізація режимів роботи технологічного обладнання.

В 1 розділі проаналізовані актуальні питання автоматизованого планування енергоспоживання по цехах на план товарної продукції.

Автоматизація процесу «Планування енергоспоживання по цехах на план товарної продукції» дозволить:

- забезпечити ефективне і оптимальне функціонування бізнес-процесів щодо формування енергоспоживання цехами підприємства;
- керівництву підприємства і користувачам системи отримати повну, оперативну і достовірну інформацію для проведення поглибленого аналізу і оцінки енергоспоживання цехами підприємства і ухвалення рішень;
- виконати оперативний контроль споживання енергоресурсів підприємства, оперативно реагувати на зміни виробничих ситуації за рахунок інформаційної

узгодженості роботи цехів і виробничих майданчиків підприємства;

– своєчасно надавати в систему «Бюджетування» інформацію про потребу в енергоресурсах цехами підприємства.

В 2 розділі розглянуті актуальні питання автоматизованого контролю використання енергоресурсів. Архітектура АСКОЕ, АСТОЕ забезпечує точність, достовірність і одночасність отримання даних про облік електроенергії.

В основу АСКОЕ, АСТОЕ покладено принципи відкритості архітектури, відкритості комунікацій і розподіленого функціонування. Це забезпечує незалежність від технічних засобів обліку і систем зв'язку, легку інтеграцію в існуючі системи обробки даних, поетапне розширення АСКОЕ і адаптація до поточних вимог з мінімальними витратами. У той самий час, кожна компонента АСКОЕ забезпечує узгоджений захист даних від несанкціонованого доступу, а також їх безпеку й цілісність.

В 3 розділі проаналізовані актуальні питання енергетичної економічності роботи енергоспоживаючих агрегатів. Таким чином, підбиваючи підсумки всьому сказаному про енергетичну економічність роботи обладнання безперервної дії, можна стверджувати, що практично доцільними є тільки такі чотири режими:

1. Безперервна робота з постійним навантаженням агрегату. Цей режим допустимий для обладнання з прямолінійними й увігнутими характеристиками при будь-якому заданому значенні його середньокалендарної продуктивності, а для обладнання з опуклими характеристиками - тільки при постійному навантаженні, що дорівнює максимальній годинній продуктивності агрегату.

2. Безперервна робота зі змінним навантаженням. Цей режим допустимий тільки для обладнання з прямолінійними характеристиками підведеної потужності.

3. Переривистий режим, що характеризується чергуванням періодів корисної роботи при максимальній годинній продуктивності агрегату з холостими ходами обладнання або роботою з мінімальною годинною продуктивністю. Цей режим допустимий в умовах обов'язкової безперервної роботи для обладнання з прямолінійними й опуклими характеристиками підведеної потужності і протипоказаний для агрегатів з увігнутими характеристиками.

4. Переривистий режим, що характеризується чергуванням періодів корисної роботи при максимальній або економічній годинній продуктивності агрегату і перерви в роботі з повним вимкненням обладнання.

В 4 розділі наведені актуальні питання оптимізації режиму гальмування електропривода за критерієм енергоефективності.

Науково-технічна проблема ресурсозбереження в системах електроприводу механізмів переміщення зі зворотно-поступальним рухом робочих органів, що працюють з високою частотою технологічних циклів, на цей час є актуальною. В аспекті цієї проблеми поставлено задачу синтезу енергоефективного процесу руху електропривода механізма переміщення робочого органа технологічної машини в режимі гальмування, який є першою за часом складовою режиму реверсування електропривода. Обґрунтовано подання критерія якості процесу гальмування у вигляді функціоналу, який враховує безповоротні витрати енергії, сформульовано математичну задачу оптимального керування електроприводом за цим критерієм. Особливою рисою критерія якості є те, що він передбачає зменшення безповоротних витрат енергії за рахунок скорочення величини переміщення робочого органа технологічної машини в процесі руху у зворотному напрямку.

В 5 розділі проаналізовані актуальні питання ресурсозберігаючого керування процесами руху несучого органа в робочому циклі летучої пили.

Вперше отримано рішення задачі ресурсозберігаючого керування процесом механічного руху привода.

В 6 розділі проведено класифікацію систем управління верстатів з ЧПУ в контексті загального ресурсозбереження на стадіях життєвого циклу автоматизованих технологічних об'єктів.

За результатами НДР отримані нові підходи по підвищенню ефективності функціонування автоматизованих технологічних об'єктів на основі розробки та впровадження інтелектуальних ресурсозберігаючих технологій функціонування технічного обладнання на стадіях життєвого циклу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Толбатов В.А. Організація систем енергозбереження на промислових підприємствах: навч. пос. / В.А. Толбатов, І.Л. Лебединський, А.В. Толбатов / – Суми: Вид-во СумДУ, 2009. – 195 с.
2. В.В Прокопенко, О.М. Закладний, П.В. Кульбачний Енергетичний аудит з прикладами та ілюстраціями: Навчальний посібник. – К.: Освіта України, 2008. – 438с.
3. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепиков В. Б. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.:За ред. М. Г. Поповича та О. Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
4. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навч. посібник. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
5. Луговой А. В. К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода //Электротехника.- 1999, № 5 – С. 62 – 67.
6. Лимонов Л.Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов / Л.Г. Лимонов. – Харьков: Изд-во “ФОРТ”, 2009. – 272 с
7. Мотченко А.И. Энергосберегающий позиционный электропривод с наблюдателем статического тока / А.И. Мотченко, В.Н. Столяров, В.П. Яблонь // Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика" науково-технічного журналу "ЕЛЕКТРОІНФОРМ". – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 357-360.
8. Формирование оптимальных по нагреву диаграмм отработки заданных перемещений при наличии постоянного статического момента на валу двигателя / В.И. Костенко, П.Х. Коцегуб, П.И. Розкаряка, О.И. Толочко // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірка наукових праць. Тематичний випуск 16. – Харків: НТУ ХПІ, 2002. – С. 350-354.

9. Тукалов И.О. Сравнительный анализ энергетических затрат при различных законах изменения скорости привода летучих ножниц / И.О. Тукалов, Л.В. Асмолова // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. – Харків: НТУ ХПІ, 2001. – С.360-362.

10. Атанс М., Фалб П.Л. Оптимальное управление. Пер. с англ. / Под ред. Ю.И. Топчиева. - М.: Машиностроение, 1968. – 764 с.

11. Ванько В.И., Ермошина О.Е., Кувыркин Г.Н. Вариационное исчисление и оптимальное управление: Учебн. для вузов. 2-е изд. / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 488 с.

12. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.

13. Теорія електропривода: Підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища шк., 1993. – 494 с.

14. Черв'яков В. Д., Панич А. О. Оптимізація режиму гальмування електропривода за критерієм енергоефективності. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Сер. Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. Т.1, №36 (1009)..- Харків: НТУ ХПІ, 2013. – С. 500 – 502.

15. Черв'яков В. Д., Панич А. О. Самедов Ю. Ф. Спосіб керування процесом гальмування електропривода. Патент України на корисну модель №93194. Реєстр. 25.09.2014.

16. Червяков В.Д., Паныч А.А. Задачи ресурсосберегающего управления электроприво-дом несущего органа летучей пилы// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. – Харків, НТУ ХПІ, 2001. – С.370-371.

17. Петров Ю.П. Оптимальное управление электрическим приводом с ограничением по нагреву. – Л.: Энергия, 1971. – 144 с.

18. Ревинская О.Г. Основы программирования в MatLab: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 208 с. : ил.

19. Теория автоматического управления: учебное пособие/ В.Ф. Дядик, С.А. Байдали, Н.С. Креницын; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 196 с.

20. Гнучкі комп'ютерно-інтегровані системи: планування, моделювання, верифікація, управління: підручник / Л.С. Ямпольський, П.П. Мельничук, К.Б. Остапченко, О.І. Лісовиченко. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 786 с.

21. Толбатов В.А. Методологія створення бази знань життєвого циклу автономних енергогенеруючих установок / В.А Толбатов, А.В. Толбатов // Вісник Сумського держ. ун-ту. Серія: “Технічні науки”. – Суми, 2008. – № 1. – С. 140–146.

22. Теория автоматического управления: учебное пособие к лабораторным и курсовым работам / О.О. Павловская, И.В. Чернецкая. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 93 с. Современные системы ЧПУ и их эксплуатация: учебник для нач.проф. образования / М.А.Босинзон; под.ред. Б.И.Черпакова, – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр “Академия”, 2008. – 192 с.

23. Пачевский В.М. Методы обеспечения точности: курсовое проектирование: учеб. пособие / В.М. Пачевский. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. - 175с.

24. Сосонкин В.Л. Системы числового программного управления: ... В.Л., Мартинов Г.М. – М.: Логос, 2005.

25. Толбатов В.А. Інформаційна технологія аналізу складності робіт при обстеженні динаміки процесів функціонування металообробного обладнання з гнучкою логікою / В.А Толбатов, А.В. Толбатов, О.А. Добророднов, С.В. Толбатов //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2014. – №2 – С.135-139.

26. Толбатов В.А. Розробка архітектури інформаційної системи для реалізації алгоритмів моделювання та оцінки складності робіт / А.В. Толбатов, В.А. Толбатов,

С.В. Толбатов// Международное научное издание – Сборник научных трудов Sworld. – Выпуск 3(36), 2014. Том 10. Иваново: МАРКОВА АД, 2014 – С. 10-16.

27. Толбатов В.А. Інформаційна технологія аналізу складності робіт при обстеженні динаміки процесів функціонування металообробного обладнання з гнучкою логікою / В.А. Толбатов, О.А. Добророднов, С.В. Толбатов //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2014. – №2 – С.135-139.

28. Толбатов В.А. Методика побудови інтегрованого інформаційного середовища сучасного промислового підприємства / А.В. Толбатов, В.А. Толбатов / Перспективные тренды развития науки: техника и технологии. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2016. – Глава 5 С.82–96.

29. Толбатов В.А. Перспективные достижения современных ученых: техника и технологии: Аналіз та розробка концепції моделювання бізнес-процесів промислового підприємства з точки зору сучасної методології аналізу та проектування складних систем / [авт.кол. : Толбатов А.В, Толбатов В.А, Толбатов С.В, В'юнєнко О.Б., Толбатова О.О. и др.]. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2017 – 219 с.

30. Tolbatov V.A. Development concept modeling of business processes of modern industrial enterprises in terms of theoretical and legal approaches to the analysis information security / A.V. Tolbatov, V.A. Tolbatov // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2017. – №1 – С.196–199.

31. Толбатов В.А. Моделювання процесу вироблення електроенергії газотурбінними електростанціями / А.В. Толбатов, Г.А. Смоляров, В.А. Толбатов // Міжнародний науково-технічний журнал “ВОТТП”. – Хмельницький, 2017. – №2. – С. 69–72.

32. Tolbatov V.A. Functional modeling – methodological basis for investigation of business processes at industrial enterprises / A.V. Tolbatov, S.V. Tolbatov, O.O. Tolbatova, S.V. V.A. Tolbatov // International scientific-technical magazine Measuring

and computing devices in technological processes. – *Khmel'nyts'kyu*, 2017. – №3 – P.186–189.

33. Толбатов А.В. Развитие та перспективи розширення предметної галузі використання інформаційної технології аналізу динаміки процесів функціонування газотурбінної електростанції / А.В. Толбатов, В.А. Толбатов, Г.А. Смоляров // *ScientificWorldJournal*, Issue №14, Vol.3 (Yolnat PE, Minsk, 2017) – P.38–42.

34. Tolbatov V. Information technologies in the educational process as the basis of modern distance learning / Viunenko, O., Tolbatov, A., Vyganyaylo, S., Tolbatov, V., Agadzhanova, S., Tolbatov, S. / 2016 Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, Proceedings of the 13th International Conference on TCSET 2016 – Lviv-Slavske, 2016. – P. 718–720.

35. Tolbatov V. Cybersecurity of distributed information systems. The minimization of damage caused by errors of operators during group activity / Lavrov, E., Tolbatov, A., Pasko, N., Tolbatov, V. / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT 2017 – Proceedings – Lviv, 2017. – P. 83–87.

36. Tolbatov V. Ergonomic reserves for improving reliability of data processing in distributed banking systems / Lavrov, E., Tolbatov, A., Pasko, N., Tolbatov, V. / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT 2017 – Proceedings – Lviv, 2017. – P. 79–82.

37. Tolbatov V. Theoretical bases, methods and technologies of development of the professional activity analytical estimation intellectual systems / Zaritskry, O., Pavlenko, P., Sudic, V., Tolbatov, A., Tolbatova, O., Tolbatov, V., Viunenko, O. / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT 2017 – Proceedings – Lviv, 2017. – P. 101–104.

38. Tolbatov A. Mathematical models for the distribution of functions between the operators of the computer-integrated flexible manufacturing systems / Lavrov, E., Pasko, N., Krivodub, A., Tolbatov, A. / 2016 Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, Proceedings of the 13th International Conference on TCSET 2016 – Lviv-Slavske, 2016. – P. 72–75.

39. Tolbatov A. Data representing and processing in expert information system of professional activity analysis / Zaritskiy, O., Pavlenko, P., Tolbatov, A. / 2016 Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, Proceedings of the 13th International Conference on TCSET 2016 – Lviv-Slavske, 2016. – P. 831–833.

40. Tolbatov A. Development of adaptation technologies to man-operator in distributed E-learning systems / Lavrov, E., Pasko, N., Barchenko, N., Tolbatov, A. / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT 2017 – Proceedings – Lviv, 2017. – P. 88–91.

41. Tolbatov A. Using cloud technologies based on intelligent agent-managers to build personal academic environments in E-learning system / Agadzhanova, S., Tolbatov, A., Viunenko, O., Tolbatova, O. / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT 2017 – Proceedings – Lviv, 2017. – P. 92–96.

42. Толбатов В.А. Методологічні основи вибору критерію параметричної надійності електричних систем управління металорізальним обладнанням / В.А. Толбатов, А.В. Толбатов / Вісник СумДУ. Серія технічні науки.-2010.-№1.-С.37-45.

43. Толбатов В.А. Інженерний синтез за критерієм надійності електричних систем керування металорізальним обладнанням із жорсткою логікою / В.А. Толбатов, А.В. Толбатов, С.В. Толбатов / Вісник СумДУ. Серія технічні науки.-2011.-№2.-С.48-54.

44. Толбатов В.А. Техніко-економічне обґрунтування побудови систем управління підвищеної надійності / В.А. Толбатов, А.В. Толбатов, С.В. Толбатов / Вісник СумДУ. Серія технічні науки.-2012.-№3.-С.68-71.

ДОДАТОК А



(11) 93194

(19) UA

(51) МПК (2014.01)
B60L 15/00

(21) Номер заявки:	u 2014 02943	(72) Винахідники:	Черв'яков Володимир Дмитрович, UA, Самедов Юсіф Фахрат-огли, UA, Панич Андрій Олександрович, UA
(22) Дата подання заявки:	24.03.2014	(73) Власник:	СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, UA
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель:	25.09.2014		
(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня:	25.09.2014, Бюл. № 18		

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГАЛЬМУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

(57) Формула корисної моделі:

Спосіб керування процесом гальмування електропривода, що полягає у здійсненні процесу гальмування як послідовного виконання операцій переведення двоконтурної системи керування електроприводом із режиму регулювання швидкості в режим автоматичного регулювання моменту на рівні заданого значення гальмівного моменту електропривода протягом часу від початку гальмування до зупину та повернення електропривода у режим регулювання швидкості, який відрізняється тим, що задане значення гальмівного моменту електропривода розраховують з врахуванням його енергетичних показників, які вимірюють перед початком гальмування, за наступною формулою:

$$M_T = \begin{cases} \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} - M_c, & \text{якщо } \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} \leq M_{\text{доп}}, \\ M_{\text{доп}}, & \text{якщо } \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} > M_{\text{доп}}. \end{cases}$$

де M_T , Н·м - задане значення величини гальмівного моменту двигуна; ω_0 , рад/с - початкове значення кутової швидкості обертання двигуна перед гальмуванням; $\beta = M_n / (\omega_x - \omega(M_n))$ - модуль жорсткості механічної характеристики електропривода; ω_x - швидкість ідеального холостого ходу; M_n - номінальне значення електромагнітного моменту двигуна; $\omega(M_n)$ - значення швидкості при роботі електропривода в усталеному режимі з номінальним навантаженням; M_c - статичний момент, що спотворюється силами спротиву в механічній частині електропривода, приведений до швидкості ω ; $M_{\text{доп}}$ - максимальна допустима величина електромагнітного моменту двигуна за умови його експлуатаційної надійності.