

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## **Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи

бакалавра

(ступінь вищої освіти)

на тему **УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕРСТАТУ ПО  
НАМОТУВАННЮ СТАТОРНИХ ОБМОТОК АСИНХРОННИХ  
ДВИГУНІВ СЕРІЇ АІР**

Виконав: студент 3 курсу, групи ЗзМЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Пашенко А. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Шефер О.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кислиця С.Г.

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки  
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Освітній рівень бакалавр  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
завідувач кафедри автоматки,  
електроніки та телекомунікацій

\_\_\_\_\_ д.т.н., проф. О.В. Шефер  
“\_\_” \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Пащенко Андрію Віталійовичу

1. Тема проекту (роботи) «УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕРСТАТУ ПО НАМОТУВАННЮ СТАТОРНИХ ОБМОТОК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ СЕРІЇ АІР»

керівник проекту (роботи) Шефер Олександр Віталійович, д.т.н., професор  
затверджена наказом вищого навчального закладу від “\_\_” \_\_\_\_\_ 2023 року № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_ 2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи). Напруга мережі живлення 380В; номінальна потужність приводного електродвигуна – до 3 кВт; максимальна частота обертання 3000 об/хв; діапазон натягу дроту – 0-100 кН; можливе зниження напруги мережі живлення  $\pm 10\%$ .

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Загальний аналіз технології та обладнання по намотці статорних обмоток. Дослідження процесу натяжки дроту в процесі намотування. Розрахунок та вибір двигуна для пристрою натягування дроту. Розрахунок параметрів системи регулювання. Синтез системи регульованого ЕП на базі АД з к/з ротором. Вибір обладнання для САР. Дослідження реакції системи на зміну навантаження приводного ЕД. Дослідження якості перехідних процесів та визначення стійкості САР. Розрахунок СІФК. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів): Кінематична схема намотувального верстата. Схеми пристроїв для натяжки дроту. Математична модель системи регулювання натягу дроту. Механічні характеристики приводного електродвигуна. Структурна схема ПЧ з ланкою постійного струму та лінеаризована структура АД. Структурна схема синтезу ПІ-регулятора. Графіки перехідних процесів. ЛАЧХ та ЛФЧХ контурів регулювання. Перехідні процеси САР за різних умов зміни навантаження. Структурна схема СІФК та схема тиристорного ключа в САР.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ .23 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи		Примітка
1.	Аналіз технології та обладнання по намотці статорних обмоток. Дослідження процесу натяжки дроту в процесі намотування.	26.04.23	25%	Пл.1
2.	Розрахунок та вибір електродвигуна для пристрою натягування дроту. Розрахунок параметрів системи регулювання. Синтез системи регульованого ЕП на базі АД.	10.05.23	50%	Пл.2,3
3.	Вибір обладнання для САР. Дослідження реакції системи на зміну навантаження приводного ЕД. Дослідження якості перехідних процесів та визначення стійкості САР.	24.05.23	70%	Пл.4
4.	Розрахунок СІФК. Висновки.	07.06.23		Пл.5
5.	Оформлення кваліфікаційної роботи та підготовка графічних матеріалів.	14.06.23	100%	Пл.6

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)Пащенко А. В.  
(прізвище та ініціали)Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)Шефер О.В.  
(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.....	7
1.1 Загальний аналіз технології та обладнання по намотці.....	7
1.2 Аналіз технічних можливостей системи намотування НВС 23-А.....	13
1.3 Дослідження процесу натяжки дроту в процесі намотування .....	16
1.4 Постановка завдань кваліфікаційної роботи.....	24
2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	25
2.1 Розрахунок та вибір двигуна натягування дроту.....	25
2.2 Розрахунок додаткового опору двигуна натяжки дроту.....	30
2.3 Розрахунок моментів інерції механізмів намотки і переміщення.....	32
2.3 Розрахунок моментів інерції механізмів намотки і переміщення.....	34
2.5 Вибір датчика натягу.....	45
2.6 Синтез ПІ – регулятора контуру регулювання.....	47
2.7 Дослідження реакції системи на прискорення валу ДПС.....	55
2.8 Дослідження якості перехідних і частотних характеристик привода намотки дроту.....	58
2.9 Розрахунок СІФК для електронного ключа.....	65
ВИСНОВКИ.....	71
ЛІТЕРАТУРА.....	72
ДОДАТОК А.....	73
ДОДАТОК Б.....	81

## ВСТУП

Обмотки є найважливішими функціональними елементами електричних пристроїв, блоків живлення приладового устаткування. Від якості обмоток значною мірою залежить якість виробів, в яких обмотки використовуються.

Намотка разом із супроводжуючими її операціями є однією з трудомістких частин технологічного процесу виготовлення статорів. Перед намоткою ізолюють пази і торцеві площини пакету, по якому відбувається контакт із дротом, що намотується. У статорних обмотках частини катушок, що лежать в сусідніх пазах, з'єднують між собою послідовно. Ці катушки утворюють катушкову групу. При намотці катушок зазвичай катушкову групу наматують, не обриваючи дріт. Завдяки цьому після укладки в пази не потрібно з'єднувати катушки однієї катушкової групи між собою, що спрощає монтаж схеми обмотки і передбачає можливість переставлення вивідних кінців катушок. Для намотування катушкової групи намотувальний шаблон повинен мати кілька жолобів, в яких розміщуються витки катушки. У машинах малої потужності прагнуть подальшого утворення сполук на статорі, включаючи всю фазу, що складається з кількох катушкових груп, одним неперервним дротом. Отже, це повністю відпадає з'єднанню катушкових груп. Конструкція корпусної ізоляції залежить від форми паза і напруги обмотки. Для виспних обмоток (корпусна ізоляція складається з кількох шарів ізоляційних матеріалів, що утворюють пазову гільзу (коробочку). У статорних обмотках для утворення корпусної ізоляції закривають катушки по всій довжині кількома шарами ізоляційної стрічки. Така ізоляція називається безперервною.

Для захисту корпусної ізоляції в пази вкладають гільзи з одного шару електрокартона у вигляді коробочки, верхній кінець якої після укладання обмотки загинають всередину пазу. Крім виткової і корпусної ізоляції катушок, в обмотках застосовують цілий ряд додаткових ізоляційних прокладок. До них відносяться прокладки на дно паза, між шарами обмоток,

ізоляція під бандажі, ізоляція між шарами лобових частин, ізоляція обмоткодержателів. Ці прокладки для машин з ізоляцією виконують з електрокартону, лакоткани та ізоляційних плівок.

Дефекти обмоток відносяться до категорії прихованих, а наслідки їх прояву можуть привести до раптових катастрофічних відмов, тому проблема підвищення якості обмоток має першорядне значення, що визначає зрештою надійність функціонування виробу, а також продуктивність і собівартість його виготовлення.

Напрямки забезпечення бездефектності, підвищення ефективності процесу виготовлення виробів відомі: ретельний відріток технології; детальне дослідження причин і умов виникнення дефектів з метою їх запобігання; автоматизоване виконання всіх складових процесу "конструювання - виробництво" виробів, що містять обмотки; вдосконалення контрольно-випробних операцій і їх оснащення.

Верстат намоточний НВС 23А, при оснащенні різними оснастками, призначений для намотки мотовилом котушкових груп обмотки статорів електродвигунів на складальні шаблони. В зв'язку з розвитком автоматичної, електроніки та обчислювальної техніки виникає можливість модернізації обладнання.

Перспективним представляється наступний напрямок модернізації: перехід від електроприводів на базі двигунів постійного струму на частотний електропривод; застосування сучасних систем керування двигуном та автоматизованих систем натягу дроту.

Цей комплекс заходів дозволяє підвищити рівень забезпечення технічних вимог до процесу намотування, розширити технологічні можливості базового устаткування, зменшити кількість браку, а отже і зменшити собівартість кінцевої продукції.

## 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Загальний аналіз технології та обладнання по намотці

Обмотки є найважливішими функціональними елементами електричних пристроїв, блоків живлення приладового устаткування. Від якості обмоток значною мірою залежить якість виробів, в яких обмотки використовуються. Дефекти обмоток відносяться до категорії прихованих, а наслідки їх прояву можуть привести до раптових катастрофічних відмов, тому проблема підвищення якості обмоток має першорядне значення, що визначає зрештою надійність функціонування виробу, а також продуктивність і собівартість його виготовлення.

Напрями забезпечення бездефектності, підвищення ефективності процесу виготовлення виробів відомі: ретельний відробіток технології; детальне дослідження причин і умов виникнення дефектів з метою їх запобігання; автоматизоване виконання всіх складових процесу "конструювання - виробництво" виробів, що містять обмотки; вдосконалення контрольно-випробних операцій і їх оснащення.

Залежно від призначення намотувальних виробів застосовуються обмотувальні дроти з чистої міді, алюмінію, сплавів з високим опором і інших матеріалів. Ізоляція обмотувальних проводів може бути емалевою, волокнистою і комбінованою. Волокнистою ізоляцією служить бавовняна пряжа, шовкові і синтетичні волокна. Ізоляція проводів повинна мати малу товщину, високу електричну міцність, температуростійкість, хімічну стійкість до просочувальних матеріалів, механічну міцність і еластичність.

Для котушок індуктивності застосовують дроти з чистої міді в основному з емалевою ізоляцією. Мідні дроти марки ПЕЛ покриті ізоляцією на основі полімеризованого тунгового або льняного масла. Дроти марки ПЕВ-1 і ПЕВ-2 мають ізоляцію на основі спеціальних лаків (вініфлекс), які добре зчіплюються з металом і більш теплостійкі, ніж попередні, тому дроти

цих марок можуть працювати при температурі 125 °С близько двох годин без зміни властивостей. Дріт з одношаровою ізоляцією ПЕВ-1 може працювати при напрузі до 500 В, ПЕВ-2 має товщину ізоляції на 0,01-0,03 мм більше і застосовується при вищій напрузі. Дроти марки ПЕЛР-1 і ПЕЛР-2 мають поліамідрезольную ізоляцію (тверду і бензостійку). Дроти марки ПЕВТЛ-1 і ПЕВТЛ-2 мають поліуретанову ізоляцію, яка володіє підвищеною теплостійкістю і допускає паяння без зачистки проводів і без застосування флюсів. Емалева ізоляція займає мало місця, тому обмотки котушок виходять компактними. Скляна ізоляція дроту (з діаметром 8 жили до 1 мм) допускає нагрів до 450 °С. Комбінована ізоляція займає більше місця, але забезпечує велику надійність в роботі. Дріт ПЕЛБО - з емалевою ізоляцією і одношаровим бавовняним обплетенням, ПЕЛШО - такий же, тільки з шовковим обплетенням.

Значно рідше застосовуються алюмінієві обмотувальні дроти, в основному зважаючи на малу механічну міцність алюмінію. Алюмінієві обмотувальні дроти мають діаметр від 0,05 до 2,44 мм. Для виготовлення дротяних опорів використовують емальований дріт з високоомних сплавів - манганіну, константана, ніхрому. Манганін - сплав міді, марганцю і нікелю. Константан - найбільш поширений сплав опору - складається з міді, нікелю, кобальту і марганцю. Сплави під загальною назвою "ніхроми" складаються з нікелю, хрому і заліза. Для обмотувальних проводів використовується тільки подвійний сплав нікелю і хрому, що має індекс "Е". Для ізоляції обмотувальних проводів нагрівостійкістю більше 250 °С використовуються керамічні або окисні покриття.

Для роботи при температурах до 600 °С застосовуються дроти марки ПЕЖБ з жилою з мідного дроту, лакованою (покритою) нікелем. Ці дроти виготовляються діаметром від 0,20 до 0,80 мм з тонкошаровою склоемалевою ізоляцією, поверхня якої лакується органосилікатним лаком. Ці дроти призначені для тривалої експлуатації при температурі до 400°С або для роботи при температурі до 500 °С протягом 2000 год або при температурі

600°C протягом 500 год. Подвоєна товщина стекломалевого покриття складає 0,006 - 0,012 мм, а загальна товщина ізоляції - 0,03-0,07 мм. Пробивна напруга мало залежить від температури і складає приблизно 250-550 С. Ізоляція проводів марки ПЕЖБ має меншу механічну міцність в порівнянні з емалевою. Для підвищення механічної міцності вони додатково покриваються шаром поліамідного лаку (марка ПЕСБ). Проте в цьому випадку їх температуростійкість знижується до 350 °С.

Дроти марки ПЕЖБ-700 мають жилу з срібного дроту, лаковані нікелем і призначені для тривалої експлуатації при температурі 500 °С. Вони можуть також використовуватися при температурі 600 °С протягом 2000 ч і при температурі 700 °С протягом 500 год.

Для високочастотних котушок індуктивності застосовують багатожильний провід (літцендрат), в якому містяться від 7 до 28 ізольованих між собою жил в загальному шовковому обплетенні (ЛЕШО) або з двома шарами шовкового обплетення (ЛЕШД). Така конструкція дроту володіє малими втратами на поверхневий ефект.

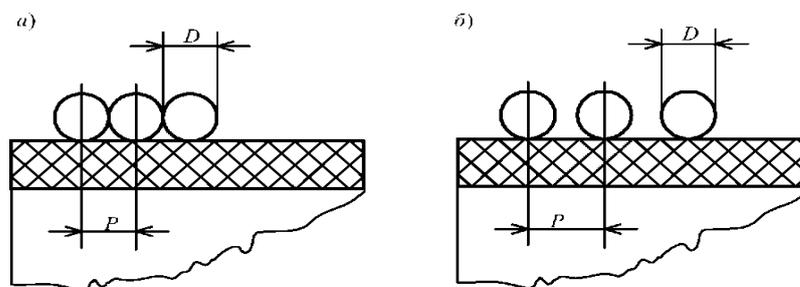
При намотуванні обмоток тонким дротом, виводи їх виконують припаюванням багатожильного гнучкого проводу, наприклад, марки МГШВ (гнучкий дріт з шовковою обмоткою і вінілітовою ізоляцією) і ПМВГ (гнучкий дріт з вінілітовою ізоляцією) і тому подібне. Робиться такий вивід з метою підвищення механічної міцності.

Види намотувальних виробів, що вживаються в приладовому устаткуванні. У приладобудуванні виготовляються десятки різних типів обмоток, що відрізняються формою, розмірами, вживаними проводами, видами ізоляції, технічними вимогами до конструкції і іншими ознаками. Пристрої приладового устаткування, що містять обмотки, виконують різні функції, які і визначають вимоги до виробу і конструктивні особливості. Як приклади обмоток, що входять до складу намотувальних виробів приладового устаткування, можна назвати трансформатори, дроселі, індуктивності, реле, дротяні резистори, сельсини, обертові трансформатори,

електродвигуни і інші електромеханічні прилади. Всі ці різновиди намотувальних виробів мають свої аналоги в мініатюрного виконання. Мініатюрні конструкції намотувальних виробів, створені з метою зменшення маси і габаритів приладового устаткування, з позиції технологічної реалізації ставлять проблеми досягнення необхідної якості і автоматизації намотувальних операцій. Самою трудомісткою і найбільш відповідальною по забезпеченню якості є операція намотування дроту. Всі допущені дефекти стають прихованими (по їх виявленню) після завершення цієї операції. На процес намотування роблять вплив багато чинників.

Види обмоток, вживаних в приладобудуванні. Намотувальні вироби, вживані в приладовому устаткуванні, найчастіше складаються з каркаса і обмотки [1]. Каркас є підставою намотувального виробу і виготовляється з діелектриків. Обмотка - це конструктивна частина намотувального виробу, а намотування або укладання визначає спосіб формування витків. У конструкції обмотки є визначальні елементи: виток, крок і ряд. Витком називають дріт, укладений по периметру каркаса за один оборот і що має зсув кінця дроту щодо його початку. Кроком називається відстань між центрами проводів сусідніх витків. Поряд називають витки, укладені по ширині обмотки. На рис. 1.1 а зображено намотування виток до витка, на рис. 1.2, б - намотування з кроком. Всі обмотки діляться на дві основні групи: одношарові і багатошарові. До кожної групи входять різні види обмоток, а визначником вигляду є їх конструктивні ознаки. Одношарова рядова обмотка укладається виток до витка або неповним на плоскому, циліндровому, об'ємному прямокутному каркасах. Така обмотка відрізняється малою власною ємкістю, простотою виготовлення, великою добротністю.

Біфілярна обмотка намотується двома ізольованими проводами, електрично сполученими з одного кінця. Ця обмотка відрізняється безіндукційністю і застосовується для дротяних безіндукційних резисторів.



$D$  - діаметр провoda,  $P$ - крок намотки

Рисунок 1.1 Крок обмотки

Тороїдальна обмотка укладається на кільцевий каркас і застосовується для дротяних змінних резисторів. Проста рядова багат шарова обмотка складається із заданої кількості рядів укладених витків і відрізняється великою величиною індуктивності при малих габаритах, великою власною ємкістю, підвищеною різницею потенціалів між витками в сусідніх рядах і складністю виготовлення. Для виключення западання витків з верхнього ряду в нижній необхідно застосовувати прокладки між рядами. Як прокладки застосовують кабельний, конденсаторний або телефонний папір. Рядова багат шарова обмотка застосовується при виготовленні трансформаторів, дроселів, котушок індуктивності і ін. Обмотка в навалювання відрізняється від рядовий тим, що ряди не дотримуються і міжрядні прокладки не застосовуються. Застосовують її при невеликій робочій напрузі і найчастіше для виготовлення котушок електромагнітних реле. Секціоновані багат шарові обмотки застосовують для зменшення різниці потенціалів між рядами і сусідніми витками, крім того, в таких обмотках значно зменшена власна ємкість, оскільки власна ємкість, що виникає в кожній секції, з'єднується послідовно. Укладають таку обмотку на секціоновані каркаси. Для котушок індуктивностей дріт у всіх секціях укладається в одному напрямі. Для дротяних безіндукційних резисторів каркаси застосовують з парним числом секцій, число витків в кожній секції повинне бути однаковим, а напрям обмотки протилежним. При проходженні струму по

такій обмотці магнітні поля, що виникають в сусідніх секціях, взаємно знищуються. Галетні обмотки безкаркасні багат шарові, використовуються у разі потреби отримання складної по конфігурації обмотки.

Для укладання таких обмоток застосовуються спеціальні пристосування, основними елементами яких служать мірна фасонна втулка (що забезпечує розміри і форму внутрішнього отвору обмотки) і дві щоки, що обмежують ширину обмотки (кількість витків в ряду). Для закріплення виконаної обмотки, застосовують обв'язування котушки нитками або просочення витків дроту клеєм або лаком з подальшою полімерізацією. Спіральна обмотка має по одному витку в ряду і використовується для отримання плоских котушок індуктивностей, що наклеюються на друкарські плати. Пірамідальна обмотка застосовується, коли необхідна котушка з великою величиною індуктивності в ланцюгах з високою робочою напругою. Щоб зменшити різницю потенціалів між витками, обмотку укладають так, що перший і другий витки лягають в першому ряду, а третій між ними в другому ряду. Універсальні обмотки відрізняються малою власною ємкістю при великих величинах індуктивності. Особливістю такої обмотки є наявність перегинів в кожному витку, укладання дроту під кутом до торців котушки, велика радіальна товщина при малій ширині котушки і наявність кутового кроку. Перехресна обмотка є різновидом універсальною і застосовується для намотування котушок з великою величиною індуктивності. Відрізняється вона від універсальної наявністю тільки двох перегинів. Тороїдальна багат шарова обмотка виконується головним чином для виготовлення трансформаторів і дроселів на феритових кільцях.

Технологічні процеси намотування котушок. Намотуванню будь-якої котушки передують підготовчі роботи, в які входить підготовка матеріалів і верстата. Матеріали, необхідні для намотування, підбирають відповідно до технологічної карти на намотування. Найчастіше в комплектацію для котушки, що виготовляється, входить: дріт, що підлягає намотуванню (або декілька різних проводів по діаметру, марці); матеріал (кабельний,

телефонний папір, тонкий електрокартон, лакотканина, склотканина) прокладки і ізоляційного, нитки (підвищеній міцності № 10, 0, 00), дріт для виводів, клей, лак для закрашення місць паяння, ацетон для промивки місць паяння, припій і флюс для паяння. У підготовку верстата входить його наладка, установка кулачків, упорів, водія, котушок намотуваного дроту, збірка нітетракта, регулювання натягу і так далі. У заготовчі операції входить: нарізка і просічення прокладок, нарізка верхньої ізоляції, нарізка дроту виводів, зачистка кінців нарізаних проводів від ізоляції, лудіння виводів, нарізка шматочків лакотканини (склотканина) для ізоляції ділянок паяних з'єднань виводів. Матеріали прокладок і ізоляційних нарізують на смуги. Матеріали прокладок нарізають на 6-8 мм ширше, ніж ширина котушки і для кращого укладання між рядами по краях смуг роблять надрізи. Кінці обмотувальних проводів також необхідно зачищати і залужувати. Зачистку обмотувальних проводів типу ПЕЛ, ПЕТ, ПЕМ і інших з емалевою ізоляцією діаметром не менше 0,25 мм проводять монтажним ножом, а дроти менших діаметрів зачищають наждачним папером. Ізоляцію з проводів типу ПЕВ діаметром від 0,03 до 0,1 мм знімають, опускаючи їх в мурашину кислоту на декілька секунд з подальшим протиранням бязевою ганчіркою для видалення розчиненої емалі і кислоти.

## 1.2 Аналіз технічних можливостей системи намотування НВС 23-А

Верстат намоточний НВС 23А, при оснащенні різними оснастками, призначений для намотки мотовилом котушкових груп обмотки статорів електродвигунів на складальні шаблони. Основні котушкових груп:

1. Внутрішній діаметр осердя статора, мм.....	45-165
2. Довжина сердечника статора, мм.....	30-180
3. Діаметр обмоточного проводу по міді, мм.....	0,1-1,4
4. Максимальне число паралельних проводів в котушці, шт.....	3
5. Кількість катушок в концентричній катушковій групі.....	1-6

6. Кількість котушкових груп, намотуємих без розриву-2,3,4,6  
 7. Максимальне число витків в одній котушці.....999  
 8. Кількість котушок в послідовно намотуємих котушкових групах, шт...  
 (5-4-5-4), (3-2-3-2), (4-3-4-3), (2-1-2-1).

Кліматичне виконання УХЛ, категорія розміщення-4, ГОСТ 15150-69, Але для роботи при температурах від 289 до 308К (від+16 до +35°).

Оператор вручну знімає з шаблону комплект котушкових груп, і передає їх на верстат для втягування котушок. Всі операції крім знімання і переносу котушкових груп, виконуються без участі оператора.

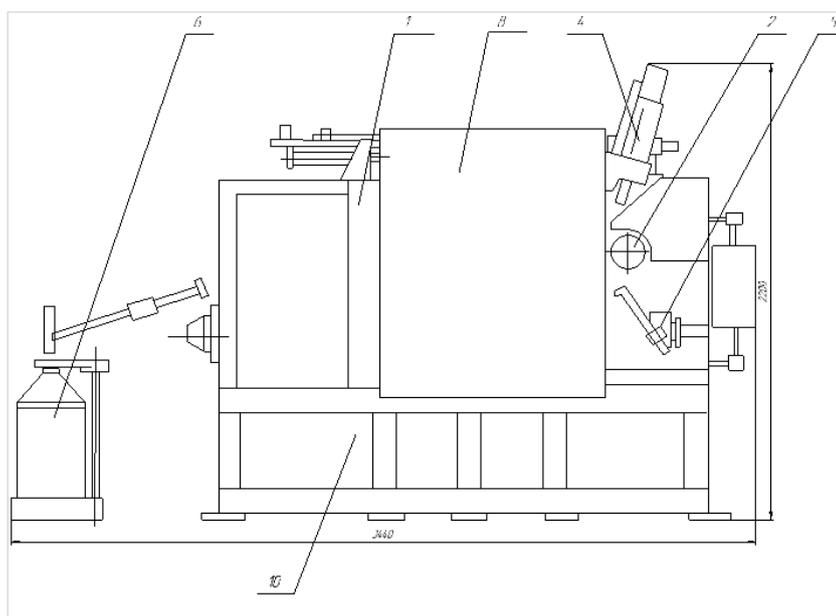


Рисунок 1.2 Загальний вигляд намотувального верстата

Верстат скомпонований на станині 10, біля верстата встановлюється гідростанція 7, електрошкафи з електроустаткуванням 9, і змоточно-натяжний пристрій 6.

На верстаті монтується намоточна головка 1 і поворотна головка 2. Всі механізми верстата працюють від гідропривода, який складається з гідростанції 7 типу 12АГ 48-2211, гідропанелей 3, і систем трубопроводів. На корпусі поворотної головки кріпиться механізм зажиму і відрізання провoda 4, і механізм створення петлі 5.

Для огороження зони намотки, служить механізм закриття кожуха.

Змоточно натяжний пристрій 6 призначений для установки ємності із змотуємим проводом, і для натяжки проводу при намотці. Електроустаткування 9 призначено для управління роботою верстата і встановлюється в окремому електрошкафові, а датчики на механізмах верстата.

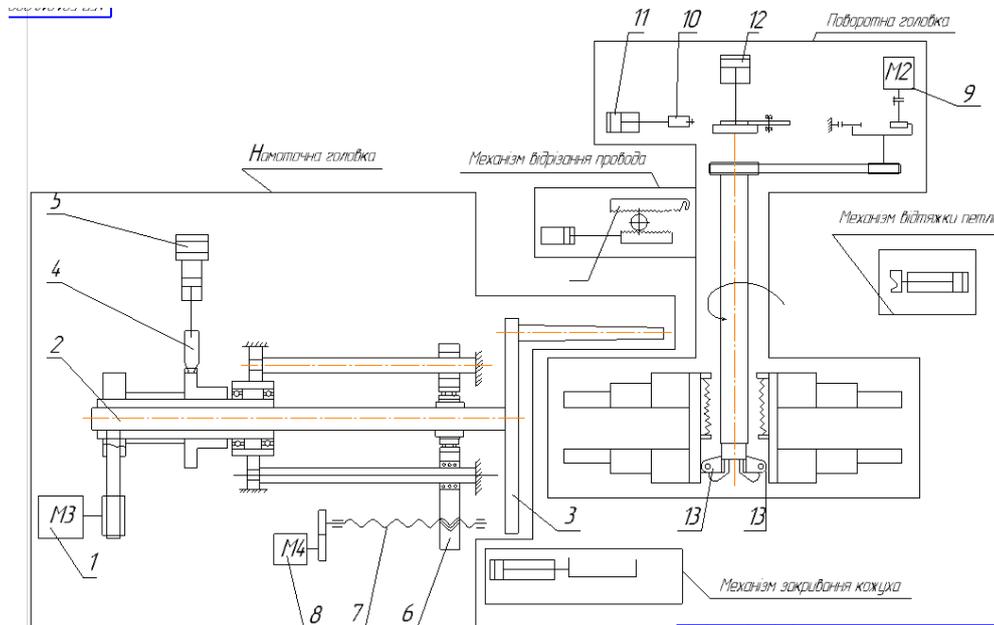


Рисунок 1.3 Кінематична схема намотувального верстата

Привод шпинделя намоточної головки виконується від двигуна постійного струму 1, який дозволяє регулювати число обертів шпинделя від максимальних 200-2200 об/хв, до вимагаємих для нормального для забезпечення стабільного перекидання, і надійної остановки шпинделя. Обертання через пасову зубчасту передачу передається на шпиндель 2, на якому закріплено мотовило 3, яке здійснює намотку проводу на шаблон. Фіксується мотовило фіксатором 4, який управляється від здвоєного гідроциліндра 5. На двох упорах встановлена траверса 6, в яку вмонтована друга опора шпинделя. Розкладання дроту здійснюється за допомогою ходового гвинта 7, який обертається від електродвигуна постійного струму 8, через зубчасту передачу. Повертання мотовила в початкове положення здійснюється реверсуванням двигуна 8.

Від двигуна 9 через планетарний редуктор з передаточним відношенням 91,2, і клинопасову передачу передається обертання на поворотну головку. На вісі поворотної головки знаходиться диск з пазами, який забезпечує фіксацію головки при поворотах на 60,90,120,180°. Фіксація забезпечується фіксатором 10, який управляється гідроциліндром 11.

Зведення і розведення шаблонів здійснюється гідроциліндром 12, за допомогою тяги і ричагів. При розведенні шаблонів шток гідроциліндра 12 переміщує тягу з ричагами, які повертають корпус з закріпленими на них шаблонами навколо нерухомої вісі 13.

Механізм відрізання здійснює відрізання і зажим кінця провoda, який залишився. Рухомий ніж 14 своїм рухомим кінцем, захвачує провід у мотовило і підводить його до нерухомого ножа, де відбувається відрізання і зажим провoda.

### 1.3 Дослідження процесу натяжки дроту в процесі намотування

Формоутворення обмотки, точність її геометричних і фізичних параметрів, швидкісні режими намотування в значній мірі залежать від фактичного значення натягнення дроту. Натягнення дроту є основним технологічним чинником, що визначає продуктивність процесу, якість і параметри намотувальних виробів (коефіцієнт заповнення обмотки, габарити котушки і ін.). Натягнення дроту забезпечується спеціальними пристроями, що встановлюються на верстаті. Зусилля натягнення дроту залежить від перетину дроту і від тертя в рухомій частині верстата. При зайвому натягненні відбувається обрив або витягування дроту, що веде до зміни омичного опору і пошкодження ізоляції, унаслідок чого можуть бути утворені короткозамкнуті витки в котушці. Мале натягнення дроту приводить до збільшення розмірів котушки, тобто до зменшення коефіцієнта заповнення.

Оптимальне значення натягнення вибирають близьким до межі його пропорційного подовження, допускаючи при цьому деякі регламентовані

пластичні деформації матеріалу дроти, що виникають від моментів, що вигинають, при формоутворенні обмотки. При цьому вибір значення оптимального натягнення залежить від багатьох чинників, зокрема від характеристик вживаних обмотувальних проводів, конструкції обмотки і її призначення, технічних умов на неї, виду намотувального устаткування і оснащення, кінематичної схеми намотування і ін. Необхідно також враховувати загальну результуючу напругу в матеріалі дроту, зміна електроопору, електричної міцності і електричного опору ізоляції, температурні деформації дроту і ізоляції на подальших операціях, а також умови експлуатації виробу. При загальному обліку всіх чинників, що впливають на роботу, результуюча напруга в матеріалі дроту і в його ізоляції не повинно перевищувати межі міцності з деяким коефіцієнтом запасу [2]

$$\sigma_n = K_f (\sigma_p, \sigma_n, \sigma_k, \sigma_c),$$

Натягнення дроту можна визначити по емпіричних формулах в залежності від матеріалів: для мідного дроту  $F_d = 8.5 \cdot 10^3 \cdot d^2$  (г) для константана і манганіну  $F_d = 19 \cdot 10^3 \cdot d^2$  (г), де  $d$ , мм діаметр проводу.

Допустиме натягнення, визначуване по цих формулах для мідного дроту діаметром 0,03 мм, - 7,6 г; для дроту діаметром 0,25 мм - 531 г; для дроту 1 мм - 8500 г. Необхідно враховувати, що окрім дії систематичних чинників, на дріт можуть робити вплив і чинники випадкового характеру. Тому контроль натягнення в процесі намотування є необхідним, оскільки він забезпечує отримання даних і по стохастичних характеристиках типових намотувальних проводів. Зважаючи на відхилення фактичного значення  $F_\phi$  натягнення дроту від його середнього значення  $F_c$ , настройку намотувальних верстатів слід проводити на натягнення  $F_n$ , визначуване з рівності:

$$F_n = F_c = F_\phi - |\Delta F|.$$

Очевидно, що для формоутворення обмотки необхідне, щоб

$$F_\phi - |\Delta F| \geq F_{\min}.$$

При знаходженні значення  $F_0$  доцільно всі чинники, що впливають на нього, по своєму характеру розділити на чотири групи: визначувані маркою і діаметром дроту; залежні від конструкції обмотки і ТУ на неї; визначувані кінематичною схемою намотування, особливостями вживаного устаткування і оснащення, швидкісними режимами; визначувані складом і особливостями подальших операцій виготовлення обмотки, а також умовами її експлуатації.

Звідси значення оптимального натягнення повинне визначатися в такій послідовності:

1. Вибирається значення  $F_d$  по характеристиках обмотувальних проводів - марки, діаметру, ізоляції, допустимого подовження і допустимої напруги в матеріалі металу і ізоляції.

2. Коректується набутого значення  $F_d$  з урахуванням форми і розмірів каркаса, радіусів вигину дроту, виду ізоляції, допустимої зміни електроопору, інших електричних характеристик і інших подібних чинників.

3. Уточнюється значення  $P$  виходячи з чинників третьої групи - кінематичної схеми намотування, виду вживаного устаткування і оснащення, режимів роботи намотувального верстата. При цьому розрахунковий або експериментально визначають значення  $F_\phi$  і  $\Delta F$ .

4. Уточнюється значення  $F_d$  виходячи з чинників четвертої групи.

5. Проводиться пробне намотування з натягненням  $F_0 = (F_\phi)_{\max}$  з вимірюванням значень  $F_d$  і  $\Delta F$ . Остаточне уточнюється значення  $F_0$ . Допустиме натягнення дроту, виходячи з чинників першої групи, може визначатися трьома методами - орієнтуванням (по таблицях), уточненим (розрахунковий) і експериментальним (точним).

Найширше застосовуються механічні, оптичні і електричні прилади для контролю натягнення дроту. Механічні прилади прості в пристрої, дешеві і зручні в експлуатації, відрізняються різноманітністю вживаних конструкцій.

Приклад схеми механічного приладу приведений на рис. 1.5а. Як перетворювач використаний механізм важеля, що представляє шарнірно закріплену вказівну стрілку 6, яка знаходиться під дією пружини 5. При зміні

натягнення дрiт 1 заправляється через направляючий i приймаючий ролики 2 i 3 вiдповiдно. Приймаючий ролик розташований на стрiлцi, яка за шкалою 4 показує середню величину натягнення. Механiчні прилади застосовуються для вимiрювання середньої величини натягнення при коливаннях до 20 - 30 Гц, що вiдповiдає намотуванню дроту на квадратний каркас iз швидкiстю 300 - 450 вит/хв.

Недолiк приладiв - велика iнерцiйнiсть рухомих частин, недостатньо висока точнiсть вимiрювання.

У оптико-механiчному приладi, приведеному на рис. 1.5б, як перетворювач використовується консольна балочка 4 iз закрiпленим дзеркалом 5 i приймаючим роликом 3. При будь-якiй змiнi натягнення дроту, закрiпленого через ролики 2 i 3, балочка прогинається, одночасно змiнюється кут повороту дзеркала, на яке через об'єктив 8 падає промiнь свiтла вiд джерела 9. Деформацiя балочки приводить до зсуву вiдбитого променя пропорцiйно величинi натягнення. Оптико-механiческие прилади володiють малою чутливiстю, iнерцiйнi, громiздкi, не забезпечують одночасний запис декiлькох процесiв, але у них висока якiсть роботи.

На рис. 1.4в представлений електротензометричний прилад. Тут як перетворюючий пристрiй використовуються тензодатчики омiчного опору 5, наклеєнi на сприймаючий елемент 4, виконаний у виглядi пружної балочки, на якiй закрiплений ролик 3, охоплюваний дротом 1. Для вимiрювання натягнення використовується мостова схема з двома або чотирма тензодатчиками. Переваги - простота конструкцiї, малi габарити. Недолiк - мала величина вихiдного сигналу.

Окрiм перерахованих приладiв широко застосовуються iндуктивнi прилади, принцип роботи яких заснований на змiнi реактивного опору котушки з сердечником при змiнi її iндуктивностi. Такi прилади бувають двох типiв: з рухомих сердечником i iз змiнним зазором в машиннiй системi.

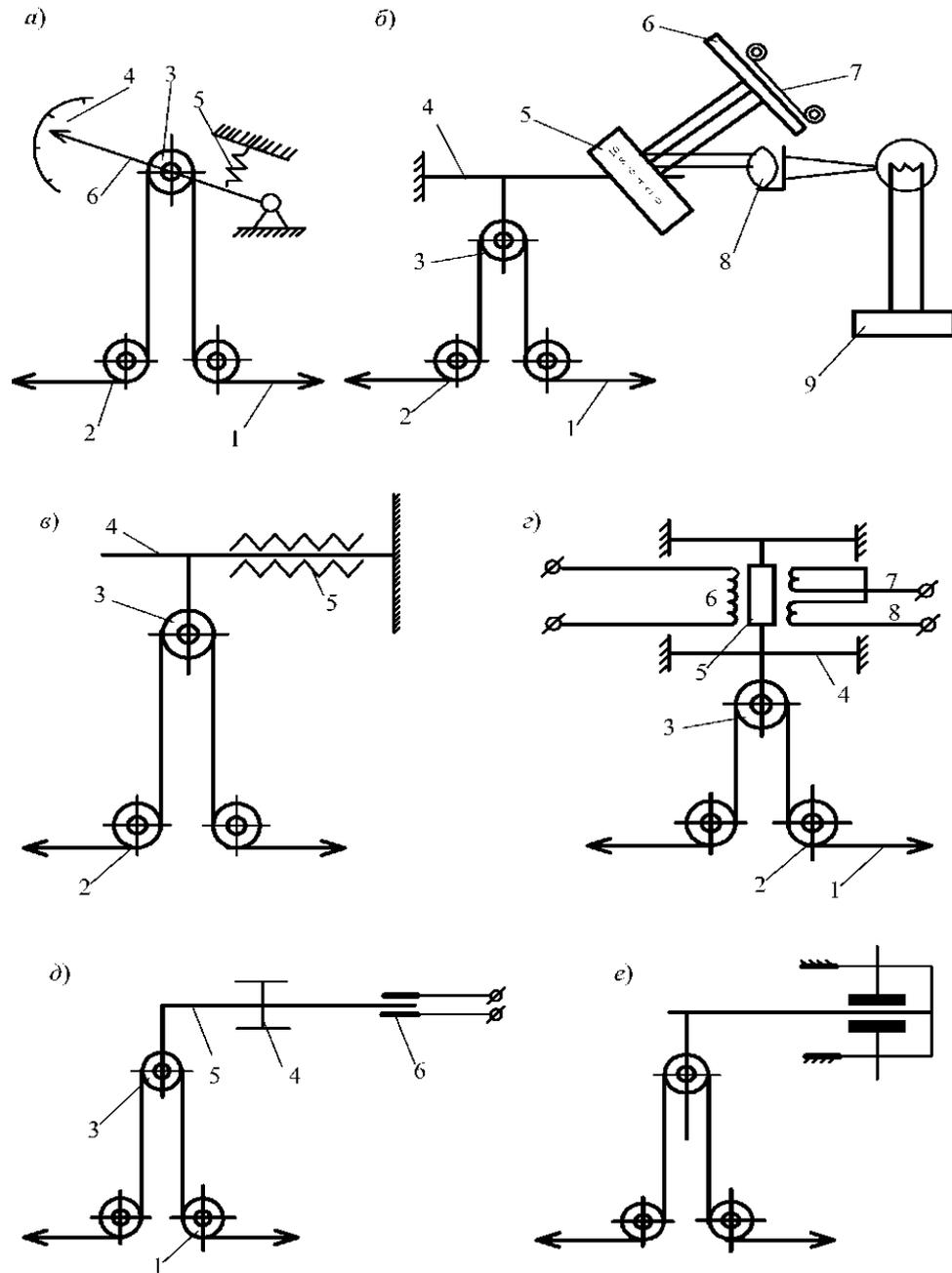


Рисунок 1.4 Пристрої для натяжки дроту

На рис. 1.4 г показаний індуктивний прилад з рухомих сердечником 5, підвішеним з двох сторін на пружних мембранах 4. Сердечник знаходиться усередині котушки з трьома обмотками. Обмотка 6 живиться змінним струмом високої частоти. Свідчення знімаються з обмоток 7 і 8, сполучених послідовно, включених зустрічно і розташованих симетрично щодо сердечника за відсутності натягнення дроту 1, заправленого при вимірюванні через ролики 2 і 3. Під впливом сили натягнення сердечник зміщується з

нейтрального положення і в обмотках 7 і 8 з'являється сигнал, пропорційний величині натягнення. Переваги висока чутливість, мала схильність дії перешкод, стійкість до дії навколишнього середовища. Недолік - мала смуга пропускання частот.

Принципова схема ємкісного приладу представлена на рис. 1.4 д. Під дією сили натягнення дріт 1 впливає на ролик 3, закріплений на рухомому стрижні - обкладанні 5, розташованому між рухомими обкладками 6 конденсатора. Застосування ємкісних приладів дозволяє використовувати мостові схеми вимірювання. Гідність - висока чутливість. Недоліки: малостійкі, значно схильні до дії перешкод і зовнішнього середовища.

Для вимірювання натягнення дроту застосовуються прилади механотрони - електронні датчики механічних величин (рис. 1.4 е). Найширше використовуються механотрони подовжнього управління, виконані у вигляді зведеного двоханодного діода з рухомим стрижнем 5, закріпленим на мембрані 4. На стрижні встановлюється сприймаючий ролик 3, охоплюваний дротом. Достоїнства - висока чутливість, стійкість роботи.

Системи стабілізації натяжки . Стабілізуючі пристрої застосовуються для радіального змотування дроту з метою вирівнювання окремих випадкових ривків натягнення, для компенсації витрати дроту у момент пуску намотувального верстата. В основному стабілізатори компенсують ривки натягнення витрачанням демпфуючої петлі дроту, довжина якої відновлюється при поверненні значення натягнення до первинного.

Широко застосовуються стабілізатори, створюючи петлю дроти за допомогою плоскої пружини або підпружного важеля (рис. 1.5, позиції 1 і 2) Їх недоліками є порівняно невелика довжина компенсаційної петлі дроту, а для стабілізаторів важелів - інерційність. На рис. 1.5 (позиція 3) показаний пружинний стабілізатор, як найбільш ефективний. На рис. 1.5 представлений стабілізатор, який регулює натягнення за допомогою електромагнітної муфти.

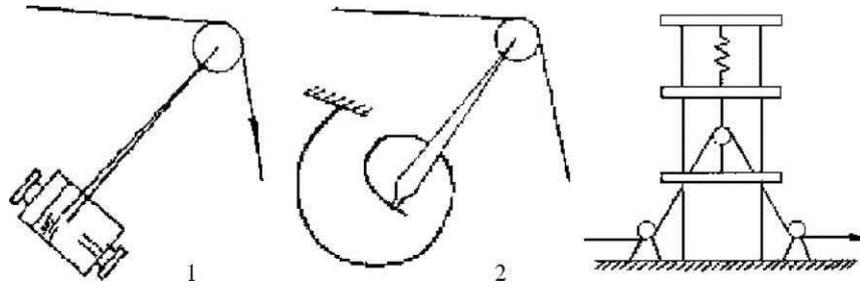


Рисунок 1.5 Стабілізатори натяжки дроту

Обертання бобіни відбувається синхронно з обертанням намотуваного каркаса. Пристрій дозволяє компенсувати збільшення натягнення у момент пуску верстата, але не компенсує окремі ривки натягнення в процесі намотування.

Розрізняють два режими роботи стабілізаторів: режим пуску верстата і сталий режим намотування. У режимі пуску верстата стабілізатор повинен мати значний запас довжини демпфуючої петлі для компенсації великих кутових прискорень бобіни. У сталому режимі потрібна мала інерційність стабілізатора для компенсації високочастотних прискорень, що впливають на дріт при не круглій формі каркаса, а також від випадкових чинників. Зважаючи на інерційність бобіна практично не реагує на високочастотні коливання і обертається з середньою швидкістю, відповідною середній витраті дроту на утворення обмотки. Прискорення, що виникають при цьому, можуть викликати значні зміни натягнення дроту. У сталому режимі намотування стабілізатор працює на компенсацію нерівномірності витрати дроту в межах кожного обороту каркаса при каркасах не круглої форми, а також на компенсацію випадкових обурень.

Автоматичні регулятори натягнення діляться на дві групи: механічні - прямої дії і електронні - непрямої дії.

Найбільше застосування мають механічні регулятори, у зв'язку з простотою конструкції і експлуатації. У регуляторів прямої дії чутливий елемент безпосередньо впливає на регулюючий орган через механічну передачу. У регуляторів прямої дії дія натяжки на чутливий елемент

переходить в електричний сигнал управління виконавчим органом регулятора.

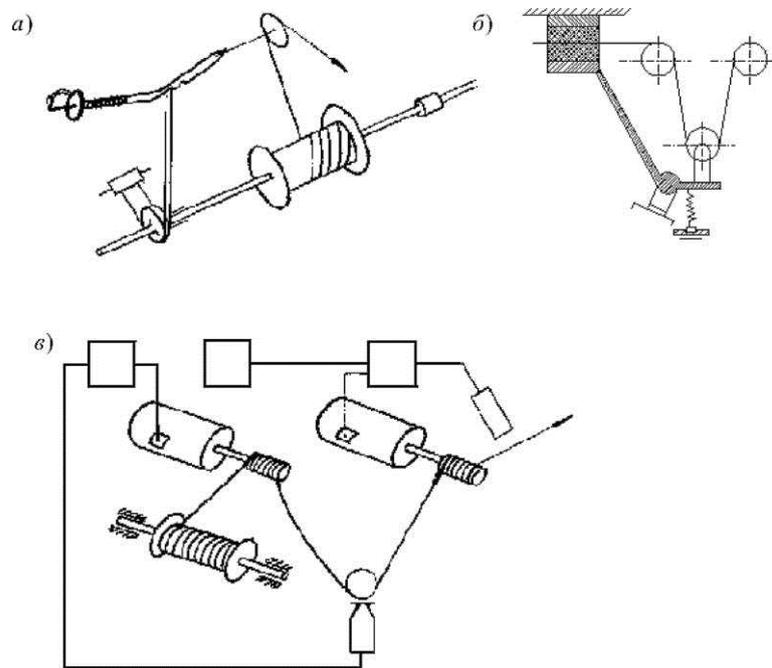


Рисунок 1.6 Автоматичні регулятори натяжки дроту

Найпоширеніший в промисловості регулятор із стрічковим гальмом. Проте у ряді випадків його застосування не можна вважати за доцільне, особливо при високих швидкостях намотування, зважаючи на велику інерційність демпфуючого важеля і релейного режиму гальмівного пристрою.

Автоматичний регулятор прямої дії, що створює натягнення дроту тертям його між двома фрикційними пластинами. Осі двох крайніх роликів закріплені нерухомо на каркасі, середній ролик встановлюється на кінці підпружиненого важеля, який є чутливим елементом і виконавським органом регулятора. По характеру дії автоматичні регулятори непрямої дії підрозділяються на чотири підгрупи: що впливають на віддаючу котушку; що впливають на привід намотуваного каркаса; що впливають на повідець, фланер або проміжний ролик; автоматичні регулятори з одночасною

комбінованою дією на віддаючу котушку і на привід намотуваного каркаса. На рис. 1.7в показаний комбінований регулятор, що має малу постійну часу. Він складається з двох регуляторів, один з яких забезпечує створення певної довжини демпфуючої петлі дроту шляхом примусового змотування його віддаючою котушкою, інший - проводить регулювання натягнення дією на малоінерційний ролик, що охоплюється одним-двома витками дроту.

#### 1.4 Постановка завдань кваліфікаційної роботи

Проаналізувавши технологію натягу та принцип роботи намоточного верстата НВС – 23А, приходимо до наступних висновків:

1. Виділяємо ряд недоліків базового устаткування.

1.1. Відсутність регулятора натягу.

1.1.1. Знижена якість продукції.

1.1.2. Необхідна людина – оператор, що керуючись своїм досвідом підбирає натяг за допомогою механічного пристрою.

1.2. Застосування ДПС – що мають знижену надійність та підвищені втрати на ремонт ніж АД.

Для вирішення недоліків ставимо наступні задачі на проектування:

1. ДПС системи намотування та системи переміщення мотовила замінити на АД. 2. Синтезувати систему керування АД, розрахувати параметри регулятора. 3. Розробити систему натягу. Синтезувати та розрахувати контур натягу. 4. Обрати датчики.



провід, довжина якого рівна периметру шаблона, на який він намотується.

$$P_{ш}=(a+b)^2, \quad (2.1)$$

де  $a, b$  відповідно сторони шаблона.

$$P_{ш}=(15+15)^2=60 \text{ (см)}.$$

Отже за один оберт змотується 0,6 м дроту. По завданню у нас двигун обертається максимум 2200 об/хв. Враховуючи, що передаточне число від двигуна на мотовило складає 2, розрахуємо швидкість обертання мотовила:

$$n_m=n_{дв}/i \text{ (об/хв)}, \quad (2.2)$$

де  $n_m$ - частота обертання мотовила;

$n_{дв}$ - частота обертання двигуна;

$i$ - передаточне число редуктора.

$$n_m=2200/2=1100 \text{ (об/хв)}.$$

Отже мотовило обертається зі швидкістю 1100 об/хв. Розрахуємо, скільки метрів дроту змотає верстат за 1 хвилину по формулі (2.3):

$$L = P_{ш} \cdot n_m \text{ (м)}, \quad (2.3)$$

де  $P_{ш}$ - довжина дроту, яка змотується за 1 оберт мотовила;

$n_m$ - частота обертання мотовила.

$$L = 0.6 \cdot 1100 = 660 \text{ (м)}.$$

Отже за 1 хвилину змотується 660 м провуда. Розрахуємо скільки метрів провуду змотується з бобіни за 1 оберт мотовила по формулі (2.4):

$$L_{об} = 2\pi \cdot r \text{ (м)}, \quad (2.4)$$

де  $r$ - радіус бобіни.

$$L_{об} = 2 \cdot 3.14 \cdot 0.15 = 0.942 \text{ (м)}.$$

Отже за 1 оберт мотовила з бобіни змотується 0,942 метри дроту. Розрахуємо частоту обертання бобіни по формулі (2.5):

$$n_b = \frac{L}{L_{об}} \text{ (об/хв)}, \quad (2.5)$$

де  $L$ -довжина дроту, яку змотає верстат за 1 хвилину;

$L_{ob}$  - довжина проводу, який змотається з бобіни за 1 оберт мотовила.

$$n_b = \frac{660}{0.942} = 700 \quad (\text{об/хв}).$$

Отже частота обертання бобіни складає 700 об/хв, а це і є номінальна частота обертання двигуна. Потужність двигуна можна розрахувати за формулою 2.6:

$$P = M \cdot \omega \quad (\text{Вт}), \quad (2.6)$$

де  $M$  - статичний момент, Н\*м;

$\omega$  - робоча швидкість двигуна, рад/с.

Попередньо розрахуємо силу для натяжки проводу:

$$m_{\max} = 8,5 \cdot 10^3 \cdot d^2,$$

де  $d$  - максимальний діаметр дроту, який може намотувати верстат;

$$m_{\max} = 8.5 \cdot 10^3 \cdot 1.0 = 8500(\text{г}) = 8,5(\text{кг}).$$

Розрахуємо силу, яку повинен розвивати двигун для натягування проводу:

$$F = mg, \quad (2.7)$$

$$F = 8.5 \cdot 9.8 = 83.357.$$

Розрахуємо момент за наступною формулою (2.8):

$$M = F \cdot r, \quad (2.8)$$

де  $F$  - сила намотки;

$r$  - радіус бобіни.

$$M = 83.357 \cdot 0.15 = 12.503, \quad (\text{Н м}).$$

Необхідно розрахувати за формулою (2.9):

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \quad (2.9)$$

де  $n$  - частота обертання бобіни.

$$\omega = \frac{3.14 \cdot 700}{30} = 73.33, \quad (\text{рад/с}).$$

Розрахуємо необхідну потужність двигуна:

$$P = 12.503 \cdot 73.33 = 916.9(\text{Вт}) = 0,916(\text{кВт}).$$

Оскільки двигун працює в повторно-короткочасному режимі, то необхідно

розрахувати еквівалентний момент.

Розрахунок еквівалентного моменту двигуна натягу дроту. Розрахуємо при умові, що час пуску рівний 0. Розрахуємо максимальний час роботи двигуна:

$$t_{\max} = \frac{k \cdot t}{n} \text{ (с)}, \quad (2.9)$$

де  $k=999$  – максимальна кількість витків котушки в котушковій групі;

$n$  – частота обертання двигуна приводу намотки.

$$t_{\max} = \frac{999 \cdot 60}{2200} = 27 \text{ (с)}$$

Розрахунок еквівалентного моменту згідно з формулою (2.10):

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{6M^2 \cdot t_{\max} + 6M^2 \cdot t_{\max}}{12t_{\max} \cdot \beta_1 + 12t_{\text{prost}} \cdot \beta_2 + t_{\text{пов}} \cdot \beta_2 + t_{\text{знім}} \cdot \beta_2}}; \quad (2.10)$$

де  $M$ - момент двигуна;

$t_{\max}$ - максимальний час роботи двигуна;

$t_{\text{prost}}=5$  (с) час простою при перекиданні проводу в котушковій групі;

$t_{\text{пов}}=10$  (с) час повороту шаблону для намотки;

$t_{\text{знім}}=15$  (с) час знімання проводу з шаблонів і втягування в статор;

$\beta_1=1$  коефіцієнт охолодження двигуна при обертанні;

$\beta_2=0,4$  коефіцієнт охолодження двигуна при простої.

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 12.503 \cdot 27 + 6 \cdot 12.503 \cdot 27}{12 \cdot 27 \cdot 1 + 12 \cdot 5 \cdot 0.4 + 10 \cdot 0.4 + 15 \cdot 0.4}} = 11.9 \text{ , (Н м)}$$

тоді

$$P_{\text{екв}} = M_{\text{екв}} \cdot \omega = 11.9 \cdot 73.33 = 872.67 \text{ (Вт)} = 0,9 \text{ (кВт)}$$

За знайденою потужністю, і частотою обертання вибираємо двигун з такими параметрами [3]:

Р, кВт	$r_{я}+r_{дп},$ Ом	$\Phi, \text{мВб}$	$j, \text{кг}$ $\text{м}^2$	$I_n,$ А	$I_{\text{пар.обм}}$	$n_n, \text{об/хв}$	К-ість пар полюсів	$U_{\text{ном}},$ В	$C_x$
1,0	3,17	4,3	0.029	5.7	0.49	1000	2р=4	220	0,4

Розрахунок параметрів двигуна натяжки дроту:

Номінальна кутова швидкість двигуна по формулі (2.11):

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3.14 \cdot 1000}{30} = 104.72, (\text{рад/с}). \quad (2.11)$$

Сумарний опір кола якоря по формулі (2.12):

$$R_{\text{яsum}} = R_{я} + R_{дп} = 3.17 (\text{Ом}). \quad (2.12)$$

Швидкість ідеального холостого ходу по формулі (2.13)

$$\omega_0 = \omega_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{(U_{\text{ном}} - I_n \cdot R_{\text{яsum}})} = 114.09 \text{ рад/с}, \quad (2.13)$$

де  $U_{\text{ном}}$  – напруга живлення двигуна;

$I_n$  – струм якоря двигуна;

$R_{\text{яsum}}$  – сумарний опір кола якоря.

Конструктивний коефіцієнт по формулі (2.14)

$$C = k\Phi = \frac{U_{\text{ном}}}{\omega_0} = 1.928 \text{ В рад/с} \quad (2.14)$$

Індуктивність якорної обмотки по формулі (2.15):

$$L_{я} = \frac{U_{\text{ном}} \cdot C_x}{(p \cdot \omega_{\text{ном}} \cdot I_n)} = \frac{220 \cdot 0.4}{(2 \cdot 104.72 \cdot 0.49)} = 0.074 (\text{Гн}), \quad (2.15)$$

де  $C_x$  – конструктивний коефіцієнт;

$p$  – кількість пар полюсів;

$\omega_{\text{ном}}$  – номінальна кутова швидкість двигуна.

## 2.2 Розрахунок додаткового опору двигуна натяжки дроту

Запишемо вираз механічної характеристики для двигуна натяжки дроту у гальмівному режимі по формулі (2.16), [3]:

$$M = \frac{C^2 \cdot \omega_{nom}}{(Rя + R\partial)}, \text{ (Н м)} \quad (2.16)$$

де  $M$  – момент двигуна натяжки дроту;

$C^2$  – конструктивний коефіцієнт;

$\omega_{nom}$  – кутова швидкість двигуна;

$Rя$  – сумарний опір кола якоря двигуна;

$R\partial$  – додатковий опір кола якоря, для регулювання гальмівним моментом.

З цієї формули (2.17) необхідно виразити і знайти додатковий опір:

$$R\partial = \frac{C^2 \cdot \omega_{nom}}{M} - Rя \quad (2.17)$$

Необхідно розрахувати  $R\partial$  при  $M=M_{max}$ ,  $M=M_{min}$ , де

$M_{max}=12,503$  - максимальний момент двигуна при натяжці проводу максимального діаметру;

$M_{min}=0.125$  – мінімальний момент двигуна пра натяжці проводу мінімального діаметру. Маємо при  $M=M_{max}$  -  $R\partial=43,3$  (Ом); при  $M=M_{min}$  -  $R\partial=3110,9$  (Ом). Також для побудови гальмівної характеристики необхідно розрахувати  $\omega$  при  $R\partial=0$ :

$$\omega = \frac{M_{max} \cdot (Rя + R\partial)}{C^2} = 20.55 \text{ рад/с.}$$

По розрахункам приведеним вище будуємо гальмівну характеристику двигуна натяжки дроту.

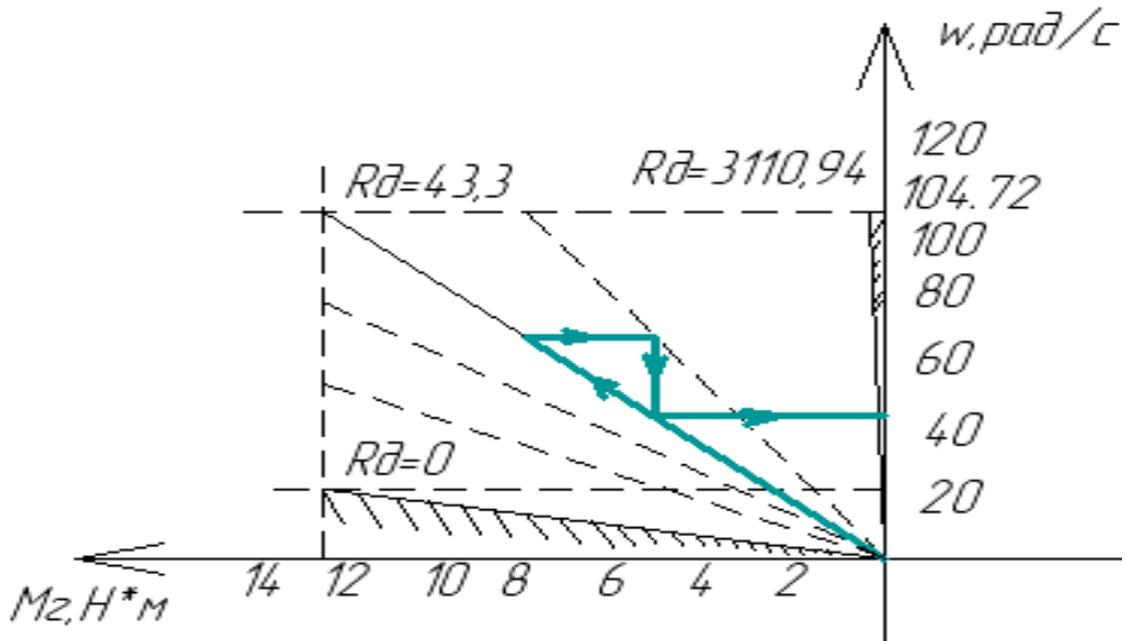


Рисунок 2.2 Механічні характеристики двигуна натяжки дроту

Розрахунок допустимого прискорення валу двигуна постійного струму і валу асинхронного двигуна

Допустиме прискорення – це значення, яке створює натяг без допомоги контуру регулювання. Вище нього контур буде непрацездатний.

1. Допустиме прискорення для максимального моменту (що відповідає максимальному натягу) визначаємо по формулі (2.18).

$$e = \frac{M}{j}, \text{ (рад/с}^2\text{)} \quad (2.18)$$

де  $e$  – кутове прискорення;

$J$  – момент інерції ДПС з моментом інерції бобіни;

$M$  – максимальний момент двигуна.

$$e = \frac{12.503}{0.029 + 0.038} = 186.6, \text{ (рад/с}^2\text{)}$$

2. Допустиме прискорення для мінімального моменту (що відповідає мінімальному натягу).

$$e = \frac{0.125}{0.029 + 0.038} = 1.86, (\text{рад/с}^2)$$

Ці межі перемножуємо на передаточне число редуктора і отримуємо межі допустимих прискорень асинхронного двигуна по формулі (2.19):

$$e_1 = i \cdot e, (\text{рад/с}^2) \quad (2.19)$$

де  $i$  – передаточне число редуктора.

1. Для максимального натягу:

$$e = 2 \cdot 186.6 = 373.2, (\text{рад/с}^2)$$

2. Для мінімального натягу:

$$e = 2 \cdot 1.86 = 3.73, (\text{рад/с}^2)$$

В результаті даного розрахунку ми отримали межі допустимих прискорень валу ДПС і валу асинхронного двигуна (двигуна намотки проводу).

### 2.3 Розрахунок моментів інерції механізмів намотки і переміщення

1. Для механізму намотки:

$$j_{sum} = (j_{dv} + j_{myfta} + j_{1koleso}) + \frac{(j_{dps} + j_{babina})}{i_1^2} + \frac{(j_{2koleso} + j_{val} + j_{motov})}{i_2^2}$$

де  $j_{sum}$  – сумарний момент інерції механізму намотки;

$j_{dv}=0,035$  – момент інерції двигуна намотки;

$j_{myfta}$  – момент інерції муфти;

$j_{1koleso}$  – момент інерції ведучого колеса;

$j_{dps}=0,029$  – момент інерції двигуна натяжки проводу;

$i_1^2$  – відношення між швидкостями двигуна намотки і двигуна натяжки проводу;

$j_{2koleso}$  – момент інерції веденого колеса;

$j_{val}$  – момент інерції валу;

$j_{\text{motov}}$  - момент інерції мотовила;

$i_2^2$  – передаточне число редуктора.

Для визначення моменту інерції муфти представимо її у вигляді циліндра радіусом  $r=0.03$  (м), і висотою  $H=0,005$  (м); також ми знаємо густину сталі, з якої виготовлена муфта  $\rho=7800$  (кг\*м<sup>3</sup>). Знаходимо об'єм муфти за формулою (2.20):

$$V = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h; \quad (2.20)$$

$$V = 9.42 \cdot 10^{-4}, \text{м}^3$$

Знаючи об'єм муфти знаходимо її масу по формулі (2.21):

$$m = \rho \cdot V = 7.348(\text{кг}) \quad (2.21)$$

Розраховуємо момент інерції муфти по формулі (2.22):

$$j = \frac{m \cdot r^2}{2} = 3.306 \cdot 10^{-3}, \text{кг м}^2 \quad (2.22)$$

Для знаходження моменту інерції ведучого колеса редуктора, представимо колесо у вигляді циліндра радіусом  $r=0.04$  (м), і висотою  $h=0.02$  (м); також у цьому циліндрі є отвір, під вал радіусом  $r_2=0.005$  (м), і висотою також  $h=0.02$  (м). Знаходимо об'єм ведучого колеса:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot (r - r_1) \cdot h = 2 \cdot 3.14 \cdot (0.04 - 0.005) = 1.539 \cdot 10^{-4}, \text{м}^3$$

Знаючи об'єм колеса знаходимо масу по формулі (2.23):

$$m = \rho \cdot V = 1.2(\text{кг}) \quad (2.23)$$

Розраховуємо момент інерції ведучого колеса редуктора по формулі (2.24):

$$j = \frac{m \cdot (r - r_1)^2}{2} = 7.351 \cdot 10^{-4}, \text{кг м}^2. \quad (2.24)$$

Аналогічно знаходимо моменти інерції веденого колеса редуктора, вала, мотовила, бабіни з проводом. Розраховуємо сумарний момент інерції системи намотування проводу:

$$j_{\text{sum}} = (0.035 + 3.306 \cdot 10^{-3} + 7.351 \cdot 10^{-4}) + \frac{(0.029 + 0.038)}{1.57} + \frac{(2.508 \cdot 10^{-3} + 2.449 \cdot 10^{-4} + 9.797 \cdot 10^{-9})}{2} = 0.083, \text{кг} \cdot \text{м}^2$$

2. Для механізму переміщення розраховуємо по формулі (2.25):

$$j_{sum} = (j_{dv} + j_{myfta} + j_{1koleso}) + \frac{(j_{2koleso} + j_{val})}{i^2}; \quad (2.25)$$

де  $j_{dv}=0.013$  – момент інерції двигуна механізму переміщення;

$j_{myfta}$  – момент інерції муфти;

$j_{1koleso}$  – момент інерції ведучого колеса редуктора;

$j_{2koleso}$  – момент інерції веденого колеса редуктора;

$j_{val}$  – момент інерції вала;

$i=2$  – передаточне число редуктора.

Моменти інерції муфти, ведучого, веденого колеса, вала знаходимо

аналогічно як  $i$  в попередньому розрахунку. Отже сумарний момент інерції механізму переміщення становитиме:

$$j_{sum} = (0.013 + 0.013 + 3.062 \cdot 10^{-3}) + \frac{(6.123 \cdot 10^{-3} + 2.449 \cdot 10^{-4})}{2} = 0.031 \text{ кг м}^2$$

#### 2.4 Синтез системи регульованого електроприводу намотки дроту та переміщення мотовила на базі АД з КЗ ротором

Системи частотного керування. Системи електропривода змінного струму значно різноманітніший, ніж системи постійного струму. Це пояснюється складністю і нелінійністю об'єкта керування, необхідністю одночасно регулювати декілька параметрів, векторним характером ланцюгів змінного струму. Із великого числа систем частотного керування АД з КЗ ротором набули широке застосування:

1) системи регулювання частоти за допомогою АІН, які будемо називати системами частотного керування;

2) системи частотно-струмового керування на базі АІС;

3) системи векторного керування;

При частотному керуванні одночасно із зміною частоти необхідно також змінювати напругу, яка підведена до статора. Якщо знехтувати спадом

напруги в ланцюзі статора, то можна вважати, що напруга на обмотці статора дорівнює ЕРС формула (2.26):

$$U \approx E = 4.44N_1 \cdot N_1 \cdot \Phi_m \cdot f_1 = \text{const} \cdot \Phi_m \cdot f_1, \quad (2.26)$$

де  $N_1$  - число витків в обмотці статора.

Допустимо, що  $U_1 = \text{const}$ , тоді при зменшенні частоти  $f_1$  магнітний потік буде зростати, що приведе до насичення магнітної системи, збільшенню втрат на гістерезис і вихрові струми, зниження ККД. Збільшення частоти визве зменшення магнітного потоку. При цьому зменшується момент АД, що також приводить до небажаних наслідків.

Існує декілька принципів одночасного регулювання частоти і напруги. Частіше всього бажають зберегти постійною перевантажувальну здатність двигуна, тобто зробити так, щоб при всіх режимах відношення максимального моменту до моменту сил опору залишалось постійним, формула (2.27):

$$\lambda = \frac{M_k}{M_c} = \text{const}. \quad (2.27)$$

Таким чином, ми приходимо до висновку, що напругу необхідно регулювати не лише, у функції частоти, але і в функції навантаження.

Критичний момент трифазного асинхронного двигуна [4]:

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}, \quad \text{де } \omega_0 = \frac{2\pi f_1}{Z_n}. \quad (2.28)$$

Якщо знехтувати активним опором статора, то:

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0 X_k}. \quad (2.29)$$

Індуктивний опір пропорційний частоті, тобто  $X_k \equiv f_1$ , значить критичний момент прямо пропорційний квадрату напруги і обернено пропорційний квадрату частоти, тому:

$$\lambda = \frac{M_k}{M_c} = \text{const} \frac{U_1^2}{(f_1^2 M_c)}. \quad (2.30)$$

Порівнюючи між собою два режими роботи АД, один із яких приймемо за номінальний, на основі (2.4):

$$\frac{U_1}{U_{1ном}} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \sqrt{\frac{M_c}{M_{c.ном}}} \quad (2.31)$$

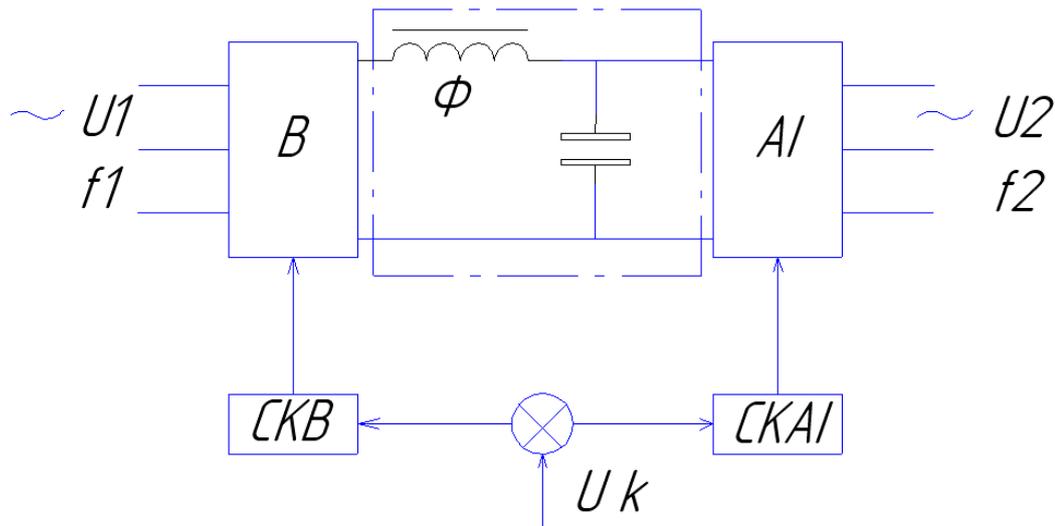


Рисунок 2.3 Блок-схема ПЧ з ланкою постійного струму

При зниженні частоти індуктивні опори статора та ротора зменшуються пропорційно  $f$ , тому струм буде збільшуватися і машина – перегріватися. Таким чином, необхідно зі зменшенням частоти зменшувати і напругу, тобто слідувати пропорційному закону регулювання ( $U/f = \text{const}$ ).

ПЧ з ЛПС дають змогу регулювати вихідну частоту в широких межах (як вгору, так і вниз від частоти мережі живлення), а також значення вихідної напруги від нуля до максимуму.

Недоліком ПЧ з ЛПС є подвійне перетворення електричної енергії, що знижує ККД перетворювача та збільшує його малогабаритні показники.

## Вибір перетворювача частоти

Вибираємо частотно-регульований електропривод "ЕРАТОН-М4". Частотно-регульовані електроприводи "ЕРАТОН-М4" призначені для плавної зміни частоти обертання електродвигунів змінного струму, що входять до складу загальпромислових і спеціальних машин і механізмів.

Для механізму намотки вибираємо двигун з наступними параметрами:

Рн,кВт	n <sub>0</sub> ,об/хв	n <sub>n</sub> ,об/хв	U <sub>n</sub> ,В	јдв	cosψ	η	R <sub>1</sub> <sup>I</sup>	X <sub>1</sub> <sup>II</sup>	R <sub>2</sub> <sup>II</sup>	X <sub>2</sub> <sup>II</sup>
3,0	3000	2874	380	0,0035	0.88	0.84	0.072	0.057	0.047	0.1

Для механізму переміщення вибираємо двигун з наступними параметрами:

Рн,кВт	n <sub>0</sub> ,об/хв	n <sub>n</sub> ,об/хв	U <sub>n</sub> ,В	јдв	cosψ	η	R <sub>1</sub> <sup>I</sup>	X <sub>1</sub> <sup>II</sup>	R <sub>2</sub> <sup>II</sup>	X <sub>2</sub> <sup>II</sup>
1,5	750	700	380	0,013	0.65	0.74	0.11	0.16	0.093	0.32

Розрахунок параметрів структурної схеми АД.

Частотно-регульовані електроприводи з електромагнітним гальмуванням і розсіюванням енергії на резисторі для механізму намотки:

$$M_c = M_n = \frac{9,55 \cdot P_n}{n_n} = \frac{9,55 \cdot 3000}{3000} = 9,98 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для механізму переміщення:

$$M_c = M_n = \frac{9,55 \cdot P_n}{n_n} = \frac{9,55 \cdot 1500}{700} = 20,46 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Максимальний момент двигуна для механізму намотки:

$$M_{кр} = \lambda \cdot M_n = 1,9 \cdot 9,55 = 18,145 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для механізму переміщення:

$$M_{кр} = \lambda \cdot M_n = 1,9 \cdot 20,46 = 38,87 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де  $\lambda = 1,9$  - кратність критичного моменту.

Номінальне ковзання для:

механізму намотки формула (2.32):

$$s_{НОМ} = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{750 - 700}{750} = 0,067 \quad (2.32)$$

Критичне ковзання по формулі (2.33):

$$s_{кр} = s_{НОМ} \cdot (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 0,067 \cdot (1,9 + \sqrt{1,9^2 - 1}) = 0,236 \quad (2.33)$$

де  $\lambda_m = 1,9$  - кратність максимального моменту

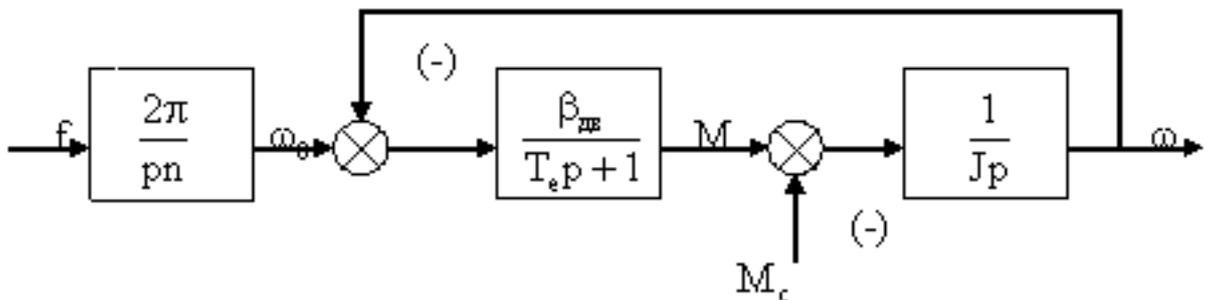


Рисунок 2.4 Лінеаризована структурна схема асинхронного двигуна

Переведемо опори із відносних одиниць у абсолютні, для цього знайдемо коефіцієнт приведення опорів  $K_{пр}$  для механізму намотки по формулі (2.34):

$$K_{пр} = \frac{U_H}{I_H}; \quad K_{пр} = \frac{220}{6.15} = 35.77 \quad (2.34)$$

Для механізму переміщення формула (2.35):

$$K_{пр} = \frac{220}{4.73} = 46.51;$$

$$I_H = \frac{P_2}{3U_H \cdot \cos\varphi \cdot \eta}; \quad (2.35)$$

$$\text{Механізм переміщення: } I_H = \frac{1500}{3 \cdot 220 \cdot 0,65 \cdot 0,74} = 4,73 \text{ А}$$

$$\text{Механізм намотки: } I_H = \frac{3000}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,84} = 6,15 \text{ А}$$

де  $I_H$  – номінальний струм статора.

Знайдемо абсолютні значення опорів, формула (2.36):

$$R_1 = R_1' \cdot K_{np};$$

Механізм переміщення:  $R_1 = 0,11 \cdot 46,51 = 5,12$  Ом

Механізм намотки:  $R_1 = 0,072 \cdot 35,77 = 2,57$  Ом,

де  $R_1'$  - активний опір фази статора;

$R_1$  - приведений активний опір фази статора.

$$R_2' = R_2'' \cdot K_{np};$$

Механізм переміщення:  $R_2' = 0,093 \cdot 46,51 = 4,33$  Ом

Механізм намотки:  $R_2' = 0,047 \cdot 35,77 = 1,68$  Ом,

де  $R_2''$  - активний опір фази ротора;

$R_2'$  - приведений активний опір фази ротора.

$$X_1 = X_1' \cdot K_{np};$$

Механізм переміщення:  $X_1 = 0,16 \cdot 46,51 = 7,44$  Ом

Механізм намотки:  $X_1 = 0,057 \cdot 35,77 = 2,03$  Ом

де  $X_1'$  - реактивний опір фази статора;

$X_1$  - приведений реактивний опір фази статора

$$X_2' = X_2'' \cdot K_{np};$$

Механізм переміщення:  $X_2' = 0,32 \cdot 46,51 = 14,88$  Ом

Механізм намотки:  $X_2' = 0,1 \cdot 35,77 = 3,57$  Ом,

де  $X_2''$  - реактивний опір фази ротора;

$X_2'$  - приведений реактивний опір фази ротора.

Електромагнітна постійна часу  $T_e$ :

$$T_e = \frac{X_{\kappa}}{\omega_0 \cdot R_2'};$$

Механізм переміщення:  $T_e = \frac{22,32}{78,54 \cdot 4,33} = 0,0656 \text{ с.}$

Механізм намотки:  $T_e = \frac{5,607}{314 \cdot 1,68} = 0,0096 \text{ с.}$

Знайдемо реактивний опір короткого зімкнення:

$$X_k = X_1 + X_2';$$

Механізм переміщення:  $X_k = 7,44 + 14,88 = 22,32 \text{ Ом}$

Механізм намотки:  $X_k = 2,03 + 3,57 = 5,607 \text{ Ом,}$

де  $X_k$ - реактивний опір короткого замикання.

Знайдемо кутові швидкості:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30};$$

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30};$$

Механізм переміщення:  $\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,54 \text{ рад/с;}$

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 700}{30} = 73,3 \text{ рад/с;}$$

Механізм намотки:  $\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/с;}$

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 2871}{30} = 300,478 \text{ рад/с;}$$

де  $\omega_0$ - синхронна кутова швидкість обертання поля статора;

$\omega_n$  - номінальна кутова швидкість обертання валу двигуна;

$n_0$ - синхронна частота обертання поля статора;

$n_n$  - номінальна частота обертання валу двигуна.

Усереднене значення модуля статичної жорсткості механічної характеристики при навантаженнях, що не перебільшують номінальне значення.

$$|\beta_{\partial\epsilon}| \approx \frac{M_n}{\omega_0 - \omega_n}; \quad |\beta_{\partial\epsilon}| = \frac{9.55}{314 - 300.478} = 30.74; \quad (2.37)$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}; \quad M_n = \frac{1500}{73.3} = 20,46 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.38)$$

де  $M_n$  - номінальний момент двигуна.

Далі проводимо розрахунок структурної схеми електропривода намотки дроту.

Електромеханічна постійна часу електропривода по формулі (2.39) [4]:

$$T_e = \frac{X_K}{\omega_0 \cdot R_2'}; \quad T_e = \frac{5.607}{314 \cdot 1.68} = 0.0096 \text{ с}. \quad (2.39)$$

Загальний момент інерції механічної системи беремо з попереднього розрахунку:

$$J_{\text{заг}} = 0,083 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Електромеханічна постійна часу електропривода згідно[5]:

$$T_m = \frac{J_{\text{заг}}}{|\beta_{\partial\epsilon}|} = \frac{0,083}{0.74} = 0.112 \text{ с}. \quad (2.40)$$

Будуємо структурну схему електропривода.

Виведемо основні передаточні функції системи. Передаточна функція перетворювача частоти:

$$W_{nc} = \frac{K_{nc}}{1 + \tau p}.$$

де  $\tau$  - постійна часу перетворювача частоти.

Передаточна функція за керуючою дією (на вході напруга, що подається на якорне коло, на виході – кутова швидкість):

$$W_1 = \frac{K_o}{T_m T_e p^2 + T_m p + 1},$$

де  $T_e$ ,  $T_m$  - електромагнітна та електромеханічна постійні часу відповідно.

Запишемо передаточну функцію за збурюючої дією:

$$W_2 = \frac{K_o(1 + T_e p)}{T_m T_e p^2 + T_m p + 1}.$$

Передаточна функція тахогенератора:

$$W_{m2} = K_{33} = K_{m2}.$$

Передаточна функція регулятора:

$$W_{рег} = K_{рег}.$$

Загальний вигляд передаточної функції :

$$\omega(p) = W_1 U_3(p) - W_2 M_c(p);$$

$$\omega(p) = W_{рег} \cdot W_{пч} \cdot W_1 \cdot (U_3(p) - U_{33}(p) - W_2 \cdot M_c(p));$$

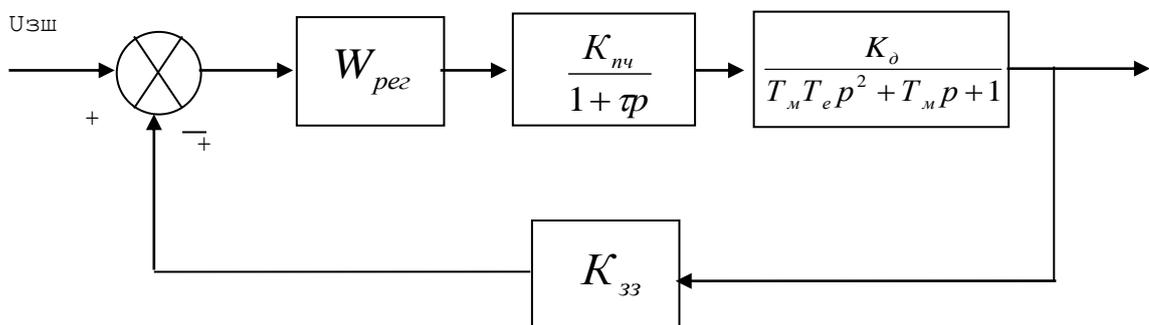
$$U_{33}(p) = W_{тр} \omega(p).$$

Отримаємо загальний вираз передаточної функції:

$$\omega(p) = \frac{W_{рег} \cdot W_{пч} \cdot W_1}{1 + W_{рег} \cdot W_{пч} \cdot W_1 \cdot W_{тр}} \cdot U_3(p) - \frac{W_2}{1 + W_{рег} \cdot W_{пч} \cdot W_1 \cdot W_{тр}} \cdot M_c(p).$$

Для синтезу регулятора знехтуємо збуренням.

Тоді отримаємо слідуючу структурну схему з від'ємним зворотнім зв'язком по швидкості.



Розрахуємо параметри структурної схеми.

Коефіцієнт підсилення перетворювача частоти:

$$K_{пч} = \frac{f}{U} = \frac{50}{10} = 5,$$

де  $f$  – частота напруги мережі;

$U$  – сигнал керування перетворювача частоти.

Коефіцієнт підсилення двигуна:

$$K_{\text{дв}} = \frac{\omega_0}{f} = \frac{314}{50} = 6.28,$$

де  $\omega_0$  - синхронна кутова швидкість обертання поля статора.

Далі можна перейти до рішення відносно методу розрахунку регулятора. Приймаємо рішення оптимізувати контур на технічний оптимум. При цьому будемо компенсувати дві послідовні ланки зі сталими часу  $T_e$  та  $T_m$ . В такому регулятор буде мати інтегральну складову і система буде астатичною.

Розрахунок каналу зворотного зв'язку.

Тахогенератор будемо вважати безінерційною ланкою. Поряд з тахогенератором можливо буде необхідно використовувати дільник напруги. Критерій рішення про застосування дільника слідуючий: в статичному режимі напруга на виході зворотного зв'язку не повинна перевищувати величину сигналу керування. Тобто для обраного нами перетворювача для номінальної швидкості двигуна напруга не повинна бути більшою 5 В.

Вибираємо тахогенератор з наступними даними:

максимальна робоча швидкість – 3000 об/хв (157,1 1/с);

вихідна ЕРС – 230 В.

Тоді коефіцієнт передачі тахогенератора  $K_{TG}$  знайдемо як відношення вихідного сигналу до вхідного в статичному режимі роботи.  $K_{TG} = 230 / 157,1 = 1,464$ .

Далі необхідно знайти величину дільника напруги, так як частоті обертання тахогенератора в 2200 об/хв буде відповідати ЕРС  $(2200/3000)*230V = 168,67$  В. Таку величину недопустимо подавати на регулятор. Величину дільника можна знайти виходячи з виразу загальної передаточної функції оптимізованого контуру швидкості.

$$W_{(TO)прям} = \frac{\omega_{\partial в}(p)}{U_{\kappa}(p)} = \frac{1/K_{ззи}}{2T_{нч}p \cdot (T_{нч}p + 1) + 1}.$$

Прирівнюємо  $p=0$  (для статичного режиму).

$$W_{Опт} = \frac{\omega_{\partial в}}{U_{\kappa}} = \frac{1}{K_{ззи}}.$$

$$\text{Тоді } K_{ззи} = K_{ТГ} \cdot K_{\text{дільника}} = \frac{U_{\kappa}}{\omega_{\partial в}} = \frac{5}{314} = 0.0159$$

$$\text{Звідси } K_{\text{дільника}} = \frac{K_{ззи}}{K_{ТГ}} = \frac{0.0159}{1,464} = 0.0108 = \frac{1}{92.59}.$$

Тобто необхідно в 92,59 разів зменшити напругу з виходу тахогенератора.

Синтез ПІД-регулятора.

Настроїмо контур регулювання швидкості на технічний оптимум.

$$W_{рег} \cdot \frac{K_{\partial} \cdot K_{нч} \cdot K_{мг}}{(1+T_{нч}p) \cdot (T_e T_m p^2 + T_m p + 1)} = \frac{1}{2T_{\mu}p \cdot (T_{\mu}p + 1)}.$$

Прийmemo  $T_{нч} = T_{\mu}$ , тоді

$$W_{рег} = \frac{(1+T_{нч}p) \cdot (T_e T_m p^2 + T_m p + 1)}{2T_{нч}p \cdot (T_{нч}p + 1) \cdot K_{\partial} \cdot K_{нч} \cdot K_{ззи}}.$$

Зробимо заміну:

$$T_1 = 2T_{нч} \cdot K_{\partial} \cdot K_{нч} \cdot K_{ззи},$$

$$\text{тоді } W_{рег} = \frac{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}{T_1 p} = \frac{T_e T_m}{T_1} p + \frac{T_m}{T_1} + \frac{1}{T_1 p}.$$

Підставимо значення і отримаємо складові ПІД-регулятора:

$$T_1 = 2 \cdot 0,1 \cdot 6,28 \cdot 10 \cdot 0,0159 = 0,02$$

$$W_{рег}(TO) = \frac{0,0656 \cdot 0,021}{0,199} p + \frac{0,021}{0,199} + \frac{1}{0,199 p} = 0,0069 p + 0,105 + \frac{1}{0,199 p}.$$

Можна побачити, що в задачі маємо не класичний випадок. Тому, що мала стала часу  $\epsilon$  по величині самою великою. Обґрунтуванням рішення про прийняття некомпенсованої сталої часу самою великою по величині  $\epsilon$  те, що частотний привод зі скалярним керуванням потребує для працездатності регулятора застосування задатчиків інтенсивності. В нашому випадку задатчиком є фільтр перетворювача енергії. Для завершення синтезу рекомендується перевіряти двигун на допустимість величин струмів в перехідних процесах з допомогою комп'ютерного моделювання.

Очікувана тривалість перехідного процесу  $t_{пп} = 4,1T_{пч} = 0,41$  с.

Перерегулювання  $\sigma = 4,3$  %

## 2.5 Вибір датчика натягу

По даним розрахунків і з конструкторських поглядів вибираємо датчик натягу типу "ДАН-У-10" .

Датчик натягу "ДАН-У-10" призначений для вимірювання величини натягнення дроту, перетворення реєстрованого вихідного сигналу в електричний сигнал постійного струму або постійної напруги і подальшої передачі для реєстрації на каротажну станцію.

Допускається по спеціальному замовленню споживача виготовлення датчика натягнення для вимірювання натягнення дроту від 0 до 100 кН і від 0 до 50 кН з рівнем вихідного сигналу від 0 до 10 мА; від 4 до 20 мА; від 0 до 5 мА і від 0 до 10 Ст. Технічні параметри даного датчика приведені у таблиці 2.1.



Рисунок 2.5 Датчик натягу

Технічні параметри датчика натягу дроту.

Таблиця 2.1

Найменування параметрів і характеристик	Номінальні значення
Діапазон вимірювання натягу дроту	від 0 до 100 кН
Рівень вихідного сигналу	від 0 до 10 мА
Номінальний коефіцієнт перетворення	0,1 мА/кН
Характеристики погрішності	
Основна погрішність вимірювання	$\pm 0,5 \%$
Додаткова погрішність вимірювання	0,25 %
Нелінійність	$\pm 0,25 \%$
Гістерезис	$\pm 0,25 \%$
Робочий діапазон температури вимірювання	50 до плюс 50°C
Напруга живлення постійного струму	+12 У • (+ 15 В / - 0,5 В)
Струм споживання	не більш 40 мА
Габаритні розміри датчика:	
Габаритні розміри датчика без вузла встройки	95x65x180 мм
2 Габаритні розміри датчика з вузлом	100x180x330 мм

Габаритні розміри датчика з вузлом встройки для нижнього блок-баланса	100x180x460 мм
Маса датчика:	
Маса датчика без вузла встройки	не більш 1,8 кг
2 Маса датчика з вузлом встройки для верхнього блок балансу	не більш 8,5 кг
Маса датчика з вузлом встройки для нижнього блок балансу	не більш 12,5 кг
Час встановлення робочого режиму датчика після включення	не більш 5 мін
Час безперервної роботи датчика	Не обмежено
Показники надійності:	
Вірогідність безвідмовної роботи датчика за 50 годин безперервної роботи	не менше 0,96
Середній термін служби датчика до списання	не менше 5 років
Робочі умови експлуатації:	
Інтервал температур навколишнього середовища	від мінус 50 до плюс 50 °С
Відносна вологість повітря при 35 °С	не більш 95 %

Параметри даного датчика натягу дроту повністю задовольняють вимоги нашої системи регулювання.

## 2.6 Синтез ПІ – регулятора контуру регулювання

Підбирається П - складова. І - складова на цьому етапі не використовується взагалі. В каналі завдання подається ступінчастий сигнал на самій максимально можливій величині, найчастіше 10 – 12 В (одна із жорстких умов). Величина П - складової підбирається (або підраховується) так, щоб

початковий сигнал в контурах не перевищував максимально допустимого значення. (Примітка: аналіз ведеться по графіках перехідних процесів.)

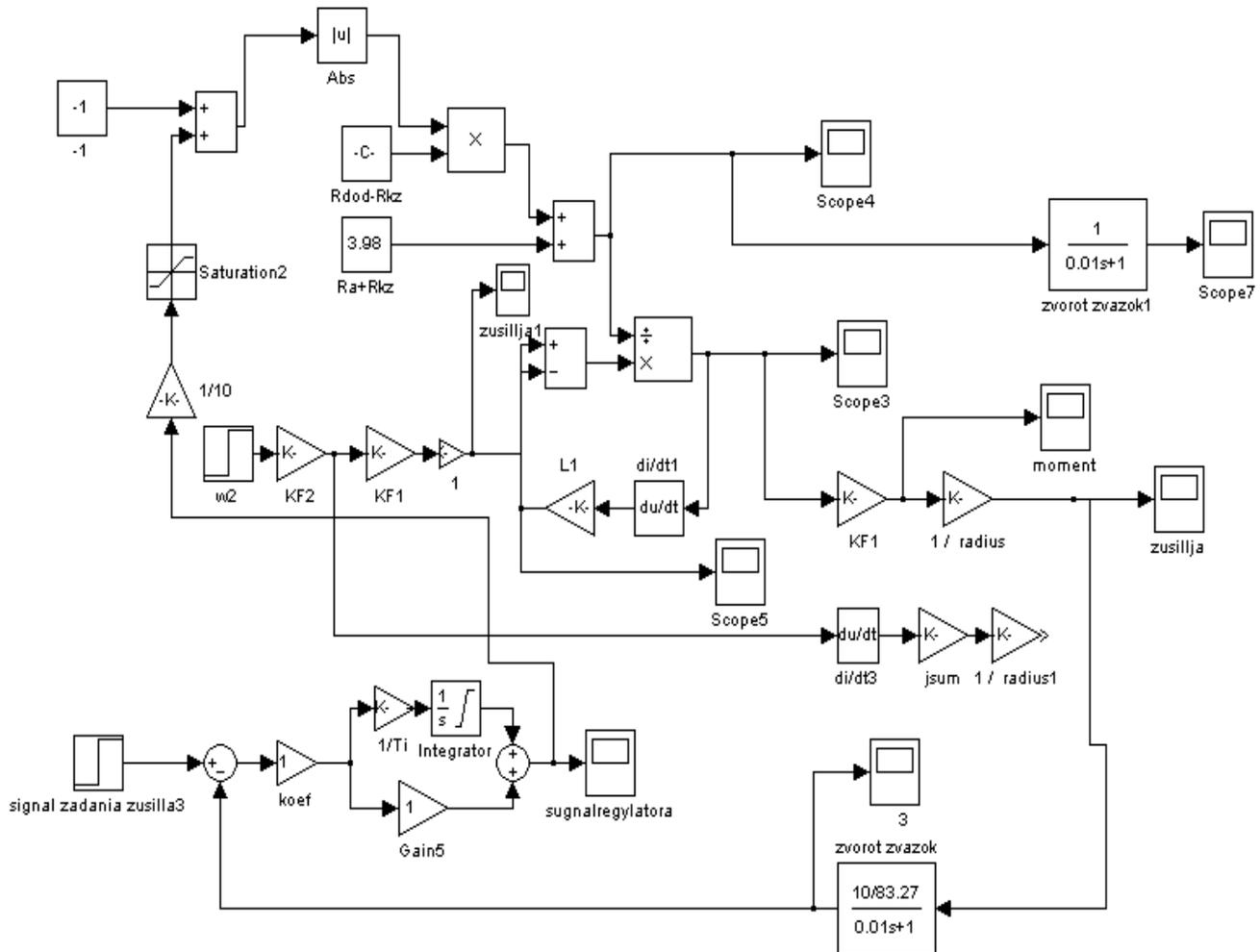


Рисунок 2.6 Схема для синтезу ПІ – регулятора

Не перевищував саме:

а) на виході регулятора напруга не повинна перевищувати максимально можливої з технічної точки зору величини (в нашому випадку 10В). Або ж величини максимально допустимої для системи. Якщо перевищує, то П-складову необхідно зменшувати;

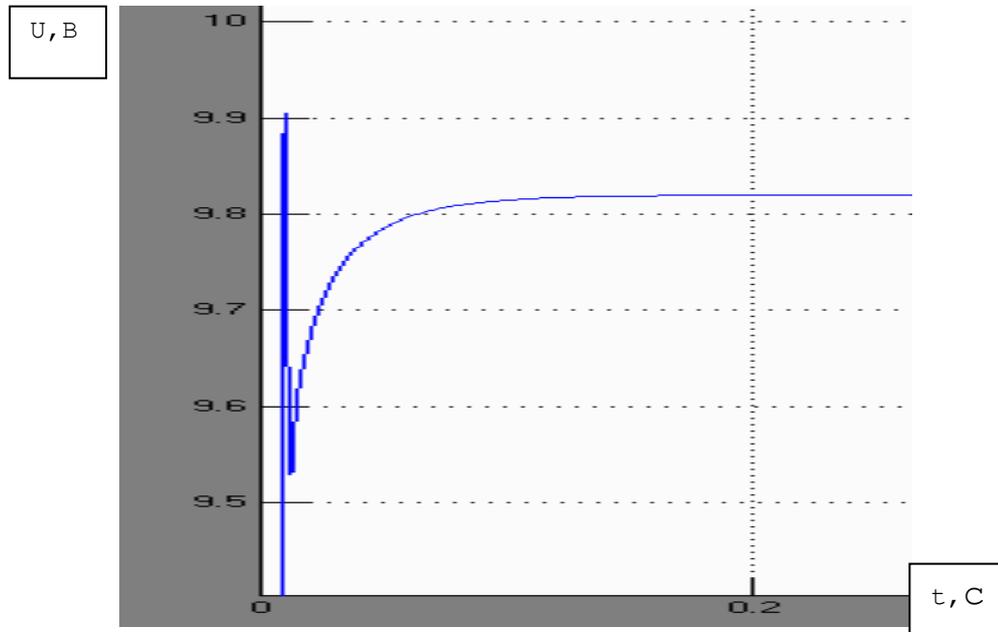


Рис 2.7 Перехідний процес з виходу регулятора

З графіка бачимо що сигнал на виході регулятора не перевищує максимально допустиме значення – 10В.

б) якщо керується двигун, то аналізується ще і струм якоря. На початку процесу він не повинен перевищувати величини (2-2,5) від I ном. При перевищенні ж II –

складову необхідно зменшувати;

в) іноді необхідно аналізувати і момент на валу. Надмірна величина котрого може привести до фізичної руйнації елементів механічної частини.

2. Після вибору II складової додається до регулятора (паралельно) та попередньо підбирається I – складова регулятора. В загальному випадку величину сталої часу інтегратора можна спочатку прийняти на рівні сталої часу об'єкта керування. Наприклад, якщо об'єкт – обмотка, то стала часу I - складової може бути вибрана на рівні електромагнітної сталої часу цієї обмотки. Якщо сталих дві, то можна взяти суму їх величин.

$$T_i = T_E + \tau_{датч} = \frac{0,074}{3,9} + 0,01 = 0,028 \text{ с.}$$

3. Робиться більш точніший підбір I – складової. При цьому якщо збільшувати сталу часу I – складової регулятора (коефіцієнт в знаменнику

біля оператора Лапласа), то процеси в контурах уповільнюються. Якщо ж зменшувати сталу часу  $I$  – складової регулятора, то процеси в контурах прискорюються. Але тут може з'явиться перерегулювання на перехідному процесі як вихідної координати так і координат інших, а воно може бути недопустиме. Його величину необхідно перевірити. Зменшування сталої інтегратора можна проводити до тих пір, поки система не отримає необхідної швидкодії, або ж якась із координат не почне виходити за допустиме значення. Перевірка відбувається за принципами 1а, 1б, 1в. З графіків ПП визначаємо час ПП, критерій:  $0.95 \cdot F_{зус.уст}$ , він складає 0,1 с. Оскільки час перехідного процесу складає 0,1с, то система має хорошу швидкодію, що задовольняє технологічним вимогам.



Рис. 2.8 Перехідний процес в регуляторі

4. Після остаточного вибору  $I$  - складової систему необхідно перевірити на запас по стійкості. Якщо він замалий, то необхідно або зменшувати величину

П - складової, або ж збільшувати сталу часу І складової. Для цього:

а) будемо еквівалентну лінеаризовану модель;

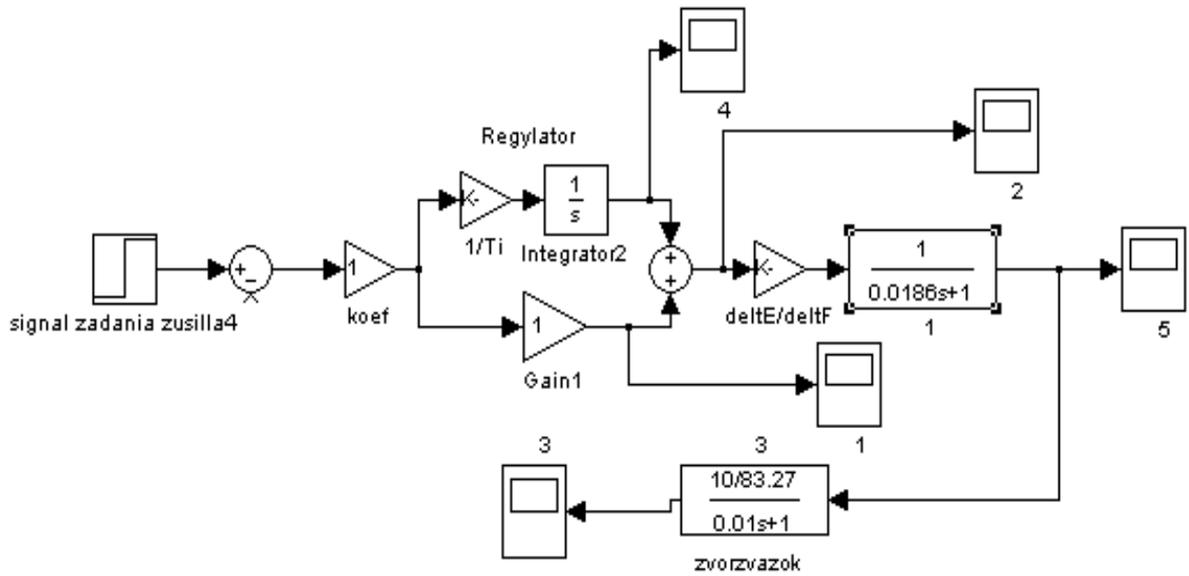


Рисунок 2.9 Еквівалентна лінеаризована модель

б) задаємо параметри моделі;

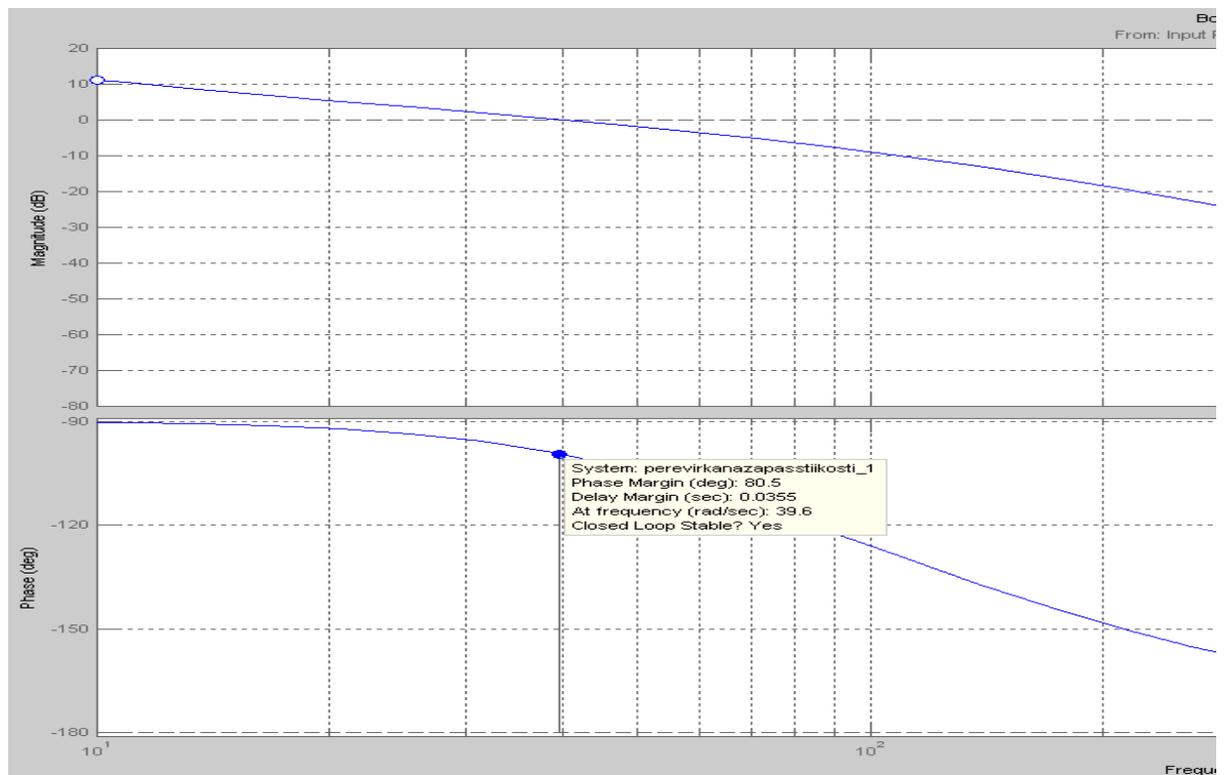
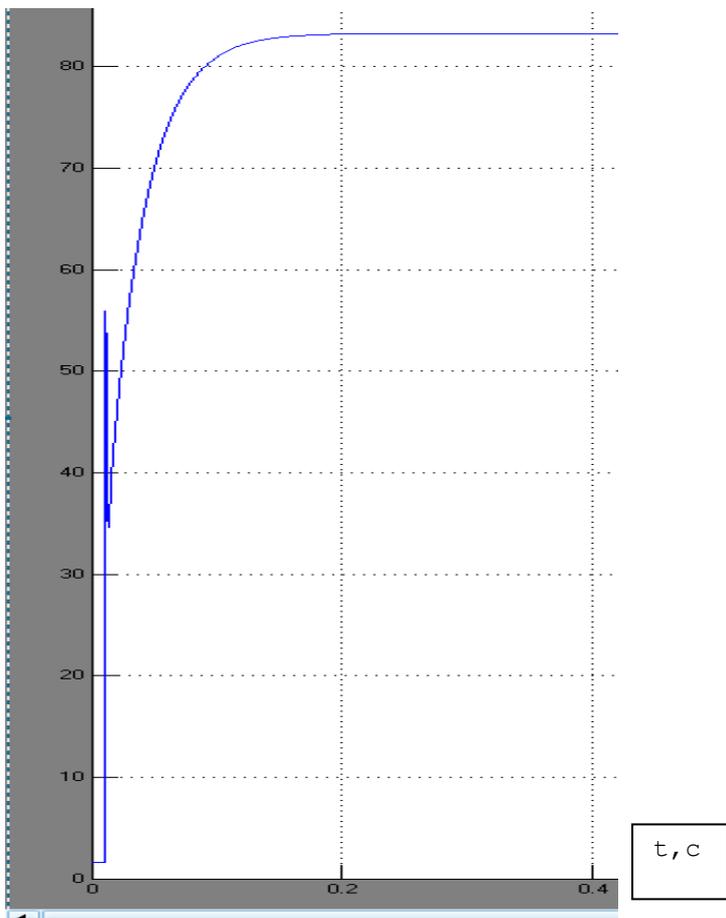
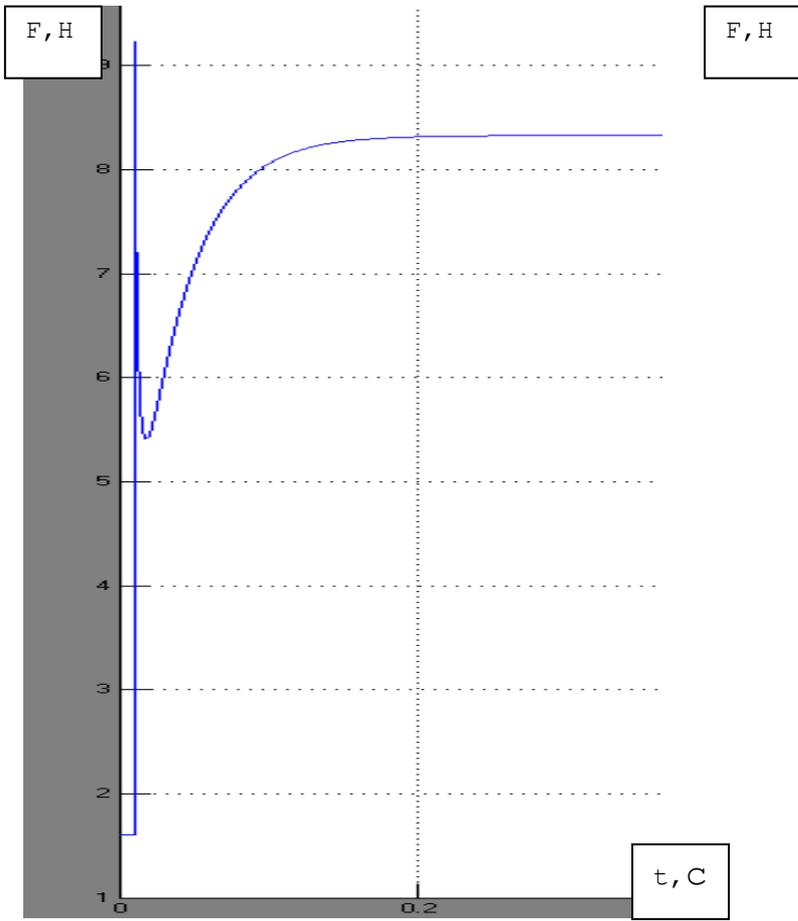


Рисунок 2.10 Дослідження запасів стійкості контуру регулювання зусилля натягу

З графіків бачимо що запас по фазі достатній і складає  $80,5^\circ$ .

6. Окремо розглядається випадок нелінійної системи. Найпростіша перевірка тут полягає в знаходженні тієї робочої ділянки, на якій запаси по стійкості та забезпечення технологічних вимог щодо регулювання (1а, 1б, 1в) – погіршуються. Тут необхідно перевірити чи буде забезпечена потрібна якість на цій найгіршій ділянці. Якщо так, то регулятор вважається синтезованим. Якщо якість незадовільна (малий запас по стійкості, або ж не виконуються вимоги 1а, 1б, 1в) то параметри ПІ краще підібрати вже саме для цієї ділянки. При цьому можуть погіршуватися якість керування для інших ділянок, наприклад втрачається швидкодія (але збільшується запас). Якщо таке погіршення допустиме, то задача синтезу регулятора розв'язана. Якщо погіршення недопустиме, то необхідно синтезувати систему з адаптацією параметрів регулятора. Коли б система керування сама підбирала найкращі величини в залежності від рівня вихідної або проміжної координати (швидкості, струму).

Взагалі метод дослідження ділянок ефективний, коли в прямому каналі існує саме елемент насичення. Тобто необхідно перевірити як реагує система при менших сигналах завдання (менших силах натягу дроту).



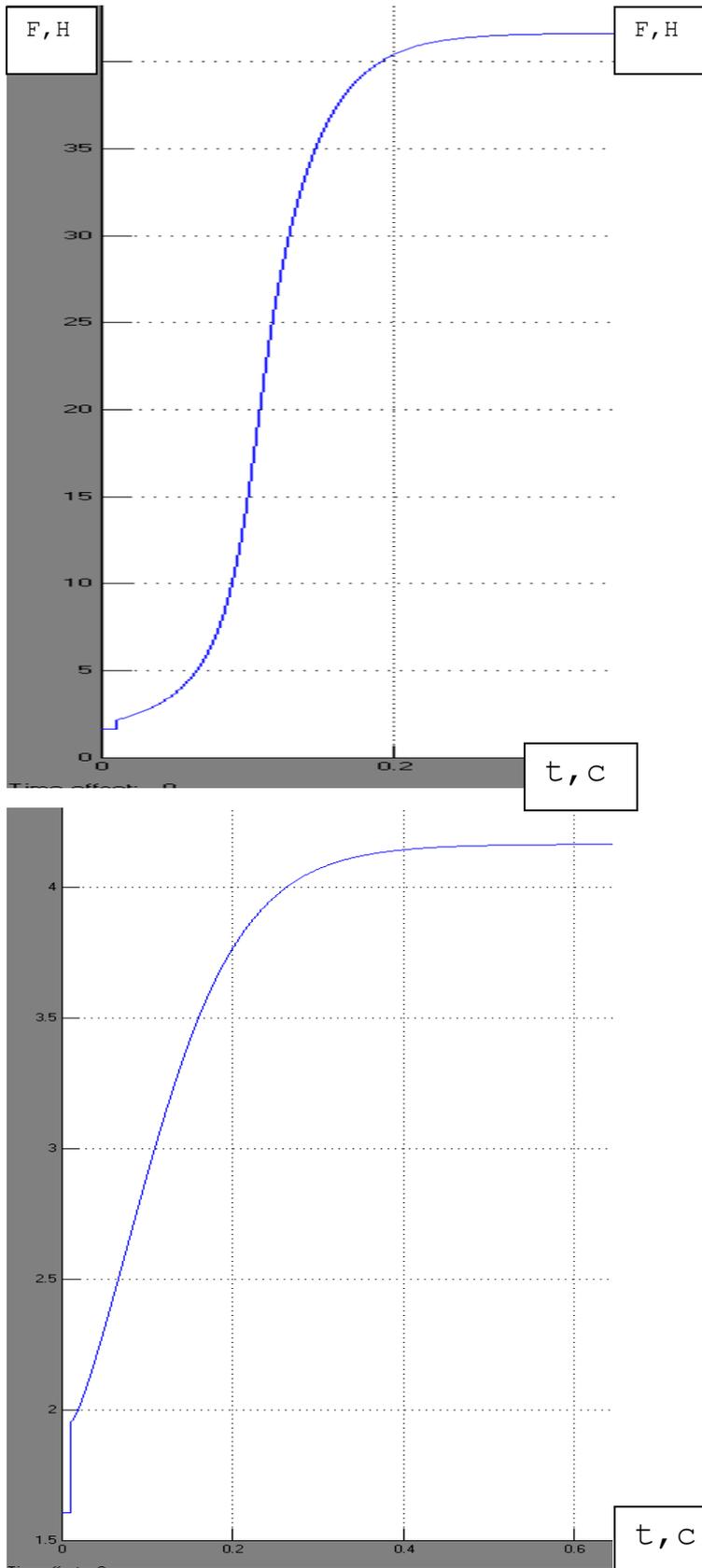


Рисунок 2.11 Перехідні процеси в системі керування

З графіка ми бачимо що система добре реагує і при малих сигналах завдання (малі сили натягу дроту), запас по стійкості зростає, але час

перехідного процесу також збільшується. Для прикладу при максимальному сигналові завдання час перехідного процесу складав  $\tau_{n.n} = 0,1$  с, а при мінімальному сигналові завдання  $\tau_{n.n} = 0,2$  с.

(Критерій:  $0.95 \cdot F_{зв.уем}$ ). Дані параметри задовольняють технологію.

Для збільшення швидкодії регулятора необхідно щоб регулятор був зі змінними параметрами. Тобто при падінні сигналу завдання регулятор сам повинен збільшувати коефіцієнт передачі головного каналу. Ми рекомендуємо на основі вивчення віртуальної моделі використовувати регулятор на основі мікроконтролера, який би сам підстроював коефіцієнт передачі головного каналу в залежності від сигналу завдання.

Висновок: в результаті розрахунку та синтезу за допомогою віртуальної моделі на комп'ютері, ми синтезували регулятор двигуна натяжки дроту. Всі параметри регулятора повністю задовольняють технологію. В результаті перевірки швидкодії регулятора при різних сигналах завдання, ми побачили що швидкодія системи достатньо висока. Отже будемо вважати що регулятор вибрано вірно.

## 2.7 Дослідження реакції системи на прискорення валу ДПС

Для дослідження реакції системи на прискорення валу ДПС необхідно в модель ввести задатчик інтенсивності розгону валу ДПС, де ми-б задавали оберти двигуна і час за який двигун повинен розігнатися до цих обертів. Цей зв'язок зображено на рис 2.12.

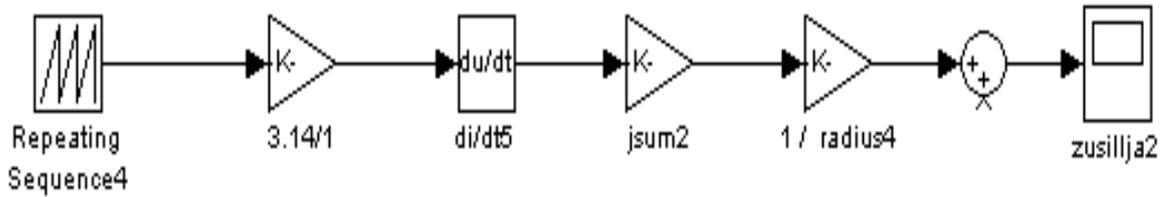


Рисунок 2.12 Задатчик інтенсивності розгону валу ДПС

Вводимо дані:

Repeating Sequence 2 – вводимо час розгону і оберти до яких потрібно розігнатися;

$J_{\text{sum}2}$  – сумарний момент інерції системи;

$1/\text{radius}4$  – радіус бобіни з дротом.

Дослід 1: розгін валу до обертів 2200 за 10 с.

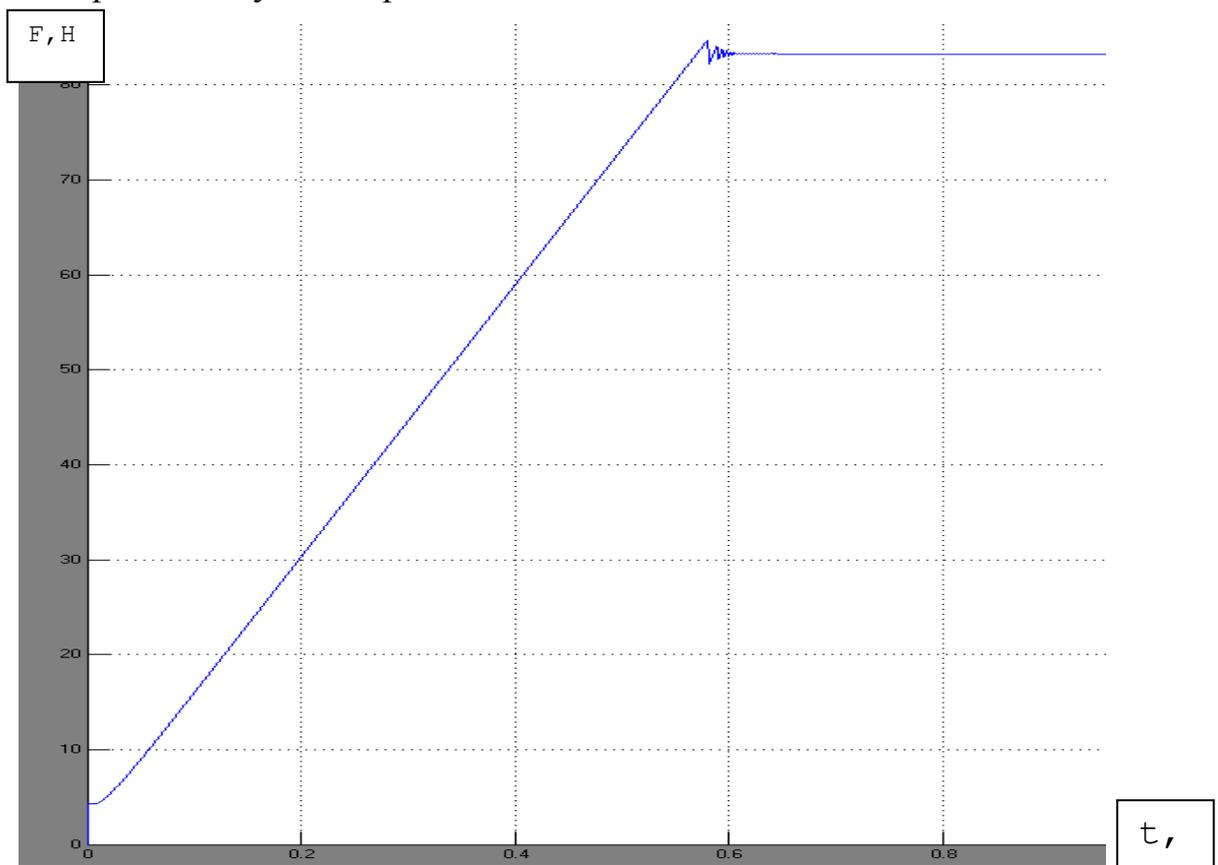


Рисунок 2.13 Перехідний процес двигуна натяжки дроту

Дослід 2: розгін валу до обертів 2200 за 5 с.

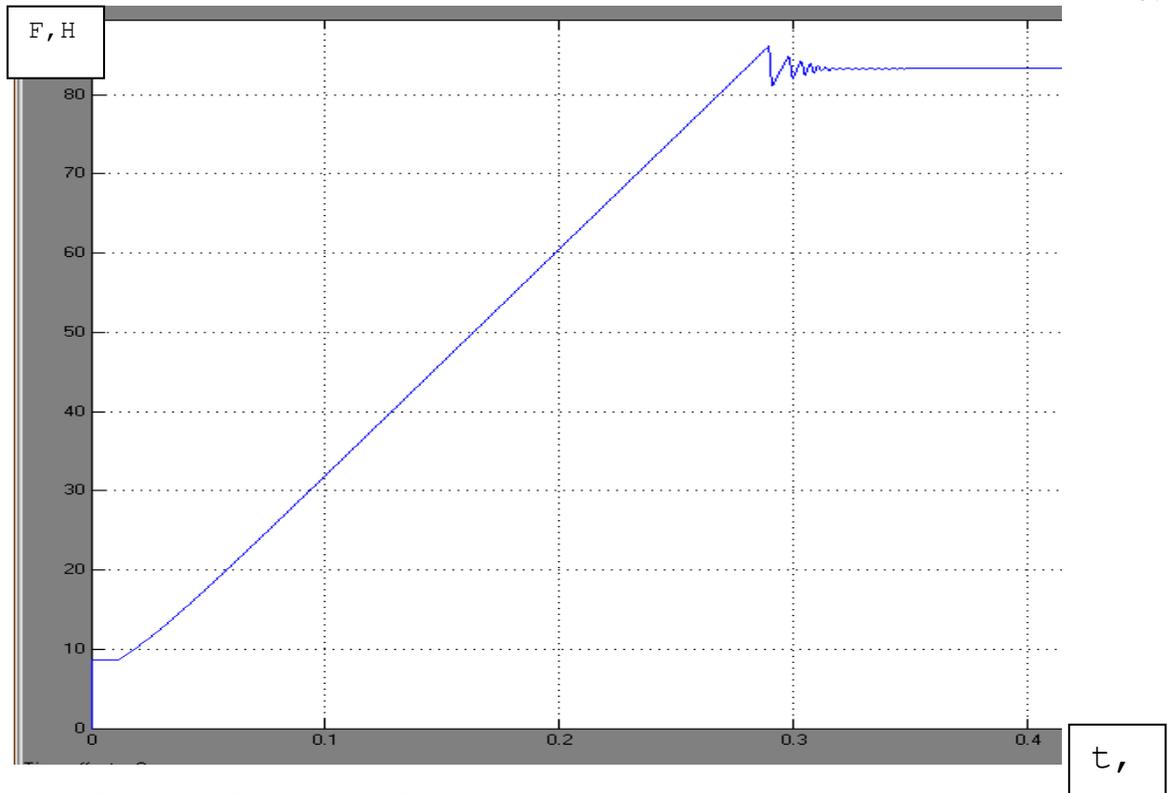


Рисунок 2.14 Перехідний процес двигуна натяжки дроту

Дослід 3: розгін валу до обертів 2200 за 2.5с .

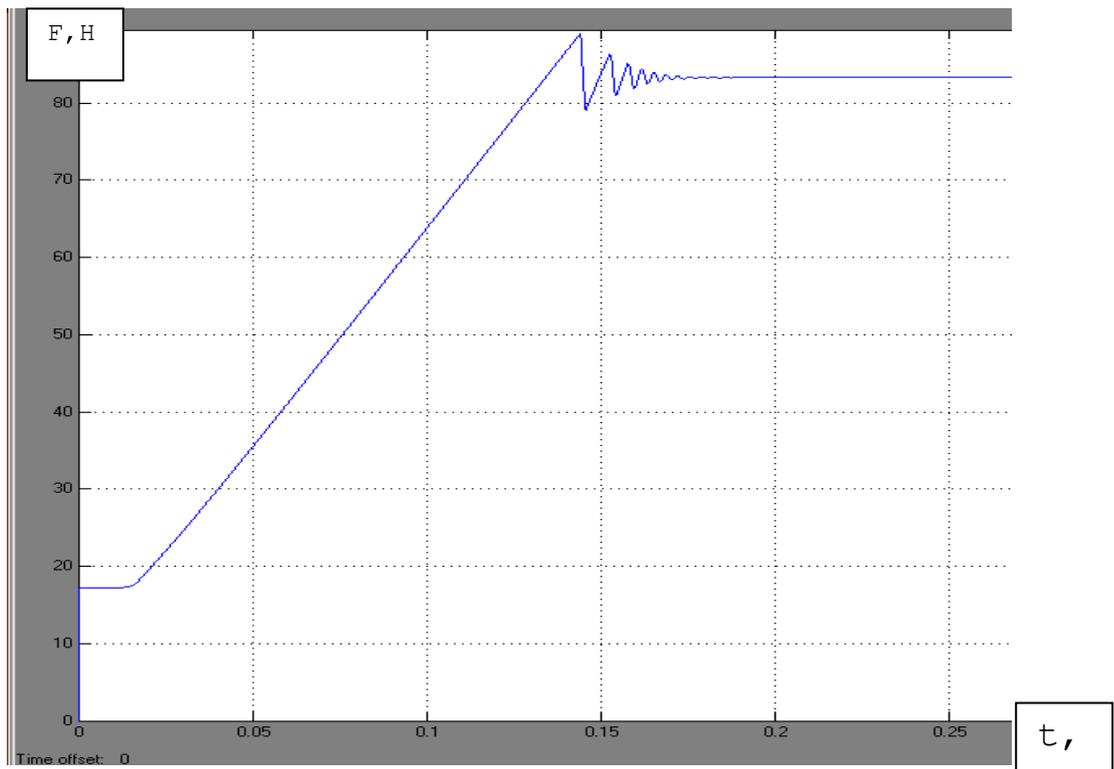


Рисунок 2.15 Перехідний процес двигуна натяжки дроту

Як видно з графіків при зменшенні часу розгону валу ДПС час регулювання зменшується, перерегулювання системи зростає, тобто система

прямує до нестабільності. Тому окремим дослідом можна позначити синтез коригуючого зв'язку.

## 2.8 Дослідження якості перехідних і частотних характеристик привода намотки дроту

Види перехідного процесу (рис.2.15).

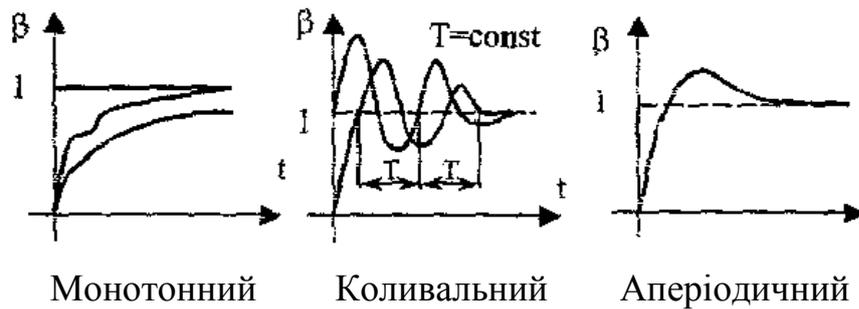


Рисунок 2.16 Види перехідних процесів

Монотонний – це перехідний процес, коли керована величина змінюється плавно без зміни знаку похідної в часі (без перерегулювання).

Коливальний – це перехідний процес, коли керована величина змінюється з постійним періодом  $T = \text{const}$  для лінійної системи автоматичного керування (САК).

Аперіодичний процес характеризується перерегулюванням, тобто мах відхиленням від початкової величини без коливань або з коливаннями, що мають не постійний період  $T \neq \text{const}$ .

Характеристики перехідного процесу (рис.2.17).

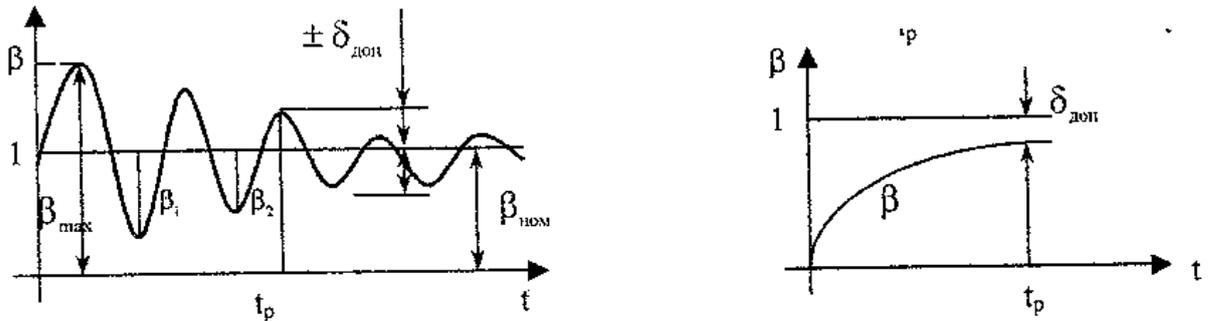


Рисунок 2.17 Характеристики перехідних процесів

1. Час регулювання (швидкодія)  $t_p$  – час із моменту зміни зовнішньої дії (збурення або завдання) до моменту досягнення керованою величиною  $\delta_{\text{доп}}$  (допустимої похибки). Вона рівна  $0,05 \cdot \beta_{\text{ном}}$ , якщо спеціально не задана.

2. Перерегулювання  $\delta = \frac{\beta_{\text{max}} - \beta_{\text{ном}}}{\beta_{\text{ном}}}$ .

3. Коливальність перехідного процесу:

– число коливань  $nT$  ( $n$  – кількість періодів коливань);

– ступінь затухання  $\frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1}$  – відносна різниця сусідніх амплітуд

коливального процесу;

– ступінь коливальності перехідного процесу  $\mu = \frac{\omega}{\alpha}$ ,

$S = \alpha \pm j\omega$  – корінь характеристичного рівняння;

– власна частота коливань  $\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi f_0$  – визначається фізичними параметрами системи.

4. Ширина смуги пропускання частот розімкненої системи – це інтервал частот, при яких амплітуда вихідного сигналу зменшується не більш як на 70% відносно вхідного.

Для визначення цих параметрів якості перехідного процесу потрібні відомості про перехідний процес  $\beta(t)$ , його крива. Для спрощення визначення якості користуються критеріями, що характеризують якість. Вони не потребують розв'язку диференціальних рівнянь, необхідних для побудови перехідного процесу. Найчастіше використовують інтегральні, кореневі та

## частотні критерії

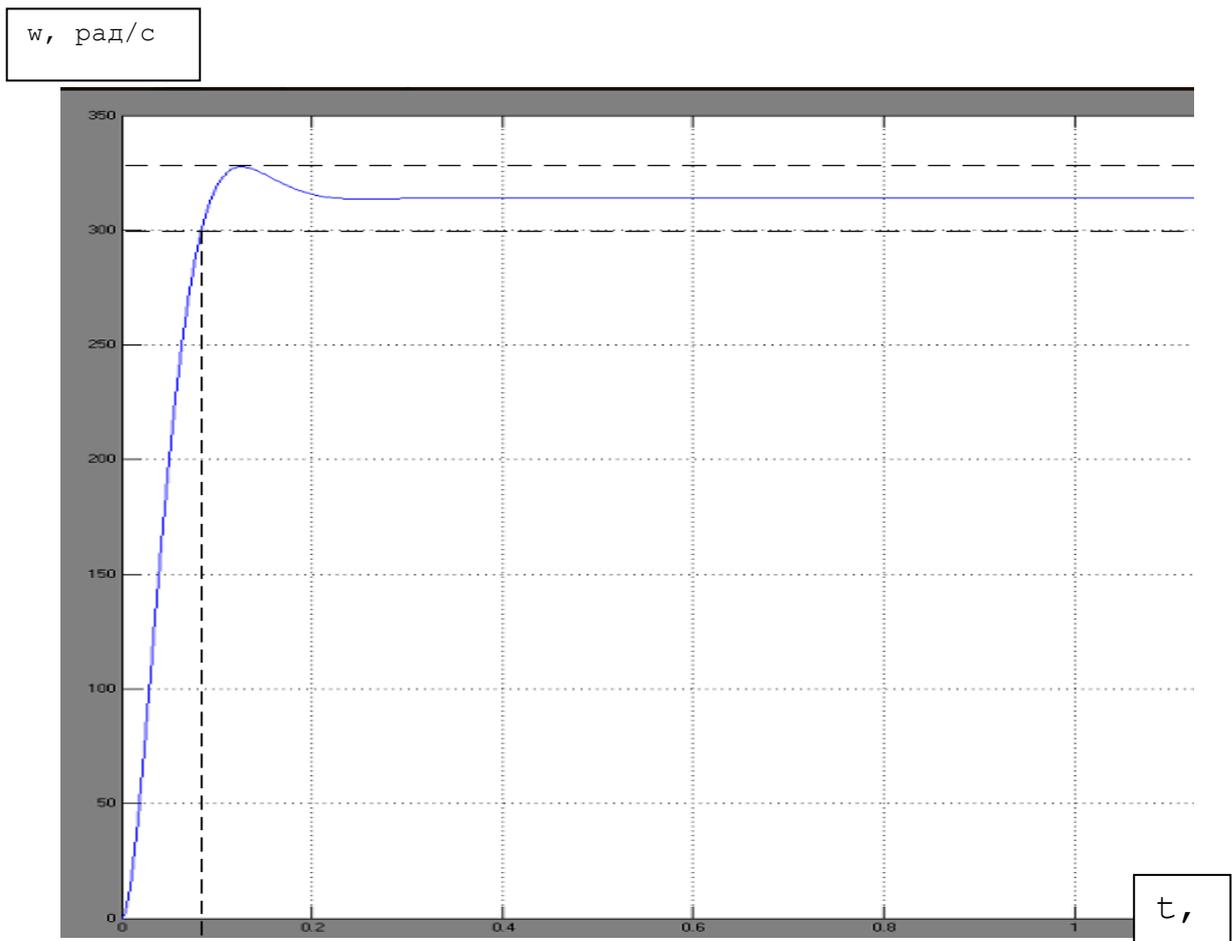


Рисунок 2.18 Параметри перехідного процесу в електроприводі намотки дроту (ПД-регулятор)

Очікувана тривалість перехідного процесу  $T_{gr1ПД} = 0,09$  с,  
перерегулювання

$\delta_{ПД} = 4,25$  % (рис.2.18).

Дана система з низькою швидкодією, тому нема необхідності застосування Д складової в регуляторі, що використовують в слідкуючих системах з високою швидкодією, також Д складова створює проблему заводозахищеності. Тому перейдемо від ПД до ПІ-регулятора і методами теорії автоматичного керування обґрунтую її недоцільність.

Очікувана тривалість перехідного процесу  $T_{gr1ПІ} = 0,09$  с,  
перерегулювання  $\delta_{ПІ} = 4,25$  % (рис.2.21).

Згідно з (рис.2.22) очікувана тривалість перехідного процесу  $T_{gr2ПІ} =$

0,09 с, перерегулювання  $\delta_{2\Pi} = 4,25\%$ .

Як видно із вищенаведених параметрів перехідних процесів в електроприводі намотки дроту після зміни регулятора із ПД на ПІ перехідні процеси майже не змінилися.

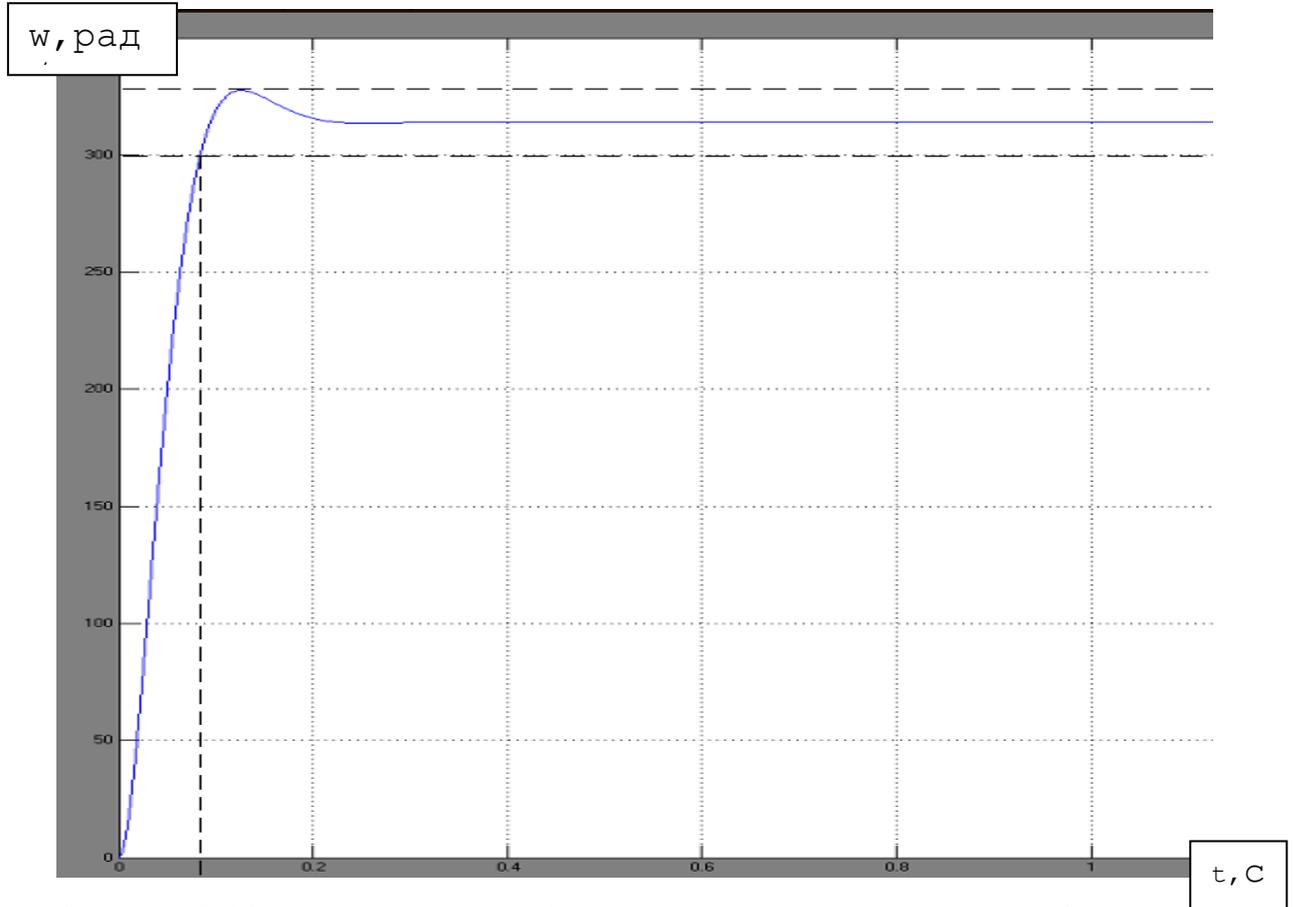


Рисунок 2.19 Параметри перехідного процесу в електроприводі намотки дроту (ПІ-регулятор)

Тому на даному етапі досліджень можна з впевненістю судити про доцільність зміни регулятора. Дослідження частотних характеристик систем для кожного двигуна, а також для кожного підбраного регулятора допоможе вирішити поставлену задачу із визначення критеріїв стійкості. Це критерії, які дозволяють визначити стійкість, а також запас стійкості системи автоматичного керування без розв'язання диференційного рівняння, що описує систему.

Алгебраїчні критерії – це критерії Рауса та Гурвіца, частотні – Михайлова та Найквіста. Критерії Рауса, Гурвіца та Михайлова можна

використовувати як для розімкнених так і для замкнених систем.

Необхідність забезпечення запасу стійкості .

1. При складанні рівнянь ланок системи, фізичні процеси системи ідеалізуються, відкидається маса другорядних факторів.
2. Похибки лінеаризації.
3. Параметри системи, що входять у коефіцієнти рівнянь (маса, момент інерції, ємності, опори, індуктивності, коефіцієнти підсилення) розраховуються з похибкою, яка досягає 10% і залежить від методів вимірювання і точності приладів.
4. Похибки експерименту та обробки результатів.
5. Розсіювання параметрів елементів системи внаслідок технологічних допусків при їх виробництві.
6. Старіння елементів у процесі експлуатації.
7. Нестабільність параметрів довкілля ( $t^0, P$ ).
8. Достатніми запасами стійкості вважаються значення  $\Delta L(\omega) \geq 6 - 12$  дБ,  $\Delta \psi(\omega) \geq 30^\circ$  [ ].

Тому вводять запаси стійкості, які передбачають можливі відхилення розрахункових параметрів системи від дійсних.

За побудованими ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкнених САК визначу параметри стійкості.

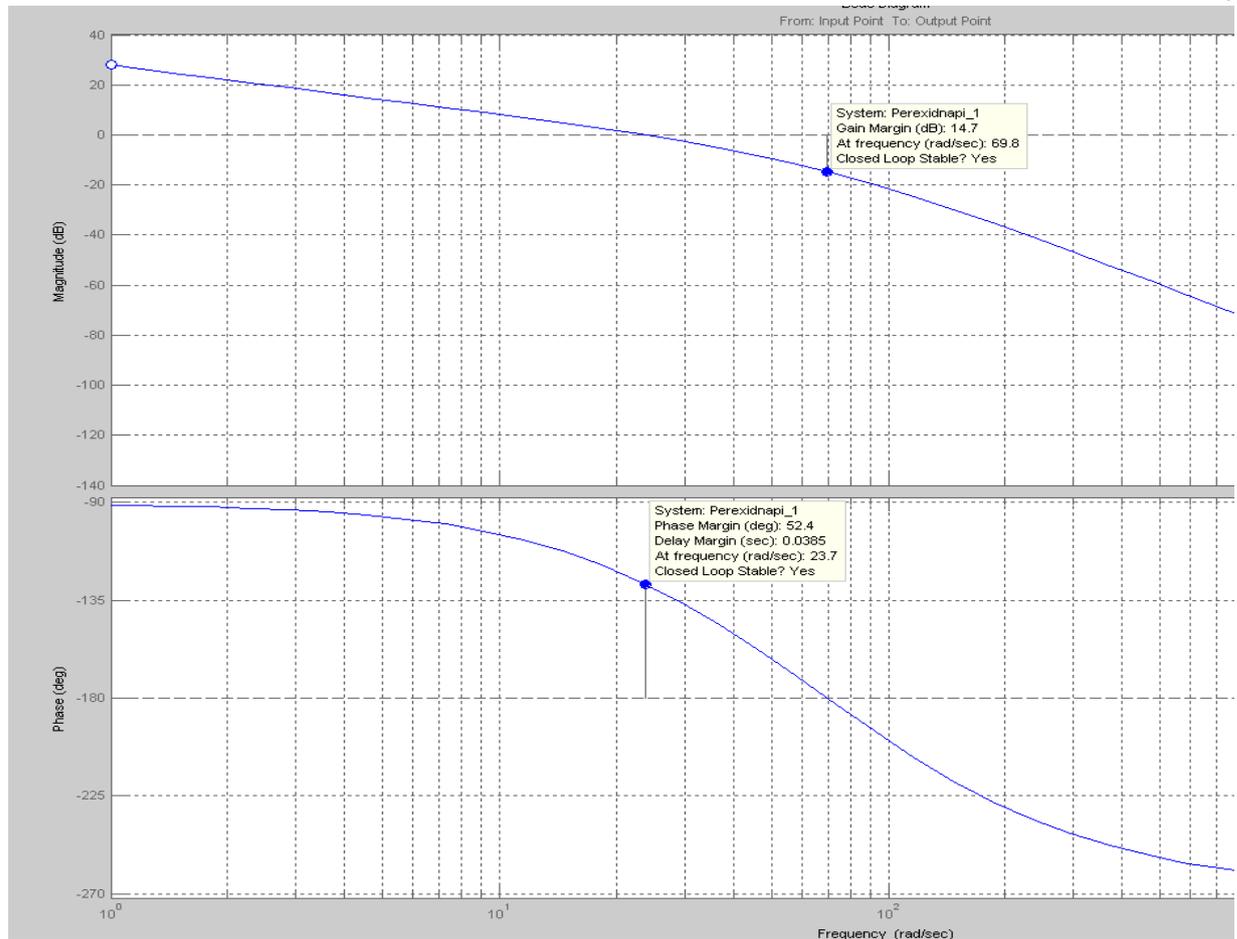


Рисунок 2.20 ЛАЧХ і ЛФЧХ в САК намотки дроту (ПД-регулятор)

Як видно із рис.2.20 в САК із встановленим ПД-регулятором забезпечуються наступні параметри запасів стійкості:

- запас за фазою  $\Delta\psi(\omega)_1 = 52,4^\circ$ ;
- запас за амплітудою  $\Delta L(\omega)_1 = 14,7$  дБ.

За даними приведеними рис.2.21 в САК із встановленим ПД-регулятором забезпечуються наступні параметри запасів стійкості:

- запас за фазою  $\Delta\psi(\omega)_1 = 52,4^\circ$ ;
- запас за амплітудою  $\Delta L(\omega)_1 = 14,7$ дБ

Наведені вище ЛАЧХ і ЛФЧХ для САК із різними регуляторами майже ідентичні одна одній і при зміні регулятора майже не змінюються.

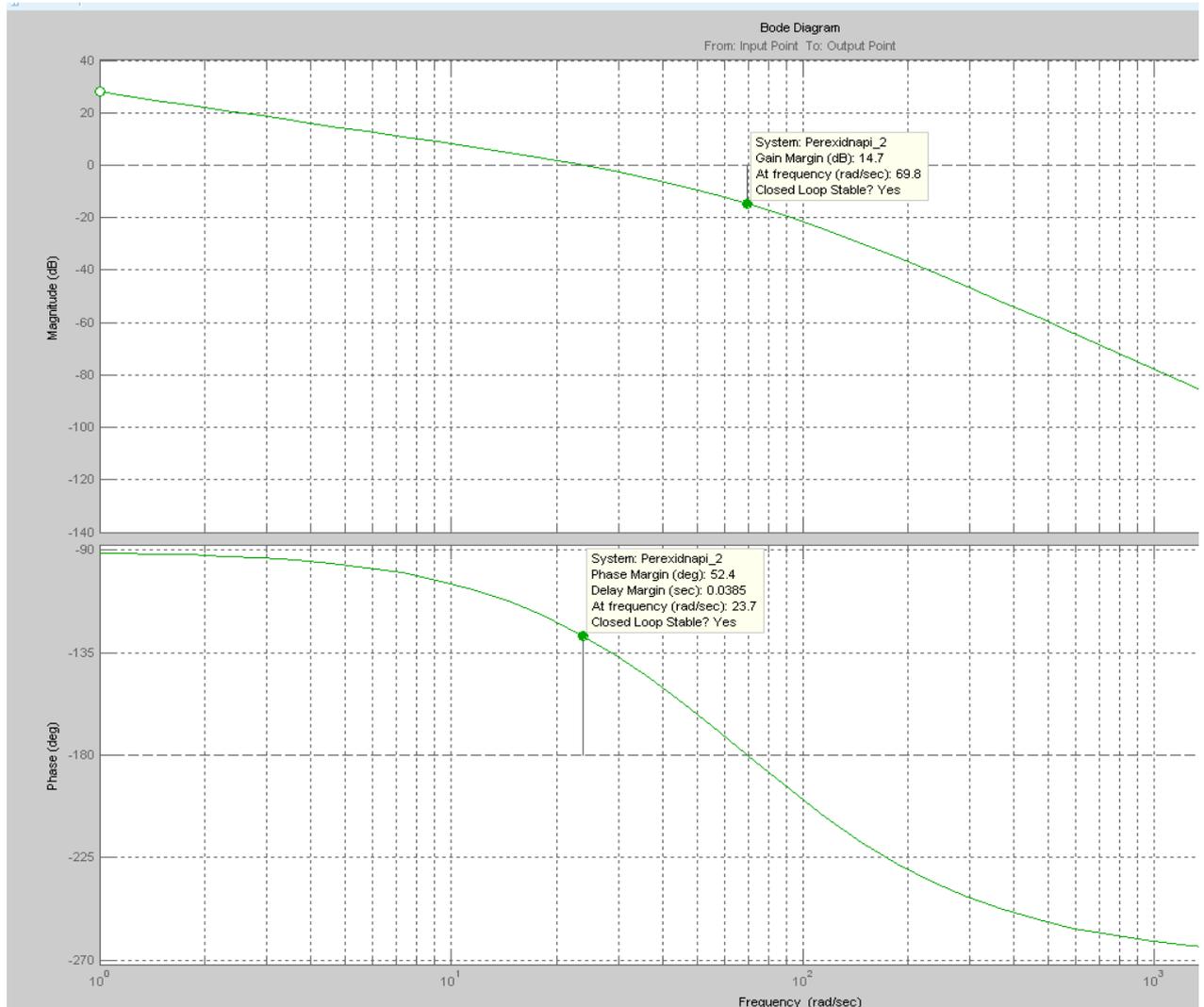


Рисунок 2.21 ЛАЧХ і ЛФЧХ в САК намотки дроту (ПІ-регулятор)

Запаси стійкості повністю задовольняють дані САК. Спираючись на дані отримані під час проведеного аналізу перехідних процесів і частотних характеристик є вичерпними для ствердження, що заміна регулятора, ПІД на ПІ-регулятор, для даної САК є обґрунтованим і доцільним. Доцільність даної заміни поясню невеликою Д складовою регулятора, що для двигуна, який призводив в рух механізм намотки дроту, склала  $4,019 \times 10^{-4}$ р і для другого двигуна, який призводив в рух вентилятор подачі атмосферного повітря в зону охолодження сировини, склала  $4,298 \times 10^{-3}$ р. Саме не велика Д складова розрахованого регулятора майже не змінила зовнішній вид перехідних процесів і частотних характеристик, а саме головне запаси стійкості залишилися у необхідних діапазонах. В свою чергу це дає змогу відмовитись

при розрахунках подібних САК від загально методичних алгоритмів по розрахункам САК такого типу.

## 2.9 Розрахунок СІФК для електронного ключа

Для регулювання вихідної напруги випрямляча застосуємо фазо-імпульсний метод. При цьому до складу перетворюючого пристроя не вводять додаткових силових вузлів, а лише у якості вентелів випрямної схеми використовують керовані ключі – як правило, тиристори. Принцип дії регулятора полягає у тому, що за допомогою спеціальної схеми керування забезпечується регульована затримка на вмикання транзисторів відносно переходу через нуль змінної синусоїдальної напруги. Тобто фаза послідовності імпульсів керування змінюється щодо фази синусоїдної напруги.

Перевагою імпульсних методів керування є те, що, перш за все, надлишок енергії тут просто не береться від джерела живлення (а не гаситься на баластному елементі, як, наприклад, у компенсаційному стабілізаторі). Це в ідеалі (якщо вважати елементи регулятора такими, що не мають, наприклад, опору) за принципом побудови регулятора обумовлює величину ККД у 100 відсотках.

Завданням СІФК є генерація імпульсів керування необхідної амплітуди, тривалості і форми, розподіл їх по відповідних вентилях і визначення моменту подачі цих імпульсів відносно переходу змінної напруги через нуль.

СІФК повинна відповідати наступним вимогам:

- 1) забезпечувати достатню для вмикання транзисторів амплітуду напруги і струму імпульсів керування – (10...20) В, (20...2000) мА;
- 2) забезпечувати високу крутизну фронтів імпульсів – (150...200) В/ел. градус;
- 3) забезпечувати регулювання величини кута  $\alpha$  у загальному діапазоні з необхідною точністю;

- 4) забезпечувати симетрію імпульсів керування по фазах випрямляча;  
 5) забезпечувати достатню для надійного вмикання транзисторів тривалість імпульсів керування – взагалі їх тривалість може складати  $(\pi-\alpha)$ , але це не економічно-достатньо, щоб вона була такою, коли струм через тиристор за час дії імпульсу перевищує величину струму утримання;  
 б) мати високу завадостійкість.

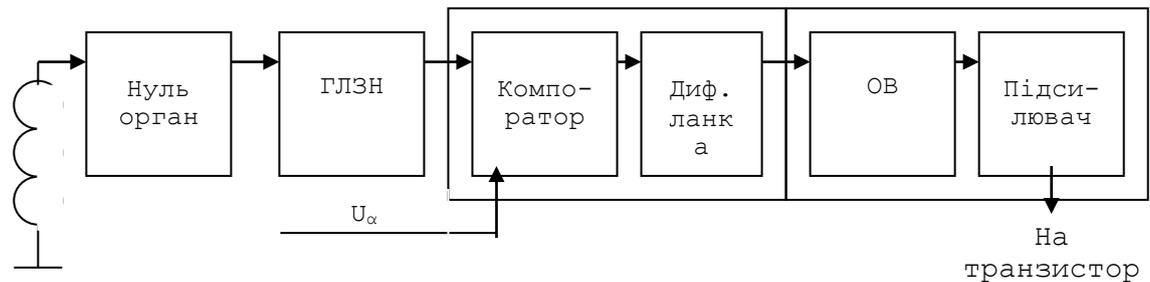


Рисунок 2.22. Структурна схема СІФК

Для забезпечення захисту транзистора від зворотної напруги на керуючому електроді, паралельно керуючому електроду ставимо діод 2Д204В, що забезпечує проходження струму не меншого, ніж струм керуючого електроду 0,15 А. Швидкодія такого діода забезпечує струм до 0,6 А з фронтом імпульсу 0,01 мкс і частотою до 5 кГц.

Оскільки напруга керуючого електроду транзистора і напруга захисного діода VD3 різні, введемо в схему обмежувач резистор послідовно з вторинною обмоткою трансформатора вихідного каскаду, що дозволить вирівняти напругу на виході трансформатора. Задамо, щоб падіння напруги на обмежувачу резисторі становило половину напруги керування на тиристорі, де  $U_{\text{тир}} = 3$  В при струмі керуючого електроду  $I_T = 0,15$  А. Тоді вихідна напруга трансформатора становитиме

$$U_m = U_{\text{тир}} \cdot 1,5 = 3 \cdot 1,5 = 4,5 \text{ В.}$$

Опір обмежувача резистора

$$R_{\text{обм}} = (U_T - U_{\text{тир}}) / I_m = (4,5 - 3) / 0,15 = 10 \text{ Ом.}$$

Із номінального ряду опорів вибираємо 10 Ом. Для забезпечення формування короткого імпульсу виберемо транзисторний насичений ключ з трансформаторним виходом.

Задаємося напругою живлення каскаду  $E_k = -25\text{В}$ .

Для забезпечення якомога, більшого коефіцієнта підсилення, частотного діапазону для формування переднього фронту імпульсу, а також допустимих напруги та струму на навантаженні попередньо виберемо транзистор КТ825Г з параметрами:

$$U_{\text{ке доп.}} > 2 \cdot E_k$$

$$I_{\text{к доп.}} = 60 \text{ А}; \quad U_{\text{ке доп.}} = 90 \text{ В}; \quad I_{\text{в тах}} = 0,5 \text{ А}; \quad f_a = 100 \text{ МГц}; \quad \beta = 750.$$

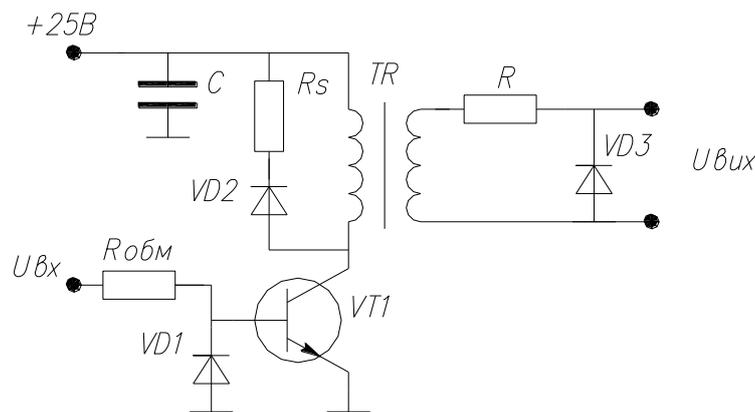


Рисунок 2.23 Транзисторний насичений ключ з трансформаторним виходом

Звідси коефіцієнт підсилення:

$$\alpha = \beta / (\beta + 1) = 750 / (750 + 1) = 0,9987.$$

$$n = U_m / E_k = 5,25 / 25 \approx 0,21.$$

Колекторний струм насичення

$$I_{\text{к нас.}} = I_m \cdot n = 0,15 \cdot 0,18 = 0,027 \text{ А}.$$

Максимальні струми та напруги в схемі виберемо з коефіцієнтом запасу

$$K_{zi} = K_{z\text{н}} = 0,8.$$

$$\text{Звідси } I_{k \max} = K_{zi} \cdot I_{k \text{ доп.}} = 0,8 \cdot 60 = 48 \text{ А.}$$

Опір навантаження, перерахований до первинної обмотки трансформатора при дії напруги додатньої полярності

$$R_n = U_m / I_m \cdot n^2 = 4,5 / (0,15 \cdot 0,18^2) = 926 \text{ Ом.}$$

Індуктивність намагнічування трансформатора вибираємо такою, щоб максимальний колекторний струм  $I_{k \max}$  в імпульсі не перевищував допустимого значення:

$$L_{\min} = \frac{E_k}{I_{k \max} - \frac{E_k}{R_n}} \cdot t;$$

$$L_{\text{мвх}} = 25 / (60 - 25/926) \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.}$$

Для конструктивного розрахунку вибираємо значення індуктивності 0,33 мкГн. Знаходимо максимальний струм намагнічування

$$j_{\max} = E_k / L \cdot t = 25 / 0,33 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} = 15,15 \text{ А.}$$

Звідси максимальний струм  $I_{\text{мн}}$  з урахуванням колекторного струму насичення

$$I_{\text{мн}} = j_{\max} + I_{k \text{ нас.}} = 15,15 + 0,027 = 15,177 \text{ А.}$$

$$\text{Струм бази насичення } I_{b \text{ нас.}} = I_{\text{мн}} / \beta = 15,177 / 750 = 0,02 \text{ А.}$$

Відповідна напруга насичення  $U_{be \text{ н}}$  становить 0,9 В.

Величину допустимого викиду напруги знаходимо з урахуванням коефіцієнта завантаження за напругою  $K_{zi}$ .

$$U_{\text{мд}} = U_{ke \text{ max}} - E_k = K_{zi} \cdot U_{ke \text{ доп.}} = 0,8 \cdot 90 - 25 = 47 \text{ В.}$$

Знаходимо еквівалентне значення шунтуючого резистора

$$R_{\text{ш екв}} = U_{\text{мд}} / 0,74 \cdot j_{\max} = 47 / 0,74 \cdot 15,15 = 962 \text{ Ом.}$$

Враховуючи, що при закриванні транзистора, напруга на вторинній обмотці трансформатора має зворотню полярність, то навантаження в цей момент шунтується діодом. Задаючись напругою на відкритому діоді  $U_d = 1,4$  В, знаходимо при цьому струм вторинної обмотки трансформатора, який рівняється також струму діода:

$$I_m = (U_m - U_d) / R = (4,5 - 1,4) / 10 = 0,31 \text{ А.}$$

Перевіряємо умову неперевершення знайденого струму максимального струму діода. Умова виконується.

Знаходимо перерахований опір до первинної обмотки трансформатора:

$$R_{нп} = U_m / I_m \cdot n^2 = 4,5 / (0,31 \cdot 0,18^2) = 448 \text{ Ом.}$$

Реальне значення шунта, що підключається до первинної обмотки трансформатора становить:

$$R_{ш} = R_{нп} \cdot R_{ш\text{екв}} / (R_{нп} - R_{ш\text{екв}}) = 448 \cdot 962 / (448 - 962) = 838,5 \text{ Ом.}$$

Вибираємо значення опору 910 Ом.

Діод, що забезпечує струм  $j_{\max}$ , зворотню напругу  $E_k$ , при вказаній вище швидкодії, вибираємо КД2995Г.

$$\text{Знаходимо тривалість викиду} \quad t_0 = 3 \cdot L / R_{ш\text{екв}} = 9,7 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$$

Знайдене значення тривалості  $t_0$  менше тривалості половини періода частоти мережі живлення 0,01 с.

Вибираючи коефіцієнт насичення транзистора  $c = 1,5$ , знаходимо необхідний струм бази  $I_b$  і значення обмежуючого резистора  $R_{обм}$  в цьому ланцюзі, задаючись значенням вхідної напруги керування ключем  $U_{вх} = 10 \text{ В}$ .

$$I_b = c \cdot I_{б\text{нас}} = 1,5 \cdot 0,02 = 0,03 \text{ мА.}$$

$$R_{обм} = (U_{вх} - U_{бе}) / I_b = (10 - 0,9) / 0,00003 = 303,3 \text{ Ом.}$$

Вибираємо стандартне значення з номінального ряду  $R_{обм} = 330 \text{ Ом}$ .

Паразитна ємність та індуктивність для вказаних значень індуктивності становить

$$C_0 = 0,03 \cdot 10^{-9} \text{ Ф, } L_c = 0,01 \cdot L = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Для обчислення фронту імпульсу знайдемо вихідний опір транзистора і постійну часу даної схеми :

$$R_{екв} = r_k \cdot (1 - \alpha) + r_e \cdot \left(1 + \frac{\alpha \cdot r_k - r_e}{r_e + r_b + R_{обм}}\right);$$

$$R_{екв} = 730000 \cdot (1 - 0,9987) + 0,08 \cdot (1 + (0,9987 \cdot 730000 - 0,08) / (0,08 + 3 + 2200)) = 998,6 \text{ Ом.}$$

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_\alpha} + C_0 \cdot R_{нп} + \frac{L_c}{R_{вих.екв}};$$

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 10^6} + 0,03 \cdot 10^{-9} \cdot 396,83 + \frac{3 \cdot 10^6}{998,6} = 2,287 \cdot 10^{-8} \text{ c}$$

Звідси тривалість фронту імпульсу

$$t_{\phi} = \tau \cdot (1 + \beta) \ln\left(1 + \frac{1}{S-1}\right) = 2,287 \cdot 10^{-8} (1 + 750) \ln\left(1 + \frac{1}{1,5-1}\right) = 1,89 \cdot 10^{-5} \text{ c}$$

еквівалентна потужність на транзисторі становить:

$$P_{\text{екв}} = U_{\text{ке н}}(j_{\text{max}}/2 + I_{\text{к нас.}})/2 = 1,5(2,083/2 + 0,063)/2 = 0,83 \text{ Вт.}$$

Обчислена потужність не перевищує максимальну  $P_{\text{к тах}} = 8 \text{ Вт.}$

## ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі була проведена модернізація пристрою для намотки статорів двигунів на базі верстата НВС 23 – А. За основу електропривода намотувача була прийнята система ПЧ-АД. Перший електропривод – привод намотки, другий привод – привод переміщення мотовила, також була розроблена система натяжки дроту – ДПС у гальмівному режимі.

Було показано, що система ПЧ-АД за техніко-економічними показниками вигідніше системи базового приводу тієї ж потужності, розроблення системи натягу скоротило кількість браку.

В роботі було вибрано та обґрунтовано перетворювач частоти. Проаналізовані можливі системи частотного керування. Розроблена функціональна схема електропривода намотки та натяжки дроту.

Побудована математична модель частотного електропривода, структурна схема та знайдені її параметри. Синтезовано регулятор.

Методами теорії автоматичного керування обґрунтовано ПІ-регулятор та досліджені різні режими роботи електропривода.

Розроблена система автоматичного керування намотки та натяжки дроту яка, як показано аналізом динаміки системи, формує необхідні перехідні процеси й забезпечує задані параметри регулювання.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Манько Т.А. Технологія виготовлення електричних та електронних елементів і пристроїв: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2006. – 112 с.
2. Онушко В.В., Шефер О.В. Електричні машини: навчальний посібник. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – 536 с.
3. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.
4. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : Львівська політехніка, 2001. – 428 с.
5. Галай М.В. Теорія автоматичного керування. – Полтава Видавництво “Полтава”, 2001р. – 470 с.
6. Проектування електричних машин : навч. посіб. / Д.В. Циценков, О.Б Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як ; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2020. – 408 с.
7. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автотичного керування. Підручник. – К. Либідь, 2007, – 656 с.
8. Галай М.В. Імпульсні, цифрові та релейні системи автоматизованого керування // Навчальний посібник. – Полтава: ПДТУ, 2002. –220 с.
9. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. К.: Либідь, 1997р. – 542 с.
10. Моделювання електричних систем. Матиматичне моделювання систем асинхронного електроприводу: Навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
11. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За ред. М. Г. Поповича. – К.:Либідь, 2005. – 672с.

## РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра «Удосконалення електропривода верстату по намотуванню статорних обмоток асинхронних двигунів серії АІР»

Робота містить 73 сторінки, 31 ілюстрацію, 4 таблиці, 11 використаних джерел, додатки.

Ключові слова: намотувальний верстат; асинхронний двигун; навантажувальна діаграма; математична модель; контур регулювання.

В процесі виконання кваліфікаційної роботи був проведений детальний аналіз технологій та обладнання по намотці статорних обмоток. В результаті аналізу визначені такі недоліки базового устаткування: відсутність регулятора натягу призводить до зниження якості продукції оскільки процес намотування здійснюється під наглядом людини-оператора, який керується власним досвідом та підбирає натяг намотувального дроту за допомогою механічного пристрою.

Було прийнято рішення синтезувати систему натягу дроту, принцип роботи системи пов'язаний на явищі, коли привідний двигун працює в гальмівному режимі, а коло якоря з розташованою на ньому котушкою з дротом шунтується резистором, струм шунтування регулюється за допомогою електронного ключа.

Для намотки статорних обмоток намотувального верстату, замінено двигун постійного струму на асинхронний двигун, попередньо прорахувавши та вибравши його з каталогу.

В процесі дослідження характеристик привода, досліджений запас стійкості контуру регулювання зусилля натягу. З графіків видно, що запас по фазі достатній і складає 80 градусів.

В результаті розрахунків та синтезу за допомогою віртуальної моделі синтезував контур регулювання натяжки дроту, всі параметри швидкодії регулятора при різних системах, завдання показали достатньо-високі параметри системи.

## ABSTRACT

bachelor's qualification thesis "Improvement of the electric drive of the machine for winding stator windings of asynchronous motors of the AIR series"

The work contains 73 pages, 31 illustrations, 4 tables, 11 used gels, appendices.

Keywords: winding machine; asynchronous motor; loading diagram; mathematical model; control circuit.

In the course of the qualification work, a detailed analysis of the technologies and equipment for winding the stator windings was carried out. As a result of the analysis, the following shortcomings of the basic equipment were determined: the absence of a tension regulator leads to a decrease in product quality, since the winding process is carried out under the supervision of a human operator, who is guided by his own experience and selects the tension of the winding wire using a mechanical device.

It was decided to synthesize a wire tension system, the principle of operation of the system is based on the phenomenon when the drive motor works in braking mode, and the armature circle with a coil of wire located on it is shunted by a resistor, the shunt current is regulated using an electronic key.

For winding the stator windings of the winding machine, the DC motor was replaced with an asynchronous motor, having previously calculated and selected it from the catalog.

In the process of researching the characteristics of the drive, the margin of stability of the tension force adjustment circuit was investigated. It can be seen from the graphs that the phase margin is sufficient and is 80 degrees.

As a result of calculations and synthesis with the help of a virtual model, he synthesized the circuit of the wire tension adjustment, all parameters of the speed of the regulator in different systems, the task showed sufficiently high parameters of the system.

## 1. THEORETICAL PART

### 1.1 General analysis of winding technology and equipment

Windings are the most important functional elements of electrical devices, power supply units of instrument equipment. The quality of the products in which the windings are used largely depends on the quality of the windings. Winding defects belong to the category of hidden, and the consequences of their manifestation can lead to sudden catastrophic failures, so the problem of improving the quality of windings is of primary importance, which ultimately determines the reliability of the product's operation, as well as the productivity and cost of its manufacture.

The areas of ensuring defect-freeness, increasing the efficiency of the product manufacturing process are well-known: thorough development of technology; a detailed study of the causes and conditions of the occurrence of defects in order to prevent them; automated execution of all components of the "design - production" process of products containing windings; improvement of control and testing operations and their equipment.

Depending on the purpose of winding products, winding wires made of pure copper, aluminum, alloys with high resistance and other materials are used. Insulation of winding wires can be enamel, fibrous and combined. Cotton yarn, silk and synthetic fibers serve as fibrous insulation. Wire insulation should have a small thickness, high electrical strength, temperature resistance, chemical resistance to impregnating materials, mechanical strength and elasticity.

For inductors, pure copper wires are used, mainly with enamel insulation. Copper wires of the PEL brand are covered with insulation based on polymerized tung oil or linseed oil. Wires of the PEV-1 and PEV-2 brands have insulation based on special varnishes (viniflex), which adhere well to metal and are more heat-resistant than the previous ones, so the wires these brands can work at a temperature of 125 °C for about two hours without changing their properties. Wire

with single-layer insulation PEV-1 can work at a voltage of up to 500 V, PEV-2 has an insulation thickness of 0.01-0.03 mm more and is used at a higher voltage. PELR-1 and PELR-2 brand wires have polyamidresol insulation (hard and gasoline-resistant). Wires of the PEVTL-1 and PEVTL-2 brands have polyurethane insulation, which has increased heat resistance and allows soldering without stripping the wires and without using fluxes. Enamel insulation takes up little space, so coil windings are compact. Glass insulation of the wire (with a diameter of 8 cores up to 1 mm) allows heating up to 450 °C. Combined insulation takes up more space, but provides great reliability in operation. PELBO wire - with enamel insulation and single-layer cotton braiding, PELSHO - the same, only with silk braiding.

Aluminum winding wires are used much less often, mainly due to the low mechanical strength of aluminum. Aluminum winding wires have a diameter from 0.05 to 2.44 mm. For the manufacture of wire resistances, enameled wire from high-resistance alloys - manganin, constantan, nichrome is used. Manganin is an alloy of copper, manganese and nickel. Constantan - the most common resistance alloy - consists of copper, nickel, cobalt and manganese. Alloys under the general name "nichrome" consist of nickel, chromium and iron. For winding wires, only a double alloy of nickel and chromium, which has the index "E", is used. Ceramic or oxide coatings are used to insulate winding wires with a heat resistance of more than 250 °C.

For operation at temperatures up to 600 °C, wires of the PEZHB brand with a core of copper wire, varnished (covered) with nickel, are used. These wires are made with a diameter from 0.20 to 0.80 mm with thin-layer glass-enamel insulation, the surface of which is varnished with organosilicate varnish. These wires are designed for long-term operation at temperatures up to 400°C or for operation at temperatures up to 500°C for 2000 hours or at temperatures of 600°C for 500 hours. The double thickness of the glass-enamel coating is 0.006-0.012 mm, and the total thickness of the insulation is 0.03-0.07 mm. The breakdown voltage depends little on the temperature and is approximately 250-550 C. The

insulation of PEZHB wires has lower mechanical strength compared to enamel. To increase mechanical strength, they are additionally covered with a layer of polyamide varnish (PESB brand). However, in this case, their temperature resistance decreases to 350 °C.

Wires of the PEZHB-700 brand have a core of silver wire, lacquered with nickel and are intended for long-term operation at a temperature of 500 °C. They can also be used at a temperature of 600 °C for 2000 h and at a temperature of 700 °C for 500 h.

For high-frequency inductors, a multi-core wire (litsendrat) is used, which contains from 7 to 28 mutually insulated cores in a common silk braid (LESHO) or with two layers of silk braid (LESHD). Such a wire design has small losses due to the surface effect.

When winding the windings with a thin wire, their terminations are performed by soldering multi-core flexible wire, for example, brands MGSHV (flexible wire with silk winding and vinylite insulation) and PMVG (flexible wire with vinylite insulation) and the like. Such a conclusion is made in order to increase mechanical strength.

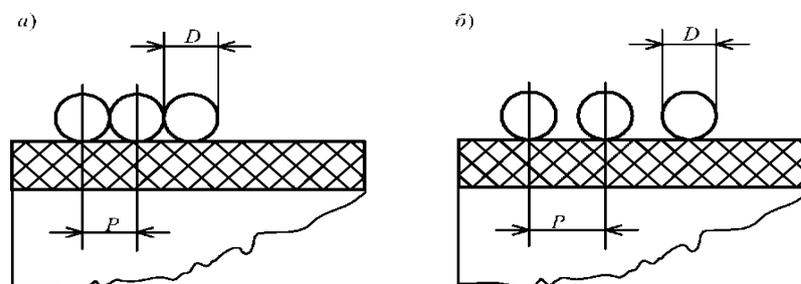
Types of winding products used in instrumentation. Dozens of different types of windings are manufactured in the instrument industry, which differ in shape, size, used wires, types of insulation, technical requirements for construction and other features. Instrument equipment devices containing windings perform various functions, which determine the requirements for the product and design features. Transformers, chokes, inductors, relays, wire resistors, selsins, rotary transformers, electric motors and other electromechanical devices can be named as examples of windings included in the winding products of instrument equipment. All these types of winding products have their analogs in miniature execution.

Miniature designs of winding products, created with the aim of reducing the mass and dimensions of the instrument equipment, from the point of view of technological implementation pose problems of achieving the required quality and automation of winding operations. The most time-consuming and the most

responsible for quality assurance is the operation of winding the wire. All admitted defects become hidden (upon their detection) after the completion of this operation. Many factors influence the winding process.

Types of windings used in instrument construction. Winding products used in instrumentation most often consist of a frame and a winding [1]. The frame is the basis of the winding product and is made of dielectrics. The winding is a structural part of the winding product, and the winding or stacking determines the method of forming the turns. There are defining elements in the winding design: turn, step and row. A wire wrapped around the perimeter of the frame in one turn and having a shift of the end of the wire relative to its beginning is called a coil. The step is the distance between the centers of the wires of adjacent turns. A row is called the turns laid across the width of the winding. In fig. 1.1 a shows winding turn to turn, in fig. 1.2, b - winding with a step. All windings are divided into two main groups: single-layer and multilayer. Each group includes different types of windings, and their design features determine the appearance. A single-layer serial winding is laid turn-to-turn or incomplete on a flat, cylindrical, three-dimensional rectangular frame. Such a winding is characterized by a small self-capacitance, ease of manufacture, and a high quality factor.

The bifilar winding is wound with two insulated wires electrically connected at one end. This winding is non-inductive and is used for wire non-inductive resistors.



D - wire diameter, P - winding pitch

Figure 1.1 Winding step

The toroidal winding is placed on a ring frame and is used for wire variable resistors. A simple serial multilayer winding consists of a given number of rows of stacked turns and is characterized by a large inductance value with small dimensions, a large self-capacitance, an increased potential difference between the turns in adjacent rows, and the complexity of manufacturing. In order to exclude the collapse of the turns from the upper row to the lower one, it is necessary to use spacers between the rows. Cable, capacitor or telephone paper are used as spacers. The ordinary multilayer winding is used in the manufacture of transformers, chokes, inductors, etc. Piling winding differs from ordinary winding in that the rows are not observed and inter-row spacers are not used. It is used at low operating voltage and most often for the manufacture of coils of electromagnetic relays. Sectional multilayer windings are used to reduce the potential difference between rows and adjacent turns, in addition, in such windings the self-capacitance is significantly reduced, since the self-capacitance arising in each section is connected in series. Such a winding is laid on sectioned frames. For inductance coils, the wire in all sections is laid in the same direction. For wire non-inductive resistors, the frames are used with an even number of sections, the number of turns in each section should be the same, and the winding direction should be opposite. When a current passes through such a winding, the magnetic fields arising in adjacent sections cancel each other out. Galette windings are multi-layer frameless, they are used in case of need to obtain a winding with a complicated configuration.

For laying such windings, special devices are used, the main elements of which are a dimensional sleeve (which ensures the dimensions and shape of the inner opening of the winding) and two cheeks that limit the width of the winding (the number of turns in a row). To fasten the completed winding, use tying of the coil with threads or impregnation of the turns of the wire with glue or varnish with subsequent polymerization. The spiral winding has one turn in a row and is used to obtain flat coils of inductors that are pasted on printed circuit boards. A pyramidal winding is used when a coil with a large inductance value is required in circuits with a high operating voltage. To reduce the potential difference between the turns,

the winding is arranged so that the first and second turns lie in the first row, and the third between them in the second row. Universal windings are characterized by a small self-capacitance at large inductance values. The peculiarity of such a winding is the presence of bends in each turn, the laying of the wire at an angle to the ends of the coil, a large radial thickness with a small width of the coil, and the presence of an angular step. Cross winding is a kind of universal and is used for winding coils with a large value of inductance. It differs from the universal one by the presence of only two inflections. Toroidal multilayer winding is performed mainly for the manufacture of transformers and chokes on ferrite rings.

Technological processes of coil winding. The winding of any coil is preceded by preparatory work, which includes the preparation of materials and the machine. The materials needed for winding are selected according to the technological map for winding. Most often, the package for the manufactured coil includes: wire to be wound (or several wires of different diameter, brand); material (cable, telephone paper, thin electrical cardboard, varnished fabric, glass fabric) gasket and insulation, thread (high strength No. 10, 0, 00), wire for terminals, glue, varnish for painting soldering places, acetone for washing soldering places, solder and flux for soldering. The preparation of the machine includes its adjustment, installation of cams, stops, driver, coils of wound wire, assembly of the thread, tension adjustment, and so on. Preparatory operations include: cutting and cutting of spacers, cutting of the upper insulation, cutting of the terminal wire, stripping the ends of the cut wires from insulation, tinning of the terminals, cutting of pieces of varnished fabric (glass fabric) for insulating the areas of the soldered connections of the terminals. Materials of spacers and insulation are cut into strips. The materials of the spacers are cut 6-8 mm wider than the width of the coil, and for better stacking between the rows, cuts are made along the edges of the strips. The ends of the winding wires must also be cleaned and tinned. Stripping of winding wires such as PEL, PET, PEM and others with enamel insulation with a diameter of at least 0.25 mm is carried out with an assembly knife, and wires of smaller diameters are cleaned with sandpaper. Insulation from PEV-type wires

with a diameter of 0.03 to 0.1 mm is removed by immersing them in formic acid for a few seconds, followed by wiping with a calico cloth to remove dissolved enamel and acid.

## 1.2 Analysis of the technical capabilities of the NVS 23-A winding system

The NVS 23A winding machine, when equipped with various accessories, is intended for winding coil groups of stator windings of electric motors onto assembly templates with a reel. The main coil groups:

1. The inner diameter of the stator core, mm.....45-165
2. The length of the stator core, mm.....30-180
3. Diameter of the copper winding wire, mm.....0.1-1.4
4. The maximum number of parallel wires in the coil, pcs.....3
5. The number of coils in a concentric coil group.....1-6
6. The number of coil groups that can be wound without breaking is 2, 3, 4, 6
7. The maximum number of turns in one coil.....999
8. The number of coils in sequentially winding coil groups, pcs...  
(5-4-5-4), (3-2-3-2), (4-3-4-3), (2-1-2-1).

Climatic execution of UHL, accommodation category-4, GOST 15150-69, but for operation at temperatures from 289 to 308K (from +16 to +35°).

The operator manually removes a set of coil groups from the template, and transfers them to the machine for retracting the coils. All operations, except for removal and transfer of coil groups, are performed without the participation of the operator.

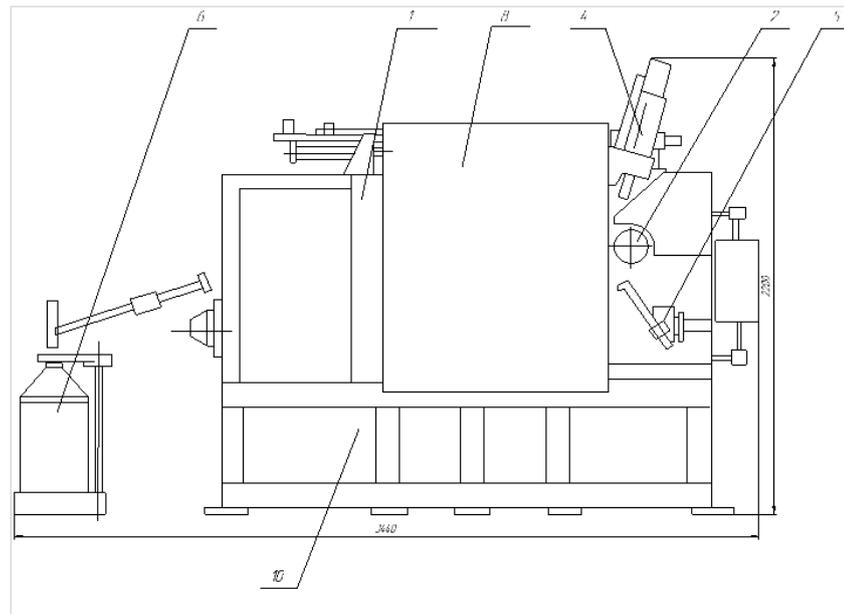


Figure 1.2 General view of the winding machine

The machine is arranged on a bed 10, a hydraulic station 7, electrical cabinets with electrical equipment 9, and a winding and tensioning device 6 are installed near the machine.

Winding head 1 and rotary head 2 are mounted on the machine. All mechanisms of the machine work from the hydraulic drive, which consists of hydraulic station 7 type 12AG 48-2211, hydropanels 3, and pipeline systems. The mechanism for clamping and cutting the wire 4 and the mechanism for creating a loop 5 are attached to the body of the rotary head.

The casing closing mechanism is used to protect the winding area. The coil tensioning device 6 is intended for installation of a container with a winding wire, and for tensioning the wire during winding. Electrical equipment 9 is designed to control the operation of the machine and is installed in a separate electrical cabinet, and the sensors are on the mechanisms of the machine.

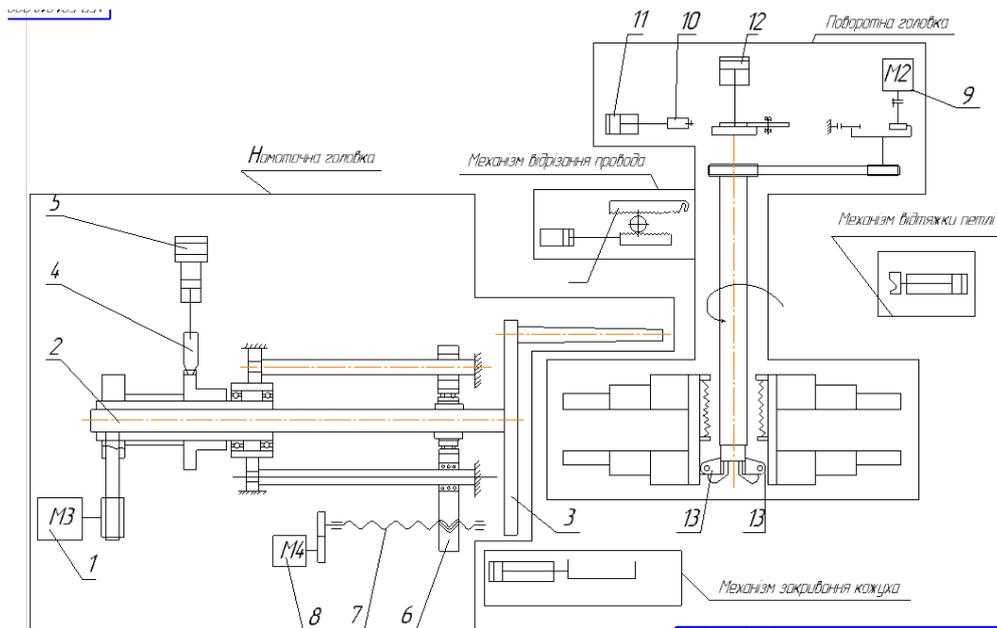


Figure 1.3 Kinematic scheme of the winding machine

The spindle of the winding head is driven by a DC motor 1, which allows you to adjust the number of revolutions of the spindle from a maximum of 200-2200 rpm, to those required for normal to ensure stable overturning, and a reliable stop of the spindle. The rotation through the belt gear is transmitted to the spindle 2, on which the reel 3 is fixed, which winds the wire on the template. The reel is fixed by the locking device 4, which is controlled by the double hydraulic cylinder 5. The traverse 6 is installed on two stops, into which the second spindle support is mounted. The unfolding of the wire is carried out with the help of a lead screw 7, which rotates from a direct current electric motor 8, through a gear. The reel is returned to its initial position by reversing the engine 8.

From engine 9, rotation is transmitted to the rotary head through a planetary gearbox with a gear ratio of 91.2 and a V-belt transmission. On the axis of the rotary head there is a disk with grooves, which ensures fixation of the head during turns of 60, 90, 120, 180°. Fixation is provided by the lock 10, which is controlled by the hydraulic cylinder 11.

The erection and separation of the templates is carried out by a hydraulic cylinder 12, with the help of traction and levers. When diluting the templates, the

rod of the hydro cylinder 12 moves the thrust with the levers, which turn the body with the templates attached to them around the fixed axis 13.

The cutting mechanism cuts and clamps the end of the remaining wire. The movable knife 14 with its movable end captures the wire in the reel and brings it to the stationary knife, where the wire is cut and clamped.

### 1.3 Study of the wire tensioning process in the winding process

The shaping of the winding, the accuracy of its geometric and physical parameters, the speed modes of winding largely depend on the actual value of the wire tension. Wire tension is the main technological factor that determines the productivity of the process, the quality and parameters of winding products (coefficient of filling of the winding, dimensions of the coil, etc.). Wire tension is provided by special devices installed on the machine. The tension of the wire depends on the cross-section of the wire and on the friction in the moving part of the machine. With excessive tension, the wire breaks or pulls out, which leads to a change in ohmic resistance and damage to the insulation, as a result of which short-circuited turns can be formed in the coil. A small tension of the wire leads to an increase in the size of the coil, that is, to a decrease in the filling factor.

The optimal tension value is chosen close to the limit of its proportional elongation, while allowing for some regulated ones plastic deformations of the wire material arising from bending moments during the forming of the winding. At the same time, the choice of the value of the optimal tension depends on many factors, in particular, on the characteristics of the used winding wires, the design of the winding and its purpose, technical conditions for it, the type of winding equipment and equipment, the kinematic winding scheme, etc. It is also necessary to take into account the total resulting stress in the wire material, the change in electrical resistance, electrical strength and electrical resistance of the insulation, temperature deformations of the wire and insulation during subsequent operations, as well as the operating conditions of the product. Taking into account all the

factors affecting the operation, the resulting voltage in the wire material and in its insulation should not exceed the strength limits with a certain safety factor [2]

Wire tension can be determined by empirical formulas depending on the materials: for copper wire (g) for constantan and manganin (g), where  $d$ , mm is the diameter of the wire.

The permissible tension determined by these formulas for a copper wire with a diameter of 0.03 mm is 7.6 g; for a wire with a diameter of 0.25 mm - 531 g; for a wire of 1 mm - 8500 g. It is necessary to take into account that, in addition to the effect of systematic factors, the wire can also be affected by factors of a random nature. Therefore, tension control in the winding process is necessary, as it provides data acquisition and stochastic characteristics of typical winding wires. Taking into account the deviation of the actual value  $F\phi$  of wire tension from its average value  $F_c$ , winding machines should be adjusted to the tension  $F_H$  determined from the equation: .

It is obvious that for forming the winding it is necessary that .

When finding the value of  $F_0$ , it is advisable to divide all the factors affecting it into four groups according to their nature: determined by the brand and diameter of the wire; depending on the design of the winding and technical specifications for it; determined by the winding kinematic scheme, features of the used equipment and equipment, speed modes; determined by the composition and features of subsequent winding manufacturing operations, as well as its operating conditions.

Hence, the value of the optimal tension should be determined in the following sequence:

1. The value of  $F_d$  is selected according to the characteristics of the winding wires - brand, diameter, insulation, permissible elongation and permissible stress in the metal material and insulation.

2. The acquired value of  $F_d$  is corrected taking into account the shape and dimensions of the frame, wire bending radii, type of insulation, permissible change in electrical resistance, other electrical characteristics and other similar factors.

3. The value of  $P$  is specified based on the factors of the third group - the kinematic winding scheme, the type of used equipment and equipment, the modes of operation of the winding machine. At the same time, the calculated or experimentally determined values of  $F\phi$  and  $\dots$

4. The value of  $F_d$  is specified based on the factors of the fourth group.

5. Test winding with tension is carried out with measurement of the values of  $F_d$  and  $\dots$ . The value of  $F_0$  is finally specified. Permissible wire tension, based on the factors of the first group, can be determined by three methods - orientation (according to tables), refined (calculated) and experimental (exact).

The most widely used are mechanical, optical and electrical devices for controlling wire tension. Mechanical devices are simple to set up, cheap and convenient to operate, and differ in the variety of used structures.

An example of a scheme of a mechanical device is shown in Fig. 1.5a. As a converter, a lever mechanism is used, representing a hinged pointing arrow 6, which is under the action of a spring 5. When the tension changes, the wire 1 is fed through the guide and receiving rollers 2 and 3, respectively. The receiving roller is located on the arrow, which on a scale of 4 shows the average amount of tension. Mechanical devices are used to measure the average amount of tension during oscillations up to 20 - 30 Hz, which corresponds to winding the wire on a square frame at a speed of 300 - 450 rev/min.

The disadvantage of the devices is the large inertia of the moving parts, the measurement accuracy is not high enough.

In the optical-mechanical device shown in fig. 1.5b, a cantilever beam 4 with a fixed mirror 5 and a receiving roller 3 is used as a converter. With any change in the tension of the wire fixed through rollers 2 and 3, the beam bends, and at the same time the angle of rotation of the mirror, which falls through the lens 8, changes a beam of light from a source 9. Deformation of the beam leads to a shift of the reflected beam in proportion to the amount of tension. Optical-mechanical devices have low sensitivity, are inertial, bulky, do not provide simultaneous recording of several processes, but they have a high quality of work.

In fig. 1.4c presents an electroresistometric device. Here, ohmic resistance strain gauges 5 are used as a converting device, glued to the receiving element 4, which is made in the form of an elastic beam, on which a roller 3 is fixed, covered by a wire 1. A bridge circuit with two or four strain gauges is used to measure tension. Advantages - simplicity of design, small dimensions. The disadvantage is the small value of the output signal.

In addition to the listed devices, inductive devices are widely used, the principle of operation of which is based on a change in the reactive resistance of a coil with a core when its inductance changes. Such devices are of two types: with a moving core and with a variable gap in the machine system.

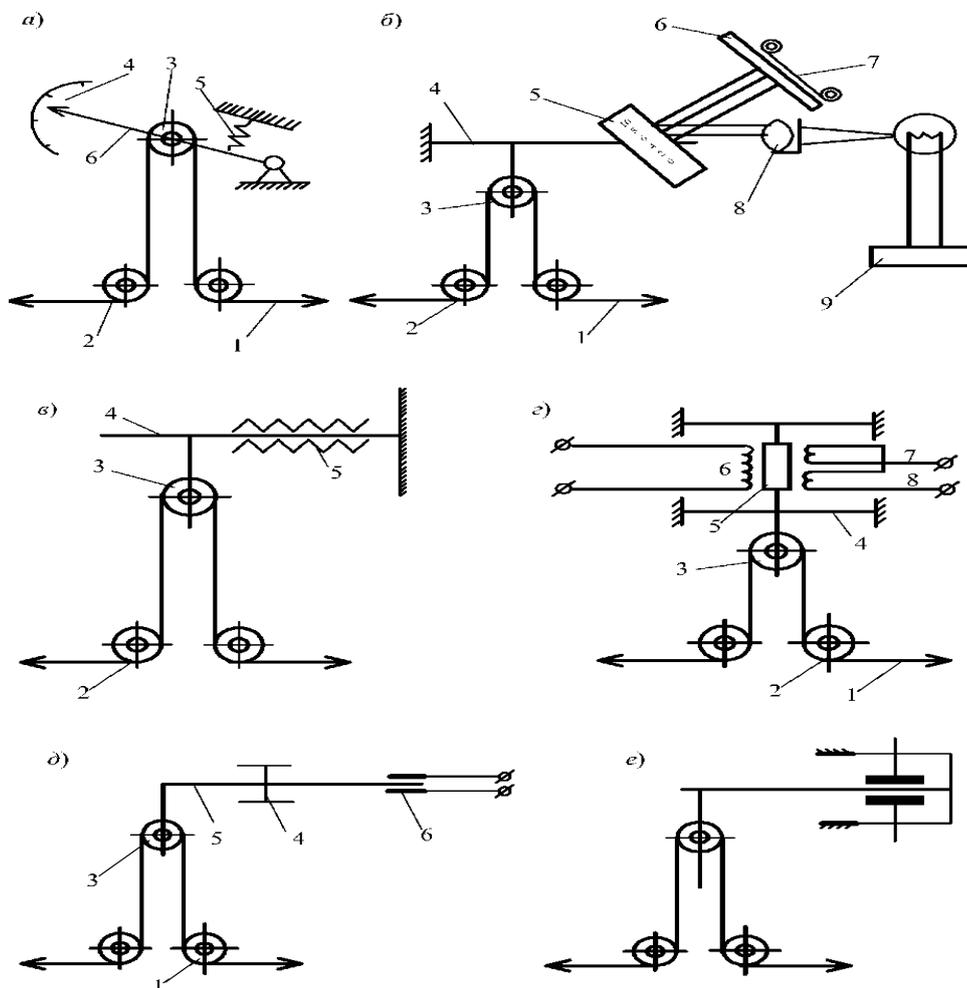


Figure 1.4 Wire tensioning devices

In fig. 1.4 g shows an inductive device with a moving core 5 suspended from two sides on elastic membranes 4. The core is inside a coil with three windings. Winding 6 is powered by high-frequency alternating current. Tests are taken from the windings 7 and 8, connected in series, turned on oppositely and located symmetrically with respect to the core in the absence of tension on the wire 1, which was threaded during measurement through the rollers 2 and 3. Under the influence of the tension force, the core is displaced from the neutral position and in the windings 7 and 8 from a signal proportional to the amount of tension appears. The advantages are high sensitivity, low susceptibility to interference, resistance to the environment. The disadvantage is a small frequency bandwidth.

The schematic diagram of the capacitive device is shown in fig. 1.4 d. Under the action of tension, the wire 1 acts on the roller 3, fixed on the moving rod - lining 5, located between the moving linings 6 of the capacitor. The use of capacitive devices allows the use of bridge measurement schemes. Dignity - high sensitivity. Disadvantages: low stability, significantly susceptible to the effects of obstacles and the external environment.

To measure wire tension, mechanotron devices are used - electronic sensors of mechanical quantities (Fig. 1.4 e). Longitudinal control mechanotrons are the most widely used, made in the form of a double two-anode diode with a movable rod 5 fixed on a membrane 4. A receiving roller 3 covered by a wire is installed on the rod. Advantages - high sensitivity, stability of work.

Tension stabilization systems. Stabilizing devices are used for radial winding of the wire in order to equalize individual random tension jerks, to compensate for the wire consumption at the time of starting the winding machine. Basically, stabilizers compensate for tension jerks by consuming a damping loop of wire, the length of which is restored when the tension value is returned to the original value.

Stabilizers are widely used, creating a wire loop with the help of a flat spring or spring-loaded lever (Fig. 1.5, positions 1 and 2). Their disadvantages are the relatively short length of the compensating wire loop, and for lever stabilizers -

inertia. In fig. 1.5 (position 3) shows the spring stabilizer as the most effective. In fig. 1.5 presents a stabilizer that regulates tension using an electromagnetic clutch.

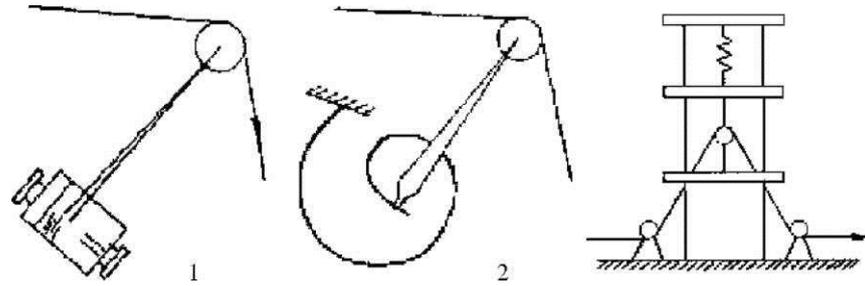


Figure 1.5 Wire tension stabilizers

The rotation of the bobbin occurs synchronously with the rotation of the wound frame. The device allows you to compensate for the increase in tension at the time of starting the machine, but does not compensate for individual jerks of tension during the winding process.

There are two modes of operation of the stabilizers: the machine start-up mode and the constant winding mode. In the start-up mode of the machine, the stabilizer must have a significant length margin of the damping loop to compensate for large angular accelerations of the bobbin. In the stable mode, a small inertia of the stabilizer is required to compensate for high-frequency accelerations affecting the wire when the frame is not round, as well as from random factors. Due to the inertia of the bobbin, it practically does not react to high-frequency oscillations and rotates at an average speed corresponding to the average consumption of wire for the formation of the winding. The resulting accelerations can cause significant changes in wire tension. In the stable winding mode, the stabilizer works to compensate for the unevenness of the wire consumption within each revolution of the frame for non-round frames, as well as to compensate for random disturbances.

Automatic tension regulators are divided into two groups: mechanical - direct action and electronic - indirect action.

Mechanical regulators are most widely used due to the simplicity of construction and operation. In direct action regulators, the sensitive element directly affects the regulating body through a mechanical transmission. In indirect action regulators, the action of tension on the sensitive element is converted into an

electrical control signal of the executive body of the regulator.

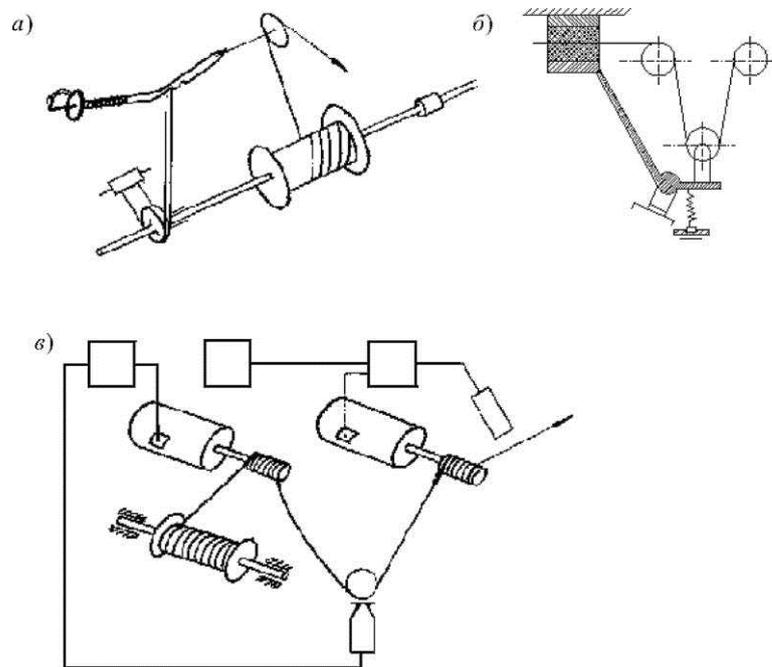


Figure 1.6 Automatic wire tension regulators

The most common regulator with a band brake in the industry. However, in a number of cases, its use cannot be considered expedient, especially at high winding speeds, given the large inertia of the damping lever and the relay mode of the braking device.

Automatic regulator of direct action, which creates wire tension by rubbing it between two friction plates. The axes of the two extreme rollers are fixed fixedly on the frame, the middle roller is installed on the end of the spring-loaded lever, which is a sensitive element and executive body of the regulator. According to the nature of the action, automatic regulators of indirect action are divided into four subgroups: those affecting the emitting coil; that affect the drive of the wound frame; affecting the leash, flannel or intermediate roller; automatic regulators with simultaneous combined action on the output coil and on the drive of the wound frame. In fig. 1.7c shows a combined regulator with a small time constant. It consists of two regulators, one of which ensures the creation of a certain length of

the damping loop of the wire by forcing it to be wound by the output coil, the other regulates the tension by acting on a low-inertia roller covered by one or two turns of the wire.

#### 1.4 Setting the tasks of the qualification work

Having analyzed the tensioning technology and the principle of operation of the NVS-23A winding machine, we come to the following conclusions:

1. We highlight a number of shortcomings of the basic equipment.

1.1. Lack of tension regulator.

1.1.1. Reduced product quality.

1.1.2. The necessary person is an operator who, guided by his experience, selects the tension with the help of a mechanical device.

1.2. The use of DPS - which have reduced reliability and increased repair losses than AD.

To solve the shortcomings, we set the following design tasks:

1. Replace the DPS of the winding system and the reel moving system with AD. 2. Synthesize the AD control system, calculate the regulator parameters. 3. Develop a tension system. Synthesize and calculate the tension contour. 4. Select sensors.

Міністерство освіти та науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Удосконалення електропривода верстату по намотуванню статорних  
обмоток асинхронних двигунів серії АІР**

**Кваліфікаційна робота бакалавра**

Виконав:

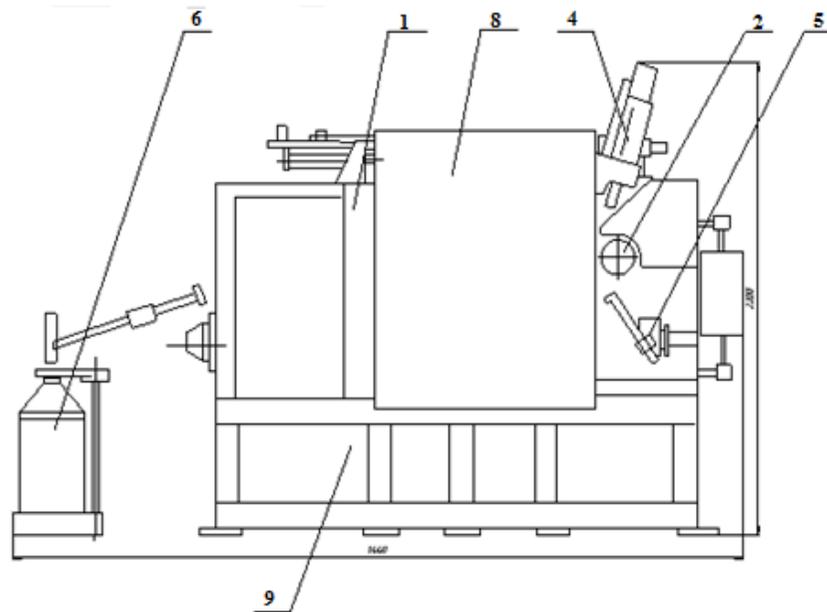
Студент ЗпМЕ групи

Керівник:

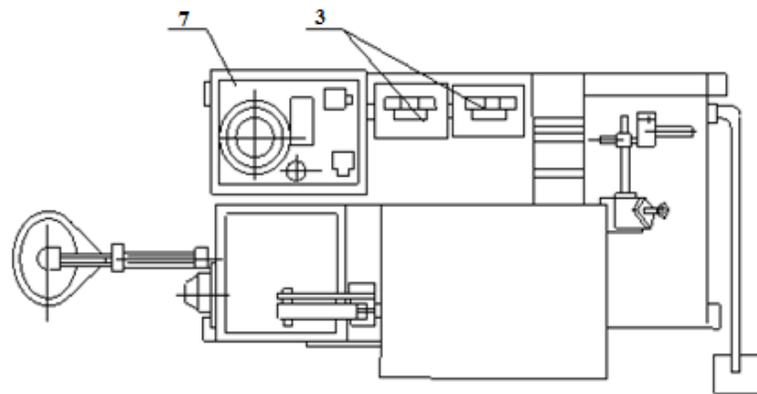
Пащенко А.В.

Шефер О.В.

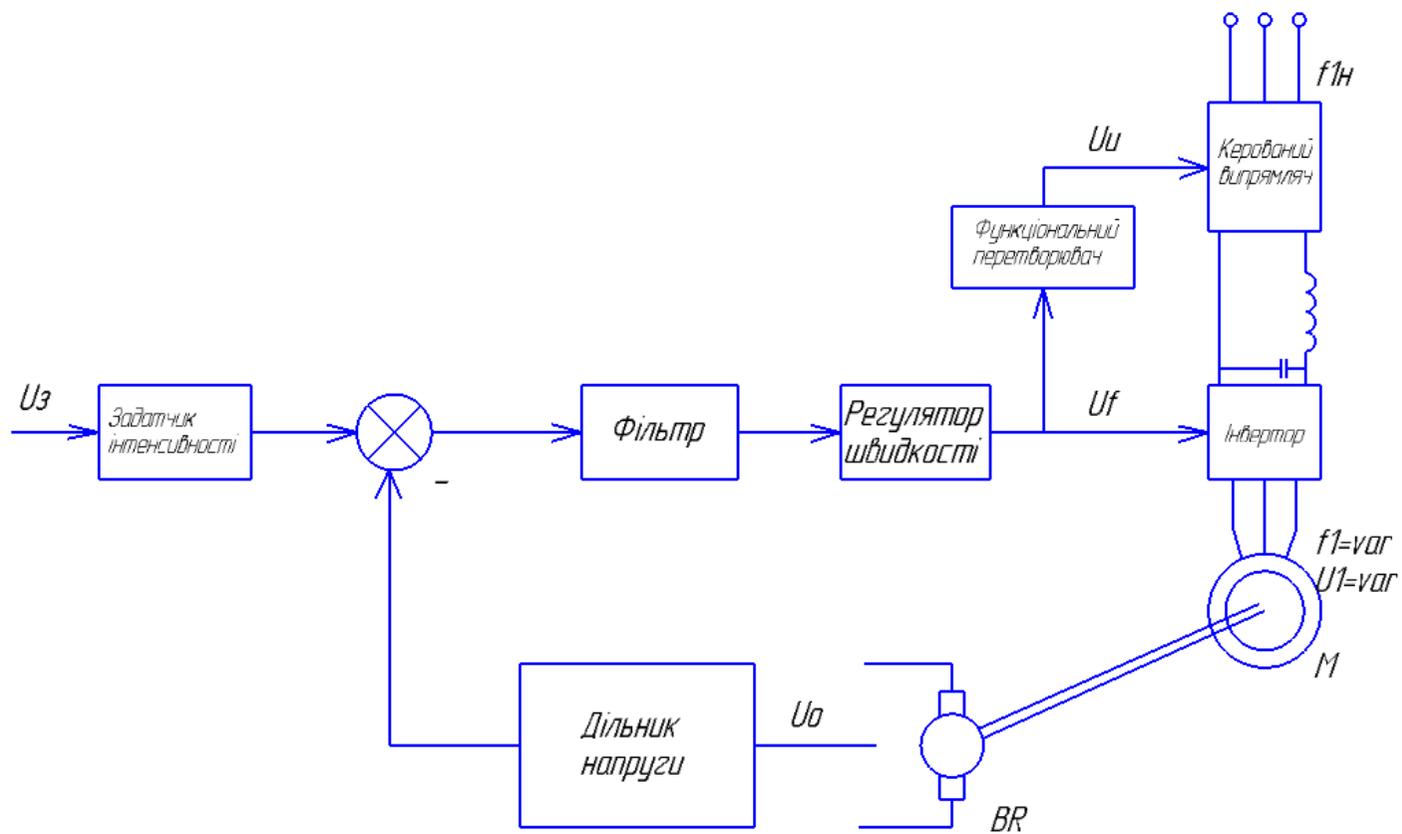
Полтава 2023



1. Намоточна головка
2. Поворотна головка
3. Гідропанелі
4. Механізм відрізання провoda
5. Механізм створення петлі
6. Змоточно-натяжний пристрій
7. Гідростанція
8. Захисний кожух
9. Станина

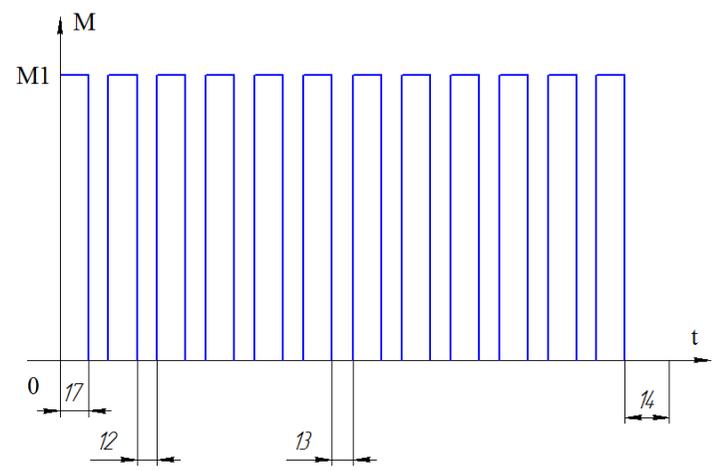


Загальний вигляд намотувального верстату

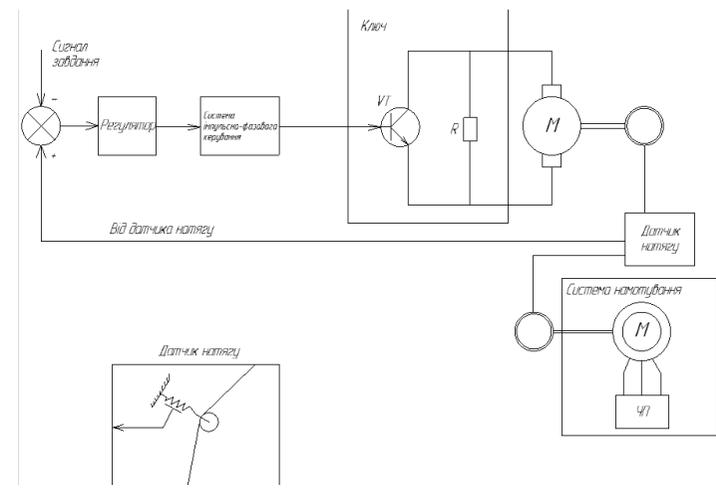


Функціональна схема контуру намотки дроту

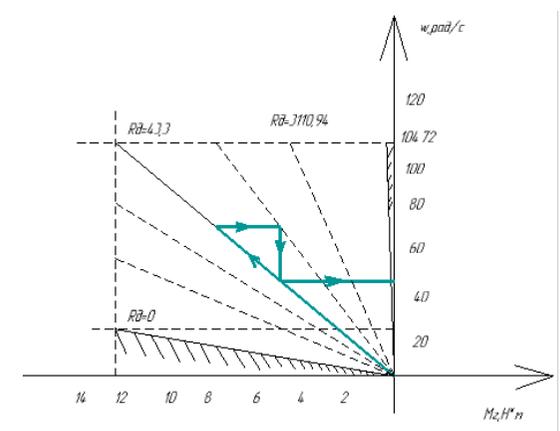
- t1- час намотування однієї котушки
- t2- час перекидання між котушками
- t3- час заміни шаблону
- t4- час всипки котушок в статор



Навантажувальна діаграма електродвигуна

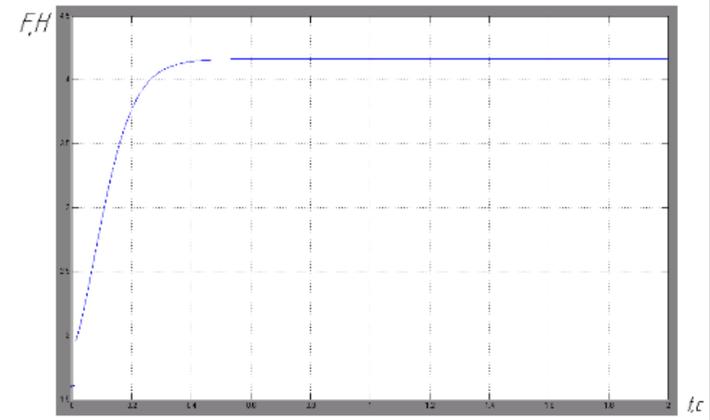
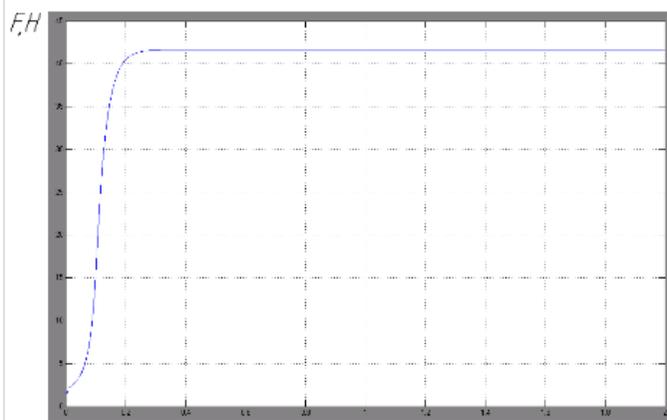
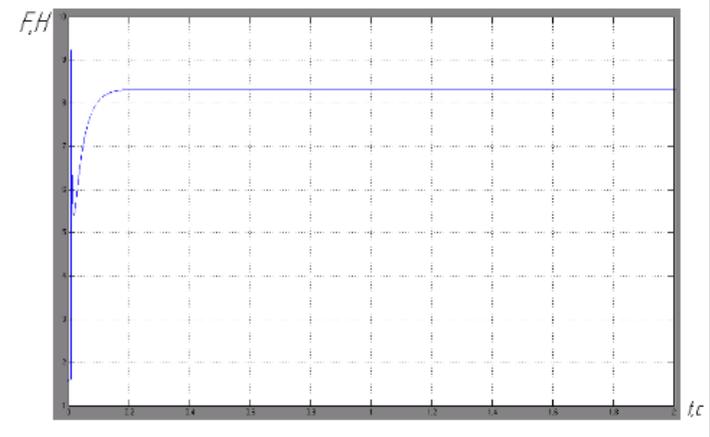
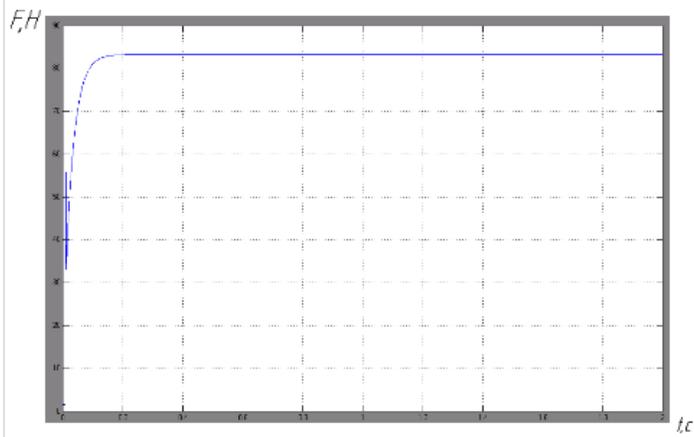


Функціональна схема натяжного пристрою

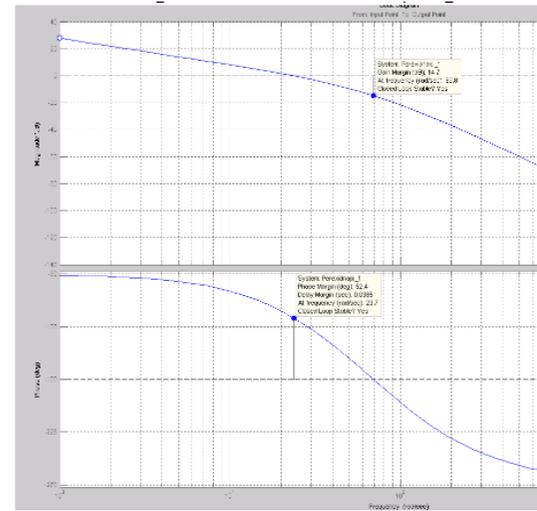
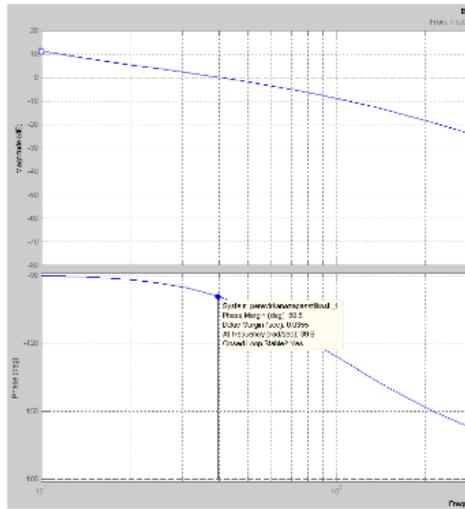


Діаграма роботи електропривода



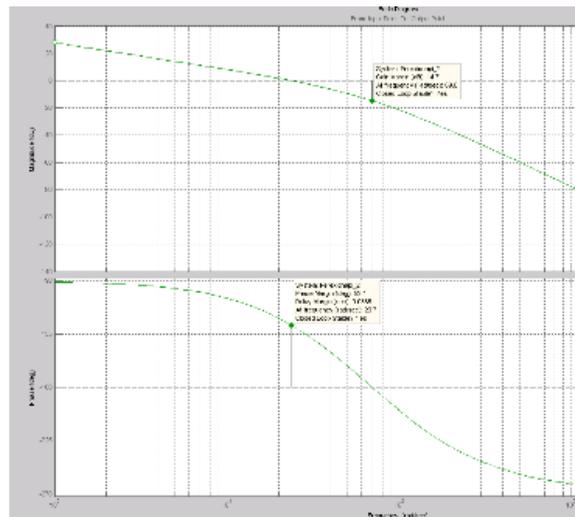


Графіки перехідних процесів контуру регулювання швидкості намотки дроту

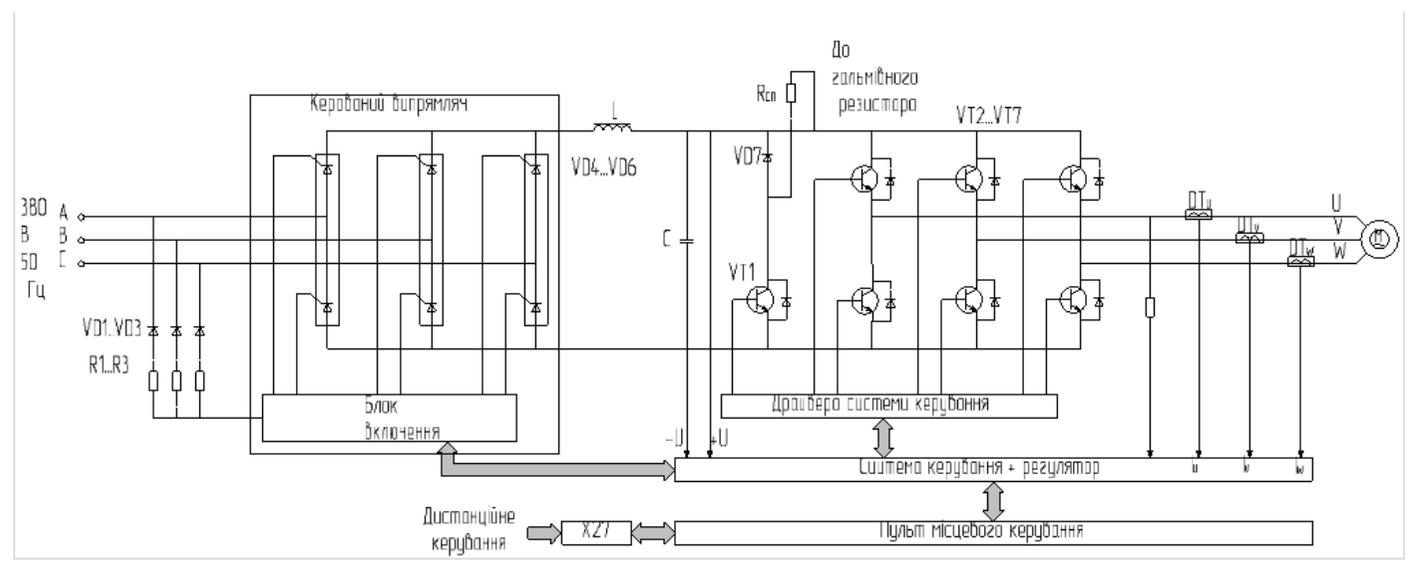


Дослідження запасів стійкості контуру регулювання зусилля натягу

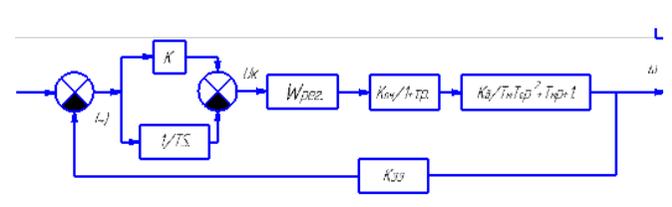
ЛАЧХ і ЛФЧХ в САК намотки дроту (ПД-регулятор)



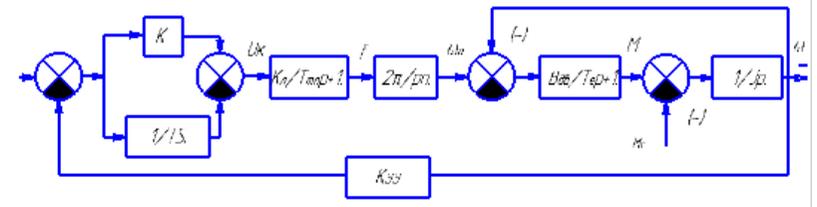
ЛАЧХ і ЛФЧХ в САК намотки дроту (ПІ-регулятор)



Функціональна схема перетворювача частоти



Структурна схема з від'ємним зворотнім зв'язком по швидкості



Лінеаризована структурна схема асинхронного двигуна