

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) О. Ю. Колларов
(ініціали, прізвище)
«___» _____ 2021 р.

**Кваліфікаційна робота
бакалавра**

на тему Підвищення енергоефективності конвеєрної лінії за рахунок
використання частотно-керованого електропривода.

Виконав: студент 3 курсу, групи ЕЛКЗп-18
(шифр групи)

напряму підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка
(спеціальності) _____
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

та електромеханіка»

Подлін М. М.
(прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Керівник _____ асистент кафедри ЕлІн, Кардаш Д. О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Нормоконтроль:

(підпис) Любименко О. М.
02.06.2021
(дата)

Засвідчую, що у цій випускній
кваліфікаційній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)
02.06.2021
(дата)

Покровськ – 2021 р.

АНОТАЦІЯ

Подлін М. М. Підвищення енергоефективності конвеєрної лінії за рахунок використання частотно-керованого електропривода. / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка — ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Проведена робота з розробки та оптимізації системи регулювання швидкості електроприводу конвеєрної лінії, та проаналізовані результати математичного моделювання на базі САПР.

Ключові слова: MATLAB, SIMULINK, КОНВЕЄР, ЕЛЕКТРОПРИВІД, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 Характеристика об'єкта дослідження	7
1.1 Характеристика конвеєрної стрічки	9
1.2 Характеристика електроприводу	11
2 Розробка математичної моделі електропривода конвеєрної лінії	15
2.1 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна	15
2.2 Розрахунок параметрів конвеєрної лінії	23
2.3 Розрахунок стрічки	27
2.4 Розрахунок параметрів привідного барабана	29
3 Аналіз і синтез системи регулювання швидкістю електропривода	32
3.1 Загальні відомості	32
3.2 Загальні розрахунки	33
3.3 Синтез регулятора струму	36
3.4 Синтез регулятора швидкості	41
4 Реалізація математичної моделі та системи регулювання на базі САПР.	47
5 Розробка заходів з охорони праці	53
5.1 Загальні поняття	53
Висновки	54
Список використаних джерел	55
Додаток А	57
Додаток Б	58

ВСТУП

Основна задача мого дослідження є аналіз роботи конвеєрної лінії за різними етапами, дослідження та аналіз перехідних процесів за використанням математичної моделі реалізованої на базі програмного розширення Simulink програмно пакету Matlab. З метою підвищення енергоефективності конвеєрної лінії, удосконаливши привідну частину конвеєрної лінії транспортування впровадивши живлення асинхронного двигуна від частотного перетворювача. Реалізувати систему регулювання швидкості електроприводу за для забезпечення оптимальної швидкості конвеєрної стрічки, та обмеження навантажень при пуску завантаженої конвеєрної лінії.

Впровадження автоматичного переводу частотного перетворювача на роботу конвеєрної лінії повного завантаження, та роботу конвеєрної лінії при виробництві у двічі менший. Використавши частотний перетворювач фірми виробник АВВ яка пропонує широкий вибір промислових технологій і сервісу для енергетики, промисловості, транспорту та інфраструктури розширюючи межі технологій та виводячи їх ефективність на новий рівень, новітньою розробкою якої є частотний перетворювач ACS880-07-0145-3 це привід шафового виконання з повітряним охолодженням, призначений для управління асинхронними двигунами змінного струму з частотою живлення 50 Гц та номінальною напругою $U_n = 400 \text{ В}$.

Метою роботи є визначення параметрів регулювання для керування конвеєрною лінією за допомогою сучасного обладнання, частотного перетворювача у двох випадках при повному навантаженні, та при навантаженні удвічі меншому від встановленої.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом мого дослідження є безпосередньо конвеєр, який виконує функцію транспортування сипучого матеріалу сульфат амонію, від центрифуг які знаходяться у головній будівлі відділення коксового газу від аміаку до сушильного барабану, який знаходиться у відокремленій будівлі яка з'єднана галерейним проходом через який саме і проходить конвеєр довжиною 200 метрів. Конвеєр проектувався за для обслуговування двох центрифуг, загальна потужність яких становить 60 т/г. Більшість часу працює одна центрифуга, водночас обидві центрифуги працюють лише деякий час, дуже рідко, це залежить від виробничого процесу, від кількості перекачаного коксового газу скрізь скрубери цеху Уловлювання №1. Транспортуєма сіль сульфат амонію надалі вантаж при виході з центрифуг достатньо волога щоб не утворювати пилу але деяка ділянка накрита захисним кожухом по 10 метрів від кожної центрифуги, та підключені до аспіраційної системи. Це обумовлено тим що з рукава завантаження на конвеєрну стрічку разом з сіллю йде і пар насичений сіллю, який є агресивним. На конвеєрі використана гвинтова натяжна система яка зображена на рис.1.2.

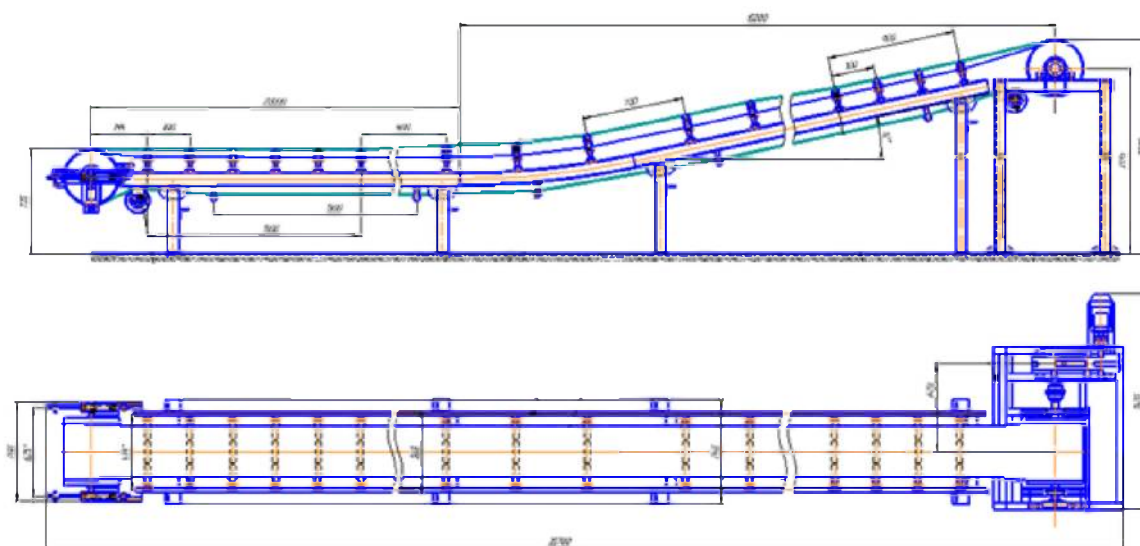


Рисунок 1.1 — Умовна схема конвеєру

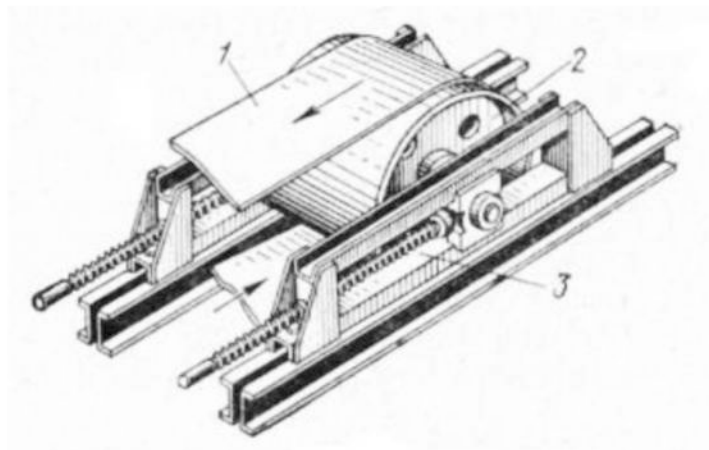


Рисунок 1.2 — Натяжна система конвеєру

1 — стрічка; 2 — натяжний барабан; 3 — натяжна опора з гвинтом

Ролико-опори встановлені на конвеєрі верхні — жолоб-обмазуючи голі (без футерування гумою, то що) з кутом нахилу роликів 20° , нижні — прямі голі (без футерування гумою, то що) [2], приклад яких вказано на рисунку 1.3

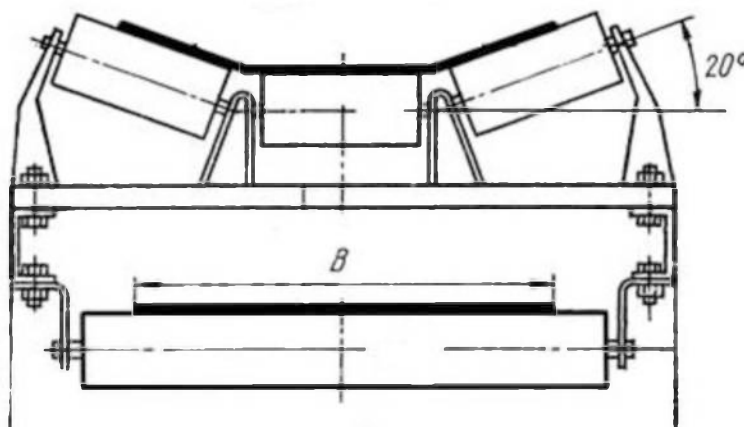


Рисунок 1.3 — Ролико-опори конвеєра

1.1 Характеристика конвеєрної стрічки

Конвеєрна стрічка є основним найбільш цінним матеріалом який використовується на конвеєрній лінії, її водночас має найменшу довговічність праці стрічкового конвеєру. Амортизаційні відрахування на конвеєрну стрічку є одним з основних факторів визначаючий економічну ефективність конвеєрного транспорту. Конвеєрна стрічка є водночас вантажоносним та тяговим органом стрічкового конвеєру. Конвеєрна стрічка повинна мати високу міцність за для забезпечення тягового зусилля, гнучкості за для забезпечення жолобу вздовж стрічки, малим подовженням для забезпечення мінімального ходу натяжних пристроїв конвеєра, міцність обкладок до стирання, ударним навантаженням, і т.п. Важливим розрахунковим параметром стрічки є міцність на розрив, відносне розтягнення. Продуктивність конвеєра залежить від ширини стрічки (ширина насипу вантажу), та її швидкість. Міцність на розрив (максимальне зусилля яке можна прикладати постійно) визначає максимальну довжину конвеєра, установлену потужність. Завдяки відносному розтягненню стрічки обрається тип натяжного механізму. Конвеєрна стрічка складається з тягового каркасу, зовнішніх гумових обкладок та бортів, які захищають каркас від впливу зовнішніх пошкоджень та інших видів зовнішніх впливів та руйнувань. У моєму випадку використовується гумо тканинна конвеєрна стрічка.

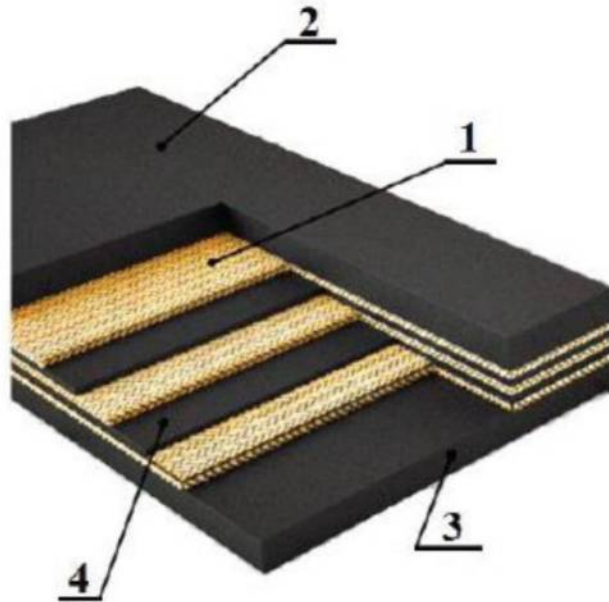


Рисунок 1.4 — Багатошарова гумо тканинна стрічка

1 — тканині шари; 2 — гумова робоча обкладка; 3 — гумова не робоча обкладка; 4 — гумовий проміжний шар

Ширина конвейерної стрічки становить 1000 мм, товщина конвейерної стрічки становить 15 мм, враховуючи що стрічка має не каталожну ширину та відсутність борту з однієї сторони, стрічка підігнана до розмірів конвеєру, тому погонне навантаження від маси стрічки треба розрахувати. Мною було взято зразок стрічки площиною 0.01 м^2 та за допомогою аналітичних ваг визначено вагу зразка яка склала 174 г, звідки визначено щільність матеріалу яка дорівнює 1200 кг/м^3 . Та погонну вагу конвеєрної стрічки яка становить 18 кг. Яка співпадає зі стрічкою 2–1000–8–БКНЛ–100–6–2–В ГОСТ 20–85 з каталожними даними якої можна ознайомитися за [2].

Транспортуєма сіль сульфат амонію (сірчаноокислий амоній) є сипучий матеріал з кристалоутворенням від 0,5 до 2 мм рисунок 1.5. Сіль після центрифуг іде вологою тому за [3], беремо насипну щільність $\gamma_g = 1.29 \text{ т/м}^3$.



Рисунок 1.5 — Кристали сульфат амонію

1.2 Характеристика електроприводу

Привідний барабан встановлений на конвеєрі приводиться до руху одним двигуном типу АИР 280 S8 потужністю 65 кВт, з використанням редуктора типу 5Ц двоступеневий з передатним числом 20, на конвеєрах такого типу більшої потужності за для посилення тягової сили встановлюють декілька приводів на один привідний барабан, для цього на привідних барабанах вали роблять з обох торців.

Електродвигун підключається до мережі прямим включенням, тому при включенні у системі виникає стрибок струму, який на незавантаженому конвеєрі для зрушення з місця довгої конвеєрної стрічки є 1000 А, то для зрушення з місця завантаженого конвеєру пуск відноситься до категорії важкого пуску. Яке пагубно діє на обладнання: пуск регулююче, механічні вузли, редуктор, барабани, стрічку. Тому встановлення частотного перетворювача є розумним кроком задля вирішення низки проблем таких як важкий пуск навантаженого конвеєра здійснюється з обмеженням по струму. При розрахунку конвеєра береться максимальна продуктивність робота на обидві центрифуги, а на період праці однією центрифугою продуктивність вдвічі менша. Тому завдяки частотному регулюванню можна обмежити оберти двигуна тим самим зменшити швидкість конвеєрної стрічки щоб у свою чергу налаштувати завантаженість

конвеєрної стрічки до розрахункових погонних навантажень транспортуючого вантажу, що також приводить до довшого строку експлуатації самої стрічки, та підшипникових вузлів. Та налаштувати швидкість конвеєрної стрічки для продуктивності обох центрифуг бо у розрахунках є відсоток похибки та допустимих відхилень, бо електродвигун має незмінні стандартні оберти, як і барабани мають стандартні розміри, отже тільки передатним числом редуктора можна підібрати швидкість конвеєрної стрічки.

Частотний перетворювач підбирається за потужністю двигуна та при режимі роботи "важкий пуск" обрається на наступну потужність, за для забезпечення довшого, більшого пускового струму. Частотні перетворювачі є різних виробників таких як ABB, Danfoss, Siemens, Schneider, Hitachi. Відповідно до кожного виробника є свій модельний ряд призначень за типами обладнань, за класифікацією об'єктів за кліматичними зонами, за вибух небезпечністю. За [5] обрано тип приводу ACS880-07-0145-3 — це привід шафового виконання з повітряним охолодженням, призначений для управління асинхронними двигунами змінного струму з частотою живлення 50 Гц та номінальною напругою $U_n = 400 \text{ В}$, зображеного на рисунку 1.5



Рисунок 1.6 — Компонівка шафи без кожухів

1 – Панель керування приводом, 2 – вимикачі та сигнальні лампи, 3 – ручка головного вимикача, 4 – головний вимикач, 5 – реле, 6 – буферний модуль, 7 – поворотна рама, 8 – монтажна панель, 9 – дверний вентилятор, 10 – трансформатор напруги (Т21), 11 – привідний модуль, 12 – блок керування, 13 – 20 – клемні колодки та шини.

За основу моделювання обрано поняття про моделювання як модель – це представлення об'єкта або системи або поняття в деякій формі яка відмінна від реальної наявності у природі. Модель є засобом що пояснює, за допомогою якого можна зрозуміти або удосконалювати систему. Модель може бути точною

копією об'єкта (хоча й в іншому масштабі і з іншого матеріалу) або відображати деякі характерні властивості об'єкта в абстрактній формі. Тому модель – це інструмент для прогнозування наслідків при дії входних сигналів на об'єкт, який перевіряє ефективність суджень фахівців.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОНВЕЄРНОЇ ЛІНІЇ

2.1 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна

За каталожними даними [6] розраховуються параметри АД (Асинхронний Двигун) які надалі будуть використані у створенні моделі АД у програмному пакеті Simulink і змодельовані перехідні процеси. Метою моделювання АД в двофазних ортогональних координатах є створення моделі АД, еквівалентній за своїми основними властивостями до його моделі у фазних координатах, лінійна модель у той же час є простішою, і тому більш зручна у моделюванні і є придатною до синтезу ефективних алгоритмів управління АД. Проте використання таких математичних моделей АД має рацію лише при дослідженні режимів роботи власно двигуна (в окремих випадках – простіших систем управління), синтезі і аналізі САК асинхронним ЕП не є доцільним, тому що не узгоджується із сучасними алгоритмами управління. Тому найчастіше використовується перетворення рівнянь Парка-Горєва, сучасні засоби математичного моделювання, зокрема MATLAB, дозволяють виконати безпосереднє математичне моделювання за рівняннями Парка-Горєва. Яке є зручне при моделюванні, при якому усі вектори представляються у вигляді сум їхніх дійсних і уявних складових (2.1 – 2.3), на рисунку 2.1 зображена еквівалентна схема заміщення АД. Також необхідно визначити швидкість конвеєрної стрічки за зменшенням обертів АД у відповідь до зменшення частоти питаючої напруги до нижнього рівня який надалі і буде розраховано.

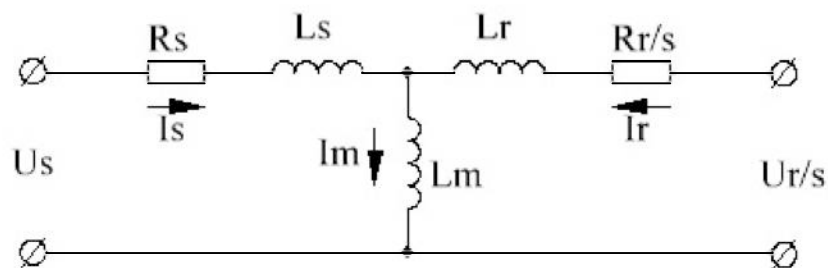


Рисунок 2.1 — Схема заміщення АД

Рівняння Парка-Горєва для напруги (2.1)

$$\begin{aligned}
 U_{s1} &= R_s * i_{s1} + p * \psi_{s1} - \omega_0 * \psi_{s2}; \\
 U_{s2} &= R_s * i_{s2} + p * \psi_{s2} + \omega_0 * \psi_{s1}; \\
 U_{r1} &= R_r * i_{r1} + p * \psi_{r1} - (\omega_0 - \omega_r) * \psi_{r2}; \\
 U_{r2} &= R_r * i_{r2} + p * \psi_{r2} + (\omega_0 - \omega_r) * \psi_{r1}.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

де U_{s1} — напруга статора першої фази, В;

U_{s2} — напруга статора другої фази, В;

U_{r1} — напруга ротора першої фази, В;

U_{r2} — напруга ротора другої фази, В;

R_s — активний опір фази статора, Ом;

R_r — активний опір фази ротора, Ом;

i_{s1} — струм статора першої фази, А;

i_{s2} — струм статора другої фази, А;

i_{r1} — струм ротора першої фази, А;

i_{r2} — струм ротора другої фази, А;

ψ_{s1} — потокозчеплення статора першої фази, Вб;

ψ_{s2} — потокозчеплення статора другої фази, Вб;

ψ_{r1} — потокозчеплення ротора першої фази, Вб;

ψ_{r2} — потокозчеплення ротора другої фази, Вб;

ω_0 — синхронна кутова швидкість обертання, рад/с;

ω_r — кутова швидкість обертання ротора, рад/с;

p — символ диференціювання Лапласа.

Рівняння Парка-Горєва для потокозчеплень (2.2)

$$\begin{aligned}
 \psi_{s1} &= L_s * i_{s1} + L_m * i_{r1}; \\
 \psi_{s2} &= L_s * i_{s2} + L_m * i_{r2}; \\
 \psi_{r1} &= L_m * i_{s1} + L_r * i_{r1};
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

$$\psi_{r2} = L_m * i_{s2} + L_r * i_{r2}.$$

де L_s — індуктивність обмотки статора, Гн;

L_r — індуктивність обмотки ротора, Гн;

L_m — індуктивність контуру намагнічування, Гн.

Рівняння руху (2.3)

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} * (M - M_o). \quad (2.3)$$

де J — момент інерції АД, кг*м²;

M — обертовий момент АД, Н/м;

M_o — момент опору приведений до валу АД, Н/м.

Розрахунки які мають відношення до частотних характеристик питаючої напруги таких як кутова швидкість, яку треба перераховувати до зменшеної частоти.

За формулою (2.4) та каталожними даними [6] визначимо ковзання номінальне s_n , [в.о.], та критичне ковзання s_k , [в.о.]

$$s_n = \frac{n_o - n_n}{n_o};$$

$$s_k = \left(m_k + \sqrt{m_k^2 - 1} \right) * s_n. \quad (2.4)$$

де n_o — синхронна швидкість (швидкість обертання магнітного поля), об/хв;

n_n — номінальна швидкість обертання двигуна, об/хв;

m_k — коефіцієнт критичного моменту;

p — число полюсів статора АД;

$$s_n = \frac{n_o - n_n}{n_o} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0.053, \text{ в. о. ;}$$

$$s_k = \left(m_k + \sqrt{m_k^2 - 1} \right) * s_n = \left(2 + \sqrt{2^2 - 1} \right) * 0.053 = 0.2, \text{ в. о.}$$

Конструктивний коефіцієнт $c_1 = 1.02018$ розраховується за формулою (2.11) за допомогою програмного забезпечення Mathcad де був попередньо обраний. Після розрахунку індуктивностей, що входять в рівняння, порівняно отримане значення з спочатку обраним і уточнено розрахунок. Якщо вчестьи що повні механічні втрати складаються з постійних та змінних втрат, та постійні складають приблизно третину повних втрат, а механічні втрати складають половину постійних [7] то механічні втрати ΔP_{meh} , та вираз $\Delta P_{\text{meh}} + P_n$ визначимо з рівнянь (2.5)

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{meh}} &= P_n * \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \frac{1}{6}; \\ \Delta P_{\text{meh}} + P_n &= P_n * \left(1 + \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \frac{1}{6} \right). \end{aligned} \quad (2.5)$$

де P_n — Потужність АД номінальна, Вт;

η_n — ККД АД за номінальним навантаженням, в.о.;

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{meh}} &= P_n * \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \frac{1}{6} = 65000 * \left(\frac{1}{0.965} - 1 \right) \frac{1}{6} = 878.4 \text{ Вт} \\ \Delta P_{\text{meh}} + P_n &= P_n * \left(1 + \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \frac{1}{6} \right) = 65000 * \left(1 + \left(\frac{1}{0.965} - 1 \right) \frac{1}{6} \right) = 65878 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Активний опір статора R_s , [Ом] визначається за виразом (2.6)

$$R_s = \frac{1}{2} * \frac{U_n^2 * (1 - s_n)}{c_1 * \left(1 + \frac{c_1}{s_k} \right) * m_k * (\Delta P_{\text{meh}} + P_n)}. \quad (2.6)$$

де U_n — лінійна напруга, В.

$$R_s = \frac{1}{2} * \frac{U_n^2 * (1 - s_n)}{c_1 * \left(1 + \frac{c_1}{s_k}\right) * m_k * (\Delta P_{meh} + P_n)} =$$

$$= \frac{1}{2} * \frac{380^2 * (1 - 0.053)}{1.02018 * \left(1 + \frac{1.02018}{0.2}\right) * 2 * 65878} = 0.083, \text{ Ом}$$

Активний опір ротора R_r , [Ом] за виразом (2.7)

$$R_r = \frac{1}{3} * \frac{(\Delta P_{meh} + P_n) * m_k}{(1 - s_n) * i_p^2 * I_n^2}. \quad (2.7)$$

де I_n — номінальний струм, А;

i_p — коефіцієнт пускового струму.

$$R_r = \frac{1}{3} * \frac{(\Delta P_{meh} + P_n) * m_k}{(1 - s_n) * i_p^2 * I_n^2} = \frac{1}{3} * \frac{65878 * 2}{(1 - 0.053) * 6^2 * 170^2} = 0.055, \text{ Ом}$$

Індуктивність статора L_s , [Гн] за виразом (2.8), але з урахуванням

$$L_s = \frac{1}{2 * \pi * f_n} * \frac{U_n / \sqrt{3}}{I_n * \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_n)^2} - \cos \varphi_n * s_n / s_k\right)}. \quad (2.8)$$

де f_n — номінальна частота напруги живлення, Гц;

$\cos \varphi_n$ — коефіцієнт потужності АД за номінальним навантаженням, в.о.

$$L_s = \frac{1}{2 * \pi * f_n} * \frac{U_n / \sqrt{3}}{I_n * \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_n)^2} - \cos \varphi_n * \frac{s_n}{s_k}\right)} =$$

$$= \frac{1}{2 * 3.14 * 50} * \frac{380 / \sqrt{3}}{170 * \left(\sqrt{1 - (0.85)^2} - 0.85 * \frac{0.053}{0.2}\right)} =$$

$$= 0.02158, \text{ Гн}$$

Індуктивність розсіювання статора L_{ls} , [Гн] за виразом (2.9)

$$L_{ls} = \frac{1}{4 * \pi * f_n} * \sqrt{\left(\frac{U_n}{\sqrt{3}} / i_p * I_n\right)^2 - (R_s + R_r)^2} . \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} L_{ls} &= \frac{1}{2 * \pi * f_n} * \sqrt{\left(\frac{U_n}{\sqrt{3}} / i_p * I_n\right)^2 - (R_s + R_r)^2} = \\ &= \frac{1}{2 * 3.14 * 50} * \sqrt{\left(\frac{380}{\sqrt{3}} / 6 * 170\right)^2 - (0.083 + 0.055)^2} = \\ &= 0.000427 , \text{ Гн} \end{aligned}$$

Взаємо індукція L_m , [Гн] за виразом (2.10)

$$L_m = L_s - L_{ls} . \quad (2.10)$$

$$L_m = L_s - L_{ls} = 0.02158 - 0.000427 = 0.02115, \text{ Гн}$$

Конструктивний коефіцієнт c_1 , [в.о.] для попередніх розрахунків.

$$c_1 = 1 + \frac{L_{ls}}{L_m} . \quad (2.11)$$

$$c_1 = 1 + \frac{L_{ls}}{L_m} = 1 + \frac{0.000427}{0.02115} = 1.02018, \text{ в. о.}$$

Коефіцієнт електромагнітного зв'язку k_s , k_r , [в.о.] розрахуємо за формулами (2.12), за [7] ці коефіцієнти приблизно однакові.

$$k_s = \frac{L_m}{L_s} ; \quad (2.12)$$

$$k_r \approx k_s .$$

де k_s — Коефіцієнт електромагнітного зв'язку статора, в.о.;

k_r — Коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора, в.о.

$$k_r \approx k_s = \frac{L_m}{L_s} = \frac{0.02115}{0.02158} = 0.98 , \text{ в. о.}$$

За рівняннями (2.1) — (2.3) збирається структурна схема АД Рис. 2.1, та заповнюються блоки згідно попередніх обчислень у зібраній структурній схемі АД, завдяки якій можна проаналізувати роботу та перехідні процеси АД при зміні величини частоти питаючої напруги живлення.

Далі розраховуються параметри які знадобляться до розрахунків конвеєрної лінії, такі як кутова швидкість номінальна та зменшена за (2.23), критичний момент та момент короткого замикання за (2.24), жорсткість механічної характеристики за (2.25).

Синхронні швидкості кутові магнітного поля статора за (2.13)

$$\omega_s = 2 * \pi * f_n . \quad (2.13)$$

$$\omega_s = 2 * \pi * f_n = 2 * 3.14 * 50 = 314, \text{ рад/с.}$$

Кутові швидкості обертання ротора АД номінальна ω_n , [рад/с], та синхронна ω_0 , [рад/с], за (2.14)

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{\pi * n_0}{30}; \\ \omega_n &= \frac{\pi * n_n}{30}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

де ω_n — номінальна кутова швидкість, рад/с;

$$\omega_n = \frac{\pi * n_n}{30} = \frac{3.14 * 1420}{30} = 148.7 , \text{ рад/с;}$$

$$\omega_0 = \frac{\pi * n_0}{30} = \frac{3.14 * 1500}{30} = 157.1, \text{ рад/с.}$$

Номінальний момент задано завданням та розрахунку не підлягає $M_n = 435 \text{ [Н * м]}$, та критичний момент $M_k, \text{ [Н * м]}$, та момент короткого замикання (пусковий) $M_p, \text{ [Н * м]}$, розраховуються за (2.15) та приведеними у каталозі даними.

$$\begin{aligned} M_k &= M_n * m_k; \\ M_p &= M_n * m_p. \end{aligned} \quad (2.15)$$

де P_n — номінальна потужність АД, кВт;

n_n — номінальні оберти АД, об/хв;

m_p — кратність пускового моменту АД;

m_k — кратність критичного моменту АД.

$$M_k = M_n * m_k = 435 * 2 = 783, \text{ Н * м};$$

$$M_p = M_n * m_p = 435 * 1.8 = 870, \text{ Н * м.}$$

Жорсткість механічної характеристики за Клоссом яка використовується у лінійній моделі АД розрахуємо за (2.16)

$$\beta = \frac{2 * M_k}{\omega_0 * s_k}. \quad (2.16)$$

$$\beta = \frac{2 * M_k}{\omega_0 * s_k} = \frac{2 * 870}{157.1 * 0.2} = 55.5.$$

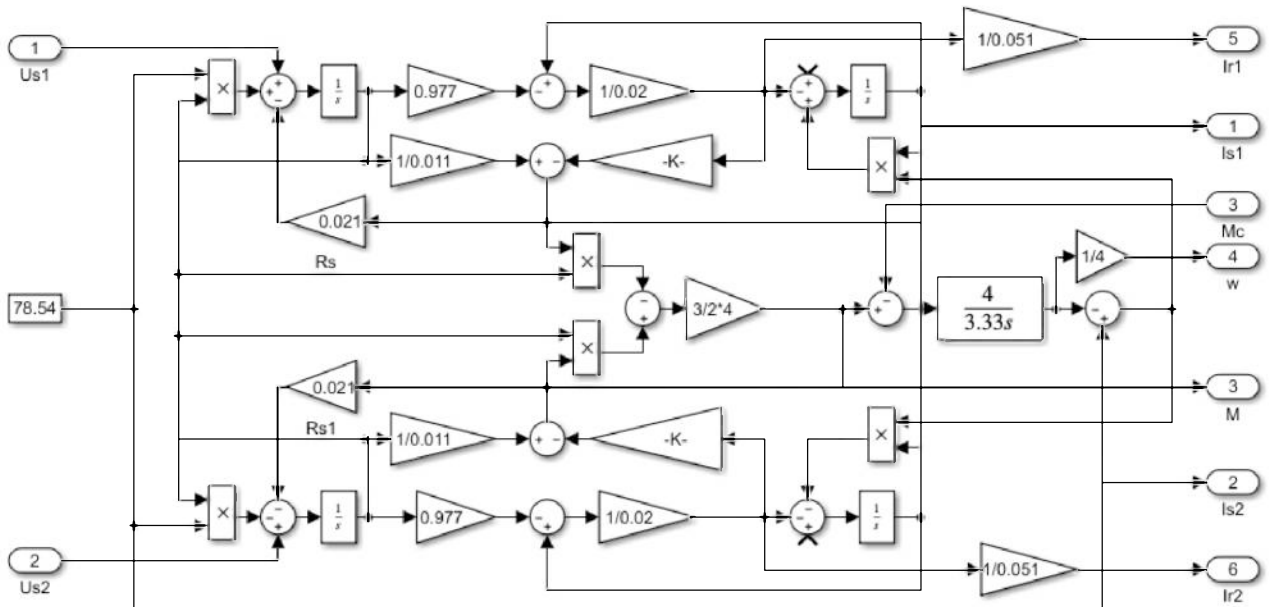


Рисунок 2.2 — Структурна схема АД

2.2 Розрахунок параметрів конвеєрної лінії

Задля того щоб визначити параметри приводу, та інші параметри конвеєру а також визначити розтягнення стрічки у різних точках лінії, необхідно провести розрахунок конвеєру одним з двох методів. За [1] приблизний спосіб розрахунку дозволяє визначити потужність приводу, завантаження натяжного пристрою. Розрахунки приблизним способом можуть виконуватися для різних режимів праці конвеєра, та його завантаження.

Розрахунковими режимами праці конвеєра є:

- пуск конвеєру з вантажем;
- усталений режим конвеєру з вантажем;
- пуск конвеєру без вантажа;

— усталений режим конвеєру без вантажа.

Розрахунок електроприводу конвеєрної лінії та інші розрахунки виконуються для усталеного режиму роботи завантаженого конвеєру. Необхідне розрахункове тягове зусилля P_v , [Н], на ободі привідного барабану (загальне зусилля опору руху стрічки) завантаженої конвеєрної лінії працюючого в усталеному режимі, розраховується за формулою (2.17), коефіцієнт опору руху стрічки по роликівим опорам обираються за «Додатком А»

$$P_v = K_D * L * w * (q_v + q_{rv} + q_{rn} + 2 * q_L) \quad (2.17)$$

де K_D — коефіцієнт додаткових опорів руху стрічки по роликам у місцях завантаження $K_D = 1.45$;

L — довжина конвеєру, м;

w — коефіцієнт опору руху стрічки по роликівим опорам;

q_v — погонне навантаження від маси транспортуємого вантажу, Н/м;

q_{rv} — погонне навантаження від маси обертаючихся частин роликівим опор верхньої гілки стрічки, Н/м;

q_{rn} — погонне навантаження від маси обертаючихся частин роликівим опор нижньої гілки стрічки, Н/м;

q_L — погонне навантаження від маси стрічки, Н/м.

Погонне навантаження від маси транспортуємого вантажу q_{vm} залежить від типу встановлених роликівим опор у моєму випадку використовуються жолобове розташування трьох роликів на опорі, з кутом нахилу роликів 20° , та ширини стрічки конвеєра тоді за [2] максимальне погонне навантаження від маси вантажу розраховується за формулою (2.18), але погонне навантаження від швидкості конвеєра $V=0.96$ [м/с] та масової продуктивності конвеєра $Q = 60$ [т/г] розраховується за формулою (2.19) та буде використовуватися як

номінальна. З урахуванням того що продуктивності конвеєра більшість часу складає $Q = 30$ [т/г] можна припустити що швидкість конвеєрної лінії можна скоротити у двічі та за ГОСТ 22664–77 є певний ряд стандартних швидкостей.

$$q_{vm} = B^2 * (0.15 * B^2 * \operatorname{tg}(0.35\varphi) + 0.144) * \gamma_g \quad (2.18)$$

де B — ширина стрічки, м;

γ_g — насипна щільність вантажу, кг/м³;

φ — кут вільного положення вантажу поперек стрічки.

$$\begin{aligned} q_{vm} &= B^2 * (0.15 * B^2 * \operatorname{tg}(0.35\varphi) + 0.144) * \gamma_g * g = \\ &= 1^2 * (0.15 * 1^2 * \operatorname{tg}(0.35 * 15) + 0.144) * 1290 * 9.81 = \\ &= 680.62 \text{ Н} \end{aligned}$$

Погонне навантаження за максимальним вмістом вантажу на стрічці після перетворення формули (2.19) у (2.20) для визначення мінімальної швидкості конвеєрної лінії дуже мала. Це може привести до того що обертів двигуна не буде вистачати для охолодження тому треба буде доукомплектувати вентилятором принадного обдув.

$$q_v = \frac{Q * g}{3.6 * V} \quad (2.19)$$

де Q — масова продуктивність конвеєра, т/г;

V — швидкість конвеєрної лінії, м/с.

$$q_v = \frac{Q * g}{3.6 * V} = \frac{60 * 9.81}{3.6 * 0.96} = 170.3 \text{ Н/м}$$

$$V_{\min} = \frac{Q}{3.6 * q_{vm}} \quad (2.20)$$

$$V_{\min} = \frac{Q}{3.6 * q_{vm}} = \frac{60}{3.6 * 680} = 0.024, \text{ м/с.}$$

Погонне навантаження від маси обертаючихся частин роликів опор верхньої гілки стрічки розраховується за формулою (2.21), значення маси обертових частин ролик-опор, та відстані між ролик-опорами (крок ролик-опор) обираються за додатком Б.

$$q_{rv} = \frac{m_{rv} * g}{l_{rv}} \quad (2.21)$$

де m_{rv} — маси обертових частин ролик-опор верхньої гілки стрічки, кг;

l_{rv} — відстані між ролик-опорами верхньої гілки стрічки (крок ролик-опор), м;

$g = 9.81$ — прискорення вільного падіння, м/с².

$$q_{rv} = \frac{m_{rv} * g}{l_{rv}} = \frac{20.7 * 9.81}{1.2} = 169.22 \text{ Н/м}$$

Погонне навантаження від маси обертаючихся частин роликів опор нижньої гілки стрічки розраховується за формулою (2.22)

$$q_{rn} = \frac{m_{rn} * g}{l_{rn}} \quad (2.22)$$

де m_{rn} — маси обертових частин ролик-опор верхньої верхньої гілки стрічки, кг;

l_{rn} — відстані між ролик-опорами верхньої гілки стрічки (крок ролик-опор), м;

$$q_{rn} = \frac{m_{rn} * g}{l_{rn}} = \frac{21.5 * 9.81}{3} = 70.3 \text{ Н/м}$$

2.3 Розрахунок стрічки

Погонне навантаження від маси стрічки q_l , [Н/м] обертається за шириною конвейерної стрічки яка становить 1000 [мм], товщина конвейерної стрічки становить 15 [мм]. Мною було взято зразок стрічки площиною 0.01 [м²] та за допомогою аналітичних ваг визначено вагу зразка яка склала 174 [г], звідки визначено щільність матеріалу яка дорівнює 1200 [кг/м³] погонна вага якої становить $m_l = 18$ [кг], та за формулою (2.23) визначимо погонне навантаження від маси стрічки.

$$q_l = m_l * g \quad (2.23)$$

де m_l — погонна вага конвеєрної стрічки, кг.

$$q_l = m_l * g = 18 * 9.81 = 176.58 \text{ Н/м}$$

Номінальне розрахункове тягове зусилля на привідному барабані P_v , [Н] — за урахуванням завантаженої конвеєрної лінії розрахуємо за формулою (2.1), та P_x , [Н] — розрахункове тягове зусилля конвеєрної лінії без урахування вантажу на стрічці конвеєрної лінії за формулами (2.24), та P_m , [Н] — максимальне тягове зусилля на привідному барабані яке можна розвинути за зменшенням швидкості конвеєрної стрічки в наслідок чого відбудеться максимальне завантаження погонного метра.

$$\begin{aligned} P_x &= K_D * L * w * (q_{rv} + q_{rn} + 2 * q_L), \\ P_m &= K_D * L * w * (q_{rm} + q_{rn} + 2 * q_L). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Розрахунки виразив (2.17) та (2.24)

$$\begin{aligned}
 P_v &= K_D * L * w * (q_v + q_{rv} + q_{rn} + 2 * q_L) = \\
 &= 1.45 * 200 * 0.06 * (172.3 + 169.22 + 70.3 + 2 * 176.58) = \\
 &= 13.28 \text{ kH};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_x &= K_D * L * w * (q_{rv} + q_{rn} + 2 * q_L) = \\
 &= 1.45 * 200 * 0.04 * (169.22 + 70.3 + 2 * 176.58) = 10.31 \text{ kH}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_m &= K_D * L * w * (q_{rm} + q_{rn} + 2 * q_L) = \\
 &= 1.45 * 200 * 0.04 * (680.62 + 70.3 + 2 * 176.58) = 22.16 \text{ kH}.
 \end{aligned}$$

Стрічка конвеєрної лінії має властивості пружності, еластичності та інерційності завдяки чому конвеєрна стрічка може витримати великі навантаження на розрив критичне зусилля [2]. За формулами (2.25) розраховується приведений момент інерції до валу двигуна J_r , [Н/м²] для робочої (верхня завантажена) ділянка конвеєрної лінії, та момент інерції J_x , [Н/м²] для холостої (нижньої не завантаженої) ділянка конвеєрної лінії. які будуть враховані до блоків моделі конвеєрної стрічки.

$$\begin{aligned}
 J_r &= L * (q_v + q_{rv} + q_L) * \frac{V^2}{\omega_n^2}; \\
 J_x &= L * (q_{rn} + q_L) * \frac{V^2}{\omega_n^2}.
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

де ω_n — номінальна кутова швидкість АД

$$\begin{aligned}
 J_r &= L * (q_v + q_{rv} + q_L) * \frac{V^2}{\omega_n^2} = 200 * (170.3 + 169.22 + 176.58) * \frac{1.96^2}{78.54^2} = \\
 &= 14.9, \text{ Н/м}^2;
 \end{aligned}$$

$$J_x = L * (q_{rn} + q_L) * \frac{V^2}{\omega_n^2} = 200 * (70.3 + 176.58) * 1.96^2 / 78.54^2 = 8.5, \text{ Н/м}^2.$$

За модулем пружності визначається, необхідний у моделюванні конвеєрної стрічки, а саме поведінки стрічки при наданні їй тягового зусилля від привідного барабану, коефіцієнт пружності k_p , за (2.26)

$$k_p = \frac{E * Sl}{L}. \quad (2.26)$$

де E — модуль пружності, Па;

Sl — площа поперечного січення, m^2 ;

$$k_p = \frac{E * Sl}{L} = \frac{8 * 10^8 * 0.015}{200} = 6 * 10^4.$$

2.4 Розрахунок параметрів привідного барабана

На конвеєрі встановлено привідний барабан типу 10050G-80, за каталожними даними розраховано такі параметри як момент інерції привідного барабану, обертовий момент та оберти привідного барабану.

Так як в момент пуску конвеєрної лінії момент на приводному барабані максимальний, тому з урахуванням динамічного навантаження визначається момент на валу приводного барабана за формулами (2.26) як момент при пуску завантаженої стрічки, який надалі буде використовуватися як момент опору M_{max} [Н/м], та момент при пуску стрічки без вантажу, який надалі буде використовуватися як момент опору M_{min} [Н/м] конвеєрної лінії.

$$M_{max} = \frac{P_m * D_b}{2};$$

$$M_{min} = \frac{P_x * D_b}{2}. \quad (2.26)$$

де M_b — крутний момент на валу барабан, Н/м;

D_b — діаметр барабана, м.

$$M_{\max} = \frac{P_m * D_b}{2} = \frac{22.16 * 0.5}{2} = 5.54 \text{ кН} * \text{м},$$

$$M_{\min} = \frac{P_x * D_b}{2} = \frac{10.31 * 0.5}{2} = 2.58 \text{ кН} * \text{м}.$$

Знаючи що привідний барабан полий у середині його форму, знехтуючи масою торцевих стінок, можна привести до полого циліндру на за формулою (2.27) можна розрахувати момент інерції привідного барабану

$$J_b = m_b * R_b^2. \quad (2.27)$$

де m_b — маса привідного барабана, кг,

R_b — радіус привідного барабана, м.

Користуючись "додатком В" розраховується момент інерції привідного барабану

$$J_b = m_b * R_b^2 = 285 * 0.25^2 = 17.81 \text{ кг} * \text{м}^2.$$

Знаючи швидкість конвеєрної лінії та радіус привідного барабана розрахую оберти привідного барабану за формулою (2.28)

$$n_b = \frac{60 * V}{\pi * 2 * R_b} \quad (2.28)$$

$$n_b = \frac{60 * V}{\pi * 2 * R_b} = \frac{60 * 1.96}{\pi * 2 * 0.25} = 74.8 \text{ об/хв}.$$

Також розраховуються оберти барабана за мінімальною швидкістю конвеєрної лінії розрахованою у попередньому розділі.

$$n_{b\min} = \frac{60 * V_{\min}}{\pi * 2 * R_b} = \frac{60 * 0.024}{\pi * 2 * 0.25} = 0.93 \text{ об/хв}.$$

Враховуючи що передатний коефіцієнт редуктора дорівнює 20 розраховується за формулою (2.29) обертовий момент створений АД враховуючи коефіцієнт редуктора на валу привідного барабана.

$$M_{rb} = \frac{9550 * i_r * P_n}{n_n} \quad (2.29)$$

де i_r — передатний коефіцієнт редуктора;

P_n — номінальна потужність двигуна, кВт.

$$M_{rb} = \frac{9550 * i_r * P_n}{n_n} = \frac{9550 * 20 * 65}{1420} = 8.5 \text{ кН} * \text{м}$$

Отже враховуючи рівність (2.30) отримаємо впевнену працю конвеєрної лінії на різних швидкостях з урахуванням мінімальної та максимальної швидкості конвеєрної стрічки.

$$M_{rb} \gg M_{max} \quad (2.30)$$

$$M_{rb} \gg M_{max}; \quad 8.5 \gg 5.54 \text{ кН} * \text{м}$$

Також за урахуванням редуктора розраховується швидкість яка повинна бути розвинена двигуном за (2.31)

$$n_{ad} = i_r * n_b. \quad (2.31)$$

$$n_{ad.min} = i_r * n_{bmin} = 20 * 0.93 = 19 \text{ об/хв.}$$

3 АНАЛІЗ І СИНТЕЗ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Загальні відомості

У нинішній час застосовуються два основних типи САК (систем автоматичного керування) електроприводами це системи з загальним суматором ,та системи підпорядкованого керування.

Сутність роботи САК із загальним суматором полягає у тому, що всі зворотні сигнали зворотного зв'язку алгебраїчно складаються із сигналом завдання у суматорі, таким чином при введенні зворотного зв'язку за швидкістю, за струмом, і т.п. усі напруги від кожного з них підсумовуються в одному вузлу та корегують роботу всієї системи.

Робота структурної схеми системи підпорядкованого керування полягає в тому що об'єкт керування поділяється на декілька підсистем, розташованих послідовно з одного в другий контури керування, де вихідний сигнал попереднього контуру керування є завданням для наступного контуру керування, а сигнал зворотного зв'язку подається безпосередньо до свого блоку регулювання. За такою структурною схемою побудовано багато систем керування електроприводами технологічного обладнання. Най частіше застосовується двоконтурна система підпорядкованого керування із зворотними зв'язками за швидкістю та струмом які на практиці дуже легко реалізувати.

У ролі регулятора як струму так і швидкості найчастіше використовують пропорційно-інтегральний ПІ-регулятор або пропорційно-інтегрально диферинційний ПІД-регулятор використання яких є дуже ефективним. на даний час існує безліч програмного забезпечення для розрахунку тих чи інших регуляторів, від онлайн ресурсів до стаціонарного ПЗ яке йде додатком до встановленого обладнання. У системі підпорядкованого керування використовується обмеження вихідного сигналу регулятора необхідним рівнем . У результаті чого при зростанні напруги вхідного сигналу вище заданого ліміту вихідний сигнал не змінюється.

Було обрано систему автоматичного керування електроприводу конвеєрної лінії на основі системи з підпорядкованого керування, та регулюючими ланками за швидкістю і струмом статора.

3.2 Загальні розрахунки

Напишемо рівняння для кутової швидкості та струму статора (3.1)

$$\begin{aligned}\omega(p) &= \frac{k_d}{T(p)} * N(p) - \frac{k_m * (1 + T_m p)}{T(p)} * M_o(p), \\ i(p) &= \frac{T_m p}{R_e * T(p)} * N(p) + \frac{k_d}{T(p)} * M_o(p).\end{aligned}\tag{3.1}$$

де $N(p)$ — Напруга на виході силового перетворювача, В;

$T(p)$ — Аперіодична ланка другого порядку;

$U_z(p)$ — Напруга сигналу надавача, В;

$k_d = 0.002$ — Конструктивний коефіцієнт двигуна;

k_m — Коефіцієнт моменту;

k_s — Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;

k_c — Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;

k_p — Коефіцієнт силового перетворювача;

τ — Стала часу силового перетворювача, с;

k_{ref} — Коефіцієнт підсилення надавача.

За формулами (3.2) розраховуються коефіцієнти, та інші складові рівнянь (3.1)

$$\begin{aligned}
 k_m &= \sqrt{\frac{2}{3}} * \frac{M_n}{I_n}; \\
 k_s &= \frac{U_{z.max}}{\omega_{se}}; \\
 k_c &= \frac{U_{z.max}}{I_n * 1.5}; \\
 T_e &= \frac{1}{s_k * \omega_{se}}.
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

де T_e — Електрична стала часу електроприводу, с;

ω_{se} — Кутова швидкість синхронна магнітного поля статора, рад/с;

$U_{z.max} = 10$ — Напруга надавача сигналу максимальна, В;

M_n — Номінальний момент двигуна, Н/м;

I_n — Номінальний струм статора, А.

Розрахунки параметрів які пов'язані з АД розраховуються за (3.3)

$$\begin{aligned}
 T_{em} &= \frac{J * \omega_s}{M_n * m_p}; \\
 T_{ee} &= \frac{L_e}{R_e}.
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

де R_e — приведений активний опір двигуна;

L_e — приведена індуктивність двигуна.

Для знаходження приведених опору та індуктивності за (3.4)

$$\begin{aligned}
 R_e &= 2 * (R_r + R_s) + \frac{p}{2 * \pi} * (X_r + X_s); \\
 L_e &= 2 * (L_r + L_s).
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

де R_r — активний опір ротора, Ом;

R_s — активний опір статора, Ом;

X_r — індуктивний опір ротора, Ом;

X_s — індуктивний опір статора, Ом;

L_r — індуктивність ротора, Гн;

L_s — індуктивність ротора, Гн;

p — кількість полюсів статора.

При розрахунку електромеханічної сталої часу T_{em} використовується кутова швидкість ідеального холостого ходу.

$$L_e = 2 * (L_r + L_s) = 2 * (0.01 + 0.0108) = 0.0416;$$

$$R_e = 2 * (R_r + R_s) + \frac{p}{2 * \pi} * (X_r + X_s) =$$

$$= 2 * (0.046 + 0.024) + \frac{4}{2 * 3.14} * (0.14 + 0.13) = 2.5;$$

$$T_{em} = \frac{J * \omega_s}{M_n} = \frac{3.33 * 78.54}{783} = 0.334;$$

$$T_{ee} = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0.0416}{0.312} = 0.133;$$

$$k_c = \frac{U_{z.max}}{I_n * 1.5} = \frac{10}{170} = 0.058;$$

$$k_s = \frac{U_{z.max}}{\omega_s} = \frac{10}{78.54} = 0.127;$$

$$k_m = \sqrt{\frac{2}{3}} * \frac{M_n}{I_n} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \frac{435}{170} = 2.09;$$

$$T_e = \frac{1}{s_k * \omega_{se}} = \frac{1}{0.05 * 314} = 0.064.$$

3.3 Синтез регулятора струму

У контурі регулювання струмом завжди мається запізнювання, обумовлене інерційністю силової частини управляючого випрямляча, інерційністю обмоток статора, аналогових елементів контуру та датчика струму в колі зворотного зв'язку по струму.

У якості великої постійної часу в контурі струму обирається електромагнітна постійна часу T_e електродвигуна яку потрібно компенсувати. Оскільки регулювання струму повинно бути виконане з обмеженням, та у випадку наявності інерційних ланок, регулятор повинен мати інтегруючі властивості, та для компенсації великої інерційності контуру з допомогою інтегрального регулятора, регулятору необхідно додатково мати пропорційні властивості.

Передавальну функцію розімкненої по контуру зі зворотною ланкою контуру струму, приведемо до функції об'єкту струму $W_{обс}(p)$ у вигляді (3.5)

$$W_{обс}(p) = K_{оз.с} * \frac{K_{ад}}{T_e p + 1} * \frac{K_{p4}}{T_{\mu c} p + 1}. \quad (3.5)$$

де $T_{\mu c}$ — сума усіх врахованих малих постійних часу контуру струму;

$K_{оз.с}$ — коефіцієнт негативного зворотного зв'язку за струмом;

$K_{ад}$ — коефіцієнт жорсткості механічної характеристики АД;

K_{p4} — коефіцієнт підсилення перетворювача частоти.

На рисунку 3.1 зображена схема контуру регулювання за струмом яку сформовану для розрахунку.

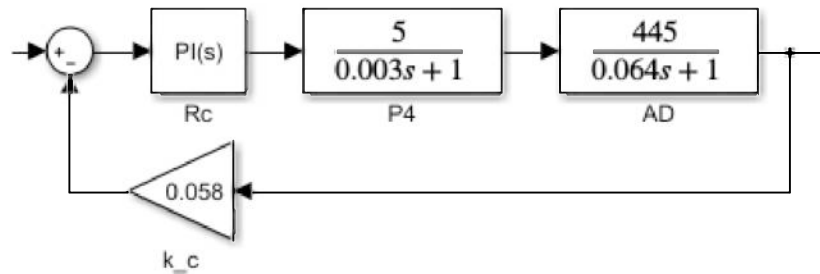


Рисунок 3.1 Контур регулятора струму

Для подальших розрахунків візьмемо найбільшу постійну часу, у даному контурі це електромагнітна постійна двигуна. Щоб компенсувати велику постійну часу візьмем постійну інтегрування регулятора за рівнянням (3.6)

$$t_u = T_e. \quad (3.6)$$

Цей вираз є першим визначальним рівнянням синтезу ПІ регулятора. При приведенні функції до виразу послідовної корекції функція контуру регулювання матиме вираз (3.7)

$$W_{rs}(p) = \frac{W_c(p)}{W_{obc}(p)}. \quad (3.7)$$

Оскільки функція налаштованого на оптимумом за модулем розімкненого контуру струму (3.8)

$$W_c(p) = \frac{1}{2 * T_\mu * s * (T_\mu * s + 1)}. \quad (3.8)$$

Підставивши рівняння (3.8) до виразу (3.7) приводить вираз передатної функції розімкненого контуру струму до наступного рівняння (3.9)

$$\begin{aligned}
W_{rc}(p) &= \frac{W_c(p)}{W_{obc}(p)} = K_{rc} * \frac{t_u p + 1}{t_u p} = \frac{\frac{1}{2 * T_{\mu c} * s * (T_{\mu c} * s + 1)}}{K_{oz.c} * \frac{K_{ad}}{T_e * s + 1} * \frac{K_{p4}}{T_{\mu c} * s + 1}} \\
&= \frac{(T_e * s + 1) * (T_{\mu c} * s + 1)}{2 * T_{\mu c} * s * (T_{\mu c} * s + 1) * K_{oz.c} * K_{ad} * K_{p4}} = \\
&= \frac{(T_e * s + 1)}{2 * T_{\mu c} * s * K_{oz.c} * K_{ad} * K_{p4}}.
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Перепишучи рівняння виділімо K_{rc} коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора за виразом (3.10)

$$K_{rc} = \frac{t_u}{2 * T_{\mu c} * s * K_{oz.c} * K_{ad} * K_{p4}}. \tag{3.10}$$

$$K_{rc} = \frac{t_u}{2 * T_{\mu c} * K_{oz.c} * K_{ad} * K_{p4}} = \frac{0.133}{2 * 0.003 * 0.058 * 445 * 5} = 0.01$$

За даними розрахунками налаштовується блок ПІ-регулятора у програмі Simulink як зображено на рис. 3.2

Після оптимізації розімкненого контуру струму за модульним оптимумом(3.9) перерахування виконуються за еквівалентною коливальною ланкою для замкненого кола (3.11) та записуються у вигляді (3.12)

$$W_{rcz}(p) = \frac{1}{2 * T_{\mu c} s * (T_{\mu c} s + 1)}. \tag{3.11}$$

$$W_{rcz}(p) = \frac{1/K_{oz.c}}{(\sqrt{2} * T_{\mu c})^2 s^2 + 2 * 0,707 * \sqrt{2} T_{\mu c} s + 1}. \tag{3.12}$$

Після низки перетворювань маємо функцію замкненого контуру струму яка надалі буде використовуватися у розрахунку контуру швидкості.

$$W_{rcz}(p) = \frac{1/K_{oz.c}}{(\sqrt{2} * T_{\mu c})^2 s^2 + 2 * 0,707 * \sqrt{2} T_{\mu c} s + 1} =$$

$$= \frac{1/0,059}{(\sqrt{2} * T_{\mu c})^2 s^2 + 2 * 0,707 * \sqrt{2} T_{\mu c} s + 1}$$

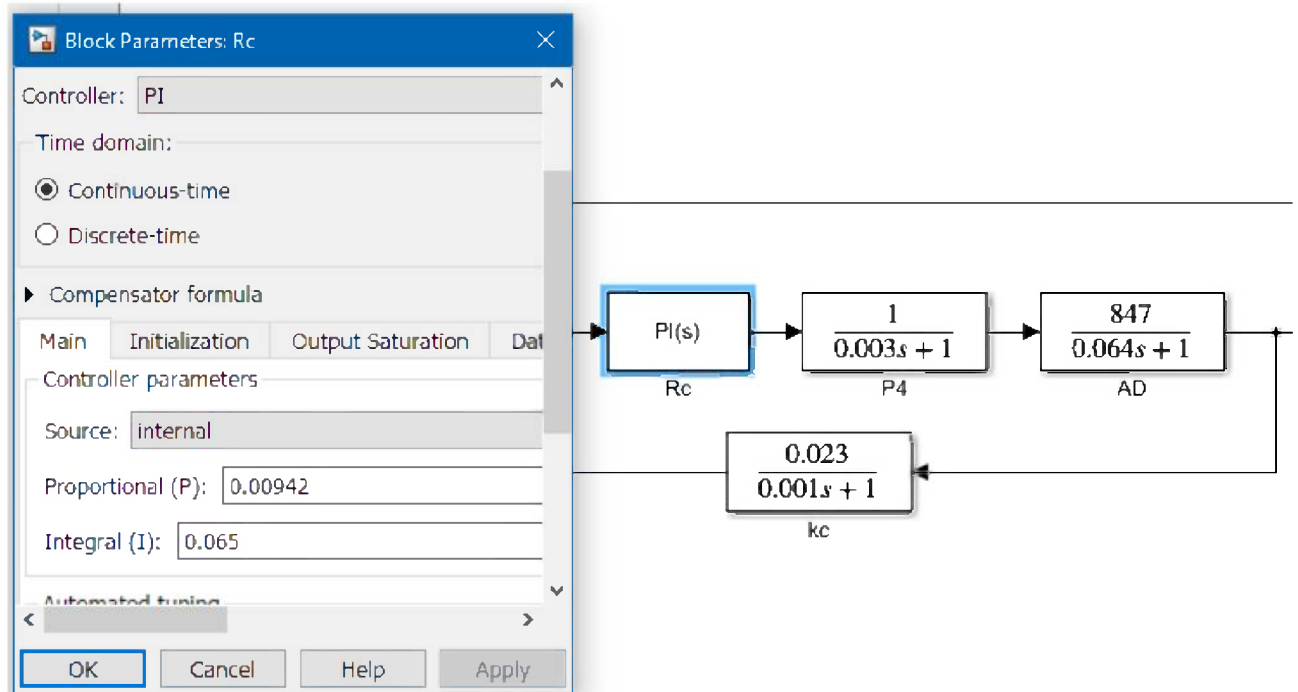


Рисунок 3.2 Параметри блоку ПІ-регулятора струму

Для даної перехідної функції при стрибок образного завдання вхідної величини матиме вид заданий функцією (3.11)

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{2T_{\mu}}} \left(\cos \frac{t}{2T_{\mu}} + \sin \frac{t}{2T_{\mu}} \right). \quad (3.11)$$

За допомогою програмного розширення Simulink в якому є додаток PID-Tuner, за яким можна налаштувати ПІ-регулятори у автоматичному режимі ми бачимо на рис.3.3 вікно цієї програми. У якій мною було перевірено

налаштування контуру регулювання струму. На графіку показані два сигнали Block response вказаний пунктирною лінією який вказує на роботу налаштувань які розраховані мною. Tuned response розраховані дані функції автоматично програмою PID-Tuner.

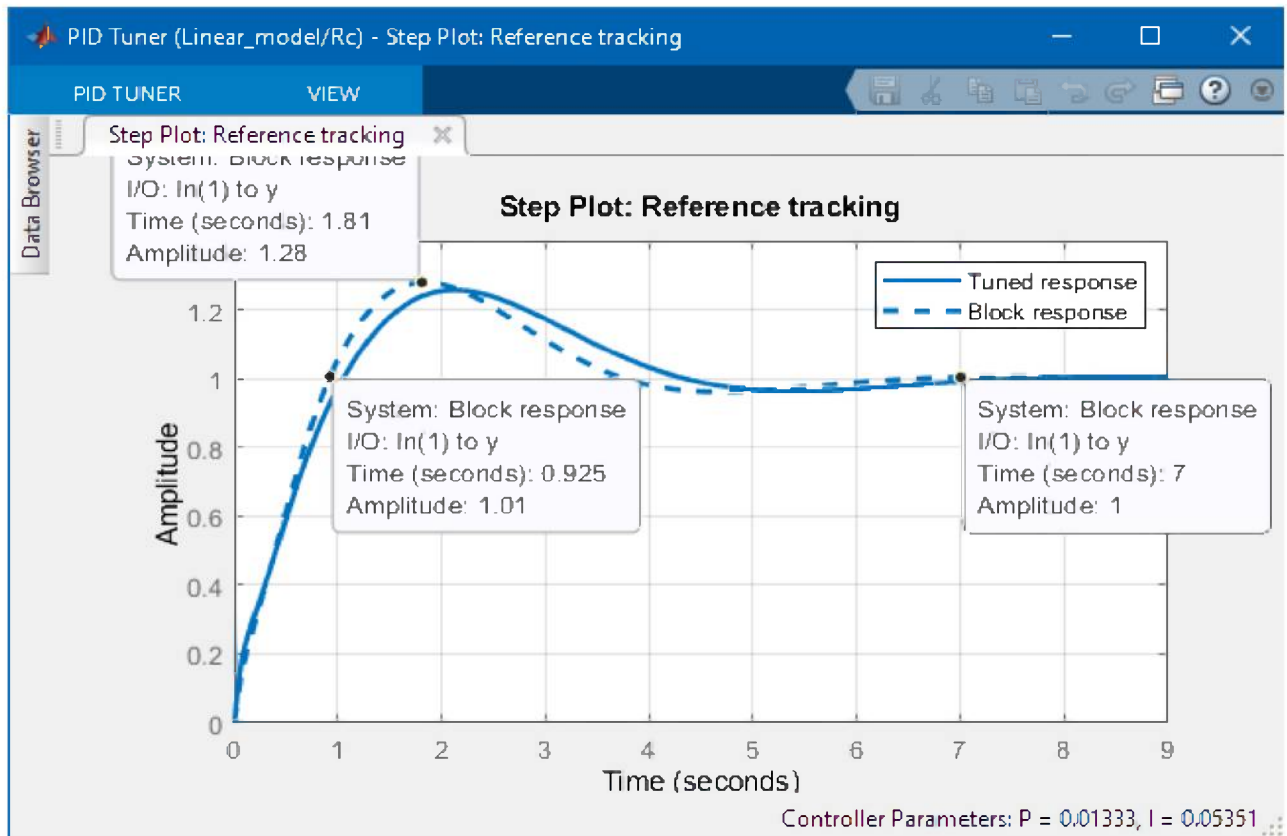


Рисунок 3.3 Графік ПІД тюнера

Як можна побачити з графіку розрахунки незначно відрізняються від автоматично розрахованих програмою PID-Tuner. На графіку позначені такі точки як: час першого узгодження $t_u = 0.925$ с, час регулювання $t_r = 7$ с, та пик амплітуди за яким видно що максимальне відхилення від устояного режиму складає 28%.

3.4 Синтез регулятора швидкості

За своєю структурою внутрішній блок регулювання струмом системи підпорядкованого керування для оптимізації за модульним оптимумом буде апроксимірован інерційною ланкою (3.14) для подальшого процесу оптимізації ланки регулювання швидкістю [10] з інерційністю ланки, за таким припущенням контур регулювання швидкістю буде мати наступну структурну схему Рис. 3.2. Тоді у співвідношенні з порядком оптимізації контуру за модульним оптимумом в разі наявності інтегруючої складової з великим значенням постійної часу, вибереться пропорційний регулятор швидкості. Передатна функція розімкненого контуру якої має вираз (3.15).

$$W_{rc}(p) = \frac{1}{2 * T_{\mu c} p + 1}. \quad (3.14)$$

Але система підпорядкованого керування з П регулятором швидкості є однократно інтегруючою, та вона обов'язково має статичну похибку $\Delta\omega$ на вході регулятора за наданні навантаження – обурення. У випадку коли за технологічними умовами присутність похибки за обуренням не допустиме, отже треба прийняти двократно інтегруючу систему.

$$W_{rs}(p) = K_{rs} * K_{obs} * \frac{1}{T_{em} * p} * \frac{1}{T_{\mu s} * p + 1}. \quad (3.15)$$

де K_{rs} — коефіцієнт пропорційного підсилення регулятора швидкості;

$T_{\mu s}$ — сума усіх врахованих малих постійних часу контуру швидкості;

K_{obs} — коефіцієнт передачі об'єкта регулювання з інерційністю.

Тоді для виключення статичної похибки будемо використовувати пропорційне інтегральний регулятор швидкості, та оптимізацію контуру

регулювання необхідно виконати за симетричним оптимумом [10]. Сформована схема зазначена на рис.3.4

Тоді пропорційне інтегральний регулятор швидкості має передатну функцію (3.16)

$$W_{rs}(p) = K_{rs} * \frac{1 + t_s * p}{t_s * p}. \quad (3.16)$$

де t_s — постійна інтегрування регулятора швидкості.

Рівняння (3.17) перехідної функції розімкненого контуру швидкості не може бути скомпенсованою.

$$W_{rs}(p) = K_{rs} * \frac{1 + t_s * p}{t_s * p} * K_{obs} * \frac{1}{T_{em} * p} * \frac{1}{T_{\mu s} * p + 1}. \quad (3.17)$$

Характеристичне рівняння (3.18) поліном знаменника має усі члени з множиною від p^0 по p^3 в наслідок чого маємо можливість забезпечити затухання перехідного процесу за синтезом регулятора схема якого вказана на Рис. 3.4

$$\begin{aligned} W_{ps}(p) &= \frac{W_{ps}(p)}{W_{ps}(p) + 1} = \\ &= \frac{K_{rs} * K_{obs} * (1 + t_s)}{K_{rs} * K_{obs} + K_{rc} * K_{obc} * t_s p + T_{em} * t_s * T_{\mu s} p^3}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Рівняння (3.18) має типову форму (3.19) за яким можна розрахувати умови оптимізації для такого типу (3.20)

$$W_s(p) = \frac{b_1 + b_0 * p}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3}. \quad (3.19)$$

Визначені умови оптимізації.

$$\begin{aligned} a_2^2 &= 2 * a_3 * a_1; \\ a_1^2 &= 2 * a_2 * a_0. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Підставимо до умов оптимізації (3.20) значення коефіцієнтів рівняння (3.19) отримаємо рівняння (3.21)

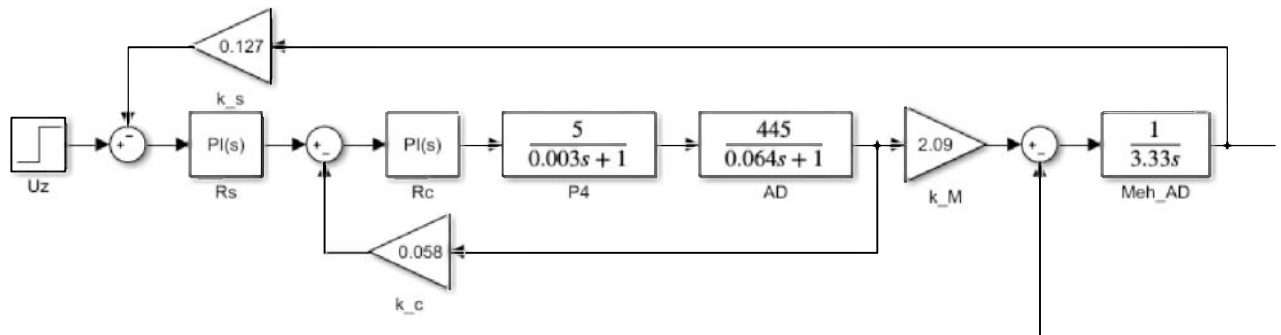


Рисунок 3.4 — Схема контуру регулювання швидкості

$$\begin{aligned} a_0 &= T_{em} * t_s * T_{\mu s}; \\ a_1 &= T_{em} * t_s; \\ a_2 &= K_{rc} * K_{obs} * t_s; \\ a_3 &= K_{rc} * K_{obs}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Та остаточно сформовано вигляд (3.22)

$$\begin{aligned} K_{rs} &= \frac{T_{em}}{2 * T_{\mu s} * K_{obs}}; \\ t_s &= 4 * T_{\mu s}; \\ K_{obs} &= K_{rc} + k_m + K_p + K_{ad}; \\ T_{\mu s} &= T_p + T_{rs}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Обрав параметри оптимальні по критерію симетричного оптимуму приведемо їх до стандартній передатної функції (3.23)

$$W_{ps}(p) = \frac{4 * T_{\mu s} * p + 1}{1 + 4 * T_{\mu s} * p + 8 * T_{\mu s}^2 * p^2 + 8 * T_{\mu s}^3 * p^3}. \quad (3.23)$$

Як можна побачити з аналізу рівняння (3.23), динаміка властивостей ланки регулювання не залежить від параметрів об'єкта керування, та загалом залежать від суми малих постійних часу які входять до контуру регулювання швидкістю.

$$T_{\mu s} = T_p + T_{rs} = 2 * 0.003 + 0.058 = 0.064;$$

$$t_s = 4 * T_{\mu s} = 4 * 0.064 = 0.256;$$

$$K_{obs} = K_{rc} * k_m * K_p * K_{ad} = 0.127 * 2.09 * 5 * 435 = 442.2;$$

$$K_{rs} = \frac{T_{em}}{2 * T_{\mu s} * K_{obs}} = \frac{0.334}{2 * 0.064 * 442.2} = 0.006;$$

$$\begin{aligned} W_{ps}(p) &= \frac{4 * T_{\mu s} * p + 1}{1 + 4 * T_{\mu s} * p + 8 * T_{\mu s}^2 * p^2 + 8 * T_{\mu s}^3 * p^3} = \\ &= \frac{0.256 * p + 1}{1 + 0.256 * p + 8 * 0.064^2 * p^2 + 8 * 0.064^3 * p^3} = \\ &= \frac{0.256p + 1}{1 + 0.256p + 0.04p^2 + 0.0028p^3}. \end{aligned}$$

Після розрахунків сформовано блок Transfer Fcn з назвою Rs у якості регулятора швидкості та занесені дані виразу (3.23), якій наведено на рис.3.5

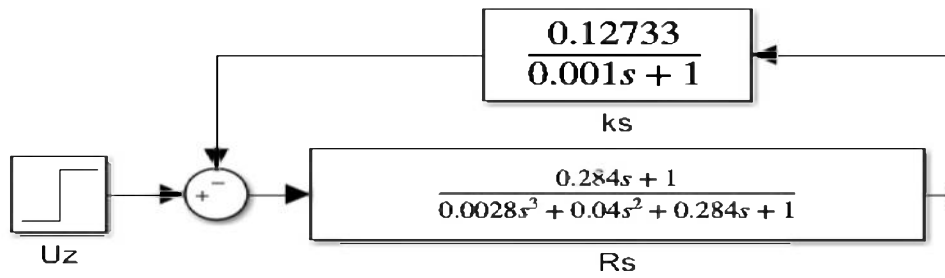


Рисунок 3.5 — Заповнений блок регулятора швидкості Rs

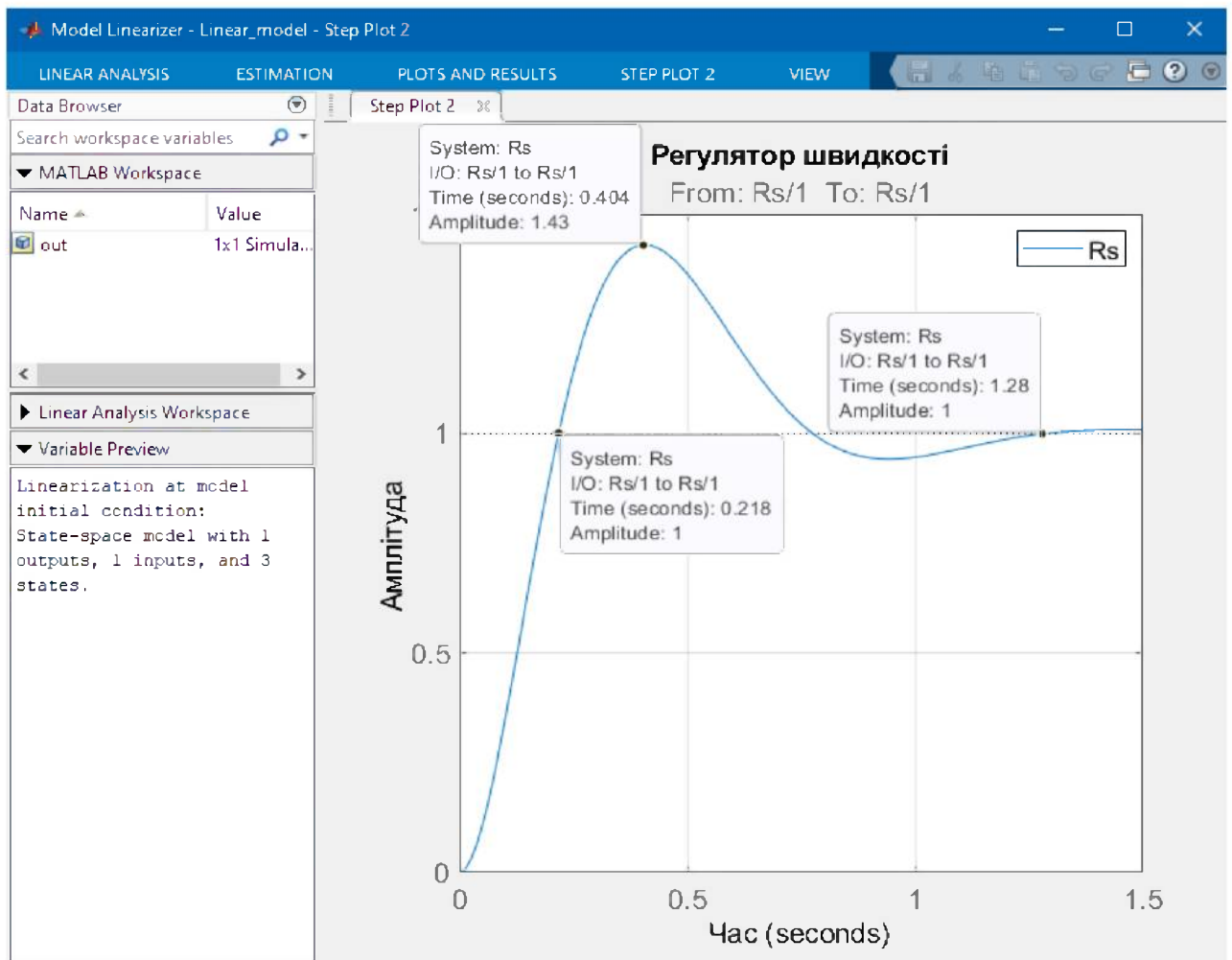


Рисунок 3.6 Характеристика блока регулятора швидкості.

За допомогою програмного розширення Simulink яке має широкий спектр програм додатків окрім додатка PID-Tuner за допомогою якого було порівняно розрахунки регулятора струму, є також додаток Model Linearizer рис. 3.6 за допомогою якого я проаналізую роботу блоку Rs регулятор швидкості. По вказаним на графіку точках можна побачити час першого узгодження $t_u = 0.218$ с, час регулювання $t_r = 1.28$ с, та пик амплітуди за яким видно що максимальне відхилення від устояного режиму складає 43%.

4 РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НА БАЗІ САПР.

Асинхронний ЕП зі скалярним частотним управлінням використовується для механізмів середньої та малої потужності, які не потребують глибокого регулювання швидкості (найчастіше діапазон регулювання обмежений показником 10:1) та завішених якості перехідних процесів. Частотне керування полягає у забезпеченні потрібних характеристик системи ЕП шляхом відповідних співвідношень між амплітудою та частотою напруги, яка прикладається до статорних обмоток АД. Це співвідношення повинне виконуватися у будь-який момент роботи ЕП, і має назву закон частотного керування, яких є декілька Таблиця 4.1. При частотному керуванні використовується АД з короткозамкненим ротором, тому напругою у роторному колі можна знехтувати тобто дорівнює нулю.

За описаними вище моделюванням регуляторів було створено лінійну модель керування електроприводом конвеєрної лінії яка вказана на Рис.4.1 яку умовно можна поділити на декілька блоків перша частина складається з надавача сигналу U_z , далі йдуть блок регулювання швидкості та зворотній зв'язок за швидкістю (датчик швидкості), далі блок регулювання струмом ,та зворотній зв'язок за струмом (датчик струму) далі блок перетворювача частоти, далі блоки АД електрична та механічна частини на цьому перша частина "електрична" закінчена та починається друга частина "механічна". Яка починається з таких блоків як інтегратор для створення кутового переміщення у блоці Clearance для формування параметру зазор у редукторі, блок Gear_Clearance перетворює кут переміщення у кутову швидкість згідно з теорією електроприводу [9], далі блок Reduction_Gear формує передаточну ланку редуктора, який переходить до наступного блоку який характеризує роботу конвеєрної стрічки за властивостями пружності, далі йде блок привідного барабана в якому враховується інерційна маса барабана та конвеєрної стрічки робочої (верхньої)

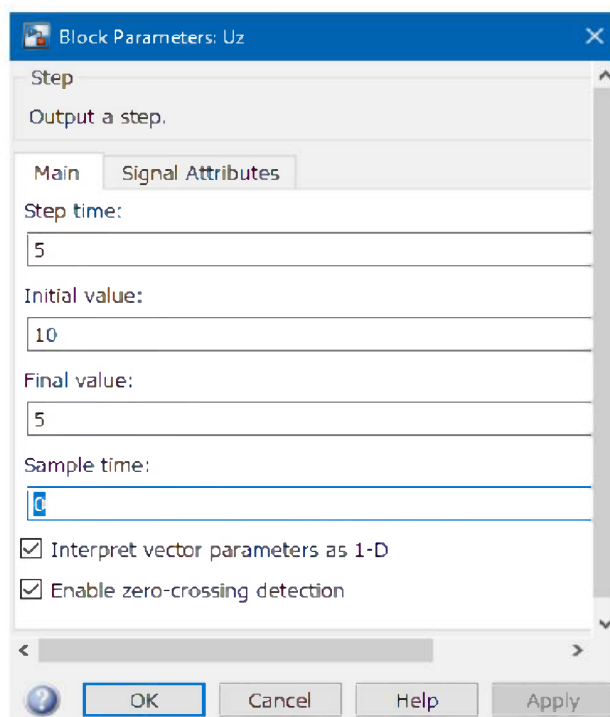


Рисунок 4.2 — Налаштування блоку Step

Проаналізовано роботу регулятора струму за такими самими параметрами налаштування блоку завдання Step як і при аналізі регулятора швидкості, графік перехідних процесів наведених за струмом показано на Рис.4.4



Рисунок 4.3 — Графік зміни кутової швидкості АД

При зниженні швидкості АД у двічі він перейшов у генераторний режим доки швидкість конвеєра не знизилась до усталеної.

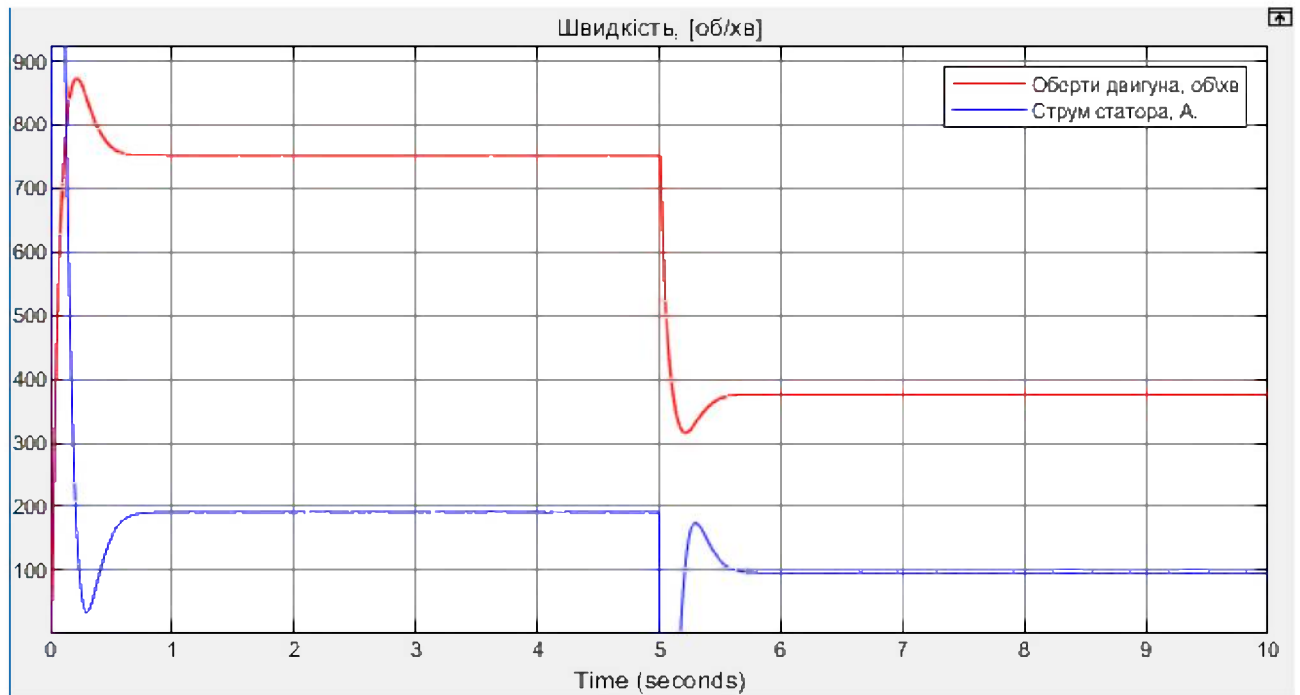


Рисунок 4.4 — Графік зміни струму статора АД

На рисунку 4.4 можна побачити як за зменшенням швидкості обертів зменшився і струм статора до 96 А що дає суттєву економію електроенергії.

Далі було розглянуто перехідний процес у механічній частині Рис. 4.5 при виборі зазору у редукторі для наглядної картини було обрано сигнали безпосередньо після АД від виходу блоку `Meh_AD` та до виходу з блока `Reduction_Gear` де кутова швидкість рівна швидкості АД, такі блоки було обрано для наглядної дії перехідного процесу при виборі зазору.

На Рис.4.5 можна помітити як при закінченні вибору зазору у редукторі до валу двигуна прикладається опір конвеєрної лінії на 0.105 секунді, та в наслідок чого утворюється удар у механічній частині редуктора, що може привести до виведення з ладу безпосередньо зубчатих шестерень у редукторі, або швидкому зносу стиранням та сколів міст тертя шестерень.

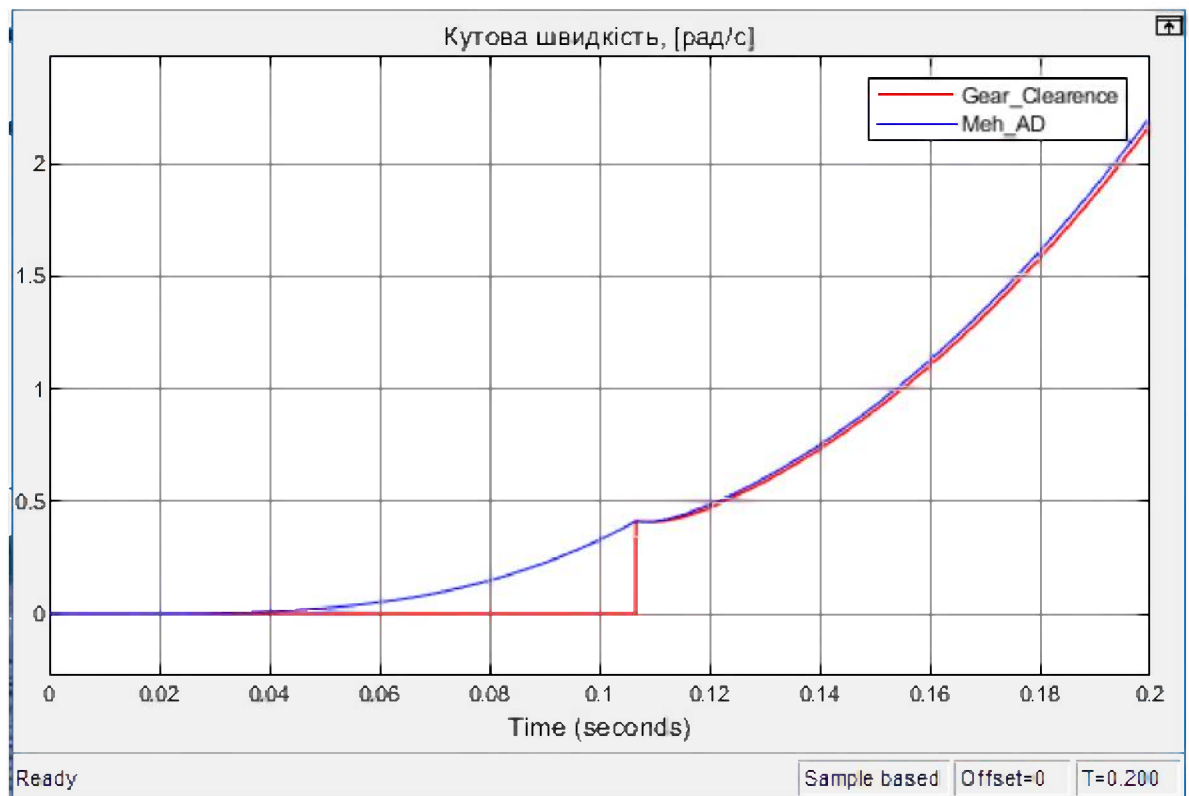


Рисунок 4.5 — Графік вибору зазору на редукторі

На Рис.4.6 показано роботу барабанів привідного синім, та натяжного червонім можна примітити що їхня швидкість трохи різна на початки руху, це пов'язано з тим що сигнал з блоку редуктора подається безпосередньо на пружні властивості стрічки а потім на інерційні властивості барабана та стрічки, цей принцип використано щоб завести до стрічки кутову швидкість скрізь редуктор та його властивості. Але це також обумовлено й проскальзуванням привідного барабана під навантаженням конвеєрної стрічки яка має велику вагу як свою так і обертових мас роликів опор.

На Рис.4.7 показано роботу привідного барабана та АД з урахуванням мінімальної швидкості роботи конвеєрної лінії за розрахунками максимального заповнення вантажем конвеєрної стрічки. Це дуже низькі оберти які на практиці можна використовувати лише на навантаженнях типу вентилятора, з характерним законом регулювання.

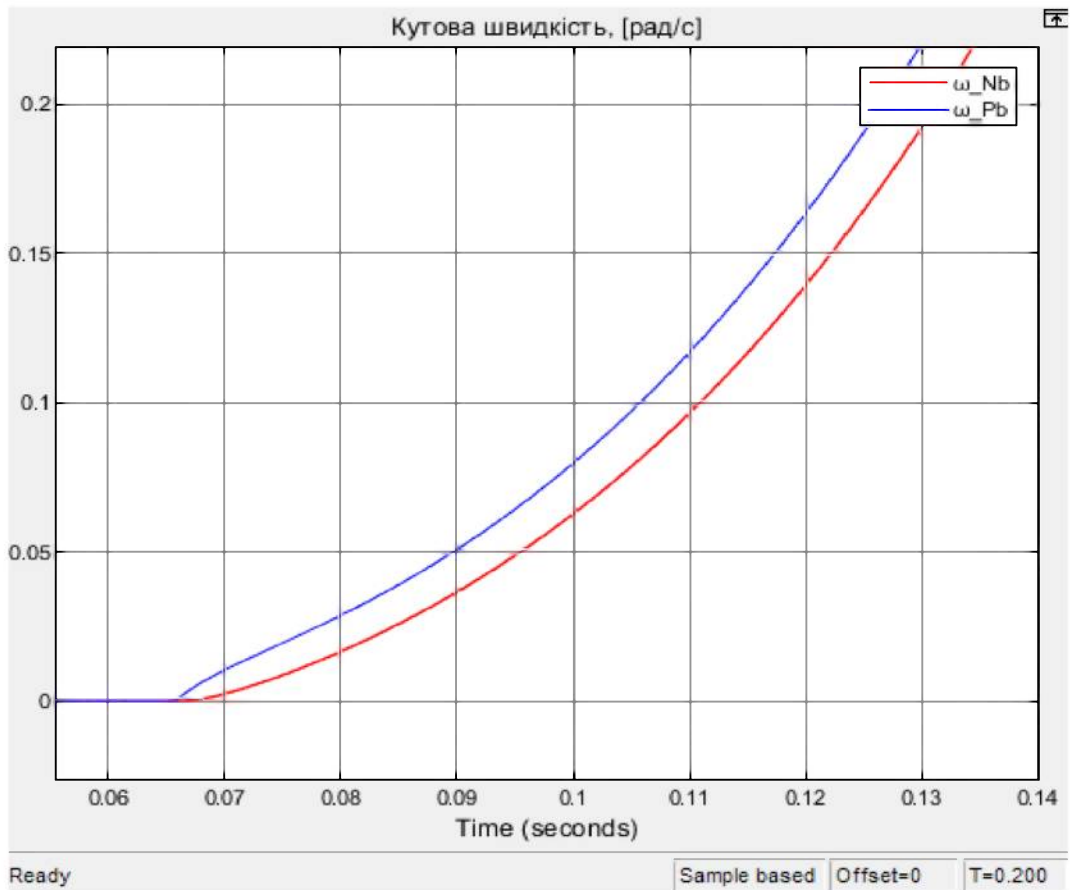


Рисунок 4.6 — Графік швидкості привідного та натяжного барабанів

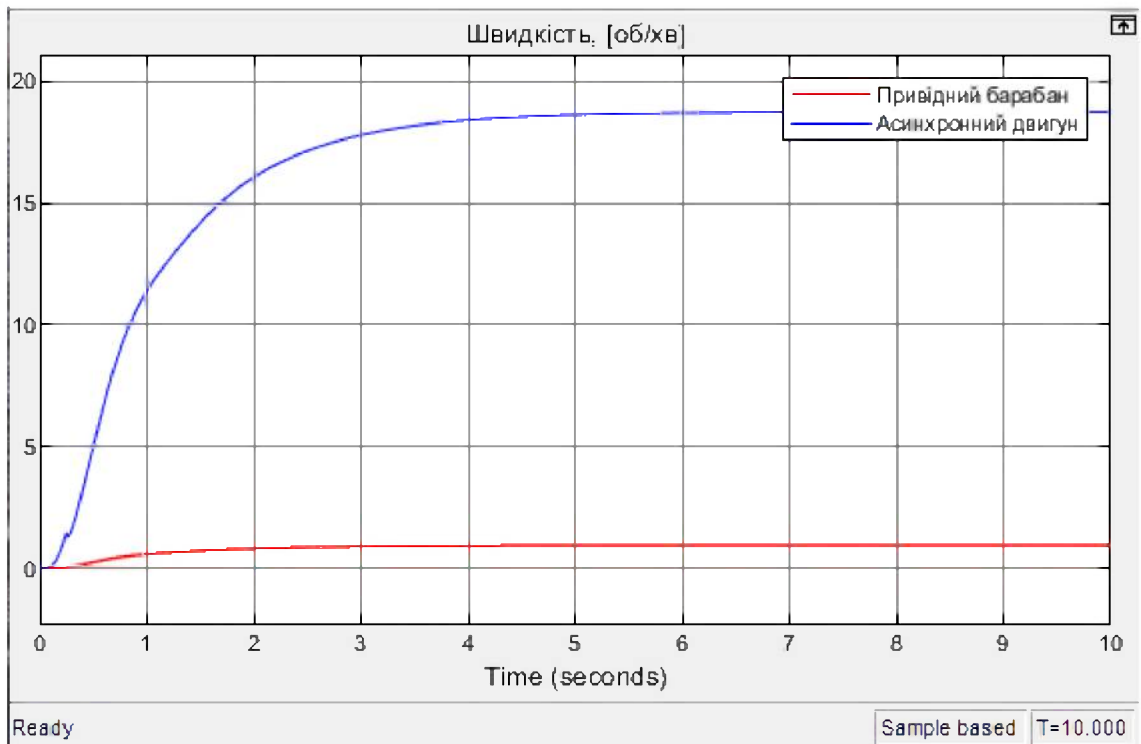


Рисунок 4.7 — Графік швидкості привідного барабана та АД

5 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З ОХОРОНИ ПРАЦІ

5.1 Загальні поняття

Охорона праці це є система правових та соціально економічних, організаційно технічних, санітарно гігієнічних і лікувально профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження працездатності людини при виконанні своїх безпосередніх обов'язків на виробництві.

Сукупність таких чинників середовища на виробництві і трудової діяльності, які мають вплив на здоров'я та працездатність працівника під час виконання ним обов'язків теж є заходом з охорони праці та включають в себе такі складові як температура у приміщені, пилоутворення а також його відведення, вентиляція приміщення, освітлення, шум.

Конвеєрне устаткування є дуже небезпечним з того боку що його можна віднести до повільно рухаючись механізмів, головна небезпека яких є багата кількість обертаючих елементів роликів, барабанів, які під натиском стрічки можуть намотати або протягнути за стрічкою елемент одягу з працівником. Та незалежно від розмірів конвеєрної лінії та потужності двигуна, конвеєрна лінія розраховується під великі навантаження та запаси тягових зусиль.

Розробка заходів з охорони праці повинна спиратися загалом на такі моменти як: нормативні документи з електроустаткування таки як ПУЄ, ПБЄСС, ПТЄСС, електричні схеми, паспортні дані до встановленого обладнання. ГОСТ-и та СНіП-и. Безпосередньо заходами є інструкції по обслуговуванню для обслуговуючого персоналу електриків, слюсарів, технологів. Виконання норм за переліком приведеним вище до встановленого обладнання та приміщень у якому встановлено це обладнання.

Впровадження заходів вимагає чіткого опису вимог у повному обсязі за переліком ГОСТ-ів, останніх правок у правилах які мають відношення до тих чи інших елементів обладнання в цілому, будь то ,організаційно-технічних чи санітарно-гігієнічних, від цього залежить життя людини.

ВИСНОВКИ

Мною було проаналізовано роботу конвеєрної лінії та окремих ланок, вузлів, створено математичну модель конвеєрної лінії. Розраховано параметри елементів, визначено що за умови зменшення швидкості за рахунок частотного перетворювача зменшується струм статора до 96 А від 170 А. Також за розрахунками конвеєрної стрічки встановленої шириною один метр за багато, та вистачить стрічки 650 мм. враховуючи щільність вільного розсипу вантажу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Комплектні електроприводи: Навч. посібник / М.М. Казачковський. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 226 с.
2. Расчет и проектирование ленточных конвейеров : учебно-методическое пособие / Г. Г. Кожушко, О. А. Лукашук. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 232 с.
3. за посиланням https://rusautomation.ru/plotnost_sypuchih_materialov#plotnost5 від 05.05.2021р.
4. Силовые полупроводниковые устройства для управления двигателями переменного тока: Учебный модуль для студентов ВУЗов специальности 141 «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика». Теоретическая часть / Н.Н.Казачковский. Шнейдер Электрик, 2017. – 193 с.
5. ACS880-07 (45 to 710 kW) hardware manual, Created 2020-11-04. за посиланням www.abb.com/drives/documents від 05.05.2021р.
6. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А 90 А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. — М.: Энергоиздат. 1982. — 504 с.
7. Элементы теории электромеханического взаимодействия в двухмассовых системах электропривода с упругими механическими связями: Учебное пособие по дисциплине «Теория электропривода» для студентов специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод» дневной формы обучения. – Часть 1. / Задорожний Н.А. — Краматорск: ДГМА, 2006. — 58 с.
8. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. — Кременчук, 2001. – 410 с.
9. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.: ил.

10. Фрер Ф. Введение в электронную технику регулирования/ Ф.Фрер, Ф.Орттенбургер; Пер. с нем. - М.: Энергия, 1973. - 192 с.
11. Перельмутер В.М. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока/ В.М.Перельмутер, В.А.Сидоренко. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 304 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Коефіцієнт опору w

Місце установк и конвеєра	Умови навколишнього середовища	Значення w при режимах роботи	
		пускові (режими I, III)	сталих (режими II, IV)
Опалюва льне приміще ння	Низька вологість, без пилу	0,03	0,02
	Нормальна вологість, невелику кількість пилу	0,037	0,025
	Нормальна вологість, велика кількість абразивного пилу	0,052	0,035
	Підвищена вологість, велика кількість абразивного пилу	0,06	0,04
	Підвищена вологість, абразивний пил, температура повітря до 1 °С	0,052	0,035
Не опалювал ьне приміще ння	Підвищена вологість, абразивний пил, температура повітря до 1 °С	0,06	0,04
	Підвищена вологість, абразивний пил, температура повітря до - 10 °С	0,09	0,06
	Підвищена вологість, абразивний пил, температура повітря до - 10 °С		

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Маса обертових частин і діаметри роликів ролико-опор верхньої і нижньої гілок стрічки

Насипна щільність вантажу γ , т/м ³	Параметри	m_{rv}, m_{rn} , кг, та d_{rv}, d_{rn} , мм при ширині стрічки В, мм								
		400	500	650	800	1000	1200	1400	1600	2000
Верхня ланка стрічки										
< 1,6	mPB	10	11,5	12,5	17,9	20,7	24,3	47,5	63	–
	dPB	102	102	102	127	127	127	159	159	–
≥ 1,6	mPB	–	–	–	38	43	50	86,5	92,8	104
	dPB	–	–	–	159	159	159	194	194	194
Нижня ланка стрічки										
< 1,6	mPH	6	7,5	10,5	19	21,5	26	40,1	43,7	–
	dPH	102	102	102	127	127	127	159	159	–
≥ 1,6	mPH	–	–	–	25	28	31	71,2	97	119
	dPH	–	–	–	159	159	159	159	194	194

Таблиця Б.2 – Відстань між ролико-опорами в середній частині робочої гілки l_{rv} при транспортуванні сипучих вантажів

Ширина стрічки, мм	Відстань між ролико-опорами l_{rv} при насипній щільності γ_g						
	до 0,50	від 0,51 до 0,80	від 0,81 до 1,20	від 1,21 до 1,60	від 1,61 до 2,00	від 2,01 до 2,50	понад 2,50
400	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2
500	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,2
650	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2
800	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1
1000	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
1200	1,2	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
1400	1,2	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
1600	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
2000	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0