

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Електротехнічний факультет
Кафедра: Електричної інженерії

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

з дисципліни: « Системи керування електроприводами»
для здобувачів спеціальності G3 Електрична інженерія (за старим переліком спеціальностей 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка).
Ступінь вищої освіти – бакалавр

Розробив: к.т.н., доц. Осадчук Ю.Г.

Затверджено на засіданні кафедри АЕСПТ

Протокол №1 від 28 серпня 2025р.

Завідувач кафедри АЕСПТ _____ Сінчук О.М.

Схвалено групою забезпечення ОПП

Протокол № 1 від 30 серпня 2025р.

Гарант ОПП _____ Пересунько І.І.

Кривий Ріг
2025

Лабораторна робота № 1

Мета роботи: ознайомитися з принципом роботи розімкнених систем керування асинхронними приводами на базі системи ТПН-АД, оцінити показники якості керування системи.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Для регулювання напруги на виводах статора АД можуть використовуватись різні пристрої автотрансформатори, магнітні підсилювачі та тиристорні перетворювачі напруги (ТПН). Останній вид регуляторів напруги - ТПН отримав велике розповсюдження та серійно випускається промисловістю. Визначається це рядом переваг ТПН: високий ККД, простота в обслуговуванні, легкість автоматизації роботи привода.

Основними елементами ТПН являються зустрічно-паралельне з'єднання силових вентилів (тиристори або тиристор і діод), представляючи собою швидкодіючий ключ, за допомогою якого можна комутувати ланцюги змінного струму на навантаженні. При вмиканні силових тиристорних елементів (ТЕ) в коло з чисто активним опором форма струму при відкритому вентилі повторює форму прикладеної до ланцюга напруги. Тривалість імпульсу струму, яка характеризується електричним кутом αT провідності тиристора, визначається в даному випадку як різниця між півперіодом π напруги живлення і кутом α включення (відкривання) тиристорів (рис. 1, а).

При комутації ланцюга, який містить активно-індуктивний опір, виникає ЕРС самоіндукції, яка затримує наростання і спадання струму. В такому ланцюзі форма струму відмінна від форми прикладеної напруги і струм припиняється із запізнюванням на кут δ по відношенню до моменту зміни знака прикладеної напруги. При переміщенні симетричного ТЕ з двома тиристорами кут провідності αT дорівнює різниці між кутом закривання β і кутом відкривання α (рис. 1,б).

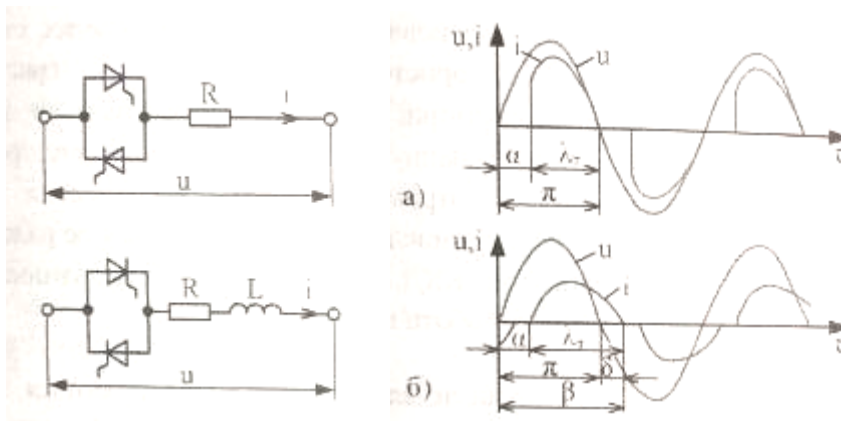


Рис. 1 Струми і напруги при активному(а) та активно-індуктивному навантаженні (б)

Головною особливістю, яка відрізняє АД від трифазного активно-індуктивного навантаження, являється наявність магнітного зв'язку між обмотками фаз статор і ротора, а також вплив на цей зв'язок швидкості АД. Тому в обмотці фази АД, відімкненої від мережі, наводиться ЕРС обертання, значення якої, як і в інших параметрах АД, залежить від ковзання. Електрорушійна сила істотно змінює форму фазної напруги по відношенню до активно-індуктивного навантаження.

На рис.2 зображена схема регулювання координат в системі ТПН-АД. На рис.2,а приведена практична схема керування АД за допомогою ТПН, яка складається із трьох пар зустрічно-паралельного з'єднаних тиристорів, кожна з яких ввімкнена між фазою мережі та фазою статора АД. Регулювання напруги на АД в даній схемі відбувається зміною кута керування, т.б. зсувом у часі керуючих імпульсів, які подаються на керуючі електроди тиристорів.

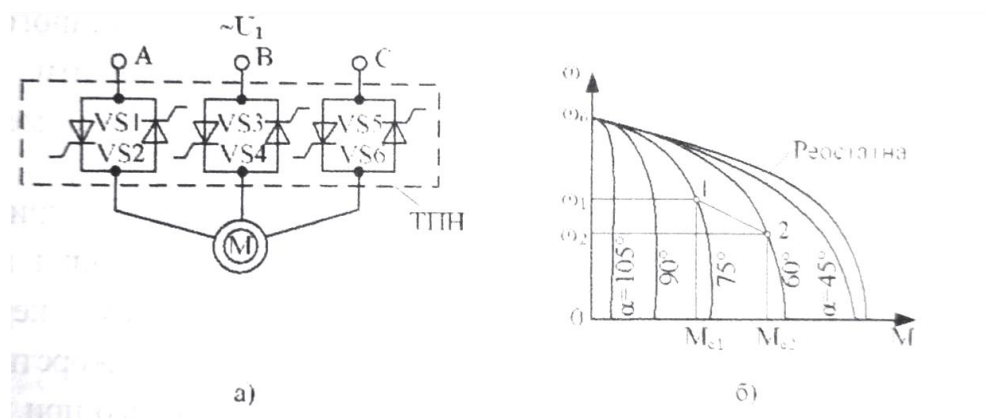


Рис.2 Регулювання координат по системі ТРН-АД

а - з розімкнена схема електропривода;

б - механічна характеристика в розімкнутій системі.

Керуючі імпульси подаються на всі тиристори не одночасно, а із зсувом у часі на третину періоду частоти мережі. Це визначається тим, що керуючий імпульс кожного тиристора повинен бути зсунутий відносно напруги тієї фази мережі, до якої підключений тиристор, на один і той же кут керування α , а фазні напруги мережі зсунуті відносно один одного на 120° .

При зміні кута керування α змінюється напруга на фазах АД, а саме: при збільшенні кута α амплітуда першої гармоніки напруги зменшується. На рис.2,6 наведені механічні характеристики АД, кожна з яких відповідає одному значенню кута керування α .

На виході ТПН виникають вищі гармоніки напруги, які впливають на роботу АД. Зокрема, кожна гармоніка напруги визначає проходження додаткового струму в обмотках АД, який викликає відповідні додаткові втрати в обмотках. При живленні АД від ТПН по схемі рис.2,а втрати на 10-20% більші ніж при живленні АД від джерела змінного джерела синусоїдальної напруги. Також слід зазначити, що вищі гармоніки напруги чинять незначний вплив на момент АД.

Як уже зазначалося, характеристики, приведені на рис.2,б, мало задовольняють цілям регулювання швидкості АД. Із графіків слідує, що із збільшенням кута керування α знижується критичний момент АД і падає жорсткість його механічних характеристик. В результаті цього при можливих коливаннях моменту опору механізму M_c швидкість його руху може різко змінитися, що в більшості випадках неприпустимо.

Дійсно, нехай, наприклад (рис.2,б), в момент опору на валу АД дорівнює M_{c1} . Якщо кут керування α дорівнює 75° , то робоча точка електропривода знаходиться в положенні 1. Припустимо, що з якихось причин збільшився момент навантаження на валу АД до значення M_{c3} . В той же час по умовам виробничого процесу допускається зменшення кутової швидкості до значення ω_2 . Очевидно, що для виконання цих вимог кут α

повинен бути зменшений до 60° , при цьому момент АД збільшиться і робоча точка електропривода переміститься в положення 2.

Із вказаного вище випливає, що для отримання сприятливих механічних характеристик АД, керованого за допомогою ТПН, необхідно регулювати кут α в залежності від зміни моменту M_c навантаження. Таке регулювання можна здійснити вручну, коли за роботою електропривода спостерігає оператор, який при неприпустимих коливаннях швидкості виробничого механізму регулює положення певної рукоятки, за допомогою якої змінюється кут α . Але найбільш простіше і з кращими результатами ці функції можуть виконати системи автоматичного регулювання, які без участі людини забезпечують підтримання швидкості АД на заданому рівні.

Основними перевагами досліджуваної схеми електропривода являється її відносна простота, надійність, легкість автоматизації в загальній технологічній схемі виробництва, зручність керування. Разом із цим дана система електропривода має значний недолік - великі втрати в обмотці ротора на низьких швидкостях.

Діапазон регулювання швидкості, при використанні зворотних зв'язків, відносно високий і досягає десяти. При використанні зворотних зв'язків можуть буди отримані жорсткі характеристики. Економічність регулювання залежить від конкретних умов роботи електропривода. Зокрема, якщо час роботи на понижений швидкості невеликий по відношенню до часу циклу, то економічність може бути високою. Регулювання швидкості АД в даній системі плавне і відбувається лише вниз від основної характеристики.

ХІД РОБОТИ

1. Подати живлення на стенд, включивши автомати QF1 та QF2. Включити ПК для реєстрації даних лабораторного стенду. Реєстрація даних здійснюється за допомогою плати реєстрації даних LA50USB.

Основні характеристики плати:

10 розрядів АЦП;

час перетворення - 500 мкс;

16 однополюсних або 8 диференціальних каналів;
вхідні діапазони напруг: $\pm 5\text{В}$, $\pm 1\text{В}$, $\pm 0.5\text{В}$, $\pm 0.1\text{В}$;
запуск АЦП: програмний, зовнішній;
16 цифрових ліній вводу/виводу, програмуються як два 8- розрядних порти;
генерація переривань з зовнішнього роз'єму;
тип АЦП - послідовного наближення;
число ефективних розрядів при частоті вхідного сигналу 1 кГц -9;
максимальна частота вибірок - 20 кГц;
вхідний опір аналогових каналів - не менше 100 МОм;
захист по напрузі - $\pm 15\text{В}$;
потужність, що споживається - +5 В, 200 мА;
шина інтерфейсу з ПК - USB 1.1

2. Запустити на ПК програмне забезпечення ADCLab для відображення графіків фазних струмів, напруг, а також сигналу тахогенератора.

Налаштувати масштаби каналів для покращення їх відображення.

3. Зняти осцилограми сигналів При трьох різних кутах керування, що змінюються за допомогою реостата R15 при різних рівнях навантаження.

Розрахувати кут керування α .

4. Запустити віртуальний лабораторний стенд. Загальний вигляд програмного забезпечення стенду представлено на рис.3.

Зняти осцилограми струмів, напруг та швидкості для тих же кутів керування, що були визначені у п.3.

Зняти осцилограми струму, напруги та швидкості при накиданні навантаження. Побудувати 2-3 механічні характеристики приводу для різних кутів керування.

5. Зробити висновки щодо діапазону керування швидкості, енергетичних показників, форми кривих напруги та струму.

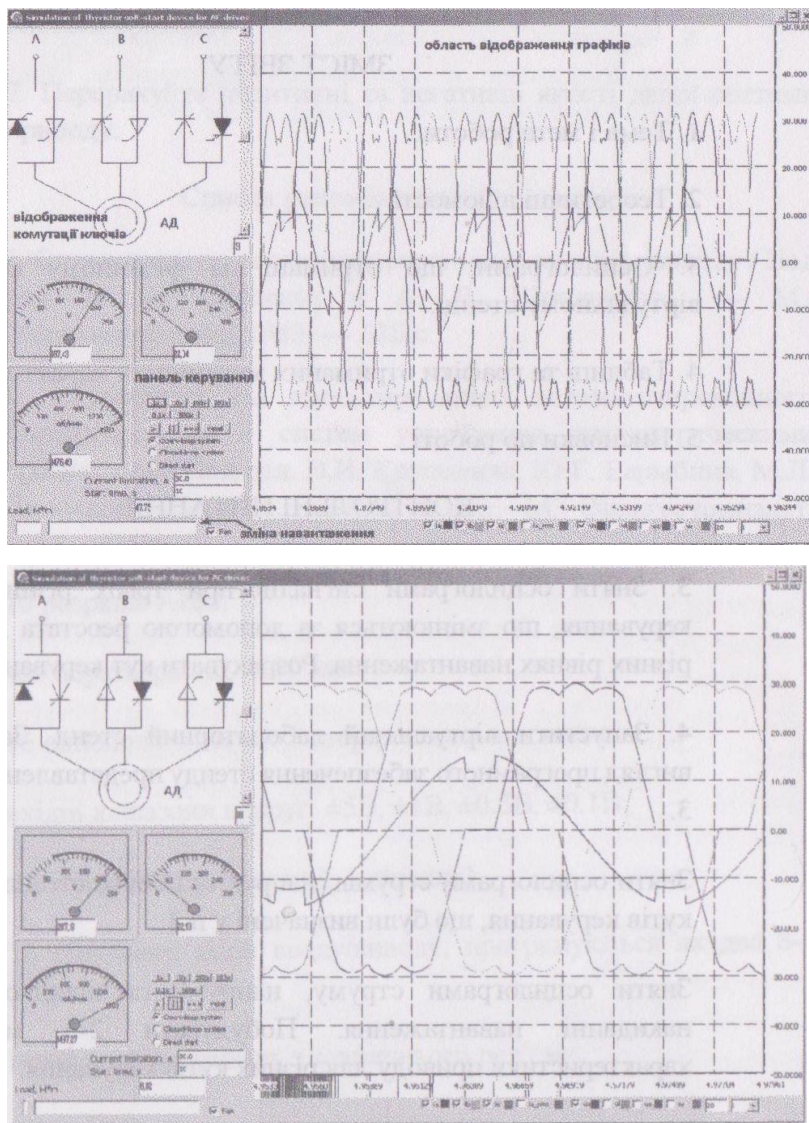


Рис. 3. Загальний вигляд віртуального лабораторного стенду для вивчення системи ТРН-АД

ЗМІСТ ЗВІТУ:

1. Тема і мета роботи.
2. Теоретичні відомості.
3. Осцилограми, що отримані на фізичному стенді та віртуальному стенді.
4. Таблиці та графіки отриманих механічних характеристик.
5. Висновки по роботі

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ:

1. Яким чином зміна напруги живлення АД дозволяє змінювати його швидкість?

2. Чому при такому способі керування відбувається зменшення критичного моменту двигуна, які обмеження це накладає на застосування даного методу?
3. Як впливає зміна кута керування ТПН на жорсткість механічних характеристик, які наслідки це має для стійкості приводу?
4. Як впливає несинусоїдальність струму на точність підтримання швидкості?
5. Для якого типу механізмів доцільно застосовувати такий спосіб керування?
6. Чим обмежений діапазон керування швидкості у даній системі приводу?
7. Перерахуйте позитивні та негативні якості даної системи приводу.

Список рекомендованої літератури

1. Системи керування електроприводами: Підручник / Ю.Г.Осадчук, І.І. Пересунько, Г.І. Ткаченко, В.О. Федотов, Д.О.Кальмус; за ред. д.т.н., проф. О.М. Сінчука – Варшава: iScience Sp. z.o.o. – 2024 – 162 с.
2. Електротехнічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; за ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. – К.: Лебідь, - 2005. – 680 с.
3. Теорія електропривода./ За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа. - 1993. – 494с.
4. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Сайченко О.В., Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. - К.: Аграр Медіа Груп. 2019. - 206 с.
5. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В., Основи електропривода. Теорія та практика. Частина І. - Вінниця: ВНАУ, 2020. - 387 с.

Додаткова література

1. Лимонов Л.Г. Автоматизований електропривід промислових механізмів. – Х.: Вид-во «Форт», 2009. – 272с.
2. Регульований електропривод: Підручник / За ред. І.М. Голодного. - К.: Аграр Медіа Груп, 2011. - 513с.
3. Електропривод: Підручник / За ред. Ю.М.Лавріненка. - К.: Ліра-К, 2009.- 504 с.

4. Системи керування електроприводами: Навч. посібник /А.П. Голуб та ін./ -К.:ПМКВО, 1992р.-353с.

5. Голуб А. П. Системи керування електроприводами : навч. посібник / А. П. Голуб, Б. І. Кузнецов, І. О. Опришко, В. П. Соляник. - К.: НМК ВО, 1992. - 352 с.

Лабораторна робота №2

Вивчення розімкненої системи керування частотно-керованого асинхронного електроприводу з використанням скалярних законів частотного керування

Мета роботи: вивчити засоби частотного керування асинхронних двигунів, а також частотні закони скалярного керування.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Частотний спосіб являється одним з найбільш перспективних і широко використовуваних у наш час способів регулювання швидкості АД. Принципи такого керування полягають в тому, що змінюючи частоту Д живлячої АД напруги, можна у відповідності з виразом $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 / p$ змінювати його синхронну швидкість ω_0 , отримуючи тим самим різні штучні характеристики. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання у широкому діапазоні, отримані характеристики володіють високою жорсткістю. У частотному способі при регулюванні швидкості АД не відбувається збільшення його ковзання, так як воно має місце при реостатному регулюванні. Тому при цьому способі регулюванні втрати ковзання, які визначаються

$$\Delta P_2 = P_1 - P_2 = M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega = M \cdot \omega_0 \cdot s = P_1 \cdot s$$

виявляються невеликими, в результаті чого частотний метод найбільш економічний.

Для кращого використання АД і отримання високих енергетичних показників його роботи - коефіцієнтів потужності, корисної дії, перевантажувальної здатності - одночасно із зміною частоти живлячої напруги необхідно змінювати і значення цієї напруги. Закон зміни напруги при цьому залежить від характеру моменту навантаження.

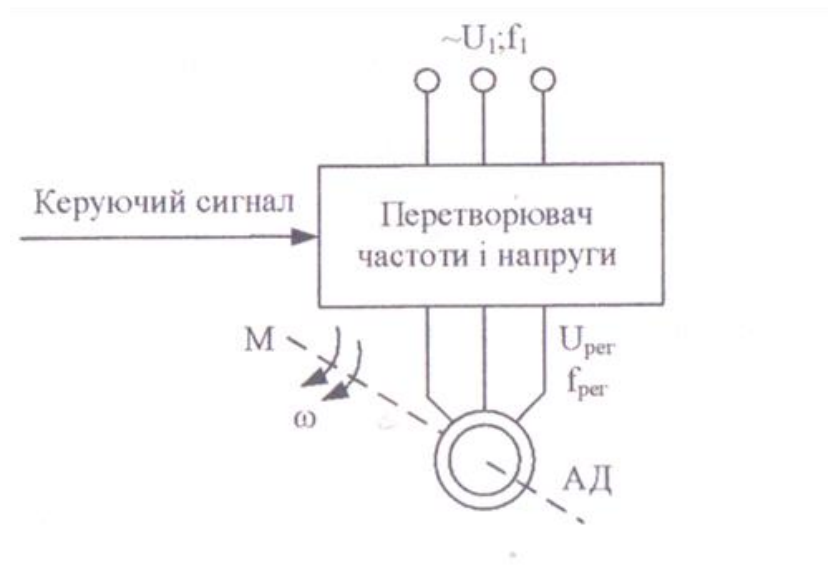


Рис.1. Схема асинхронного електропривода при частотному регулюванні

При обранні відношення між частотою і напругою, яка підводиться до статора АД, часто виходять із умови зберігання його перевантажувальної здатності λ , яка визначається відношенням критичного моменту двигуна M_k до моменту навантаження M_c ,

$$\lambda = \frac{M_k}{M_c} = \text{const}$$

Якщо знехтувати активним опором статора і врахувати, що $x_k \sim f_1$ та $\omega_0 \sim f_1$, то відповідно формули

$$M_k = \frac{3 \cdot U_\phi^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot x_k}$$

можна записати

$$\lambda = \frac{3 \cdot U_\phi^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot x_k \cdot M_c} = A \cdot \frac{U_\phi^2}{f_1^2 \cdot M_c} = \text{const}$$

де A - постійна, яка не залежить від f_1 .

З отриманого вище виразу випливає, що для будь-яких двох значень частоти f_{1i} та f_{1k} має виконуватись наступне співвідношення

$$\frac{U_{\phi i}^2}{f_{1k}^2 \cdot M_{ci}} = \frac{U_{\phi k}^2}{f_{1k}^2 \cdot M_{ck}}$$

де M_{ci} , M_{ck} - моменти навантаження при швидкостях АД, які відповідають

частотам f_{1i} та $f_{1к}$.

Звідси впливає основний закон зміни напруги при частотному способі регулювання швидкості АД

$$\frac{U_{\phi i}}{U_{\phi к}} = \frac{f_{1i}}{f_{1к}} \cdot \sqrt{\frac{M_{ci}}{M_{ck}}}$$

З даного виразу можуть бути отримані частотні закони зміни напруги і частоти при різних залежностях моменту навантаження M_c від швидкості.

При постійному моменті навантаження $M_c = const$, (рис. 2) при цьому:

$$\frac{U_{\phi}}{f_1} = const$$

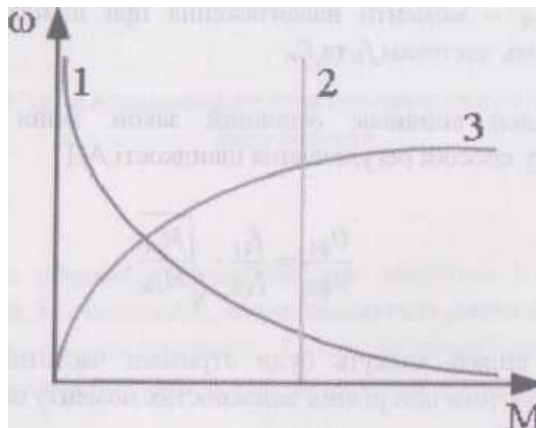
тобто напруга на статорі повинна змінюватися пропорційно його частоті.

Для вентильного характеру навантаження маємо співвідношення (рис.2)

$$\frac{U_{\phi}}{f_1^2} = const$$

а при моменті навантаження, обернено пропорційного швидкості (рис. 2):

$$\frac{U_{\phi}}{\sqrt{f_1}} = const$$



1 – характеристика при постійності механічної потужності

2 – характеристика при постійності моменту

1 – вентиляторна характеристика

Рис. 2. Типові механічні характеристики навантаження

На рис. 5, а приведені механічні характеристики АД. Для частот нижче

номінальної ($f_{1i} < f_{1\text{ном}}$) критичний момент АД постійний, що забезпечує незмінну перевантажувальну здатність двигуна. При частотах вище за номінальну ($f_{1i} > f_{1\text{ном}}$), коли по технічним умовам напруга на статорі не може бути підвищена більше за номінальну, критичний момент АД знижується.

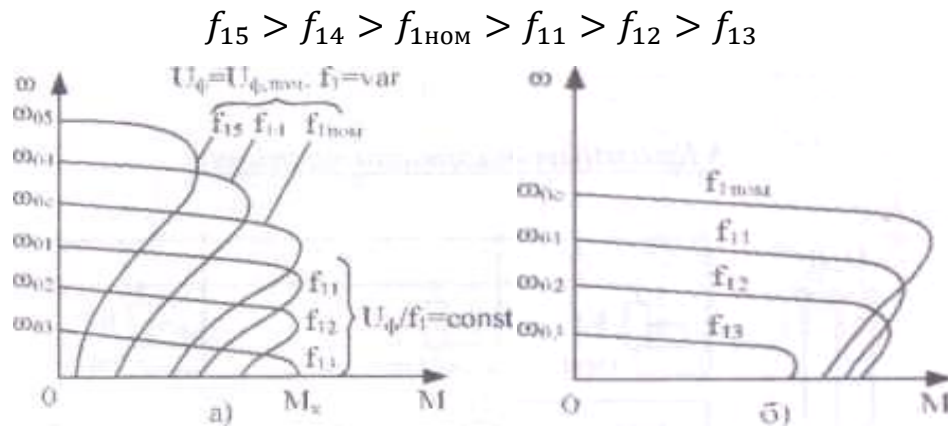


Рис.3. Механічні характеристики при частотному регулюванні координат АД:
а - розрахункова; б - практичні

Важливо відмітити, що наведені вище висновки і характеристики отримані при знехтуванні активним опором статора. Це припущення мало позначається при більшій (близькій або вище номінальної) частоті, в той час як при малих частотах воно помітно відображається на характеристиках привода. Для прикладу на рис. 3,б приведено сімейство експериментальних механічних характеристик АД. З графіків видно, що при невеликих частотах відбулося зниження критичного моменту АД. Причина цього полягає у зменшенні магнітного потоку АД при низьких частотах внаслідок впливу активного опору статора, яке викликає зменшення ЕРС АД через падіння напруги на R_1 .

$$\Phi_1 = \frac{E_1}{k \cdot f_1} = \frac{U_1}{k \cdot f_1}$$

Для компенсації цього явища необхідно із зменшенням частоти знижувати напругу в меншій мірі, ніж це передбачено відношенням

$$\frac{U_\phi}{f_1} = const$$

Машинний перетворювач частоти

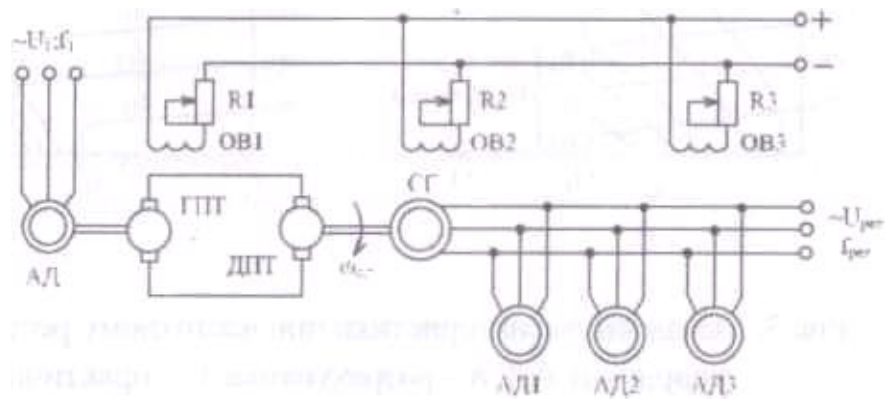


Рис.4. Електромашинний перетворювач частоти (ПЧ) з синхронним генератором

На рис .4 приведена схема перетворювача частоти з синхронним генератором. Перетворювач складається з двох частин: агрегату постійної швидкості, який вмикає АД (замість нього може бути використаний і синхронний двигун) та приведений ним генератор постійного струму ГПТ та агрегату змінної швидкості, який складається із регульованого двигуна постійного струму ДПТ, який приводить в обертання синхронний генератор змінної частоти СГ. Двигун АД живиться від мережі з частотою $f_1 = 50$ Гц, а на виводах СГ частота може регулюватися. При зміні за допомогою резистора R_1 струму збудження генератора ГПТ змінюється напруга, яка підводиться до якоря двигуна ДПТГ, а за допомогою R_2 - магнітний потік ДПТ, таким чином його швидкість регулюється. При цьому змінюється і частота напруги на виходах СГ, яка визначається з виразу $f_{\text{рег}} = p \cdot \omega_{\text{сг}} / (2 \cdot \pi)$ (де $\omega_{\text{сг}}$ - кутова швидкість ротора СГ; p - число пар полюсів генератора) і частота напруги приводних двигунів АД1-АД3, підключених до СГ. Напруга на виводах АД регулюється за допомогою резистора R_3 ,зв'язаного в коло збудження СГ.

Застосування перетворювача частоти дозволяє плавно регулювати швидкість двигунів АД1 - АД3 у широкому діапазоні, але процесу регулювання частоти в цій системі притаманні істотні недоліки. Для створення перетворювача необхідно чотири електричні машини, розраховані на повну потужність споживачів (групи АД), що визначає громіздкість установки та високу вартість, особливо при великих потужностях навантаження. Подвійне

перетворення енергії - енергії змінного струму частоти $f_1 = 50$ Гц в енергію постійного струму і далі знову в енергію змінного струму регульованої частоти - супроводжується виділенням втрат енергії у всьому ланцюзі перетворювача, що визначає невисокий ККД системи. Використання колекторних машин постійного струму потребує неперервного нагляду, їх робота супроводжується великим шумом. Також процесу зміни частоти в даній системі властива інерційність регулювання, так як регулювання частоти пов'язане із зміною швидкості агрегату ДНГ-СГ, який володіє механічною інерцією.

Безпосередній перетворювач частоти (БПЧ)

Безпосередніми називають такі ПЧ, у яких вихідна напруга формується із вхідної безпосередньо, без проміжної ланки постійного струму. Це дозволяє скоротити число ланок перетворення до однієї, однак ускладнює комутатор та керування ним, тому що кожна вихідна фаза повинна тимчасово зв'язуватися з кожною вхідною за допомогою ключів.

На рис. 5 зображено систем}' безпосередній перетворювач частоти (БПЧ) - асинхронний двигун (АД), де в якості схеми ТП взята трифазна мостова схема. БПЧ вмикається в статорний ланцюг АД і слугує для перетворення напруги стандартної частоти 50 Гц у регульовану $\mathcal{C}_2$ по величині та частоті. Такий перетворювач частоти являє собою три узгоджено працюючих ТП постійного струму. Кожна фаза АД живиться від свого реверсивного ТП.

Найбільш широке розповсюдження отримали БПЧ з природною комутацією струму у вентилях, яке відбувається за рахунок напруги живлячої мережі. До переваг таких перетворювачів частоти належать:

- 1) відсутність ланки постійного струму, а відповідно, і необхідності подвійного перетворення енергії. Завдяки цьому підвищується ККД перетворювача за рахунок зниження втрат потужності у силових вентилях;
- 2) можливість без прийняття додаткових схемних заходів здійснювати двосторонню передачу потужності: від мережі живлення до ланцюга

навантаження та від ланцюга навантаження в мережу. Ця властивість має велике значення в установках електропривода, так як дозволяють здійснити рекуперативне гальмування двигунів та працювати на навантаження з будь-яким значенням коефіцієнту потужності;

- 3) можливість здійснити плавне регулювання амплітуди і частоти основної гармоніки вихідної напруги від нуля до номінального значення, необхідне для частотного керування двигунами змінного струму;
- 4) можливість за допомогою систем керування отримувати на виході напругу, форма гладкої складової якої близька до синусоїдальної. Це особливо корисно, а в деяких випадках просто необхідно при роботі БПЧ на двигуни середньої та великої потужності.

Існують і недоліки БПЧ:

- 1) відносно низький коефіцієнт потужності, який споживається з мережі, що викликане відстаючим фазовим зсувом основної гармоніки струму, який споживається;
- 2) розгалуженість силової схеми внаслідок чого для її реалізації необхідно достатньо велика кількість вентилів;
- 3) обмеження верхньої межі робочих частот по умовам забезпечення природної комутації струму у вентилях та стійкість роботи системи імпульсно-фазового керування;
- 4) при частоті живлення 50 Гц, дозволяє отримати вихідну частоту в межах 0-20 Гц. Збільшення частоти вище 20 Гц приводить до значного спотворення форми живлячої мережі, що призводить до зниження енергетичних показників привода.

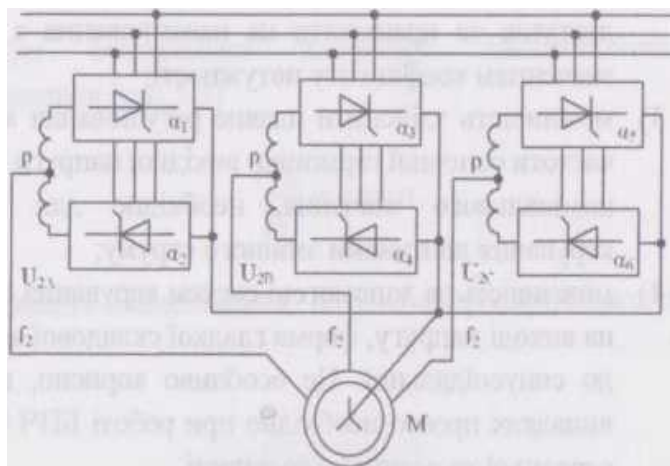


Рис.5. Електропривод по системі БПЧ-АД

Механічні характеристики безпосереднього перетворювача частоти зображено на рис. 6:

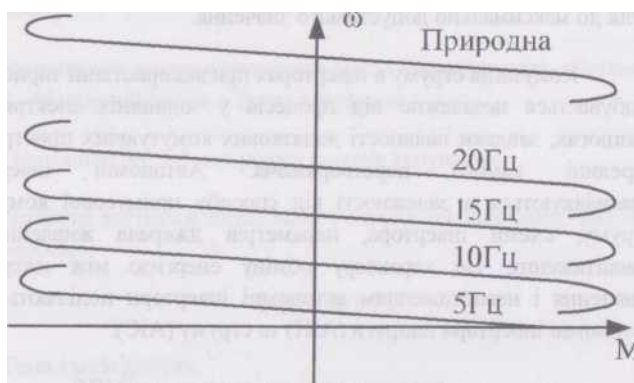


Рис.6. Механічні характеристики БПЧ

Вказані особливості БПЧ з природною комутацією обумовлюють області їх застосування в установках автоматизованого електропривода. Найбільш доцільно використати БПЧ в установках відносно тихохідного електропривода середньої та великої потужності з коротко замкнутими АД, з АД з фазним ротором; в схемі машин подвійного живлення; з синхронними двигунами та в установках вентильного двигуна.

Автономні інвертори

Автономний інвертор - перетворювач постійного струму в однофазний або багатофазний змінний струм, частота якого визначається системою керування, а величина і форма вихідної напруги залежить від характеру і параметрів навантаження. На відміну від залежного інвертора, частота якого визначається частотою мережі, на виході автономного інвертора отримують

змінний струм будь-якої частоти, а напруга плавно змінюється від нуля до максимально допустимого значення.

Комутація струму в інверторах при використанні тиристорів відбувається незалежно від процесів у зовнішніх електричних ланцюгах, завдяки наявності додаткових комутуючих пристроїв в середині самого перетворювача.

Автономні інвертори класифікуються в залежності від способу примусової комутації струму, схеми інвертора, параметрів джерела живлення та навантаження. По характеру обміну енергією між джерелом живлення і навантаженням автономні інвертори поділяються на автономні інвертори напруги (АІН) та струму (АІС).

Автономний інвертор напруги (АІН)

Характерною особливістю автономного інвертора напруги являється те, що він отримує живлення від джерела напруги, на вході АІН вмикається конденсатор великої ємності. Друга особливість АІН заключається у використанні в якості ключів повністю керованих вентилів, які зашунтовані діодами зворотного струму (рис.7). АІН формує на навантаженні напругу прямокутної форми, а форма струму визначається характером навантаження. В зображеній схемі керовані вентиля можуть працювати з тривалістю відкритого стану $\alpha=120^\circ$ та $\alpha=180^\circ$. При куту провідності вентилів $\alpha=180^\circ$ забезпечується неперервний зв'язок фаз навантаження з джерелом живлення та краща форма напруги на виході, яка не залежить від параметрів навантаження. Це обумовило більш широке застосування такого керування. В схемі завжди одночасно відкриті три керованих вентиля різних фаз, що забезпечує незалежність форми вихідної напруги на навантаженні від її параметрів. Із алгоритму перемикання транзисторів (рис.8,а) видно, що можливі шість незалежних поєднань відкритих і закритих станів керованих вентилів. Кожному поєднанню відповідає своя еквівалентна схема (рис.8,б,в). При з'єднанні навантаження в зірку, кожна фаза ввімкнена або паралельно другій фазі та послідовно з третьою, або послідовно з двома іншими паралельно з'єднаними фазами. Тому в кожній фазі прикладається напруга,

яка дорівнює $U_d/3$ або $2 \cdot U_d/3$ (при симетричному навантаженні), і фазна напруга на навантаженні має двоступінчасту форму (рис. 8,а).

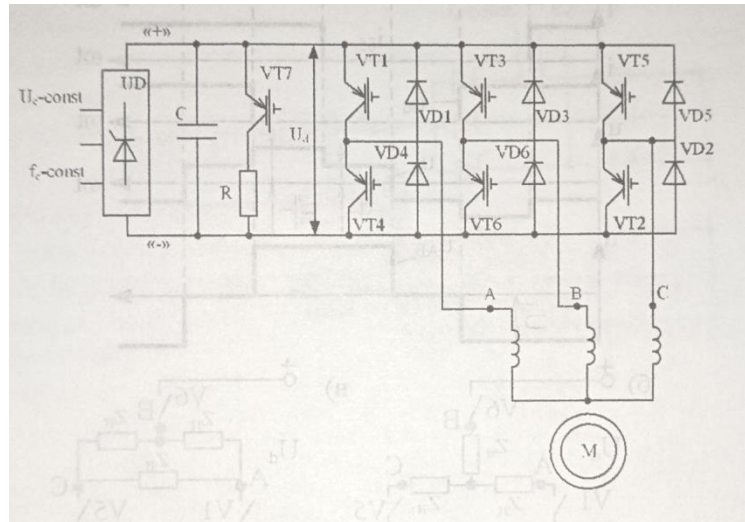


Рис.9. Транзисторний трифазний автономний інвертор напруги

При з'єднанні навантаження зіркою до кожної фази або прикладається напруга джерела живлення, або на протязі $1/6$ періоду фаза опиняється замкненою на себе, т.б. фазна прямокутна напруга з довжиною паузи $1/6$ періоду (рис. 11,а). Лінійна напруга при з'єднанні навантаження зіркою має таку само форму.

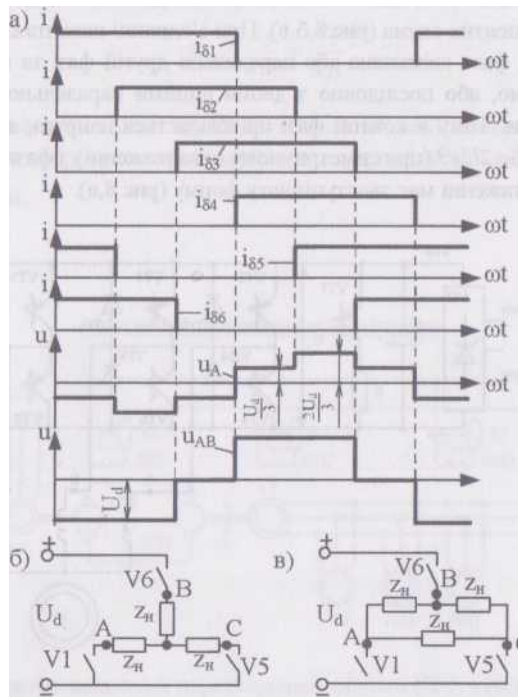


Рис. 10. Діаграми струмів та напруг в трифазному АІН (а) та еквівалентні схеми при навантаженні з'єднаної зіркою (б) та трикутником (в)

Автономний інвертор струму (АІС)

Характерними особливостями автономного інвертора струму являється живлення від джерела струму. Тоді в коло джерела вмикається дросель великої індуктивності (рис. 12). Також в даній схемі відсутні зворотні діоди в мостовій схемі інвертора. При використанні АІС керуючими впливами на АД являються частота і струм статора.

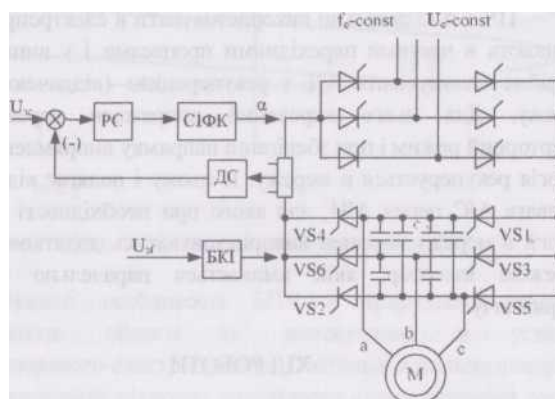


Рис. 11. Схема ПЧ з ланкою постійного струму

В схемі використовуються конденсатори для комутації тиристорів.

Формування обертаючого поля обумовлено алгоритмом роботи тиристора.

Перемикання тиристорів VS1-VS6 відбувається в порядку збільшення їх

номерів.

Нехай відкриті тиристори $VS1$, $VS2$. Струм проходить через фази «а» і «с». Конденсатор C_{13} заряджений із знаком «+» на верхній обкладинці. При подачі керуючого імпульсу на $VS3$, відкривається і створюється замкнений контур C_{13} - $VS1$ - $VS3$ - C_{13} , по якому відбувається заряд C_{13} . Під дією струму перезаряду, тиристор $VS1$ закриється і струм буде протікати через $VS3$ фази «b», «с» та $VS2$. Полярність C_{13} зміниться на протилежну. Потім відкриється тиристор $VS4$ і струм протікає від фази «с» на «а» (в протилежному напрямку). За час періоду заданої частоти, відбувається шість комутацій тиристорів, в результаті чого по обмотках статора буде протікати струм заданої частоти.

ПЧ з АІС доцільно використовувати в електроприводах, які працюють в частими перехідними процесами і у випадках, коли потрібне гальмування АД з рекуперацією (віддачею) енергії в мережу. Для цього керований випрямляч переводиться в інверторний режим і при зберіганні напрямку випрямленого струму енергія рекуперується в мережу. В цьому і полягає відмінність та перевага АІС перед АІН, для якого при необхідності рекуперації енергії в мережу повинен використовуватись додатковий ведений мережею інвертор, якій вмикається паралельно керованому випрямлячу.

ХІД РОБОТИ

1. Включити живлення лабораторного стенду, дочекатися виходу перетворювача в стан готовності.
2. Зайти в меню Налаштування - Входи/Виходи - Джерело швидкості. Впевнитися, що в якості джерела швидкості вибрано завдання з пульта керування.
3. Зайти в меню Робота - Керування - Пуск/стоп швидкість. Виконати команду «пуск», а також ручне завдання швидкості з пульта керування.
4. Змінюючи рівень навантаження, зняти механічні характеристики приводу.

5. Змінити тип закону керування у меню Налаштування - Параметри ПЧ - Напруга/Частота - Закон керування.
6. Повторити пп. 3-5 для різних законів керування.
7. Зробити висновки щодо якості керування приводом частотним способом.

ЗМІСТ ЗВІТУ:

1. Тема і мета роботи.
2. Теоретичні відомості.
3. Таблиці та графіки отриманих механічних характеристик.
4. Висновки по роботі

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ:

1. Чому при зміні частоти слід змінювати величину напруги?
2. Які закони частотного керування Вам відомі? Зобразіть механічні характеристики, що отримуються при реалізації цих законів. Для яких застосувань підходить кожен з цих законів?
3. Якими технічними засобами можна одночасно змінювати величину напруги та частоти, що прикладаються до статора двигуна?
4. Які керуючі впливи з боку системи керування існують для інвертора напруги? Яким чином відбувається відпрацювання заданого сигналу?
5. Які керуючі впливи з боку системи керування існують для інвертора струму? Яким чином відбувається відпрацювання заданого сигналу?
6. Чому для інвертора струму неможлива реалізація закону $V/f = \text{const}$ у розімкненій системі керування?
7. У яких приводах знаходять застосування інвертори струму, напруги, а також безпосередні перетворювачі?

Список рекомендованої літератури

1. Електротехнічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович , О.Ю. Лозинський , В.Б. Клепиков та ін. ; за ред. М.Г. Поповича , О.Ю. Лозинського. – К.: Лебідь, - 2005. – 680 с.

2. Теорія електропривода./ За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа. - 1993. – 494с.
3. Видмиш А. А.. Ярошенко Л. В.. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина І. - Вінниця: ВНАУ, 2020. - 387 с.
4. Системи керування електроприводами: Навч. посібник /А.П. Голуб та ін./ -К.:ПМКВО, 1992р.-353с.

Додаткова література

1. Основи електроприводу. Виробничих машин і комплексів. Навчальний посібник/ В.Е. Воскобойник , В.А. Борізай , Р.О. Борєва , О.Ю. Нестереня. – Д.: Національний ТУ «Дніпровська політехніка» , 2021.-254с.
2. Електропривод: Підручник / За ред.. Ю.М.Лавріненка. - К.: Ліра-К, 2009.- 504 с.
3. Голуб А. П. Системи керування електроприводами : навч. посібник / А. П. Голуб, Б. І. Кузнецов, І. О. Опришко, В. П. Соляник. - К.: НМК ВО, 1992. - 352 с.

Лабораторна робота № 3

Дослідження типових схем релейно-контакторного керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором

Мета роботи: вивчити основні принципи керування в розімкнених системах АЕП та їх реалізацію на прикладі конкретних схем пуску, зупинки та керування двигунами постійного та змінного струму

На рис. 1 зображена одноконтрна схема керування неререверсивним короткозамкненим двигуном. На рис. 2 - схема керування неререверсивним двигуном з двох місць та динамічним гальмуванням при останові. На рис. 3 - схема керування реверсивним короткозамкненим двигуном.

Умовні позначення на даних схемах: QF - автомат; SA та SA2 - вимикачі оперативної напруги та ланцюга постійного струму; FU1 та FU2 - запобіжники; KM1 та KM2 - лінійний контактор та контактор гальмівного режиму; KM3, KM4 - лінійні контактори «вперед» і «назад»; SBC, SBC1, SBC2 - кнопка пуску; SB3, SB4 - кнопка пуску «вперед» і «назад»; SBT, SB1, SB2-кнопка зупинки.

Приведені схеми містять захисти від короткого замикання (автомат QF та запобіжники FU), захисти від перевантаження двигуна (QF, теплове реле КК1, КК2), нульовий захист (котушки контакторів KM1, KM3, KM4). В схемі присутні електричні блокування: блок-контакт KM2 в ланцюзі KM1, а також блок-контакт KM1 в ланцюгах котушки KM2 (рис.1), блок контакт KM4 (рис.2). Крім того, за рахунок розмикаючих ланцюгів кнопок SB1, SB2, SBC1, SBC2, SBC3, SBC4 додатково виконане блокування від одночасного вмикання KM1 та KM2 (рис. 1) і контактів KM3 та KM4 (рис.2). Контроль та вимірювання струму здійснюється амперметром РА.

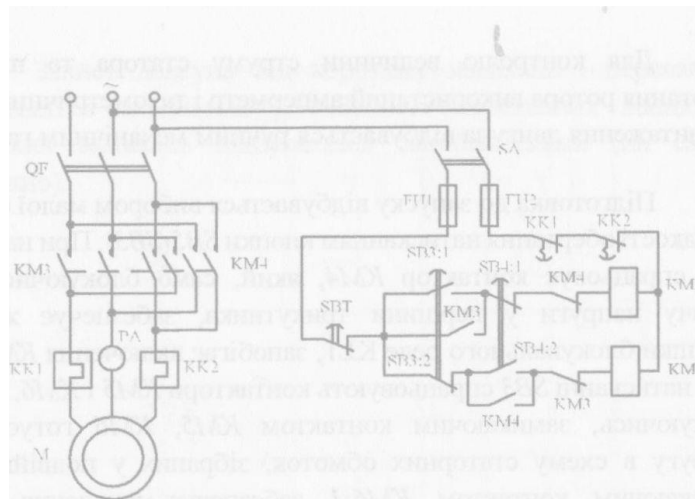


Рис. 3. Схема керування реверсивним коротко замкненим двигуном

Лабораторна робота № 4

Дослідження релейно-контакторної схеми керування частотою обертання та регулювання двошвидкісного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

На рис.4 зображена схема керування асинхронним двигуном з перемиканням обмотки статора із трикутника на повійну зірку.

Схема передбачає пуск на низьку чи високу швидкість, перехід на ходу з низької швидкості на високу і навпаки без попередньої зупинки двигуна, а також можливість реверсу на будь-якій швидкості. Подача живлення в схему відбувається автоматом QF та вимикачем оперативної напруги SF, а керування двигуном - з п'ятикнопового поста керування.

Для контролю величини струму статора та швидкості обертання ротора використаний амперметр і тахометричний датчик. Навантаження двигуна відбувається ручним механічним гальмом.

Підготовка до запуску відбувається вибором малої (великої) швидкості обертання натисканням кнопки SB5(SB3). При натисканні SB5 спрацьовує контактор КМ4, який, само блокуючись, готує подачу напруги у вершини трикутника, забезпечує живлення котушки блокувального реле KL1, запобігає включення КМ5, КМ6. При натисканні SB3 спрацьовують контактори КМ5 і КМ6, які, само блокуючись, замикаючим контактом КМ5, КМ6 готує подачу напругу в схему статорних обмоток) зібраних у подвійну зірку, замикаючим контактом КМ6: І забезпечує живлення KL1, а розмикаючим КМ5:2 запобігають вмикання КМ4.

Спрацьовуючи, KL1 дозволяє вмикання контакторів КМ1, КМ2 («вперед» і «назад») при натисканні відповідної кнопки SB4 (SB2).

При вмиканні КМ1, осатаній своїм замикаючим контактом само блокується, подає напругу на обмотки статора, а розмикаючим контактом запобігає спрацювання КМ2. Схема аналогічно працює при пуску «назад».

Завдяки використанню двоцепних кнопок керування можливо перемикання величини швидкості на ходу, а також безпосереднє реверсування двигуна без попередньої зупинки.

Зупинка двигуна відбувається натисканням кнопки SB1, в результаті чого знеструмлюються всі апарати, які були збуджені.

Дотисканням кнопки SB1 відбувається вмикання контактора КМ3, керуючого гальмуванням двигуна (в контакторній установці вихід КМ3 не задіяний).

Захист двигуна від коротких замикань і перевантажень відбувається автоматом QF. Захист оперативних ланцюгів від коротких замикань, відбувається запобіжниками (на схемі не показано).

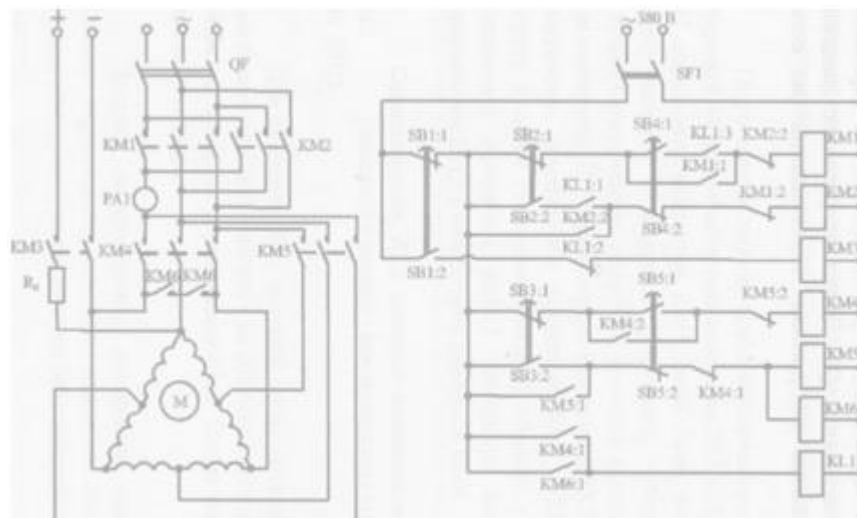


Рис. 4. Схема керування асинхронним двигуном з перемиканням обмотки статора із трикутника у подвійну зірку

Лабораторна робота № 5

Дослідження релейно-контакторної схеми керування синхронним двигуном середньої потужності

На рис.5 представлена досліджувана схема керування синхронним двигуном.

Умовні позначення на схемі: KV1 і KV2 - поляризоване реле подачі збудження і реле контролю синхронізації; KT1 - реле контролю часу пуску; KL1 - проміжне реле з витримкою часу; KL1 - проміжне реле; КСТ - вмикаюча котушка лінійного контактора; KV3 - сигнальне реле контролю оперативної напруги; KL3 і KL4 - блокуючі реле захисту від передчасної синхронізації та недопустимого зниження живлячої напруги та спрацювання захисту з ручним поверненням в початкове положення; КМ2 - контактор подачі збудження з засувкою; КМ3 - котушка звільнення механічної засувки контактора КМ2.

Підготовка схеми до роботи відбувається вмиканням автомата QF та рубильника SA.

Пуск СД відбувається натисканням кнопки SB1 («пуск»). При цьому створюється ланцюг живлення котушки контактора КМ1, який, вмикаючись, замикаючим контактом КМ1:2 створює ланцюг само утримання і підключає статор двигуна до мережі. Одночасно створюється ланцюг живлення схеми синхронізації та захистів. Починається асинхронний пуск СД. Обмотка збудження СД опиняється замкненою на RP1 і через нього протікає струм, обумовлений ЕРС, яка індукована в обмотці. Реле KV1 збуджене, і його контакт в ланцюзі KV2 замкнений. З вмиканням ЛЛ-/7 втягується KV3 і KL3, створюється ланцюг вмикання реле KT1, який має миттєво розмикаючий контакт, який переводить живлення котушки KT1 в економічний режим (через економічний резистор R3), а також контакт, який замикається з витримкою часу в ланцюгах живлення котушок KL1, КСТ. Реле KT1, відрахувавши витримку часу, замикає ланцюг живлення котушки реле KL1, яке вмикає реле KL2. Останнє, вмикаючись, знеструмлює котушку реле KL1,

яке своїм контактом повторно вмикає КТ1. Крім того, реле КЛ2 замикає контакт в ланцюзі котушки реле КЛ3 і готує ланцюг живлення котушки КСТ.

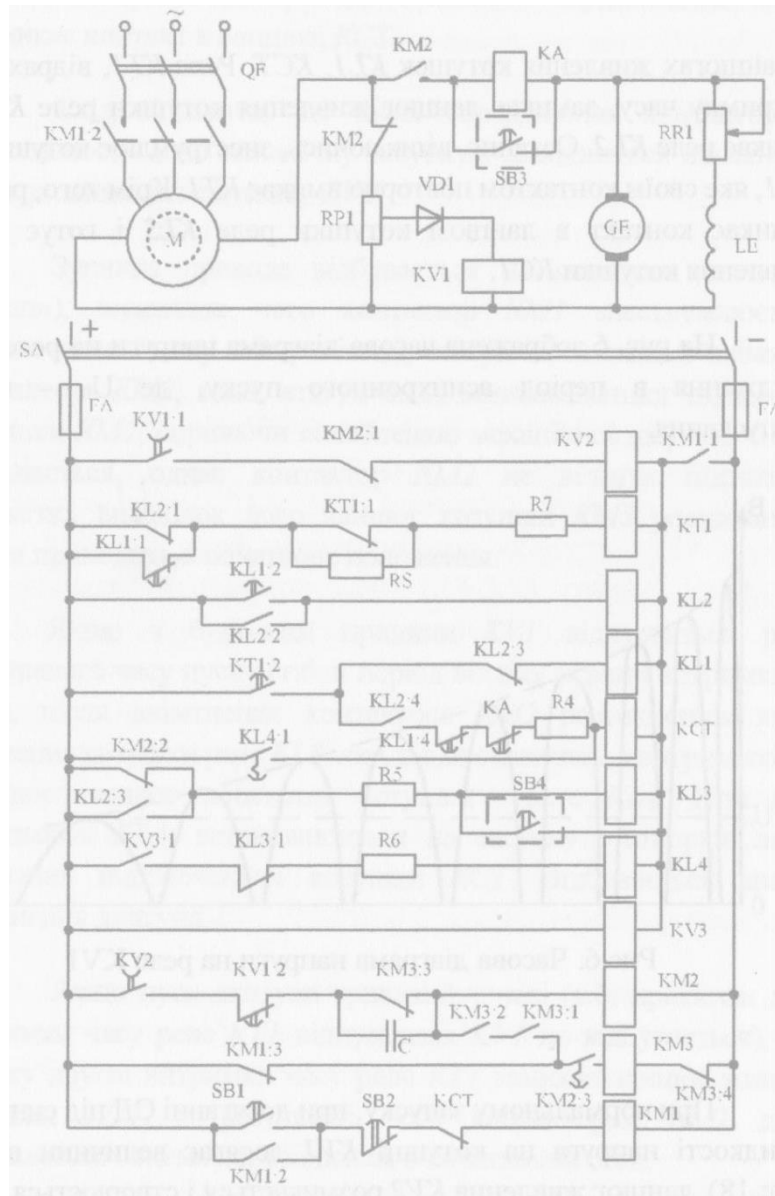


Рис.5. Схема керування пуском синхронного двигуна

На рис. 6 зображена часова діаграма напруги на реле подачі збудження в період асинхронного пуску, де U_0 - напруга відпускання.

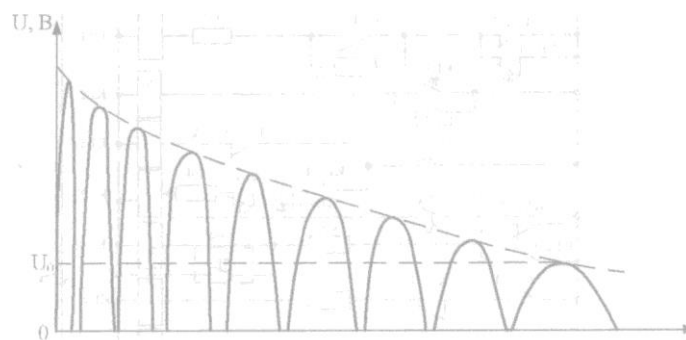


Рис.6. Часова діаграма напруги на реле КВ1

При нормальному запуску, при досяганні СД під синхронної швидкості напруга на котушці KV1 досягає величини відпуску (рис. 6), ланцюг живлення KV2 розмикається і створюється ланцюг вмикання контактора КМ2 на час витримки реле KV2. Контактор КМ2 спрацьовує, забезпечуючи перемикання обмотки збудження М з розрядного резистора RP1 на збуджував GE. Струм збудження сприяє синхронізації привода і визиває спрацювання КА, яке розмикає контакт в ланцюзі КСТ.

Слід відмітити, що після спрацювання контактор КМ2 встановлюється на механічну засувку і залишається ввімкненим і після розмикання контакту KV2.

Зупинка привода відбувається натисканням кнопки SB2 («стоп»), внаслідок чого контактор КМ1 знеструмлюється, відключаючи схему синхронізації; створюється ланцюг ввімкнення контактора КМ3, який, втягуючись, замикає ланцюг підживлення котушки КМ2, сприяючи ослабленню механічної засувки. Остання звільняється, однак контактор КМ2 не встигає підтягнутися повністю, внаслідок чого ланцюг котушки КМ3 розмикається і схема приходить в початкове положення.

Якщо з будь-якої причини KV1 відпуститься раніше очікуваного часу пуску (т.б. в період відліку першої витримки часу КТ1), після ввімкнення контактора КМ2 розімкнеться ланцюг живлення котушки реле KL3, яке, відключаючись, з витримкою часу створює ланцюг живлення котушки реле KL4. При цьому спрацьовує KL4, встановлюється на засувку і створює ланцюг живлення відключаючої котушки КСТ. Відбувається аварійне вимкнення двигуна.

Якщо пуск двигуна тривалий у часі (т.б. протягом другої витримки часу реле КТ1 відпускання KV1 не відбувається), після відліку другої витримки часу реле КТ1 замикає ланцюг живлення котушки КСТ, в результаті чого контактором КМ1 двигун вимикається і схема переводиться в початковий стан.

Аварійне відключення відбувається також у випадку, коли KV1 відпускається своєчасно, але струм в обмотці збудження після ввімкнення КМ2 недостатній для синхронізації і нормальної роботи двигуна, т.б. якщо не спрацює реле КА.

Лабораторна робота № 6

Вивчення схеми керування двигуном постійного струму з керуванням у функції часу та корегуванням по струму навантаження

Схема керування двигуном зображена на рис. 7. Умовні позначення на схемі: М - якорь двигуна; СО, ОЗ - послідовна і паралельна обмотки збудження; КА1, КА2 - реле максимального струму; RV1 - струмове реле підсилення поля; RR1-RR3 - ступені пускового реостату; КТ1, КТ2 - реле витримки часу на відпускання; VD1 і RP- діод і розрядний опір обмотки збудження ОЗ; КА3 - реле наявності струму збудження; KV2 - реле напруги; КМ8 - контактор економічного режиму збудження; КМ6 - контактор керування полем; RR - додатковий опір; КМ7 - контактор ввімкнення електрогідравлічних вентилів системи знесилення, КМ1, КМ2 - лінійні контактори; КМ3-КМ5 - контактори прискорення; KV3 - реле контролю прискорення з витримкою часу; НУБ - контакт із схеми вимірювання наявності матеріалу в живлячому бункері.

Для запуску двигуна вмикаються рубильники SA1, SA2. При цьому отримує живлення ОЗ, струм в якій обмежений опором RP на рівні 40-60% від номінального. Крім того вмикається реле КТ1.

Схема передбачає два режими пуску і зупинки двигуна, вибір яких відбувається перемикачем, вибір керування SA.

Режим «ручне керування», яке не залежить від ходу технологічного процесу, відбувається при замиканні ланцюга 1SA. Пуск і зупинка привода в даному випадку відбувається лише оператором за допомогою двокпопкового поста SBC, SBT. При переведенні SA в положення «автоматичне керування» замикається його ланцюг 2SA.

При ручному керуванні натисканням кнопки SBC охоплюється струмом реле KV2 і встановлюється на само підхват. Вмикаються контактори КМ1, КМ2, які подають напругу в силовий ланцюг привода і знеструмлюється КТ1.

Крім того, спрацьовує контактор КМ6, підсилюючи струм збудження ОЗ до 120-130% від номінального, а також вмикаються контактори КМ8 і КМ7 (електрогідравлічний вентиль, керований контактором КМ7, на схемі не зображений). Під дією стрибка силового струму (близько 150% від номінального значення) спрацьовують реле КВ1, а також КТ2, КТ3. По закінченню витримки часу КТ1:1 вмикає КМ3, шунтуючи RR1 одночасно з КТ2. Останнє з витримкою часу вмикає КМ4, який шунтує RR2 і обмотку КТ3. З витримкою реле вмикається КТ3:1, який шунтує RR3 - останню ступінь пускового реостату, а також вмикається RV3. Котушки контакторів КМ6 і КМ7 залишаються під напругою на час витримки RV3, проте, якщо струм силового ланцюга не знизиться до струму відпускання RV1 (близько 115% від номінального), ланцюг живлення цих контакторів зберігається через послідовно ввімкнені замикаючі контакти КМ5:2 та КВ1:1.

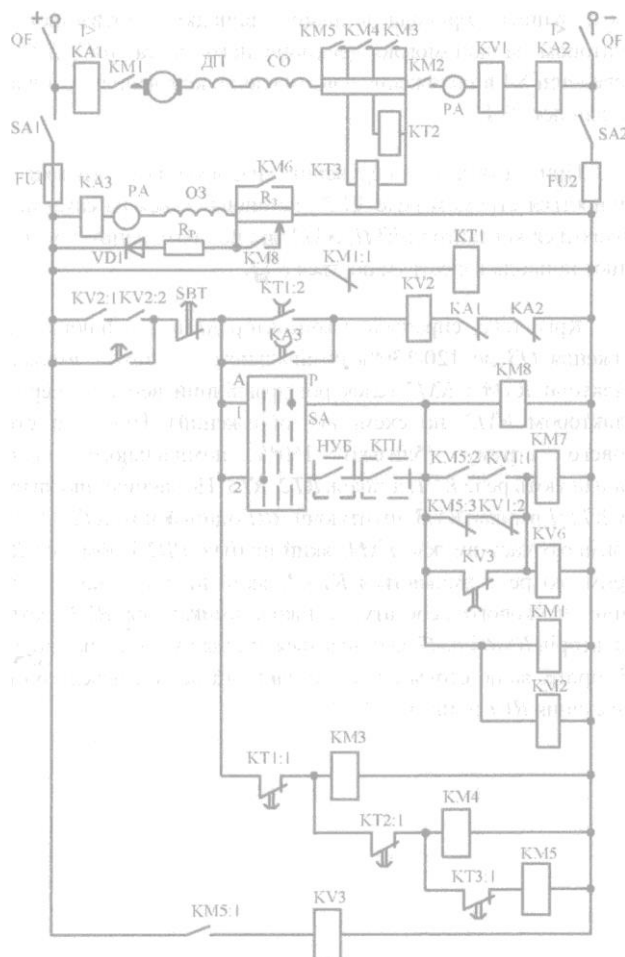


Рис.7. Схема керування пуском двигуна постійного струму

Зниження струму в силовому ланцюзі до величини відпускання KV1 призводить до відключення котушок КМ6 і КМ7. При цьому струм збудження зменшується до 70-85% номінального значення, яке налаштовується Rр. Одночасно зростає струм силового ланцюга, що може призвести до спрацювання KV1 і подальшому підсиленню поля завдяки КМ6. Таким чином, можливий вібраційний режим переходу двигуна на роботу з номінальним потоком (рис.7).

Якщо при номінальній роботі привода живильника відбувається збільшення навантаження, спрацює KV1 і переводить двигун на роботу з підсиленням магнітним потоком.

Для забезпечення автоматичного пуску необхідно підготувати схему до роботи: перевести SA в положення «автоматичне керування» і натисканням кнопки ввімкнути схему.

Автоматичний пуск в послідовності, вказаній вище, відбудеться, якщо буде замкнений контакт НУБ(мається матеріал в живлячій ємності), а також буде замкнений блокувальний контакт (якщо запущений в роботу наступний по технологічній лінії конвеєр) КП1.

Зупинка живильника вручну відбувається кнопкою SBT. При цьому двигун, вимикаючись, переводиться на роботу з ослабленим (черговим) струмом збудження. Аварійне відключення відбувається при спрацюванні КА1 або КА2, перегоранні вставок запобіжників, а також при недопустимому зниженні або зникненні струму збудження ОЗ, який фіксується КА3.

Лабораторна робота № 7

Вивчення схеми керування асинхронним двигуном з фазним ротором

Схема керування АД представлена на рис. 8. Ввімкнення автомата QF силової напруги и живлення оперативних ланцюгів схема готується до роботи. При цьому отримують живлення реле прискорення КСС1-КСС6, які миттєво розмикають свої контакти в ланцюгах котушки контакторів КМ1-КМ6. Крім того, спрацьовують КЛ1, КЛ2.

Вибір напрямку обертання відбувається натисканням відповідних кнопок SB2 («вперед») або SB3 («назад»). Натискання кнопки SB2 викликає спрацювання контактора КМ7, який своїми силовими контактами підключає статор двигуна до мережі, розмикаючим блок-контактом знеструмлює котушку реле прискорення КСС1, а іншим розмикаючим контактом блокує ланцюг котушки контактора КМ8, запобігаючи можливості його вмикання при ввімкненому контакторі КМ7. Крім того, через блок-контакт КМ7:1 і контакт КЛ1 шунтується кнопка SB2

Починається пуск двигуна «вперед» з повністю введеним в роторний ланцюг опорами.

Знеструмлене реле КСС1, відрахувавши витримку часу, своїм контактом вмикає ланцюг живлення котушки контактора КМ1, який, спрацьовуючи, силовими контактами шунтує першу ступінь пускового опору, а розмикаючим блок-контактом знеструмлює котушку другого реле прискорення КСС2.

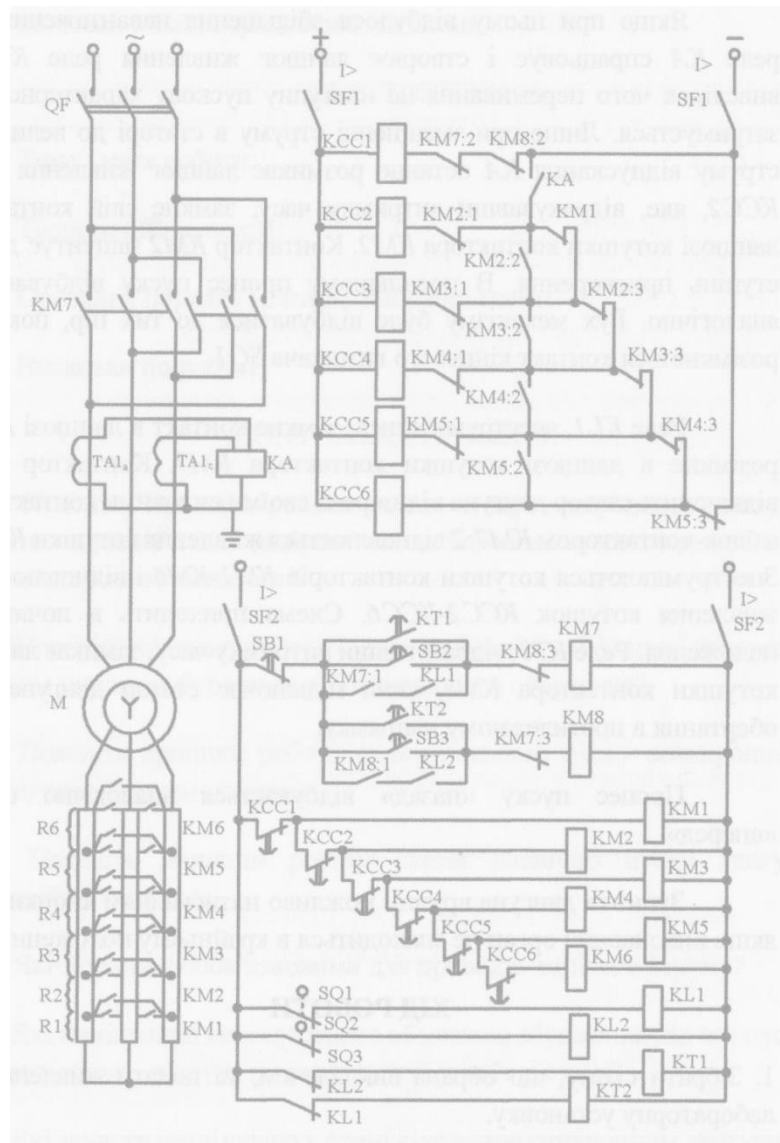


Рис.8.Схема керування асинхронним двигуном

Якщо при цьому відбулося збільшення навантаження, то реле КА спрацює і створює ланцюг живлення реле КСС2, внаслідок чого перемикання на наступну пускову характеристики затримується. Лише при зменшенні струму в статорі до величини струму відпускання КА останнє розмикає ланцюг живлення реле КСС2, яке, відрахувавши витримку часу, замкне свій контакт в ланцюзі котушки контактора КМ2. Контактор КМ2 зашунтує другу ступінь прискорення. В подальшому процес пуску відбувається аналогічно. Рух механізму буде відбуватися до тих пір, поки не розімкнеться контакт кінцевого вимикача SQ1.

Реле KL1, знеструмившись, замкне контакт в ланцюзі КТ2 і розімкне в ланцюзі котушки контактора КМ7. Контактор КМ7 відключить статор

двигуна від мережі своїми силовими контактами, а блок-контактором КМ7:2 відновлюється живлення котушки КСС1. Знеструмлюються котушки контакторів КМ1-КМ6 і відновлюється живлення котушок КСС2-КСС6.

Схема приходить в початкове положення. Реле КТ2, відрахувавши витримку часу, замикає ланцюг котушки контактора КМ8, який підключає статор двигуна для обертання в протилежному напрямку.

Процес пуску «назад» відбувається аналогічно пуску «вперед».

Зупинка двигуна вручну можливо натисканням кнопки SB1, якщо виконавчий орган не знаходиться в крайньому положенні.

ХІД РОБОТИ

1.Зібрати схему, що обрана викладачем, та подати живлення на лабораторну установку.

2.Перевірити схему шляхом натискання відповідних кнопок.

3.Описати у звіті порядок роботи схеми.

ЗМІСТ ЗВІТУ:

1.Тема і мета роботи.

2.Теоретичні відомості.

3.Описання порядку монтажу вибраної схеми.

4.Висновки по роботі

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ:

1. Поясніть принцип роботи схеми пуску синхронного двигуна. Яким чином в схемі відбувається визначення моменту досягнення підсинхронної швидкості?

2. Поясніть принцип роботи схеми керування двофазним двигуном. Яким чином відбувається зміна швидкості обертання?

3. Поясніть принцип роботи схеми плавного пуску асинхронного двигуна з фазним ротором.

4. Поясніть принцип роботи схеми плавного пуску двигуна постійного струму.

5. Які захисти є обов'язковими для приводів змінного струму?

6. Які маніпуляції виконуються з обмоткою збудження під час пуску синхронного двигуна по розглянутій у роботі схемі?
7. Які захисти реалізовано у схемі керування синхронним двигуном?

Список рекомендованої літератури (лабораторні роботи №№ 3 – 7)

1. Системи керування електроприводами: Підручник / Ю.Г.Осадчук, І.І. Пересунько, Г.І. Ткаченко, В.О. Федотов, Д.О.Кальмус; за ред. д.т.н., проф. О.М. Сінчука – Варшава: iScience Sp. z.o.o. – 2024 – 162 с.
2. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Сайченко О.В., Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. - К.: Аграр Медіа Груп. 2019. - 206 с.
3. Електропривод: Підручник / За ред.. Ю.М.Лавріненка. - К.: Ліра-К, 2009.- 504 с.
4. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В.. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина І. - Вінниця: ВНАУ, 2020. - 387 с.

Додаткова література (лабораторні роботи №№ 3 – 7)

1. Основи електроприводу. Виробничих машин і комплексів. Навчальний посібник/ В.Е. Воскобойник , В.А. Борізай , Р.О. Борєва , О.Ю. Нестереня. – Д.: Національний ТУ «Дніпровська політехніка» , 2021.-254с.
2. Мазена С.С. , Маруцак Ф.Ю. , Куцак А.С. Електрообладнання промислових підприємств. Навчальний посібник – 2-е видання. Львів.: «Магнолія 2006»,2008.-260с.

Лабораторна робота №8

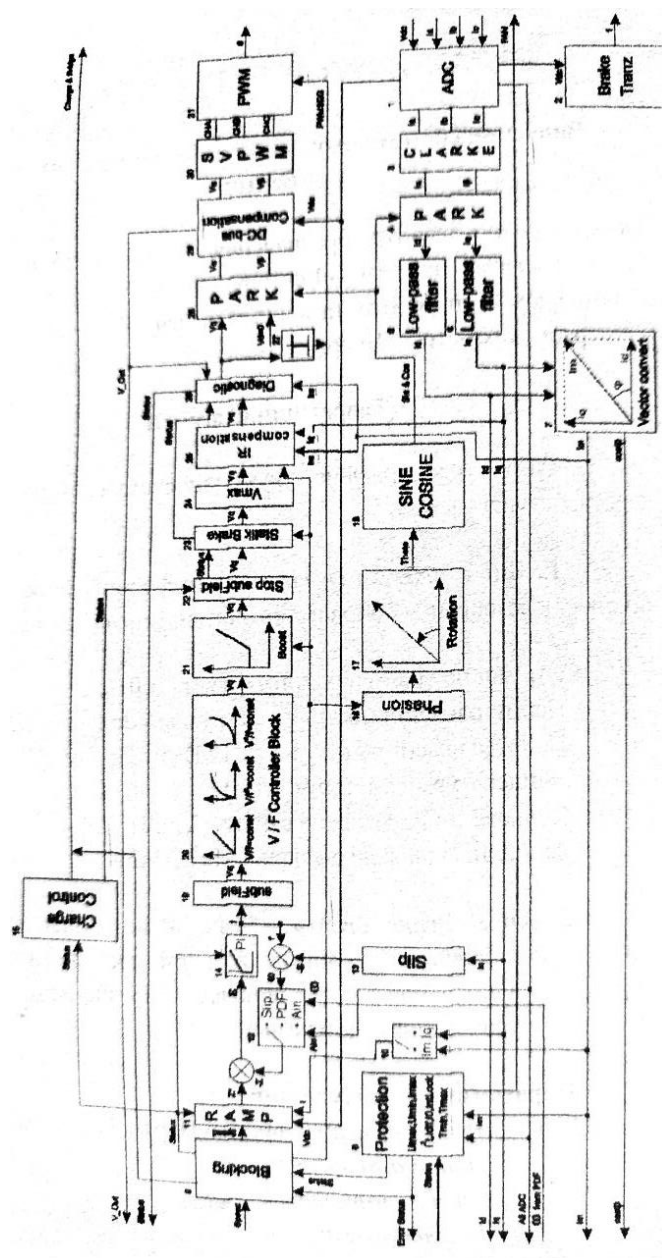
Вивчення системи керування електропривода змінного струму на базі перетворювача частоти «Вектор»

Мета роботи: вивчити призначення блоків системи керування перетворювача частоти «Вектор», навчитися підготовлювати перетворювач до роботи та користуватися вбудованою системою реєстрації параметрів «Візір»; зняти регульовальні та швидкісні статичні характеристики системи для заданого викладачем діапазону регулювання та побудувати механічні характеристики електроприводу.

Теоретичні відомості

На рис. представлено структурну схему системи керування перетворювача частоти.

1. Блок «ADC» - (Аналогово-цифровий перетворювач) виконує перетворення і обробку аналогових сигналів, таких як:
 - Струми по трьом вихідним фазам(I_a I_b I_c);
 - Напруга в анці постійного струму(V_{dc});
 - Напруга власних потреб 5 та 12 В(P_{wG5} , P_{wG12});
 - Температура радіатору(T_{erm});
 - Нульова точка датчиків струму(V_{null});
 - Зовнішні аналогові сигнали(A_{In1} , A_{In2}).
2. Блок «Brake Tranz» - забезпечує керування гальмівним транзистором зрівнюючи напругу в ланці постійного струму з напругою гальмування і у випадку перевищення ШИМує транзистор з урахування гістерезису.



Параметри налаштування:

[\\Налаштування\Парам.Двигуна\Парам.Гальмування\](#)

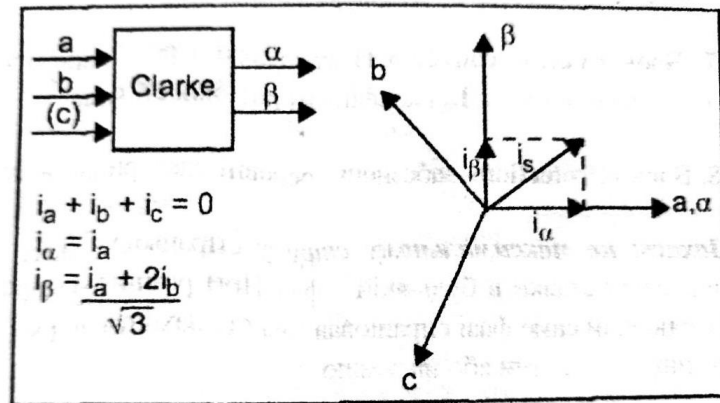
Напруга гальмування(%)

Сила гальмування(%)

Гіс. Гальмування(%)

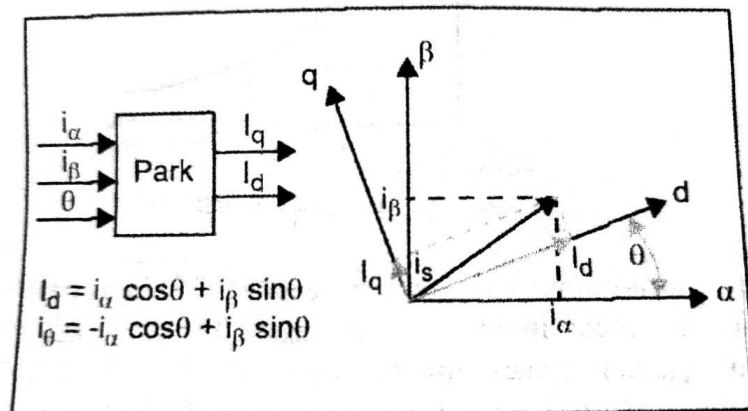
Структурна
схема
роботи
и ПЧ

3. Блок «CLARKE» реалізує в собі перетворення системи векторів струму 3-х фаз i_a i_b та i_c в двовекторну i_α та i_β :



Блок перетворення координат «CLARKE»

4. Блок «PARK» виконує функцію виділення активної « I_d » і реактивної « I_q » складової струму статора електродвигнуна відносно векторів i_α та i_β і кута вектора напруги θ :



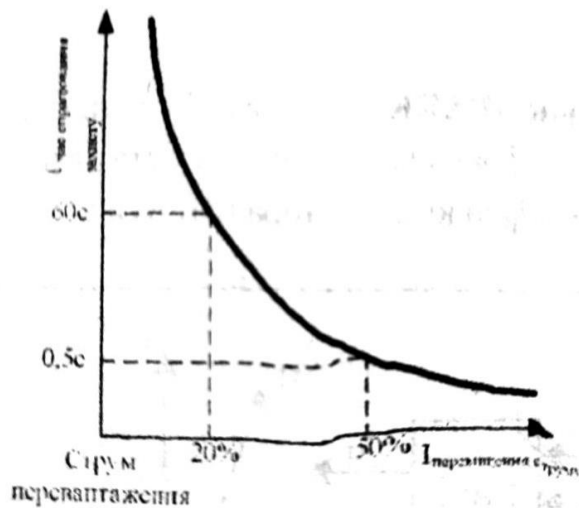
Блок перетворення координат «PARK»

5. Блок «Low-pass filter» - фільтр низьких частот знеструмлює програмну фільтрацію параметра I_d з частотою зрізу 300 Гц.
6. Блок «Low-pass filter» - фільтр низьких частот знеструмлює програмну фільтрацію параметра I_q з частотою зрізу 300 Гц.
7. Блок «Vector convert» - із активного і реактивного струму обчислює повний струм I_m і коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)$.
8. Блок «Protection» - забезпечує основні електричні захисти:

Захист по максимальному струму спрацьовує миттєво при перевищенні уставки в будь-якій з фаз. При розшифруванні аварії показує по якій саме фазі спрацював захист. Захищає від короткого замикання між фазами або на землю.

Параметри налаштування

[\\Налаштування\Парам.ДВигуна\Захист\](#)



Часо-струмовий захист

Часо-струмовий захист спрацьовує при перевищенні струму протягом інтервалу часу, який залежить від квадрату струму. Даний захист призначений для захисту двигуна від тривалих перевантажень і як наслідок перегріву і можливого виходу із ладу.

Параметри налаштування

[\\Налаштування\Парам.ДВигуна\Захист\](#)

Струм перевантаження(%)

Диференційний захист(перекошення фаз) – сума струмів перевищує мінімальний струм протягом 0.1 с. Цей захист спрацьовує при пробі ізоляції в кабелі або двигуні на землю.

Параметри налаштування

[\\Налаштування\Парам.ДВигуна\Захист\](#)

Мінімальний струм %

Обрив вихідної фази. Струм в одній із фаз нижчий ніж мінімальний струм протягом 50 електричних періодів. Тобто час спрацювання захисту залежить від вихідної частоти ПЧ.

Контроль напруги в ланці постійного струму. Призначена для захисту ланки постійного струму (випрямляючих діодів, конденсаторів, IGBT транзисторів) від низьких та високої напруги.

Параметри налаштування

[\\Налаштування\Парам. ПЧ\Захист ПЧ\](#)

Макс. напруга %

Мін. напруга %

Контроль температури радіатора забезпечує захист по температурі радіатора, а також, керує вентиляторами охолодження радіатора. Здійснює захист ПЧ при тривалому навантаження.

[\\Налаштування\Парам. ПЧ\Захист ПЧ\](#)

Макс.Темпер.Рад.(°C)

Мін.Темпер.Рад.(°C)

Темп.вкл.вентил. (°C)

Гіс.т вкл. Вент. (°C)

Контроль напруги власних потреб забезпечує захист слабострумних

ланцюгів керування для запобігання безконтрольній роботі ПЧ.

[\\Налаштування\Парам. ПЧ\Захист ПЧ\](#)

Напруга вкл. (В)

Захист може вимикатися із загального списку за необхідністю:

[\\Налаштування\Парам. ПЧ](#)

Вибір захисту

9. **Блок «Blocking»** - забезпечує блокування і розблокування роботи силових ключів, випрямляючого моста і зарядного ланцюга у випадку спрацювання захистів, блокування або зупинки роботи і переводить систему в нульовий стан.

10. **Блок «Вибір струму»** дозволяє обирати вид струму (активний чи повний) для зворотного зв'язку при струмообмеженні в блоці «RAMP».

Струмообмеження по активному струму застосовується для підтримання постійного моменту на валу двигуна, як правило це застосовується на намоточних пристроях з підтримкою постійної сили натягу.

По повному струму застосовується для розгону механізмів з великим динамічним моментом або непостійним ускладненим пуском (застигання змащення, навантаження на виконавчому механізмі). При цьому час розгону автоматично продовжується.

УВАГА! У випадку заклинювання двигуна і роботи струмообмежувача можливе перегрівання двигуна та/або ПЧ. Для запобігання виходу із ладу обладнання необхідно переконатися в правильності налаштування параметра [\\Налаштування\Парам. Двигуна\Двигун\Номинальний струм\](#) та часо-струмового захисту [\\Налаштування\Парам. Двигуна\Захист\Струм перевантаження\](#)

Параметри налаштування:

[\\Налаштування\Парам.Двигуна\Розгін-Зупинка\Струмообмеження\](#)

Джерело струму

11.Блок «RAMP» - виконує функцію задатчика інтенсивності розгону-гальмування електродвигуна за заданий час. Також розгон-гальмування може виконуватися по заданій кривій.

Параметри налаштування

[\\Налаштування\Парам.Двигуна\Розгін-Зупинка\](#)

Час розгону (с)

Тип розг.Кривої

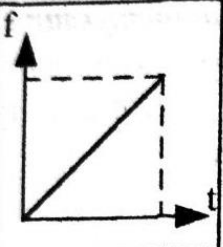
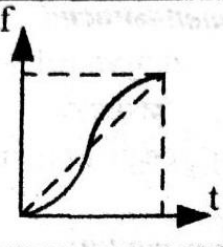
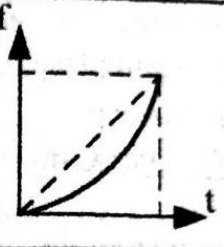
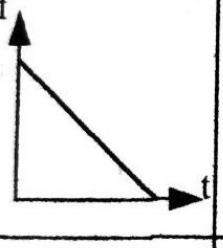
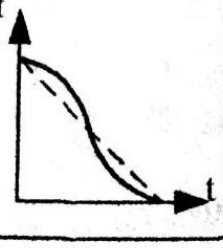
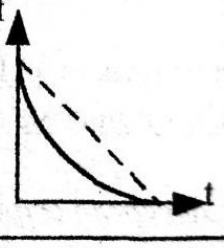
Ст. кривизни розг.(%)

Час зупинки (с)

Тип зуп.кривої

Ст. кривизни зуп. (%)

Розгон може виконуватися з заданої частоти. У випадку завдання швидкості обертання двигуна нижче мінімальної частоти, застосовується або нульова, або мінімальна частота, в залежності від налаштування.

	U або S подібна	S подібна	U подібна
	$K=0\%$	$-100\% < K < 100\%$	$100\% < K < 100\%$
Тип кривої розгону			
Тип кривої гальмування			
		Застосовується в електроприводах конвеєрів, транспортерів, ліфтів, для запобігання перевантажень	Такий тип характеристики застосовується для запобігання розриву при натязі, наприклад, в намотувальному обладнанні

Криві розгону та гальмування електроприводу

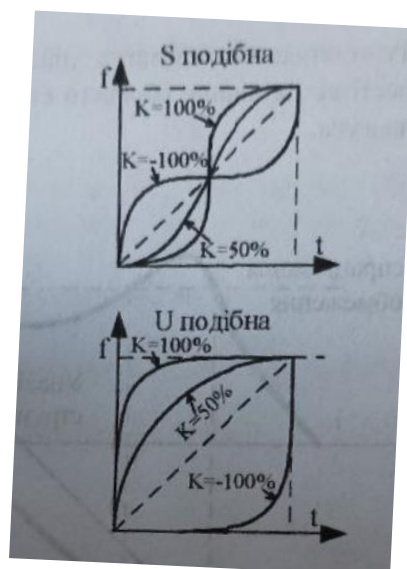


Рис. 26 – Показники кривизни розгону/гальмування

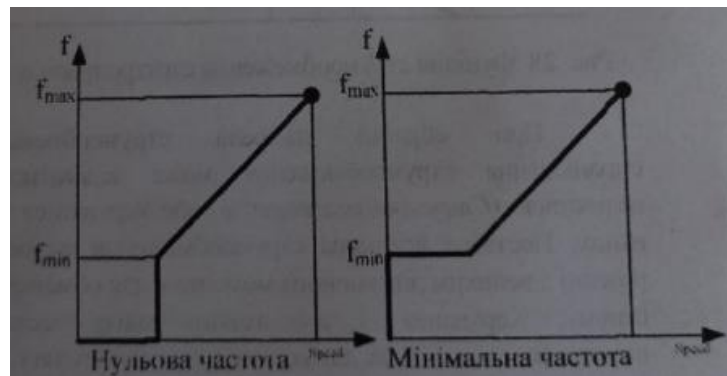


Рис. 27 – Нульова та мінімальна частота

Параметри налаштування:

\\Налаштування\ Перетворювач\Параметри ПЧ\

Мін. частота (Hz)

Умови пуску

Розгін/гальмування може здійснюватися функцією струму в залежності від величини обраного струму (10. «Вибір струму») електродвигуна:

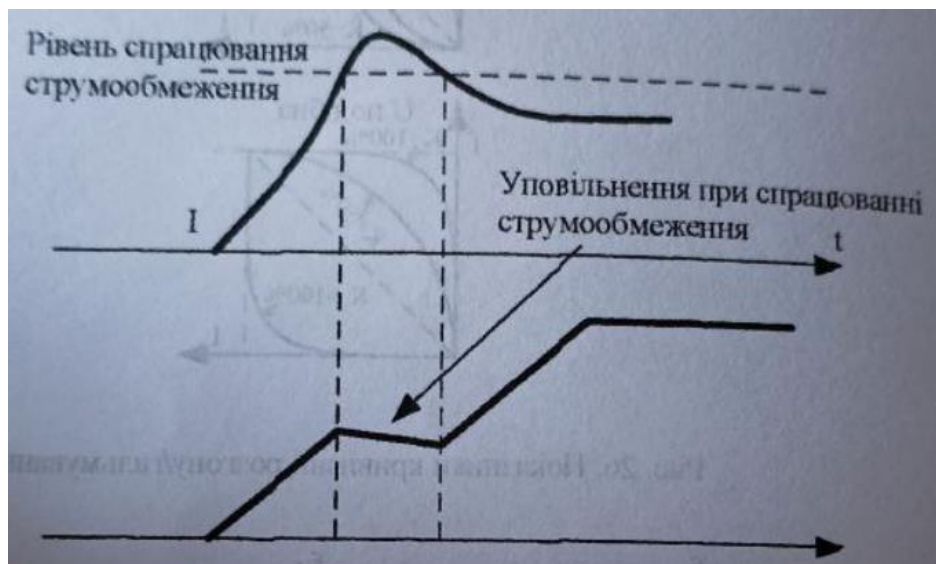


Рис. 28 – Функція струмообмеження електроприводу при розгоні

При обранні джерела струмообмеження рівень спрацювання струмообмеження може задаватися постійною величиною (*Струмообмеження(%)*) або керуватися з аналогового входу. Постійна величина струмообмеження застосовується при розгоні з великим динамічним моментом для обмеження пускового струму. Керування з аналогового входу застосовується в намоточних механізмах для регулювання сили натягу.

Параметри налаштування:

\\Налаштування\Парам.двигуна\РозгінЗупинка\Струмо-обмеження\

Джерело струмообмеження

Струмообмеження(%)

Рампа струмообмеження(s)

Також при гальмуванні здійснюється перевірка величини напруги в ланці постійного струму та порівняння його із:

Параметри налаштування:

\\Налаштування\Парам. двигуна\Парам. гальмування\

Напруга гальмування + Гістерезис гальмування +10V

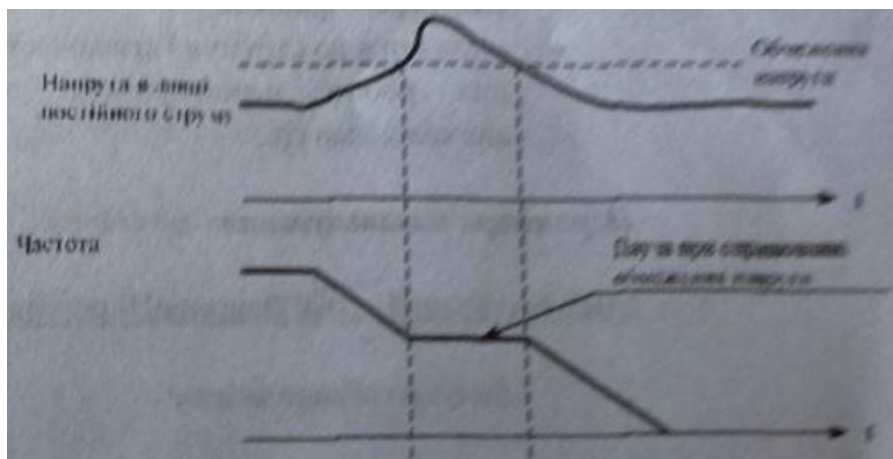


Рис.29 – Функція струмообмеження електроприводу при гальмуванні

При перевищенні виконується пауза при гальмуванні. Це застосовується в тому випадку, коли відсутній гальмівний резистор і можливий пуск на двигун що обертається, після команди «Стоп» з самовибігом. Дана функція дозволяє знижувати частоту разом реальними обертами двигуна і у випадку команди «Пуск» розгін виконується з поточної частоти, а не з нульової. При цьому відбувається підхоплення обертаючого двигуна і не відбувається різке гальмування з можливим стрибком струму.

12. Блок «Вибір зворотного зв'язку ПІ регулятора».

Функція, що обирається ПІ регулятором, визначається налаштуванням цього блоку. Цей блок підключає до входу зворотного зв'язку регулятора

відповідний сигнал:

- «Швидкість з ПДФу». Регулятор контуру швидкості – при роботі перетворювача із зворотним зв'язком від цифрового датчика швидкості (ПДФ або інкрементальний датчик).
- «Аналоговий вхід 1,2». Регулятор технологічного параметра – при підключенні сигналу зворотного зв'язку від технологічного датчика на аналоговий вхід перетворювача.
- «Ковзання по струму». Низькочастотного фільтру – при роботі перетворювача з компенсацією ковзання двигуна.

Параметри налаштування:

\\Налаштування\Парам. двигуна\ПІ регулятор\

Джерело обриву зв'язку

13. Блок «Розрахунок ковзання» виконує непрямий розрахунок ковзання двигуна на основі паспортних даних і поточного навантаження на валу. Поточне ковзання заводиться в зворотній зв'язок «**ПІ регулятора**» для її компенсації. Після компенсації на валу двигуна підтримуються стабільні обороти, близькі до синхронних, незалежно від навантаження. Для усунення «повзучої» швидкості, на малих обертах або в зупиненому стані, компенсація ковзання відключається при заданні швидкості нижче 2% від максимальної. Частота ковзання обчислюється по наступній формулі:

$$f_s = \frac{\left(f_b - \frac{\omega_N \cdot p}{60}\right) \cdot I_q}{I_N \cdot \cos \varphi}$$

f_b – базова частота (паспортні дані);

ω_N – номінальні оберти (паспортні дані);

p – кількість пар полюсів (паспортні дані);

I_N – номінальний струм двигуна (паспортні дані);

$\cos \varphi$ – номінальний коефіцієнт потужності (паспортні дані);

I_q – миттєвий активний струм двигуна.

Параметри налаштування:

\\Налаштування\Параметри ПЧ\Перетворювач\

Базова частота (Hz)

\\Налаштування\\Парам. двигуна\\ПІ регулятор\\

Кількість пар полюсів

Номінальний струм двигуна(A)

Номінальні оберти(rpt)

Номінальний $\cos\varphi$

14. Блок «ПІ регулятор»

Цей блок являється класичним пропорційно-інтегральним регулятором з обмеженням насичення. Він виконує одну з трьох функцій, яка задана в блоці **«Вибір зворотного зв'язку ПІ регулятора»**. Джерелом завдання (уставки) регулятора завжди слугує блок **«RAMP»**, який виконує функцію задатчика інтенсивності. Регулятор працює за наступним алгоритмом:

$\varepsilon = \text{завдання} - \text{зворотній зв'язок}$

$$\text{вихід} = \varepsilon \cdot k_P + k_I \cdot \int \varepsilon$$

ε – помилка

k_P – підсилення пропорційної частини

k_I – підсилення інтегральної частини

При роботі в якості регулятора швидкості або технологічного регулятора необхідні налаштування коефіцієнтів k_I і k_P залежать від параметрів всього контуру регулювання, включаючи об'єкт керування і датчик. Тому однозначних рекомендацій для вибору параметрів налаштування дати не можна. Як правило, починають налаштування контуру при $k_I = 0$. Поступово підвищуючи k_P , домагаються прийнятної якості перехідного процесу при значних змінах завдання. Далі, збільшуючи k_I , домагаються нульової помилки в сталому режимі, тобто після закінчення перехідного процесу, завдання повинне бути рівним сигналу зворотного зв'язку. При виникненні автоколивань в системі, необхідно зменшувати коефіцієнти. Необхідно відзначити, що регулятор є цифровим і тому в рідкісних випадках можливі паразитні ефекти, викликані дискретизацією сигналу за рівнем. Ці ефекти можуть проявлятися у вигляді непереборної помилки в сталому режимі (незначною) або у вигляді виникнення коливань з високою частотою. Наладку регулятора зручно проводити, використовуючи дані, записані на модуль

пам'яті ММС.

ВАЖЛИВО! При роботі перетворювача з компенсацією ковзання коефіцієнт k_P **ПОВИНЕН** бути встановлений в 0 (нуль). В іншому випадку, почнуться різкі коливання швидкості від мінімального до максимального значення і спрацює струмовий захист. При роботі з компенсацією ковзання, ПІ регулятор фактично являє собою фільтр низької частоти. Частота зрізу фільтра залежить від коефіцієнта k_I . Чим вище значення k_I , тим вище частота зрізу і менше постійна часу фільтра. Оскільки робота в режимі компенсації ковзання залежить від параметрів двигуна, необхідне підлаштування коефіцієнта k_I для отримання необхідних характеристик приводу. При повільній реакції перетворювача на зміну навантаження двигуна, необхідно збільшити k_I . При нестійкій роботі і виникненні коливань швидкості або струму необхідно зменшити значення k_I .

Якщо потрібна робота перетворювача в режимі прямого скалярного керування (без зворотних зв'язків і без компенсації ковзання), то необхідні наступні налаштування:

1) \\Налаштування\Парам. Двигуна\ПІ регулятор\ Джерело обриву зв'язку\ = «Ковзання по струму»

2) \\Налаштування\Парам. Двигуна\Двигун\Ном. оберти\ = синхронні обороти двигуна

3) \\Налаштування\Парам. Двигуна\ПІ регулятор\ Коефіцієнт k_P \ = 0

4) \\Налаштування\Парам.Двигуна\ПІ регулятор\ Коефіцієнт k_I \ = 32000, зменшуючи це значення, можна уповільнити (згладити) реакцію перетворювача на зміну завдання, наприклад, при переході від гальмування до розгону.

ВАЖЛИВО! При установці обох коефіцієнтів (k_I і k_P) в 0 перетворювач не реагує на зміни завдання від будь-якого джерела. Вихідна частота в цьому випадку дорівнює 0.

Параметри налаштування:

\\Налаштування\Парам. Двигуна\ПІ регулятор\

Коефіцієнт k_P

Коефіцієнт k_I

15. Блок «Charge Control» забезпечує заряд ємностей ланки постійного струму перед виходом в стан готовності.

Параметри налаштування:

\\Налаштування\Параметри ПЧ\Заряд ємностей\

Час зарядження (s)

Мін. напр. зарядження(%)

УВАГА! Дані параметри налаштовуються заводом-виробником і некоректне налаштування може призвести до виходу з ладу ПЧ.

16. Блок «**Phasion**» дозволяє змінити фазування під'єданого двигуна за допомогою програмних засобів без фізичного перекидання фаз.

Параметри налаштування:

\\Налаштування\Входу Виходу\Швидкість\

Фазування

17. Блок «**Rotation**» забезпечує обертання вектора напруги з заданою швидкістю та напрямком.

18. Блок « **Sine Cosine** » вираховує синус і косинус кута вектора напруги для подальшого використання

19. Блок «**subField** » виконує ослаблення поля на частотах вище базової частоти f_b .

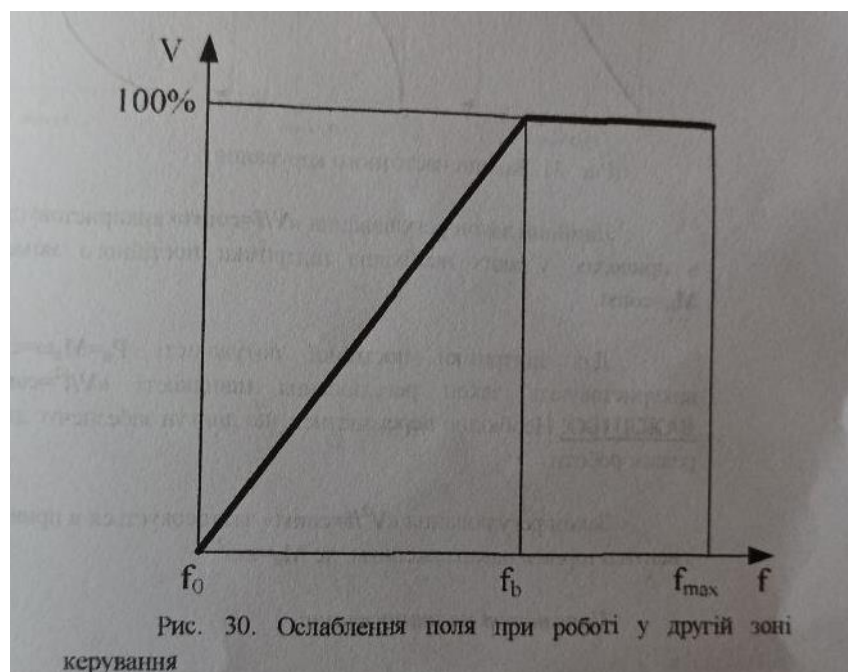


Рис. 30. Ослаблення поля при роботі у другій зоні керування

Рис.30 Ослаблення поля при роботі у другій зоні керування

Параметри налаштування:

\\Налаштування\Параметри ПЧ\Перетворювач\

Макс. частота (Hz)

Базова частота (Hz)

20. Блоком «V/F Controller Block» здійснюється вибір закону регулювання зміни швидкості електродвигуна , в залежності від моменту навантаження і визначається із умов збереження перевантажувальної здатності:

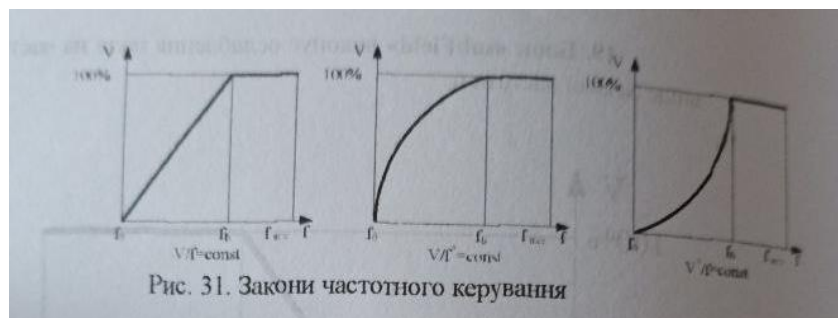


Рис. 31. Закони частотного керування

Рис . 31. Закони частотного керування

Лінійний закон регулювання « $V/f = \text{const}$ » використовується в приводах , у яких необхідна підтримка постійного моменту $M = \text{const}$.

Для підтримки постійної потужності $P_n = M_n \omega = \text{const}$ використовують закон регулювання швидкості « $V/f^2 = \text{const}$ » **ВАЖЛИВО!** Необхідно переконатися , що двигун забезпечує режим роботи.

Закон регулювання « $V^2/f = \text{const}$ » застосовується в приводах з вентиляторним навантаженням , де $M_n = k\omega^2$.

Параметри налаштування :

\\Налаштування\Параметри ПЧ\Напруга\Частота\

Закон керування

21. Блок « Boost » виконує функцію додаткового підмагнічування для стабільної роботи двигунів на низьких частотах і механізмів з ускладненим пуском :

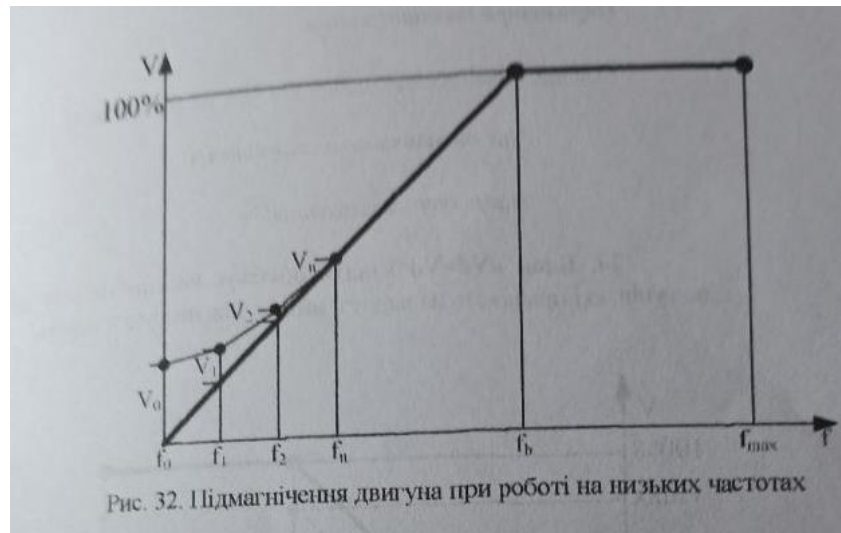


Рис . 32. Підмагнічення двигуна при роботі на низьких частотах

Параметри налаштування :

\\Налаштування\Параметри ПЧ\Напруга\частота\Підмагнічування

Кількість точок

Рід , підмагн . (Hz , %)

22. Блок «Stop subField» виконує функцію ослаблення поля для розмагнічування двигуна перед миттєвим ввімкненням динамічного гальмування для вилучення стрибку струму .

Параметри налаштування :

\\Налаштування\Парам. двигуна\ Парам. гальмування\

Час ослаблення поля (s)

23. Блок « Statik Brake » виконує динамічне гальмування двигуна постійним струмом .

Параметри налаштування :

\\Налаштували\ Парам. двигуна\Парам. гальмування\

Час динамічного гальмування (s)

Напр . дин , гальмування (%)

24. Блок « Vd = Vd*Vmax » обмежує вихідну напругу для двигунів , які працюють на напрузі нижче , ніж напруга в мережі .

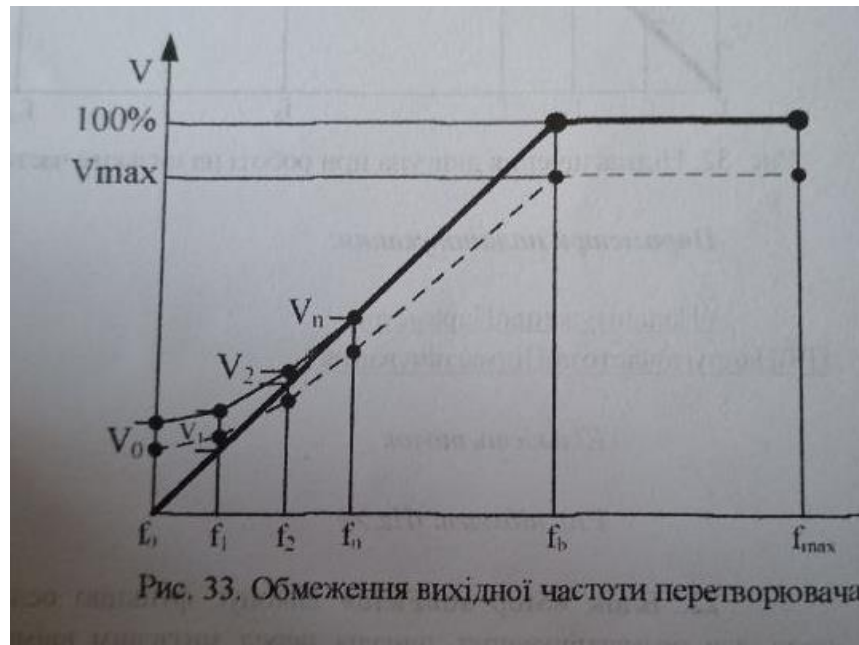


Рис . 33. Обмеження вихідної частоти перетворювача

Параметри налаштування :

\\Налаштування\Параметри ПЧ\Перетворювачі\

Макс . напр . виходу (%)

25. Блок « IR Compensation » виконує компенсацію падіння напруги в силовому кабелі та активному опорі статора двигуна, що забезпечує стабільне намагнічування двигуна. Це дозволяє підвищити обертальний момент на малих частотах і при динамічних навантаженнях . Для роботи даного блоку необхідно сумарний активний опір (Вимірювати між двома фазами підключення до ПЧ омметром мостовим або визначити автоматично (описано нижче « Діагностика »)) і постійну часу (вибирається залежно від динамічного моменту фільтра системи).

Для відключення компенсації необхідно опір виставити в нуль.

ВАЖЛИВО! У разі неправильного встановлення часу фільтру можливе виникнення коливань струму .

ВАЖЛИВО! При завищеному значенні опору можлива перекомпенсація з великим струмом .

Параметри налаштування :

\\Налаштування\Парам. Двигуна\Двигун\

Опір статора (Ohm)

\\Налаштування\Парам. Двигуна\IR компенсація\

Фільтр IR компенсації (s)

26. Блок « Diagnostic » визначає активний опір в силовому кабелі і статора двигуна. Визначення відбувається шляхом подачі на двигун постійного напруження і наступним виміром струму . Напруга піднімається доти поки струм не досягне половини номіналу струму двигуна . Заздалегідь переконайтеся В правильності завдання параметра Налаштування\Парам. Двигуна\Двигун\Номінальний струм\. Вимірювання відбувається в зупиненому стані .

27. Блок « Нуль - компаратора » забезпечує додаткові функції перетворювача , такі як відключення ШІМ при нульовій напрузі, для енергозбереження і продовження ресурсу перетворювача.

28. Блок «INVERSE PARK» виконує перетворення із активної і реактивної складової до координат сумарного вектора напруги з урахуванням вектора напруги 0 .

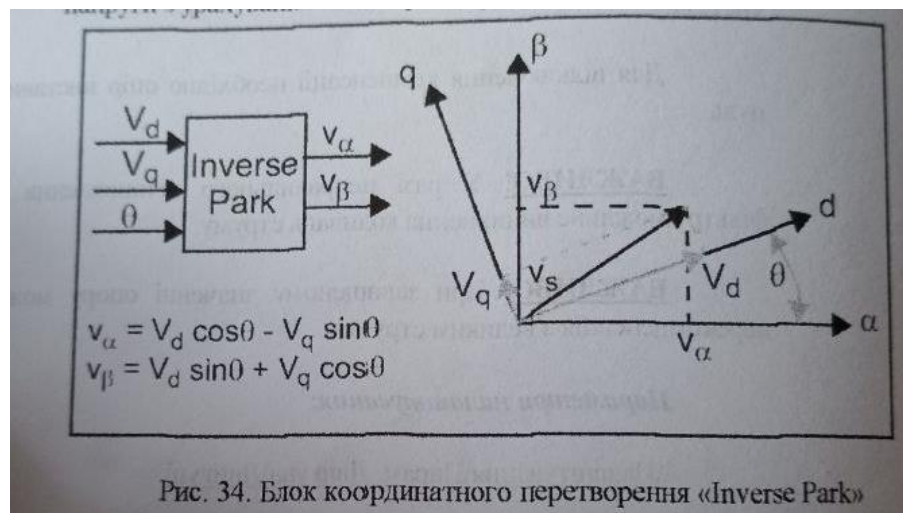


Рис . 34. Блок координатного перетворення «Inverse Park»

29. Блок «DC - bus compensation » забезпечує корекцію вихідної напруги ПЧ в залежності від напруги в ланці постійного струму . Призначений для стабілізації вихідної напруги .

Параметри налаштування :

\\Налаштування\Параметри ПЧ\Перетворювач\

Номінальна напруга (V)

30. Блок «SVPWM» реалізує інверсне перетворення «Clarke» і здійснює неперервну векторну модуляцію. Для повного використання інвертора по напрузі вводиться третя гармоніка, струм при цьому залишається синусоїдальним. Результат розрахунків формується з урахуванням подальшого виводу на ШІМ

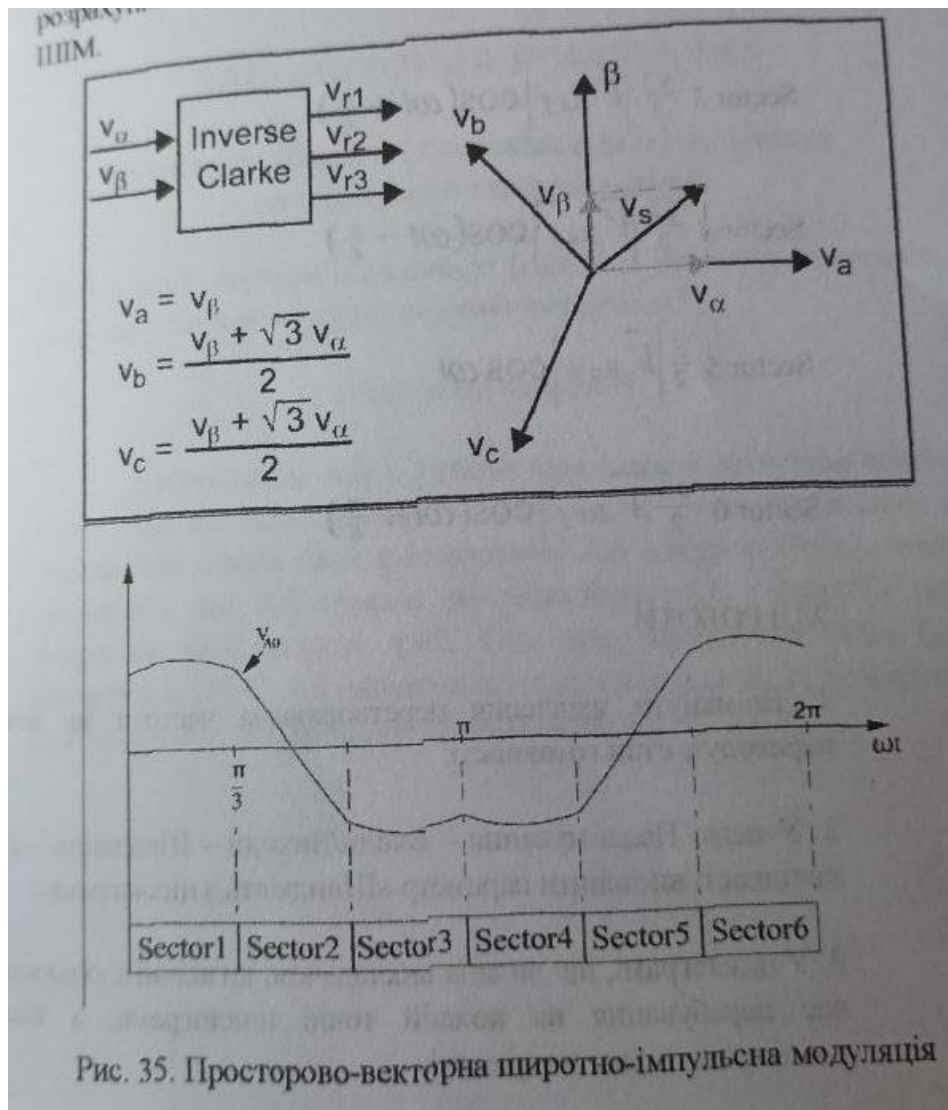


Рис . 35. Просторово - векторна широтно - імпульсна модуляція

$$\text{Sector 1} \quad \frac{\sqrt{3}}{2} |\overrightarrow{V_{Ref}}| \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)$$

$$\text{Sector 2} \quad \frac{3}{2} |\overrightarrow{V_{Ref}}| \cos(\omega t)$$

$$\text{Sector 3} \quad \frac{\sqrt{3}}{2} |\overrightarrow{V_{Ref}}| \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$\text{Sector 4 } \frac{\sqrt{3}}{2} |\overrightarrow{V_{Ref}}| \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)$$

$$\text{Sector 5 } \frac{3}{2} |\overrightarrow{V_{Ref}}| \cos(\omega t)$$

$$\text{Sector 6 } \frac{\sqrt{3}}{2} |\overrightarrow{V_{Ref}}| \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

ХІД РОБОТИ

Частина 1.

1.1 Теоретична частина : вивчити призначення блоків системи керування ПЧ « Вектор».

1.2 Практична частина

1.2.1 Ввімкнути живлення перетворювача частоти та дочекатися переходу у стан готовності .

1.2.2 У меню Налаштування - Входи / Виходи - Швидкість - Джерело швидкості виставити параметр « Швидкість з циклограми » .

1.2.3 У циклограмі , що видана викладачем , визначити кількість точок, час перебування на кожній точці циклограми, а також час розгону / гальмування (рампу).

1.2.4 Підготувати картку SD до роботи у перетворювачі частоти, виконавши форматування у середовищі «Візір».

1.2.5 Записати осцилограми фазних струмів , напруги ланки постійного струму , активного та реактивного струму двигуна , сигналу тахогенератора на картку SD , переглянути та проаналізувати отримані графіки у середовищі « Візір » .

Додаток1 (до частини 1). Порядок роботи на стенді ПЧ «Вектор» (з використанням карти зчитування і системи «Візір»):

1.1. Включити комп'ютер стенда.

1.2. Переконатися , що 3-х полюсний автоматичний вимикач живлення перетворювача вимкнений.

1.3. Відкрити ключем дверці шафи перетворювача та виставити спеціально підготовлену карту SD в роз'єм в верхній частині процесорної плати.

1.4. Закрити дверці на ключ.

1.5. Увімкнути 3-х полюсний автоматичний вимикач живлення перетворювача. На перетворювачі вмикається індикатор пульта і починає

мигати червоний сигнал «АВАРІЯ». Відбувається процес заряду ланки постійного струму в перетворювачі. Це займає близько 15 секунд. Після успішного закінчення заряджання червоний сигнал «АВАРІЯ» тухне і вмикається мигаючий зелений сигнал «РОБОТА». Перетворювач готовий до запуску.

1.6. Натиснути кнопку «ПУСК». Перетворювач почне працювати по запрограмованій циклограмі. Зелений сигнал «РОБОТА» увімкнений постійно.

1.7. Після декількох циклів роботи натиснути кнопку «СТОП». Після зупинки двигуна починає мигати зелений сигнал «РОБОТА».

1.8. Вимкнути автоматичний вимикач живлення.

1.9. Відкрити дверці шафи та вийняти карту SD з роз'єму. Для цього злегка натиснути на неї для спрацювання защіпки. Після цього карту можна вийняти.

УВАГА! Після вимкнення живлення, протягом 10 хвилин, на силових елементах зберігається небезпечна для життя напруга. При вийманні карти не торкайтеся клем перетворювача та дотримуйтесь правил безпеки!

1.10. Встановіть карту в зчитувач, підключений до комп'ютера.

1.11. Запустіть програму VisirV.

1.12. В меню програми обрати – «Файл/Імпортувати останню сесію з останнього RGD файлу». В діалозі вибору імені файлу натиснути «ОК».

1.13. В основному вікні програми дослідити записані дані і зробити необхідні виміри.

ПРИМІТКА. Канал «Аналог.вхід1» відповідає тахогенератору і відображає реальну швидкість двигуна.

Частина 2 . Зняття і побудова статичних характеристик приводу.

2.1 Включити комп'ютер стенду.

2.2 Запустити ярлик « Стенд ». Відкривається програма на вкладці «Монітор».

2.3. Увімкнути 3-х полюсний автоматичний вимикач живлення перетворювача. На перетворювачі вмикається індикатор пульта і починає мигати червоний сигнал «АВАРІЯ». Відбувається процес заряду ланки постійного струму в перетворювачі. Це займає близько 15 секунд. Після успішного закінчення заряджання червоний сигнал «АВАРІЯ» тухне і вмикається мигаючий зелений сигнал «РОБОТА». Перетворювач готовий до запуску.

2.4. Упевнитися, що в таблиці монітора присутні декілька рядків з назвами параметрів, а в рядку стану присутня напис «Підключений як 4:100 до 0:4». Натиснути комбінація Ctrl+М «латин.» Програма починає зчитування параметрів.

2.5. Натиснути кнопку «ПУСК». Перетворювач почне працювати по запрограмованій циклограмі. Зелений сигнал «РОБОТА» увімкнений постійно.

2.6. Після декількох циклів роботи натиснути кнопку «СТОП». Після зупинки двигуна починає мигати зелений сигнал «РОБОТА».

2.7. Вимкнути автоматичний вимикач живлення.

УВАГА! Після вимкнення живлення, протягом 20 хвилин, на силових елементах зберігається небезпечна для життя напруга.

2.8. Зупинити запис монітору комбінацією клавіш Ctrl+M.

2.9. В вікні графіків дослідити записані дані і зробити необхідні виміри.

ПРИМІТКА. Канал «Аналог.вхід1» відповідає тахогенератору і відображає реальну швидкість двигуна.

2.10. Виставити фіксовані значення-діапазон регульованої швидкості (2-3 точки, задається викладачем) і за допомогою механічного тормоза експериментально зняти характеристики: швидкісні $\omega = f(I_c)$ та навантажувальні $U = f(I_c)$.

2.11. Розрахувати і побудувати в вище вказаному діапазоні механічні характеристики.

2.12. Визначити статизм системи.

2.13. Зробити загальні висновки щодо поліпшення статичної похибки.

Список рекомендованої літератури

1. Системи керування електроприводами: Підручник / Ю.Г.Осадчук, І.І. Пересунько, Г.І. Ткаченко, В.О. Федотов, Д.О.Кальмус; за ред. д.т.н., проф. О.М. Сінчука – Варшава: iScience Sp. z.o.o. – 2024 – 162 с.

2. Електротехнічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; за ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. – К.: Лебідь, - 2005. – 680 с.

3. Грабко В. В. Системи керування електроприводами. Розрахунок системи підпорядкованого керування електроприводом постійного струму. Курсове та дипломне проектування: навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, В. В. Грабко. - Вінниця: ВНТУ, 2010. - 89 с.

4. Файнштейн В.Г., Воробейчик О.С., Цифрові системи управління електроприводів: Монографія / Під ред. Учителя А.Д.. – Кривий Ріг.: Вид-во ГВУЗ «КНУ», 2014. - 159с.

5. Перельмутер В.М. Цифрові системи управління тиристорним ЕП. –К.: «Техніка», 1983.

Додаткова література

1. Регульований електропривод: Підручник / За ред. І.М. Голодного. - К.: Аграр Медіа Груп, 2011. - 513с.

2. Електропривод: Підручник / За ред.. Ю.М.Лавріненка. - К.: Ліра-К, 2009.- 504 с.

3. Системи керування електроприводами: Навч. посібник /А.П. Голуб та ін./ -К.:ПМКВО, 1992р.-353с.

Лабораторна робота №18

Дослідження оптимізованої по симетричному критерію двоконтурної системи підлеглого керування електроприводом постійного струму (ПС) типу ЕТУ-3601

Мета роботи: Дослідження статичних і динамічних режимів роботи двоконтурної СУЕП ПС оптимізованої по симетричному критерію.

Основні положення

Для оптимізації окремих контурів системи підлеглого регулювання переважно застосовуються два критерія – модульний (МО) та симетричний (СО), доведення яких базується на використанні частотного критерія оптимальності. Сутність цього критерію в тому, що якість процесів регулювання в оптимізованому контурі з одиничним зворотнім зв'язком (ЗЗ) і керуючим впливом типу одиничного скачку буде оптимальною, якщо амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) замкнутого контуру $\Phi(\omega)$ на досить великому проміжку частот ω , починаючи з нуля, дорівнює одиниці.[1]

$$\Phi(\omega) = \left| \Phi(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} \right|_{p=j \cdot \omega} = \begin{cases} 1, & 0 \leq W \leq W_{\text{ср.з}} \\ 0, & W > W_{\text{ср.з}} \end{cases}$$

Для двоконтурних систем підлеглого керування з об'єктом типу ТП-Д передавальну функцію об'єкту $W_o(p)$ можна виразити як:

$$W_o(p) = \frac{K_o}{T_M \cdot p \cdot (1 + T_\mu \cdot p)};$$

де T_M – не компенсуюча постійна;

K_o – коефіцієнт підсилення розімкнутого контуру.

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{1 + \tau_R \cdot p}{\tau_o \cdot p};$$

де $\tau_R = 4 \cdot T_\mu$; $\tau_o = \frac{8 \cdot T_\mu^2 \cdot K_o}{T_M}$.

Передавальні функції оптимізованого по симетричному критерію контуру по керуючому впливу (ОЗ одиничний):

- розімкнутий контур

$$W_{\text{роз}}(p) = W_{\text{рс}}(p) \cdot W_o(p) = \frac{1 + 4 \cdot T_\mu \cdot p}{8 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2 \cdot (1 + T_\mu \cdot p)} = \frac{K_a}{p^2} \cdot \frac{1 + 4 \cdot T_\mu \cdot p}{(1 + T_\mu \cdot p)};$$

де $K_a = \frac{1}{8 \cdot T_\mu^2}$ – коефіцієнт посилення контуру по прискоренню, с^{-2} ;

- замкнутий контур

$$W_z(p) = \frac{W_{\text{рс}}(p) \cdot W_o(p)}{1 + W_{\text{рс}}(p) \cdot W_o(p)} = \frac{1 + 4 \cdot T_\mu \cdot p}{8 \cdot T_\mu^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_\mu \cdot p + 1};$$

Динамічні особливості контуру регулювання, оптимізованого по СО. Запас стійкості.

ЛАЧХ розімкнутого контуру:

$$L(\omega) = 20 \cdot \log K_a - 20 \cdot \log \omega^2 + 20 \cdot \log \sqrt{1 + 16 \cdot T_\mu^2 \cdot \omega^2} + 20 \cdot \log \sqrt{1 + T_\mu^2 \cdot \omega^2}.$$

ФЧХ:

$$\Phi(\omega) = -\pi + \arctg(4 \cdot T_\mu \cdot \omega) - \arctg(T_\mu \cdot \omega).$$

ЛАЧХ і ФЧХ контура оптимізованого по симетричному критерію

представлена на рис.1.

Характеристики $L(\omega)$ і $\Phi(\omega)$ симетричні відносно частоти зрізу $W_{зр} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu}}$.
Частоти сполучення $W_{з1} = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu}}$ та $W_{з2} = \frac{1}{T_{\mu}}$. Завдяки цій особливості такий спосіб настройки контурів отримав назву «симетричний оптимум».

Запаси стійкості:

- по амплітуді $A_{зап} = \infty$;
- по фазі $\Phi_{зап} = 180^{\circ} - A(W_{зр}) = 180^{\circ} - 180^{\circ} + \arctg(4 \cdot T_{\mu} \cdot W_{зр}) - \arctg(T_{\mu} \cdot W_{зр}) = \arctg(2) - \arctg(0.5) = 37^{\circ}$

Нормована перехідна функція налаштованого на СО контура:

$$h\left(\frac{t}{T}\right) = 1 + e^{-\frac{t}{2 \cdot T_{\mu}}} - 2 \cdot e^{-\frac{t}{4 \cdot T_{\mu}}} \cdot \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{4 \cdot T_{\mu}} \cdot t\right).$$

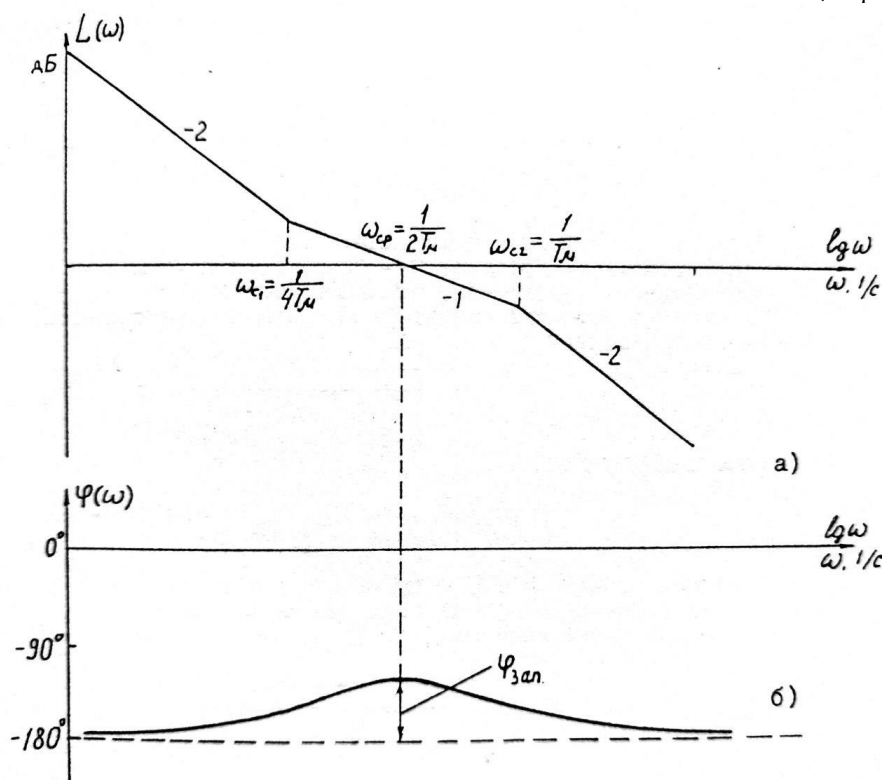


Рис.1.

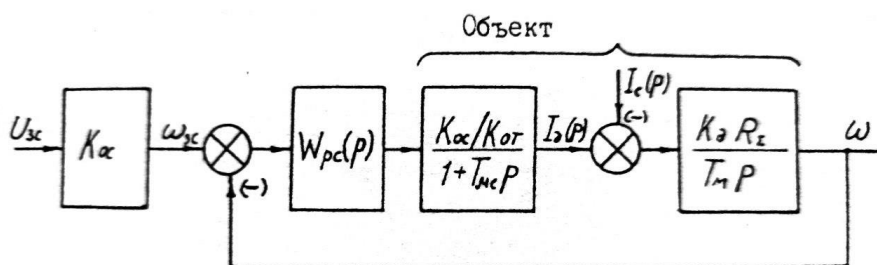


Рис.2.

Показники ПП: $\delta = 43.4\%$ і $tp = 16.5 \cdot T_{\mu}$.

Збільшене перерегулювання обумовлене форсуючою ланкою $(1 + 4 \cdot T_{\mu})$

ПФ замкнутого контуру.

Доступні способи зниження перерегулювання:

а) використання згладжуючого пасивного РС фільтра з ПФ:

$$W_p(p) = \frac{1}{1+4 \cdot T_\mu};$$

ПФ замкнутого контуру:

$$W_e(p) = \frac{1}{8 \cdot T_\mu^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_\mu \cdot p + 1}.$$

Передаточна функція:

$$h\left(\frac{t}{T}\right) = 1 - e^{-\frac{t}{2 \cdot T_\mu}} - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot e^{-\frac{t}{2 \cdot T_\mu}} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{4 \cdot T_\mu} \cdot t\right).$$

Показники ПП: $\delta = 8.1\%$ і $tp = 13.3 \cdot T_\mu$.

Запас стійкості $A_{\text{зап}} = 9$ дБ, $\Phi_{\text{зап}} = 60^\circ$.

б) паралельне з'єднання аперіодичних згладжуючих ланок, що вмикаються на вхід контура[1]. При відповідному виборі параметрів схеми:

$$W_e(p) = \frac{1}{2 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2 + 3 \cdot T_\mu \cdot p + 1}.$$

Перехідна функція:

$$h\left(\frac{t}{T}\right) = 1 + e^{-\frac{t}{T_\mu}} - 2 \cdot e^{-\frac{t}{2 \cdot T_\mu}}.$$

Показники ПП: $\delta = 0\%$ і $tp = 9.2 \cdot T_\mu$.

У випадку оптимізації по симетричному критерію контура швидкості (рис.2) бажана ПФ:

$$W_6(p) = \frac{1+4 \cdot T_\mu c \cdot p}{8 \cdot T_\mu c^2 \cdot p^2 \cdot (1+T_\mu c \cdot p)};$$

ПФ об'єкта:

$$W_o(p) = \frac{K_{\Sigma\Sigma} \cdot K_d \cdot R_\Sigma}{K_{OT} \cdot T_M} \cdot \frac{1}{p \cdot (1+T_\mu c \cdot p)};$$

ПФ регулятора швидкості:

$$W_{\text{рш}}^{\text{co}}(p) = \frac{W_6(p)}{W_o(p)} = K_{\text{рш}} \cdot \frac{1+T_\mu c \cdot p}{p};$$

Де $K_{\text{рш}} = \frac{K_{OT} \cdot T_M}{8 \cdot T_\mu c^2 \cdot K_{\Sigma\Sigma} \cdot K_d \cdot R_\Sigma}$ – коефіцієнт підсилення регулятора швидкості.

ПФ $W_{\text{рш}}^{\text{co}}(p)$ реалізується за допомогою «ПІ» регулятора.

Динамічні характеристики системи підлеглого регулювання з налаштуванням РШ(регулятора швидкості) на СО.

ПФ по керуючому і збурюючому впливах:

$$W_{\text{рш}}^{\text{кв}}(p) = \frac{W(p)}{U_{\Sigma c}(p)} = \frac{1}{K_{Oc}} \cdot \frac{1+4 \cdot T_\mu c \cdot p}{8 \cdot T_\mu^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_\mu \cdot p + 1}.$$

$$W_{\text{рш}}^{\text{зв}}(p) = \frac{W(p)}{I_c(p)} = \frac{1}{K_{Oc}} \cdot \frac{K_d \cdot R_\Sigma \cdot 8 \cdot T_\mu c^2 \cdot p \cdot (1+4 \cdot T_\mu c \cdot p)}{T_M \cdot (8 \cdot T_\mu^3 \cdot p^3 + 8 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2 + 4 \cdot T_\mu \cdot p + 1)}.$$

ПП, які відповідають наведеним ПФ, описуються наступними аналітичними виразами:

$$W(t) = \frac{U_{3c}}{K_{oc}} \cdot \left(1 - \frac{a-1}{a-3} \cdot e^{-\frac{t}{a \cdot T_{\mu}}} + \frac{2}{a-3} \cdot e^{-\frac{(a-1) \cdot t}{2 \cdot a \cdot T_{\mu c}}} \cdot \cos \left(\frac{\sqrt{3+2 \cdot a - a^2}}{2 \cdot a} \cdot \frac{t}{T_{\mu c}} \right) \right);$$

$$I(t) = I_c \cdot \frac{K_d \cdot R_{\Sigma} \cdot a^3 \cdot T_{\mu c}}{T_M} \cdot \left(\frac{a \cdot (a-1)}{3-a} \cdot e^{-\frac{t}{a \cdot T_{\mu}}} + \frac{2}{3-a} \cdot e^{-\frac{(a-1) \cdot t}{2 \cdot a \cdot T_{\mu c}}} \cdot (1-a) \cdot \cos \left(\frac{\sqrt{3+2 \cdot a - a^2}}{2 \cdot a} \cdot \frac{t}{T_{\mu c}} \right) + \sqrt{3+2 \cdot a - a^2} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{3+2 \cdot a - a^2}}{2 \cdot a} \cdot \frac{t}{T_{\mu c}} \right) \right).$$

Система, що досліджується, є астатичною другого порядку по КВ і астатичною першого порядку по ЗВ. Відповідно статична похибка при накиданні навантаження $\Delta_{ст} = 0$.

Запас стійкості та показники ПП контуру швидкості аналогічні вищерозглянутим для загального випадку.

Експериментальне дослідження системи підлеглого керування налаштованої по симетричному критерію здійснюється на базі тиристорного агрегату «ЕТУ 3601».

Функціональна схема «ЕТУ- 3601» представлені на рис.3.

Нелінійна ланка (НЛ) забезпечує постійність коефіцієнта підсилення керуючого випрямляча в режимі безперервного та переривчастих струмів. Характеристика НЛ зворотна регулюючій характеристиці керуючого випрямляча в режимі переривчастого струму. Сигнал на виході РТ пропорційний тільки струму двигуна, що досягається подачею на НЛ з функціонального перетворювача (ФП) сигналу позитивного зворотного зв'язку по ЕРС двигуна, що забезпечує додаткове струмообмеження.

В системі регулювання передбачений також вузол залежного струмообмеження (ВСО), обмежуючий по модулю вхідне значення регулятора швидкості (РШ) в залежності від напруги тахогенератора.

Конструктивно електропривід «ЕТУ- 3601» складається з наступних частин:

1. Силова частина – блок, виконаний у вигляді реверсивного трифазного мостового тиристорного випрямляча. Якір електродвигуна підключається до

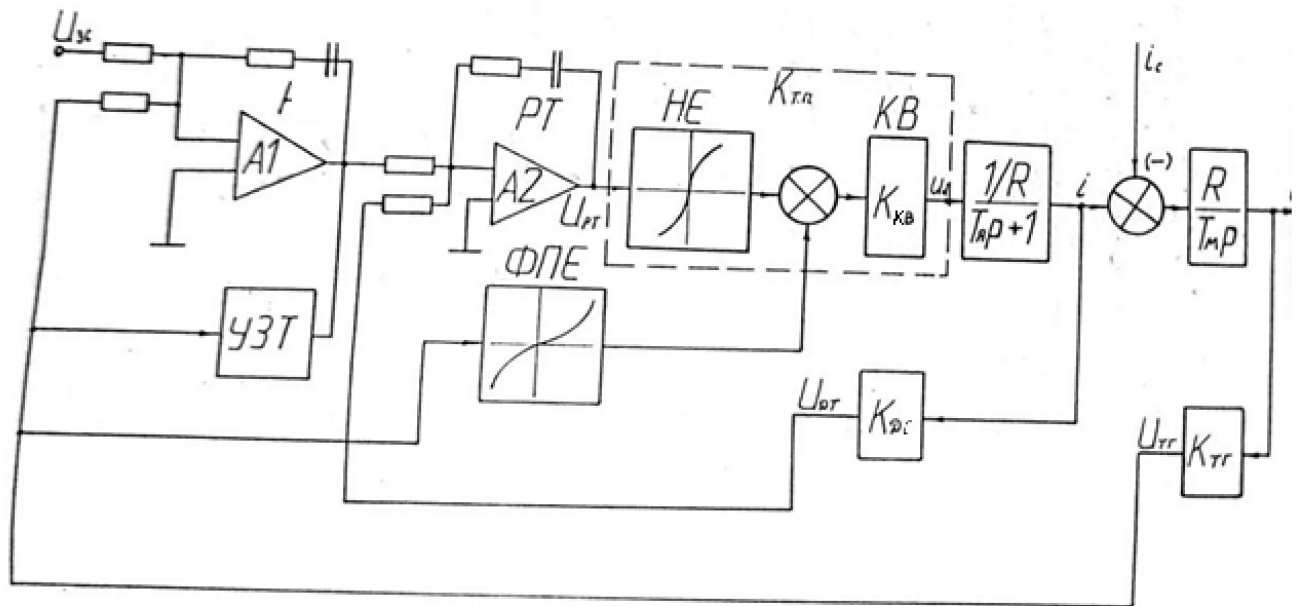


Рис.3.

затискачів постійного струму силових вентильних комплектів, що вмикаються зустрічно паралельно через згладжуючий дросель.

2. Схема керування – розміщується на двох знімних платах П1 та П2.

На платі П1 знаходяться:

1. Система імпульсно-фазового керування (СІФК);
2. «ПП» - регулятори швидкості і струму (РШ, РС);
3. Функціональний перетворювач ЕРС двигуна (ФПЕ).

Генерує сигнал пропорційний ЕРС U_e . U_e налаштовують так, щоб середнє значення $U_{pc} = 0$. При цьому сигнал U_{pc} стає пропорційним тільки струму двигуна. Таким чином здійснюється додаткове обмеження максимально можливого струму двигуна.

4. Блок живлення (БЖ);
5. Датчик струму (ДС);
6. Вузол захисту і сигналізації (ВЗС)

Забезпечує захист:

- a) Максимально-струмовий, працюючий при аварійних струмах;
- b) Від перегріву двигуна при перевантаженнях;
- c) Від зниження напруги живлячої мережі;
- d) Усунення «повзучої» швидкості при вимкненні задатчика частоти обертання

На платі П2 в залежності від модифікацій можуть знаходитися наступні вузли:

1. ППРШ – попередній підсилювач регулятора швидкості;
2. ВЗС – вузол залежного струмообмеження слугує для зміни вставки струмообмеження в залежності від частоти обертання двигуна;
3. ПЗ – пристрій зв'язку з числовим програмним керуванням;

4. ПЛ – логічний пристрій системи роздільного керування з перемикачем характеристик(ПХ) і датчиком провідності вентелей(ДПВ).

Опис лабораторної установки

Установка складається з наступних основних частин:

1. Електропривід комплектний тиристорний постійного струму типу «ЕТУ-3601», що складається з:
 - а) Блок перетворювача;
 - б) Система керування;
 - в) Узгоджуючий трансформатор типу «ТСТ-10»;
 - г) Дросель типу «ДСА 552».
2. Електродвигун постійного струму типу «2ПН 112» з вбудованим тахогенератором.
3. Панель керування, на якій розміщенні всі блоки керування і вимірюючі прилади (див. рис. 4.)

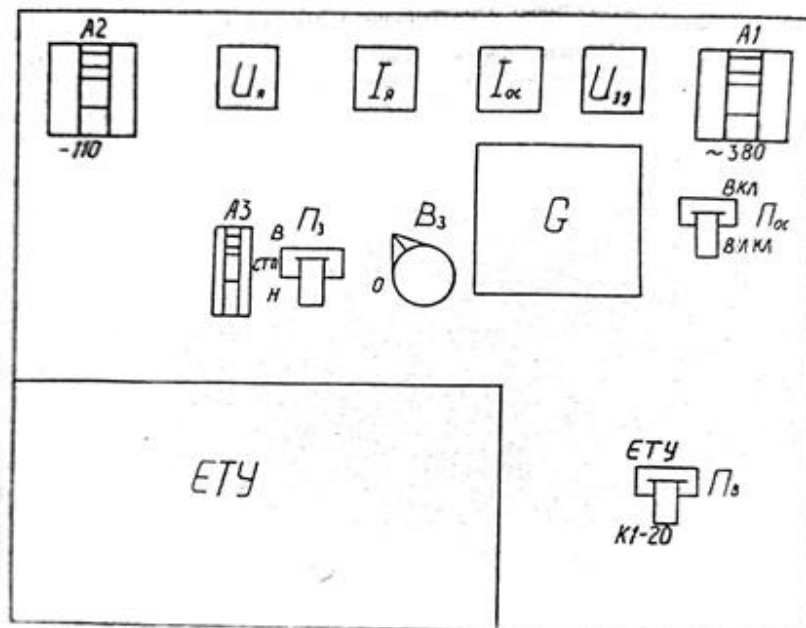


Рис. 4.

- A1 - автоматичні вимикач живлення всієї установки;
A2 - автоматичні вимикач живлення (110 В) якоря двигуна та обмотки збудження;
ПЗ - трипозиційний перемикач напрямку обертання двигуна;

V_z – потенціометр $U_{\text{зад}}$;

G - показчик швидкості обертання валу двигуна;

Поз – положення «вверх» - система замкнута; «вниз» - система розімкнута;

Пв – положення «вверх» - аналоговий ЗІ; «вниз» - цифровий ЗІ;

U_y – випрямлена напруга двигуна;

I_y – величина струму в ланцюзі якоря;

U_z – напруга завдання;

I_{oc} – величина струму в ланцюзі зворотного зв'язку;

Програма роботи

До програми роботи входить:

1. Зняття регулювальних характеристик приводу розімкнутої та замкнутої систем $W = f(U_z)$. Розрахувати коефіцієнт посилення приводу за регулювальною характеристикою.
2. Зняття швидкісних характеристик $W = f(I_y)$ в розімкнутій та замкнутій системах у всьому діапазоні зміни завдання $U_{z \text{ макс}} = 9 \text{ В}$; $U_{z \text{ мин}} = 1.5 \text{ В}$.
3. Зняти залежність U_d (1я) $U_d = f(I_y)$ при $U_{z \text{ макс}} = 9 \text{ В}$; $U_{z \text{ мин}} = 1.5 \text{ В}$ у розімкнутій та замкнутій системах.
4. За допомогою осцилографа зняти графіки перехідних процесів $W = f(t)$, $I = f(t)$ при зміні керуючого та збурюючого впливів.
5. Розрахувати параметри регуляторів при налаштування на СО системи підлеглого керування з об'єктом: двигун - 2ПН112, $K_{тп} = 11.5$, $T_{тп} = 1/2 \text{ мс}$. Схемно реалізувати регулятори на конкретних ОУ (тип задається викладачем).
6. Розрахувати ПП $W = f(t)$ аналітичним шляхом, порівняти з експериментальними характеристиками.
7. Оцінити статичні та динамічні показники системи.

Методичні вказівки і завдання для дослідження

Перед включенням лабораторної установки необхідно вивчити особливості її конструкції. Двигун потенціометра V_z встановити в крайнє ліве положення, перемикач Па в положення "стоп" (середнє положення).

Вмикаються послідовно автомати:

A1 на стенд подається 380 В;

A2- подається живлення в коло якоря та обмотки збудження;

A3: - у положення "вкл. (середнє положення).

Перевести Пз в положення "В" або "Н" і за допомогою потенціометра V_z встановити необхідну величину U_z .

Величина статичного навантаження на валу двигуна встановлюється за допомогою гальмівного важеля.

Усі необхідні значення параметрів фіксуються за допомогою встановлених на пульті приладів.

Реверсування приводу необхідно проводити тільки через нейтральне положення перемикача Пз після повної зупинки двигуна.

Динамічні характеристики знімаються шляхом підключення щупів осцилографа до відповідних пазів $I(t)$ та $W(t)$.

Параметри: двигун – 2ПН 112 – МУХЛ4, $P_n = 1.5$ кВт, $U_n = 110$ В, $I_n = 20.5$ А, $N_n = 1500$ об/хв; $N_{\text{макс}} = 4000$ об/хв, $\eta_n = 0.7$, $U_b = 110$ В, $I_b = 1.09$ А, дросель – ДСА-552, $L_{\text{др}} = 0.082$ мГн.

Зміст звіту

У звіті з лабораторної роботи слід навести:

1. Структурну схему експериментальної установки.
2. Дані про перетворювач, двигун та дросель.
3. Результати розрахунків та структурну схему системи підлеглого регулювання за п. 5 програми.
4. Таблиці результатів та графіки статичних характеристик систем (регулювальних та навантажувальних). Результати розрахунків коефіцієнтів посилення.
5. Графіки перехідних процесів $W = f(t)$ та $I = f(t)$.
6. Результати розрахунків $W = f(t)$ при зміні керуючого та збурюючого впливів.
7. Результати аналізу і оцінка показників якості регулювання системи, порівняння експериментальних та розрахункових характеристик. Висновки.

Контрольні питання

1. Розкрийте способи зменшення перерегулювання у дворазово-інтегруючих системах?
2. Оцініть стійкість та показники ПП системи, налаштованої на СО. при різних способах зменшення перерегулювання ?
3. За рахунок чого підвищується порядок астетицизму в системах підпорядкованого регулювання при налаштуванні РС на СО?
4. Наведіть графіки перехідних функцій контуру, оптимізованого за симетричним критерієм для випадків відсутності та присутності фільтра ?
5. Як здійснюється розрахунок параметрів РС і фільтра при налаштуванні на СО?

Список рекомендованої літератури

1. Системи керування електроприводами: Підручник / Ю.Г.Осадчук, І.І. Пересунько, Г.І. Ткаченко, В.О. Федотов, Д.О.Кальмус; за ред. д.т.н., проф. О.М. Сінчука – Варшава: iScience Sp. z.o.o. – 2024 – 162 с.
2. Електротехнічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; за ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. – К.: Лебідь, - 2005. – 680 с.
3. Теорія електропривода./ За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа. -1993. – 494с.

4. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Сайченко О.В., Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. - К.: Аграр Медіа Груп. 2019. - 206 с.
5. Видмиш А. А.. Ярошенко Л. В.. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина І. - Вінниця: ВНАУ, 2020. - 387 с.
6. Системи керування електроприводами: Навч. посібник /А.П. Голуб та ін./ -К.:ПМКВО, 1992р.-353с.
7. Голуб А. П. Системи керування електроприводами : навч. посібник / А. П. Голуб, Б. І. Кузнецов, І. О. Опришко, В. П. Соляник. - К.: НМК ВО, 1992. - 352 с.
8. Перельмутер В.М. Цифрові системи управління тиристорним ЕП. –К.: «Техніка», 1983.

Додаткова література

1. Лимонов Л.Г. Автоматизований електропривід промислових механізмів. – Х.: Вид-во «Форт», 2009. – 272с.
2. Основи електроприводу. Виробничих машин і комплексів. Навчальний посібник/ В.Е. Воскобойник , В.А. Борізай , Р.О. Борєва , О.Ю. Нестереня. – Д.: Національний ТУ «Дніпровська політехніка» , 2021.-254с.