

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія  
Кондратюка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інформаційно-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему

Розроблення системи діагностики електроприводних систем

Виконав: студент 3 курсу, групи 3-пМЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Шевченко О.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник Кислиця Є.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кожушко Г.М.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2024 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
робототехніки  
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Ступінь вищої освіти Бакалавр  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної,  
електроніки та телекомунікацій

О.В. Шефер

«01» квітня 2024 р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ

**Шевченку Олександрю Анатолійовичу**

1. Тема роботи «Розроблення системи діагностики електроприводних систем»  
керівник роботи Кислиця Світлана Григорівна, к.т.н., доцент  
затверджена наказом вищого навчального закладу №1481/1-фа від 08.12.2023.
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2024 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Документація на стенд діагностики плати управління силової схеми. Документація на прилади, що використовуються. Номінальна напруга 220В, частота 50 Гц. Забезпечити надійне електропостачання підприємства з мінімальними капіталовкладеннями.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналітичний огляд. Алгоритми керування двигуном постійного струму. Існуючі способи діагностики несправностей у регуляторах. Перевірка електронних компонентів. Перевірка функціонування всієї панелі. Розробка діагностичного стенду. Розробка алгоритму роботи стенду. Розробка підсилювача напруги. Розробка принципової схеми. Висновки по роботі.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
  - 1) Загальний вигляд;
  - 2) Схема стенду;
  - 3) Структурна схема двигуна постійного струму;
  - 4) Функціональна схема стенду діагностики системи керування із симулятором ДПС;
  - 5) Схема підсилювача постійного струму;
  - 6) Принципова схема розробленого стенду;
  - 7) Висновки.
6. Дата видачі завдання 01.04.2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата	Категорія	Відсоток	
1	Аналітичний огляд. Постановка задач на кваліфікаційну роботу	25.04.24	I	20%	Пл. 1
2	Алгоритми керування двигуном постійного струму. Існуючі способи діагностики несправностей у регуляторах.	08.05.24		40%	Пл. 2,3
3	Перевірка електронних компонентів. Перевірка функціонування всієї панелі. Розробка діагностичного стенду.	23.05.24	II	60%	Пл. 4,5
4	Розробка алгоритму роботи стенду. Розробка підсилювача напруги. Розробка принципової схеми.	30.05.24		80 %	Пл. 6
5	Висновки по роботі. Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	10.06.24	III	100%	Пл. 7,8

Студент


Шевченко О.А.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


Кислиця С.Г.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра

«Розроблення системи діагностики електроприводних систем»

Робота містить 59 сторінок, 11 літературних джерел.

Ключові слова: двигун постійного струму, система керування, стенд діагностики плати управління.

Метою роботи є розробка стенду діагностики плати управління силової схеми, що дозволяє тестувати плати управління без подачі силової напруги, яка дозволить скоротити витрати на організаційні та технічні заходи з охорони праці в кілька разів при ремонті електроприводу, оскільки роботи на вторинних ланцюгах допускається виконувати одноосібно.

## ABSTRACT

bachelor's qualification work

"Development of a diagnostic system for electric drive systems"

The work contains 59 pages, 11 literary sources.

Keywords: DC motor, control system, control board diagnostics stand.

The purpose of the work is the development of a diagnostic stand for the control board of the power circuit, which allows testing the control boards without applying power voltage, which will reduce the costs of organizational and technical labor protection measures several times during the repair of the electric drive, since work on the secondary circuits can be performed alone.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД, АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	10
1.1 Загальні поняття.....	10
1.2 Пряма зміна коефіцієнта заповнення.....	10
1.3 Контроль комутації колекторних пластин.....	14
1.4 Прямий вимір проти-ЕРС.....	16
1.5 Контроль напруги.....	19
1.6 Фазове автопідстроювання частоти обертання.....	25
1.7 Позитивний зворотний зв'язок за силою струму якоря.....	27
1.8 Спостерігач проти-ЕРС.....	28
1.9 Системи підпорядкованого регулювання.....	37
1.10 Висновки.....	83
2 ІСНУЮЧІ СПОСОБИ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ У РЕГУЛЯТОРАХ.....	44
2.1 Перевірка електронних компонентів .....	44
2.2 Перевірка функціонування всієї панелі.....	47
3 РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОГО СТЕНДУ.....	49
3.1 Розробка алгоритму роботи стенду.....	49
3.2 Розробка підсилювача напруги.....	53
3.3 Розробка принципової схеми.....	56
ВИСНОВКИ.....	58
Список використаних джерел.....	59
ДОДАТКИ.....	60

## ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток сучасного виробництва промислової продукції, підвищення продуктивності сільського господарства та прискорення перевезень вантажів неможливе без регульованого електроприводу. Нині більшість використовуваних у промисловості та побуті автоматизованих електричних приводів використовує електричні двигуни постійного струму. Системою управління є напівпровідникові електронні блоки. Однак, незважаючи на те, що в більшості економічно розвинених країн світу масове виробництво регульованих електроприводів постійного струму припинено десять років тому, встановлені електроприводи постійного струму ще довгі роки будуть застосовуватися в промисловості, оскільки їхня заміна потребує великих капітальних та організаційних витрат [1].

Організаційні заходи щодо заміни застарілих електроприводів постійного струму, пуско-налагодження, утилізації, включають ще афінаж дорогоцінних металів, що містяться в електронному блоці. Дорогоцінними металами є: платина, осмій, іридій, рутеній, паладій, родій, срібло, золото. Усі ці метали використовуються як хімічно пасивні провідники. Метали платинової групи (платина, осмій, іридій, рутеній, паладій, родій) використовуються в приладах, де потрібна міцність або висока температура плавлення: контакти, перемикачі, реле, термопари, резистори, мікросхеми, конденсатори, осі приладів з параметрами, що настроюються. Золото використовується там, де, крім хімічної пасивності, потрібна ще пластичність. Його можна знайти майже у будь-яких типах електронних компонентів. Сріблу віддають перевагу за його дешевизну щодо інших пасивних металів. Тому використовується в будь-яких типах електронних компонентів і ще як антикорозійне покриття проводів, металевих корпусів, охолоджувачів та екранів [2].

Також електронні блоки містять надзвичайно небезпечні речовини:

- берилій та кадмію оксид у контактах;
- ртуть у малогабаритних реле;

- трихлордифеніл та пентахлордифеніл у потужних неполярних конденсаторах;
- свинець, оксид свинцю та інші його неорганічні сполуки, літій у припої;
- кадмію стеарат і трикрезилфосфат у просоченні ізоляції проводів для гнучкості;
- телур у термопарах;
- миш'як та селен у напівпровідникових приладах;
- нікель у покритті мідних шин;
- склоемаль у дротяних резисторах;
- оксид ванадію в термісторах;
- кадмій у фарбі, припої, золотистих гвинтах, контактах;
- оксид хрому в дротяних резисторах та варисторах;
- оксид ванадію у напівпровідникових резисторах;
- гідроціаніду солі в літєвих батареях.

Життєвий цикл нової системи управління буде значно меншим. Це викликано кількома причинами.

1. Заміна металевого корпусу на пластмасовий. Прогрес у галузі сигнальної та інформаційної електроніки, призвів до зменшення розміру плат пристрою управління. В результаті замість дорогого, але надійного кріплення плат різьбовими з'єднаннями до металевих стійок і корпусу в старих блоках, використовується кріплення за допомогою засувок до пластмасового корпусу, який, через кілька років експлуатації, розсипається в потерть через нагрівання. В результаті плати просто вивалюються з корпусу. У деяких випадках пластмасовий корпус блоку може одночасно бути несучою конструкцією пускача на струм у кілька сотень ампер, як у блоці плавного пуску siemens sirius 3rw40. Що призводить до необхідності викидати блок у разі деградації контактів пускача [3].
2. Збільшення температури всередині системи керування електроприводом, що негативно впливає на плати, пластмасу та

електронні компоненти. Прогрес виробництва електронних компонентів призводить до зростання їхньої допустимої температури. Наприклад, електролітичні конденсатори використовувалися тільки з максимальною допустимою температурою 85 градусів Цельсія, тепер вони переважно виробляються з гранично допустимою температурою 105 градусів. Те саме відбувається з силовими модулями: нові серії напівпровідникових силових модулів допускають граничну температуру кристала ( $T_j$ ) 175 градусів, що на 25-50 градусів більше, ніж було допустимо в напівпровідникових приладах 20 років тому. У майбутньому цей процес продовжиться, бо почався перехід на напівпровідникові прилади на основі карбїду кремнію, який теоретично допускає підвищення температури кристала до 500.

3. Збільшення густини монтажу. Збільшення щільності монтажу призводить до зменшення відстані між висновками елементів електронного пристрою, що призводить до їх замикання у разі потрапляння струмопровідного сміття, наприклад, металевої стружки, що виникає при металообробці. Якщо таке замикання сталося в ланцюзі вимірювання напруги або формувача сигналів керуючих на силовий модуль, то відбудеться вигорання пов'язаних елементів схеми.
4. Використання електронних компонентів недостатньої потужності. Часто використовують резистори з номінальною потужністю менше тієї, що розсіюється ним при роботі, що призводить до перетворення у втрати плати в області паяння резистора.
5. Зменшення довговічності електронних компонентів. Наприклад, використання дешевого порошкового заліза замість дорогого фериту призводить до прискорення деградації електронних компонентів.
6. Використання безсвинцевих припоїв. Характеристики шва безсвинцевих припоїв, що виникають при тривалій експлуатації також гірше, ніж у припоїв, що містять свинець. Тобто згодом, після кількох тисяч циклів нагрівання-охолодження, що неминуче при перервах у

роботі обладнання, оскільки при роботі блок нагрівається на кілька десятків градусів, компоненти відвалюються від місця паяння.

Все це можна назвати «планованим старінням».

Через все вище перераховане (матеріальних витрат, афінажу дорогоцінних металів, утилізації особливо небезпечних відходів та планованого старіння нових блоків) має сенс відновлювати системи управління ДПС. Тим паче вони повністю відновлюються ще тривалий час, оскільки у яких використовуються малого ступеня інтеграції і дискретні компоненти. Завдання діагностики несправностей системи керування електроприводом ДПС є важливим і актуальним.

Мета та завдання дослідження. Електропривод, змонтований у промисловому підприємстві, є діючою електроустановкою, тобто сукупністю машин, апаратів, ліній та допоміжного обладнання, призначеного для перетворення електричної енергії в інший вид енергії, яка знаходиться під напругою, або на яку напруга може бути подана включенням комутаційних апаратів. Найчастіше, напруга електроустановки нижче 220 кВ [4]. Під час робіт без зняття напруги з електроустановки повинен призначатися відповідальний керівник, тому такі роботи виконуються за розпорядженням.

Система управління складається з двох частин: силової схеми та плат (панелей або блоків) управління їй з живленням напругою нижче 42В.

Тому метою роботи є розробка стенду діагностики плати управління силової схеми, що дозволяє тестувати плати управління без подачі силової напруги, яка дозволить скоротити витрати на організаційні та технічні заходи з охорони праці в кілька разів при ремонті електроприводу, оскільки роботи на вторинних ланцюгах допускається виконувати одноосібно.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД. АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

## 1.1 Загальні поняття

Двигун постійного струму (ДПС), в загальному випадку, обов'язково має 2 виводи якоря (ротора) та два виводи обмотки збудження. Для збудження можуть використовуватися постійні магніти замість обмотки збудження або обмотка збудження може бути послідовно з'єднана з якорем, в цьому випадку двигун буде мати тільки два виведення. Крім того, на двигуні може бути змонтований тахогенератор для вимірювання швидкості обертання. З цього випливає, що система керування електроприводом ДПС – це електронний блок, який керує напругою на якорі та обмоткою збудження двигуна у функції:

- сигналу завдання;
- напруги тахогенератора;
- напруги та струму якоря;
- напруги та струму обмотки збудження.

Кожна з цих змінних, крім сигналу завдання, залежить від напруги на якорі та обмотці збудження, тобто сигнали зворотного зв'язку. Вони можуть бути позитивними чи негативними. В електроприводах використовуються різні комбінації всіх типів. У цьому розділі досліджується застосування в електроприводах цих зворотних зв'язків і виявляється їх комбінація, яка використовується в найдорожчих та найскладніших для ремонту електроприводах.

## 1.2 Пряма зміна коефіцієнта заповнення

Пряме управління відрізняється простотою конструкції та нестабільною роботою при малих обертах. Найчастіше використовується в електроприводах ручного механізованого інструменту, вентиляторах і т. п. системах управління

малими двигунами, так як великі установки вимагають захисту від надструмів, а значить негативного зворотного зв'язку по струму .

На рис. 1.1 показано схему електроприводу електроміксера МР1Е(У).

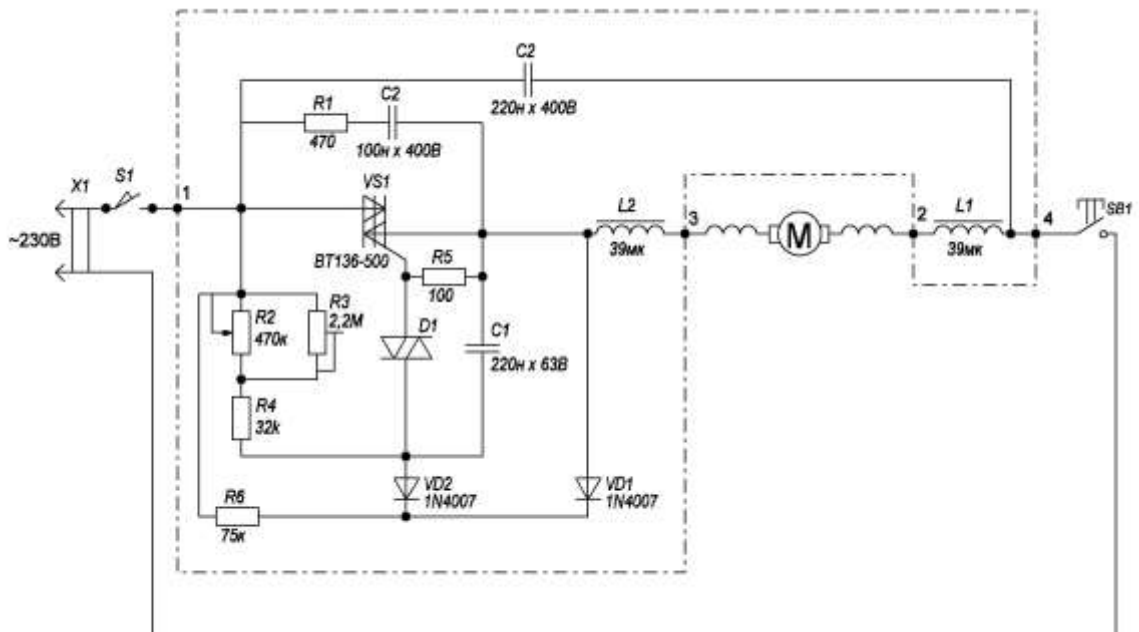


Рисунок 1.1 – Принципова схема електроміксера МР-1Е(У)

Система управління МР-1Е(У) є провідним мережевим випрямлячем із «горизонтальним» СІФУ. Призначення електронних компонентів системи керування:

- S1 – кінцевий вимикач, що блокує подачу напруги при неправильному складанні міксера;
- SB1 - кнопка з фіксацією, що деблокує привід шляхом подачі напруги на схему керування;
- C3, L1 та L2 – фільтрація перешкод від щіток двигуна;
- R1 і C2 – «снаббер», тобто ланцюжок, що зменшує швидкість наростання напруги на симісторі до допустимого рівня при замиканні;
- R5 – зменшення чутливості затвора до шумового сигналу, потрібне для запобігання помилковому спрацьовуванню тріаку;
- R2, R3, R4, D1, C1 - схема СІФУ з горизонтальним керуванням;
- R6, VD2, VD1 – схема компенсації неідеальності тиристора VS1.

СІФУ працює в такий спосіб. На початку кожного напівперіоду конденсатор С1 заряджається через резистори R2, R3, R4. Швидкість наростання напруги на С1 можна змінювати за допомогою "движка" R2. Що менше опір R2 – то швидше заряджається конденсатор С1. Коли напруга на конденсаторі С1 досягне рівня напруги пробією тригер-діода D1, конденсатор С1 розряджається диністор D1 і затвор VS1.

Схема компенсації неідеальності симетричного тріністора VS1 виконує дві функції.

1. Створює ланцюг для протікання струму рівного струму утримання симетричного тригер-тріода VS1, тим самим запобігаючи замиканню його після закінчення імпульсу управління, що відмикає. Це відбувається за рахунок ланцюга R6 та VD1.
2. Вирівнює кут відмикання тріаку VS1 при роботі в першому та третьому квадранті за допомогою ланцюга протікання струму заряду через R6 та VD2.

Через те, що R6 підбирається рівним струму утримання симетричного тиристора VS1 при напрузі приблизно рівному амплітудному значення напруги мережі, то максимальний кут відмикання VS1 трохи більше 90 градусів. Тобто така схема забезпечує регулювання напруги на навантаженні від 100% до 50% на індуктивне навантаження.

Схожі схеми використовуються у слюсарному ручному механізованому інструменті. Принципова схема електроприводу ручної свердлильної машини ІЕ-1505Е, показано рис. 1.2.

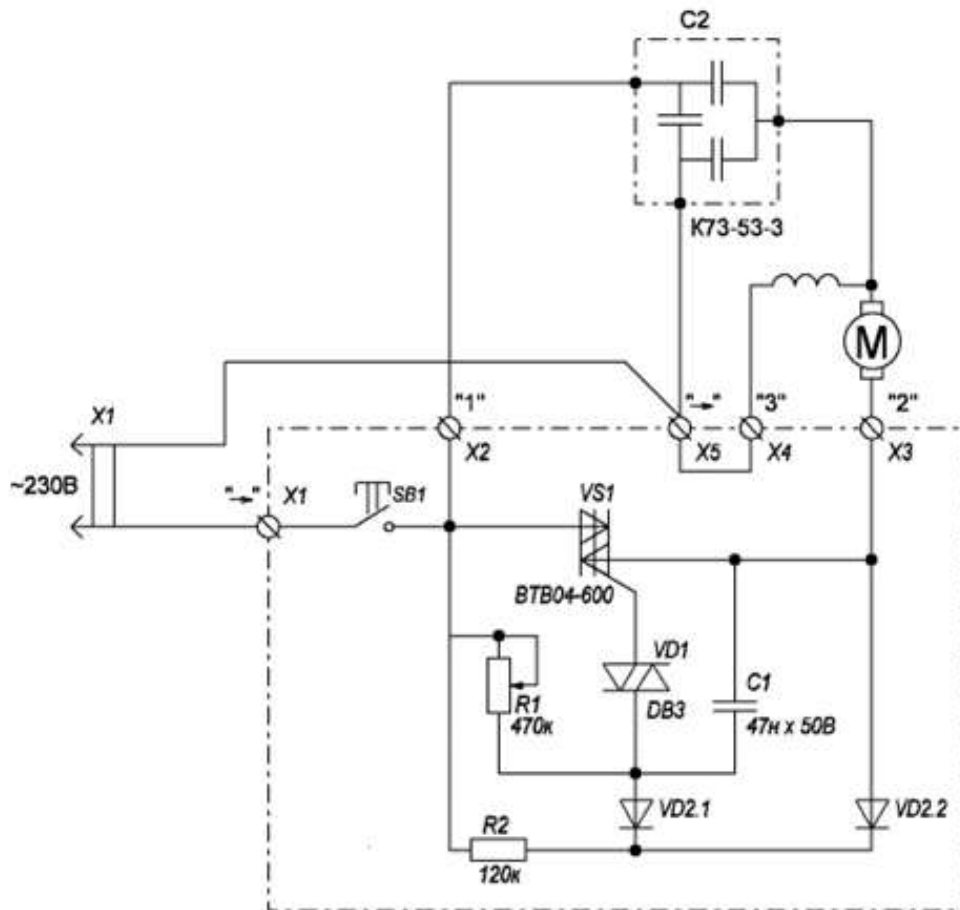


Рисунок 1.2 – Принципова схема ручної свердильної машини PE-1505E

У цій машині вся статична система управління міститься в маленькій кнопці, яка називається БУЕ (блок управління електронний). Це вдалося досягти за рахунок використання електронних компонентів поверхневого монтажу, спрощення снабера, відсутності дроселів придушення перешкод, використання тріаку з дуже низьким струмом управління.

Ці схеми шляхом додавання моста випрямлення легко допрацьовуються до системи управління електродвигуном з незалежним збудженням.

Як очевидно з вищепоказаних схем, системи управління електродвигунами, здійснюють пряме управління двигуном без зворотних зв'язків є дешевими пристроями, які часто продаються як «кнопки» і працюють стабільно на низьких оборотах.

### 1.3 Контроль комутації колекторних пластин

Активний опір та індуктивність якоря, а також миттєве значення проти-ЕРС ДПС залежать від кута повороту ротора. Число циклів зміни їх значення за один оборот ротора обчислюється за такою формулою.

$$N = 2Kp, \quad (1.1)$$

де  $K$  – число колекторних пластин;

$p$  – число пар основних полюсів.

Тобто струм якоря містить складову, частота коливань якої кратна частоті обертання двигуна. На контролі частоти цієї складової струму якоря створюють малопотужні системи управління електроприводом постійного струму. Системи управління електроприводом, створені за таким принципом, мають більшу точність встановлення швидкості обертання, ніж з тахогенератором постійного струму. Їх точність можна порівняти з системами, в яких є датчик положення ротора. З іншого боку, їх використання неможливе у таких випадках.

1. Використовується комбінація двигуна та силового перетворювача, в якій неможливо відокремити сигнал кратний частоті обертання від шуму.
2. Низька швидкість обертання.
3. Потрібна швидка зміна швидкості при зміні завдання або швидка компенсація впливу зміни навантаження, що обурює. Цю проблему можна компенсувати, ввівши позитивний зворотний зв'язок струму.

Іншими словами, такий алгоритм управління застосовується тільки до електроприводів, в яких потрібне регулювання швидкості обертання у вузьких межах, наприклад, магнітофонах. Схема такого електроприводу показано рис. 1.3 [7].

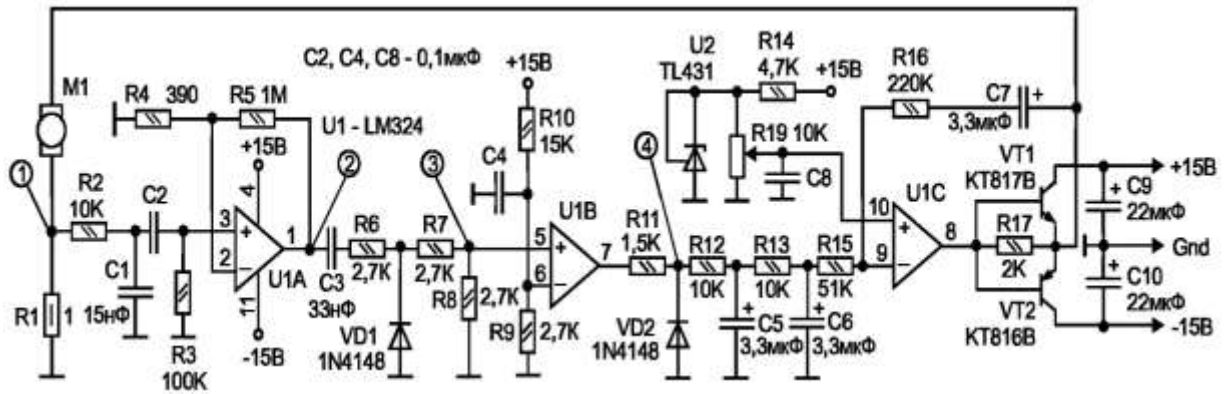


Рисунок 1.3 – Схема системи керування електроприводом, що використовує контроль комутації колекторних пластин [7]

Сила струму споживана M1 викликає падіння напруги на резисторі R1, пульсації якого приблизно рівні 100 мВ. Змінна складова з частотою комутації колекторних пластин виділяється за допомогою інтегруючого ланцюжка R2, C1 та роздільного конденсатора C2. Виділена таким чином змінна складова з кратною частотою частоті обертання ДПС надходить на вхід компаратора U1A. З цього сигналу виділяється передній фронт за допомогою C3, R6, R7, R8, VD1. Виділений у такий спосіб передній фронт надходить на формувач тривалості імпульсу U1B. Середнє значення напруги на вихід U1B пропорційно частоті проходження імпульсів, а значить і швидкості обертання ротора. Ця постійна складова детектується R11, R12, C5 та R13, C6. Далі сигнал надходить на ПІ-регулятор, що містить U1C і елементи, що відносяться до нього. Джерелом опорної напруги є U2. Як задатчик швидкості обертання використовується потенціометр R19. Вихід регулятора потужний двотактним емітерним повторювачем на VT1 і VT2. Транзистор VT1 пропускає струм у робочому режимі, а VT2 у гальмівному, тому тріод VT1 бажано встановити на охолоджувач. Тріоду VT2 зовнішнє охолодження не потрібне.

## 1.4 Прямий вимір проти-ЕРС

Відповідно до принципу оборотності електричних машин, будь-яка електрична машина може працювати в генераторному та руховому режимах. Тобто на затискачах якоря двигуна, що обертається, постійного струму з обірваним якорем буде генеруватися напруга, зване «проти-ЕРС», величина якого пропорційна швидкості обертання.

На основі контролю цієї напруги створюються системи керування електродвигуном. Оскільки для вимірювання проти-ЕРС потрібна відсутність струму через якір, то електроприводи, які використовують цей алгоритм контролю швидкості обертання без тахогенератора, працюють у режимі переривчастих струмів. Для гарантування цього коефіцієнт заповнення імпульсного перетворювача повинен бути менше 0.5, а значить вони використовують можливості перетворювача менш ніж на 50% максимально можливого, тобто вони малопотужні, але електроприводи побудовані за цим принципом управління мають точність сумірної точності систем побудованих з використанням ОС за швидкістю. Тому цей метод застосовується у магнітофонах, програвачах, малопотужних приводах подач промислових установок тощо пристроях.

На рис. 1.4 зображений двонапівперіодний регулятор швидкості з прямим вимірюванням проти-ЕРС двигуна. Мостовий випрямляч VDS1 необхідний для того, щоб струм протікав через двигун в одному напрямку. Ротор електродвигуна завжди обертається в магнітному полі, навіть якщо у всіх обмотках немає струму через залишкову намагніченість. Тому, коли тиристор VS1 замкнений, то на його катоді буде присутній проти ЕРС двигуна M1. Його величина пропорційна швидкості обертання двигуна. У першу половину напівперіоду напруга на аноді діода VD2 наростатиме. Коли воно стане більше проти ЕРС двигуна, то діод VD2 відкриється і через затвор тиристора піде струм відмикання, який відкриє його. Таким чином, система

стабілізуватиме швидкість обертання. Так як ця система використовує залишкову намагніченість магнітної системи двигуна, вона працює нестабільно при низьких оборотах двигуна. Як видно, ця схема за кількістю компонентів схожа на пряме керування двигуном.

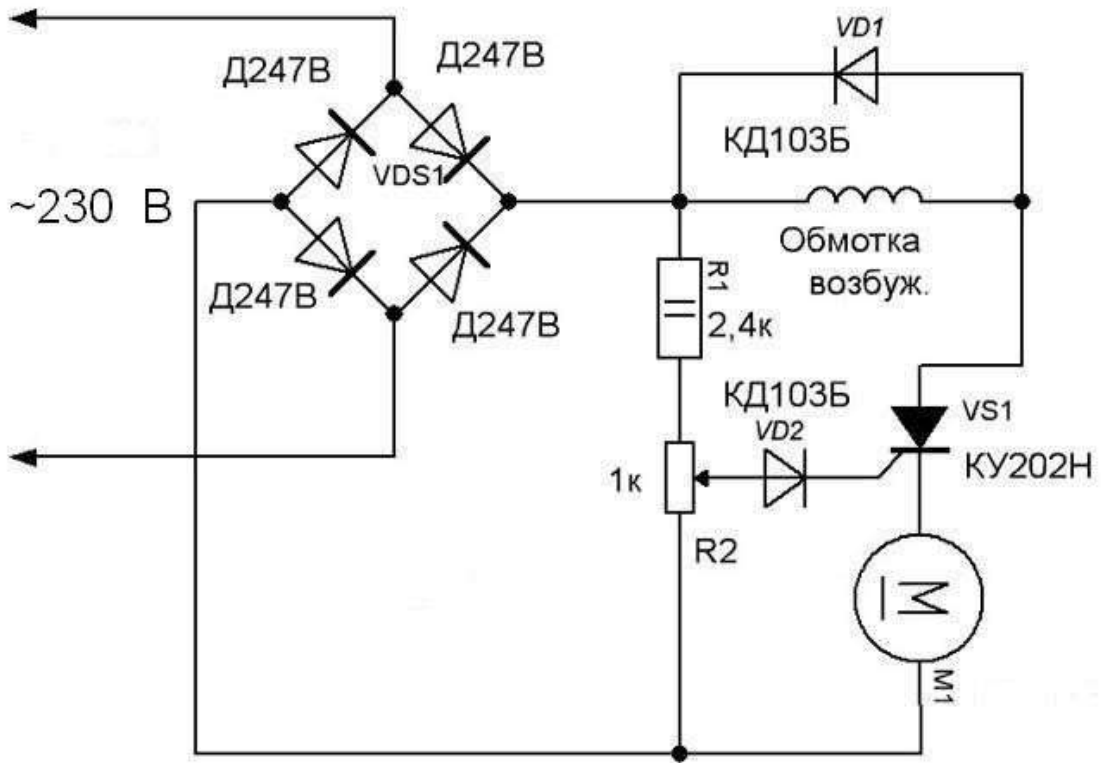


Рисунок 1.4 – Двонапівперіодний регулятор швидкості з прямим вимірюванням проти-ЕРС двигуна

Найкращі результати дають схеми із незалежним збудженням двигуна. Така схема показана рис. 1.5. [7]. Регулятором у системі управління електроприводом є мікросхема TL494. Ця мікросхема є ШІМ-контролером двотактних ІІІ. У своєму складі вона має два операційні підсилювачі для реалізації негативного зворотного зв'язку з напруги та струму. Виходи цих операційних підсилювачів з'єднані за схемою або монтажне. У даній схемі використовується тільки один операційний підсилювач. Елементами R2, C2 задається частота ШІМ. На схемі вказані значення для генерації імпульсів із частотою близько 1 кГц, хоча найкращі результати ШІМ дає на частоті 3 кГц.

Частота генерації визначається за формулою

$$f = \frac{1}{2 \cdot R_2 \cdot C_2}, \quad (1.2)$$

де  $R_2$  та  $C_2$  – це номінали  $R_2$  та  $C_2$ , відповідно.

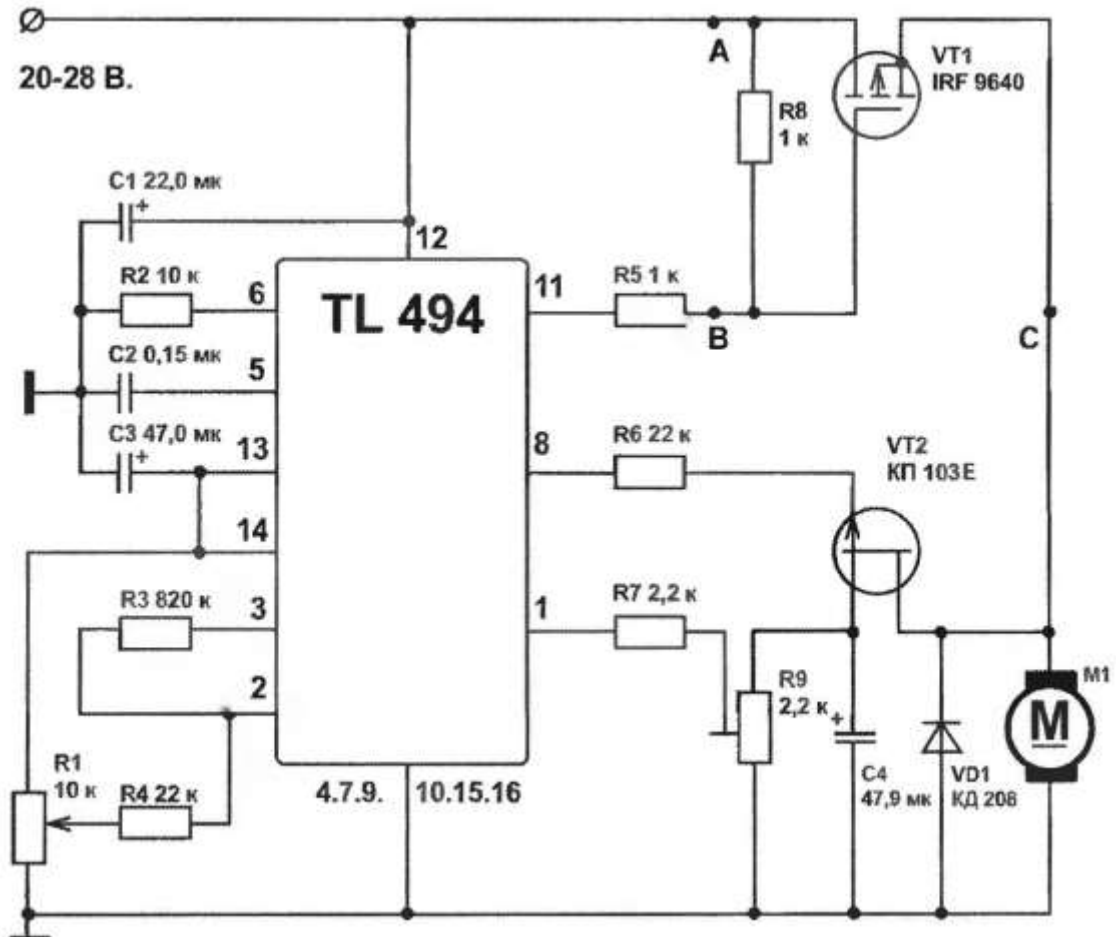


Рисунок 1.5 -ШИМ регулятор швидкості з прямим виміром проти-ЕРС двигуна

Конденсатор  $C_4$  служить для запам'ятовування величини проти ЕРС двигуна, виміряного в попередньому циклі. Резистором  $R_9$  підбирається рівень зворотний зв'язок, тобто максимальна можлива швидкість обертання. Напряга з виходу  $R_9$  подається на вхід ОУ, що не інвертує, вбудованого в півкову мікросхему  $tl494$ . Вихід цього підсилювача (виведення 3  $TL494$ ) з'єднаний резистором  $R_3$ . Завбільшки цього резистора задається коефіцієнт

посилення регулятора. Тобто стабільність швидкості обертання. Інвертуючий вхід (висновок 2) через резистор K4 з'єднаний із задатчиком R1.

Працює схема в такий спосіб. У перший такт мікросхема tl494 подає відмикаючий імпульс на VT1, тим самим подаючи силову напругу на якір двигуна M1. Тривалість подачі силової напруги прямо пропорційна різниці напруги між запам'ятованим рівнем проти-ЕРС на конденсаторі C4 та задатчиком R1. Коли імпульс закінчиться, накопичена магнітна енергія в двигуні M1 буде розряджатися через діод VD1.

У наступному такті відмикається транзистор VT2 для початку вимірювання проти ЕРС.

Ця система управління застосовується у приводі подачі дроту у зварювальному апараті.

### **1.5 Контроль напруги**

Цей спосіб управління схожий на попередній, у ньому також вимірюється напруга на якорі, тільки для цього не виділяється окремий такт вимірювання проти ЕРС. Таке керування використовується там, де немає необхідності підтримувати високу точність підтримки швидкості, але потрібна більш висока потужність, ніж може забезпечити прямий вимір проти ЕРС. Такий зворотний зв'язок необхідний зменшення вихідного опору системи управління, що у тиристорних випрямлячах може досягати 10 Ом. Наприклад, на рисунках 1.7 та 1.8 наведено результати комп'ютерного моделювання у програмі proteus 8, проекту показаного на рис. 1.6.

У проекті була обрана амплітуда напруги живлення рівна 325В, що відповідає 230 В напруги мережі. Кут відмикання – 68 градусів. Індуктивність L1 дорівнює 10 мГн та опір R2 рівним 10 Ом. Ці значення відповідають даним якоря двигуна потужністю 100-1000 Вт.

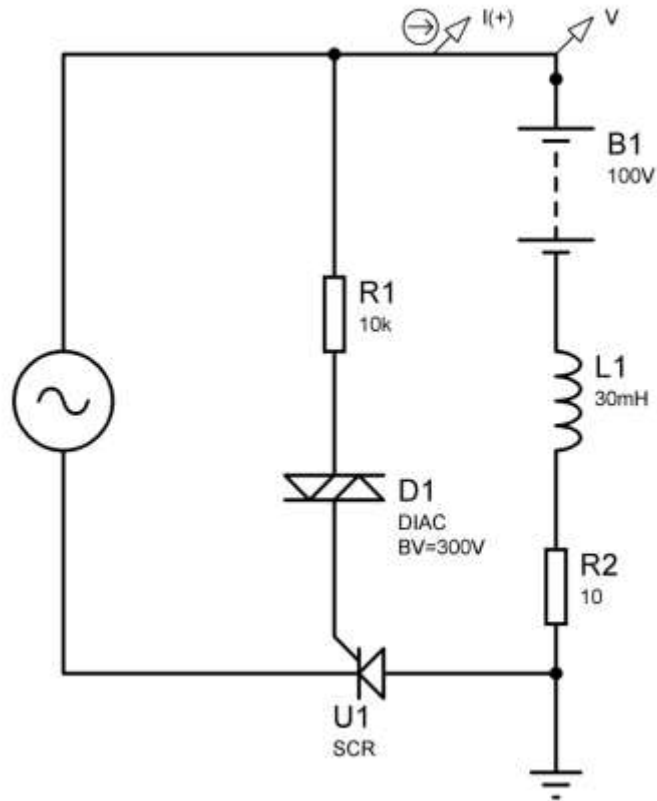
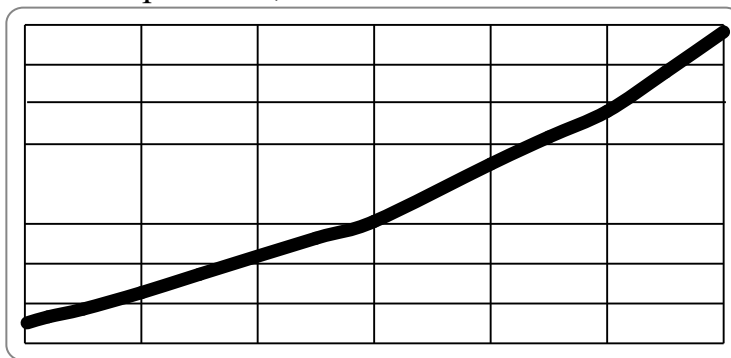


Рисунок 1.6 – Проект proteus 8, що симулює роботу керованого випрямляча

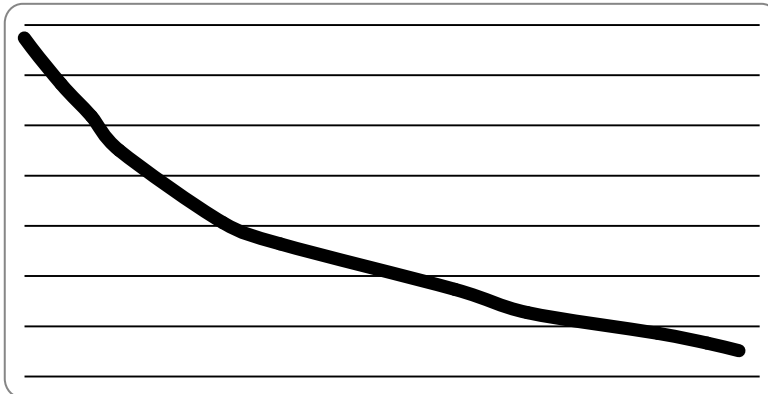
Вихідна напруга  
керovanого випрямляча, В



Напруга проти-ЕРС, В

Рисунок 1.7 – Залежність вихідної напруги керованого випрямляча від напруги проти-ЕРС при незмінному куті відмикання, результат моделювання в proteus 8

Вихідна напруга  
керованого випрямляча, В



Середня сила струму, А

Рисунок 1.8 – Залежність вихідної напруги керованого випрямляча від середньої сили струму при незмінному куті відмикання, результат моделювання в proteus 8

Залежність частоти обертання від ЕРС перетворювача та опору перетворювача та якоря:

$$\omega = \frac{E - (R_{\text{пр}} - R_{\text{я}})}{k\Phi} \quad (1.3)$$

де  $\omega$  – частота обертання;

$E$  – ЕРС перетворювача;

$R_{\text{пр}}$  - опір перетворювача;

$I_{\text{я}}$  – сила струму якоря;

$R_{\text{я}}$  - опір якоря двигуна постійного струму;

$K$  – конструктивний коефіцієнт;

$\Phi$  – магнітний потік.

Так як  $R_{\text{пр}}$ , як показано вище, може бути приблизно рівним  $R_{\text{я}}$ , негативний зворотний зв'язок по напрузі може зменшити просідання швидкості обертання навантаженого двигуна постійного струму в два рази. Крім того, при низькому значенні коефіцієнта заповнення перетворювача, системи управління електроприводом зі зворотним зв'язком по швидкості за

властивостями схожі на електроприводу з прямим виміром проти-ЕРС, так як в цьому випадку проти-ЕРС двигуна відіграє більш помітну роль. А в електронних блоках, у яких використовується ведений мережею випрямляч з не синхронізованим СІФУ, поведуться точно так, як блоки здійснюють вимірювання проти-ЕРС, оскільки вони контролюють напругу на двигуні лише до моменту відкриття тиристора. А якщо в цей час тиристри в інших фазах не проводять струм, то напруга, що контролюється регулятором, дорівнюватиме проти-ЕРС. Одним з електронних блоків, що здійснюють таке управління є НР1-С9. Він використовується в електроприводі повороту барабана дробометальної установки. Схема блоку показана на рис.1.9.

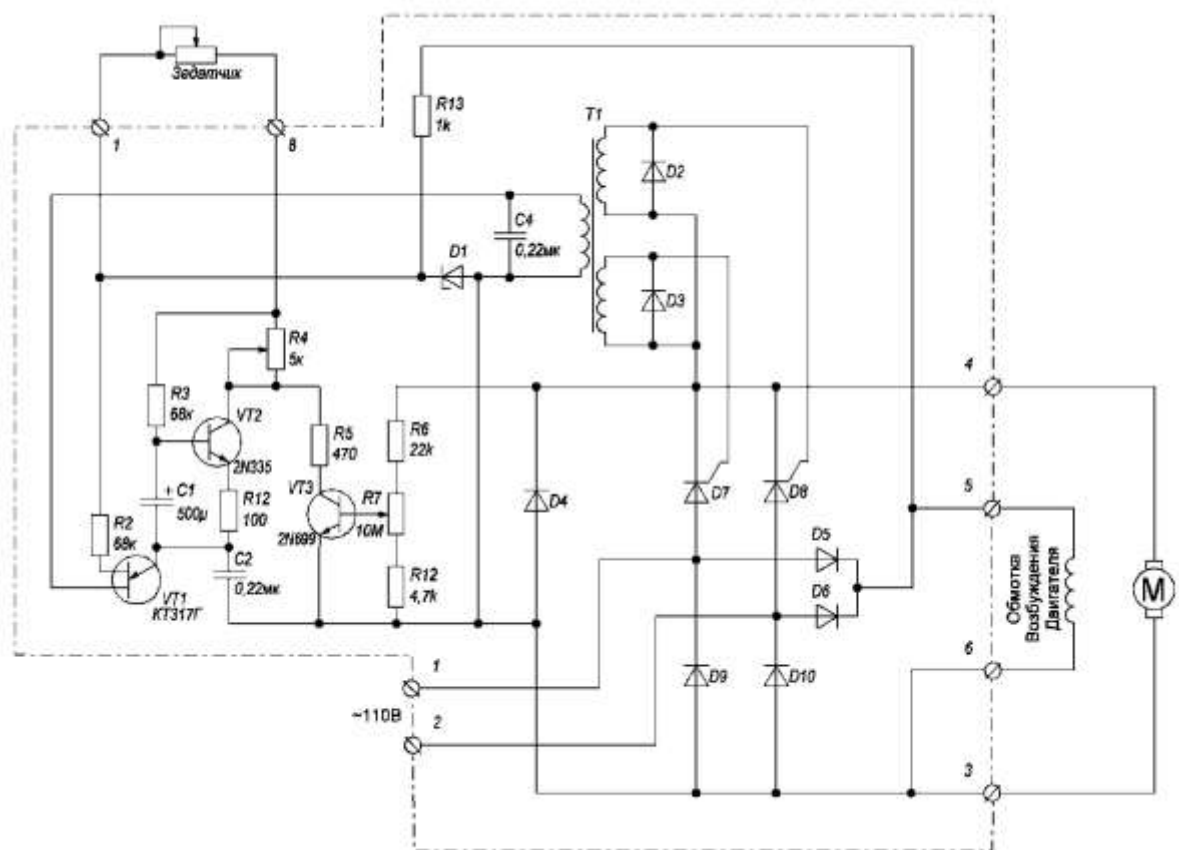


Рисунок 1.9 – Принципова схема електроприводу дробометальної установки

Регулятор швидкості НР1-С9 забезпечує регулювання середнього значення вихідної напруги від 25 до 90В. Діапазон регулювання виставляється резисторами R7 та R4. Регулятор НР1-С9 є двонапівперіодним напівкерваним

випрямлячем, керованим горизонтальним СІФУ, що не синхронізується. НР1-С9 розрахований на керування двигуном потужністю 0,8 кВт, номінальна напруга 90 В, напруга збудження 100 В.

Робота СІФУ ґрунтується на одноперехідному транзисторі VT1. Одноперехідний транзистор – це своєрідний тиристор, тобто як прилад має яскраво виражену область негативного опору. Вивід цього тріода, підключений до С2 називається емітером, він є аналогом анода тиристора, вивід підключений до R2 називається базою 2, він є аналогом затвора тиристора, а третій вивід транзистора, що залишився, називається базою 1, він є аналогом катода керованого кремнієвого випрямляча. Одноперехідний транзистор відкривається, тобто починає пропускати струм від емітера до бази 1, коли напруга між емітером і базою 2 стане більше порогового значення, який залежить від струму, що протікає через базу 2 і моделі транзистора, що використовується. Якщо база 2 обірвана, то перехід емітер- база 1 поводитья як нелінійний резистор, вольт-амперну характеристику зображено на рис. 1.10.

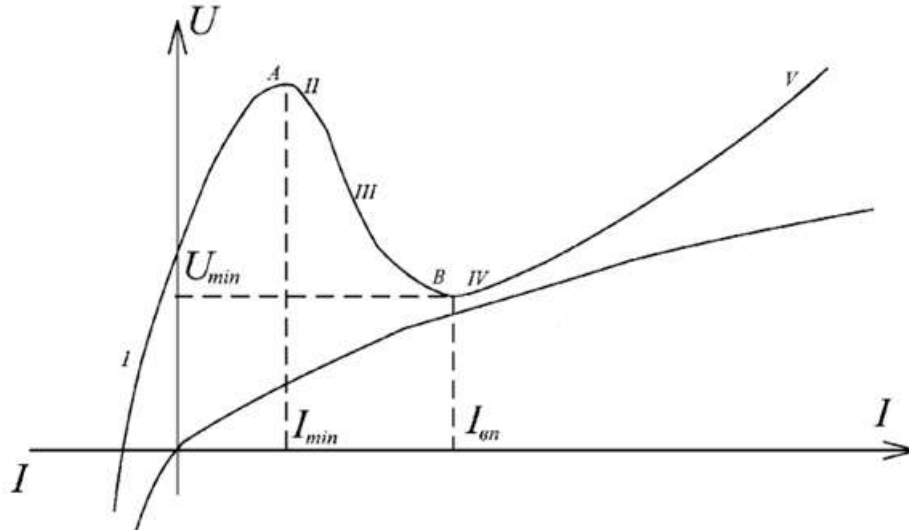


Рисунок 1.10 – ВАХ одноперехідного транзистора

Опис роботи регулятора. D5...D10 – це однофазний двонапівперіодний випрямляч. Діоди D9 та D10 служать для отримання негативної полярності живлення (загального дроту), який використовується для живлення всіх компонентів пристрою. Керовані кремнієві випрямлячі D7 і D8 служать для

живлення позитивної напруги живлення якоря двигуна. Діоди D5 та D6 видають позитивну напругу живлення для обмотки збудження та нестабілізовану напругу живлення для плати СІФУ. На платі СІФУ міститься параметричний стабілізатор, що містить резистор R13 і діода Зенера D1. На стабілітроні D1 "зрізається" напруга вище 22 В. Резистор R13 - баластовий, він обмежує струм через стабілітрон D1 на рівні 15 мА. Ця стабілізована напруга, яка на початку кожного напівперіоду падає до нуля, надходить на задатчик. Із задатчика ця напруга надходить на резистор зміщення одноперехідного транзистора R3 та R4 - потенціометр обмеження максимальної швидкості.

Кожен напівперіод транзистор VT2 відкривається напругою усунення і конденсатор C2 заряджається через опір задатчика R3 і R8. Залежно від величини опору задатчика та R4 змінюється швидкість заряду конденсатора C2. Конденсатор C2 заряджається до необхідного для відкриття одноперехідного транзистора VT1. Після чого розряджається через одноперехідний транзистор і імпульсний трансформатор T1, який потрібно для розподілу імпульсів по тиристорах невідключених до загального проводу. Після закінчення розряду конденсатор C2 починає заряджатися знову, але це роботу схеми впливає. Коли напруга на діоді D1 спадає до нуля, це буває в кінці кожного напівперіоду, конденсатор C2 розряджається через VT1, так як струм зсуву зсуву спадає до нуля.

Імпульси з вторинних обмоток трансформатора T1 приходять на обидва тиристри одночасно, але відмикається тільки той із них, на якому є позитивне зміщення. Після цього випрямлена напруга прикладається до якоря двигуна. Наприкінці кожного напівперіоду тиристри обов'язково замикаються, готуючи себе до наступного відкриття. Замикання тиристорів відбувається за рахунок подачі негативного зміщення через діоди VD9 та VD10. Регулювання напруги на якорі напруги на якорі здійснюється за допомогою зовнішнього задатчика, підключеного до затискачів 7 і 8, а також резисторами R4, R7. Таким чином, можлива зміна кута відмикання майже від 0 до 180 градусів, тим самим змінюється середня напруга на якорі. Коли тиристри замкнені, то на

якорі двигуна присутня напруга проти-ЕРС або напруга нижче 2 В. Напруга нижче 2 виникає тоді, коли в попередній напівперіод магнітна система накопичила достатньо енергії, щоб відімкнути діод D4.

Використання діодів замість тиристорів у нижньому плечі випрямного мосту якоря та зустрічний діод D4 перешкоджають роботі двигуна у режимі рекуперативного гальмування. Тому двигун на неодруженому ході повільно зменшує швидкість. Транзистор VT3 відіграє роль зворотного зв'язку за напругою і, коли навантаження низька, проти-ЕРС.

## 1.6 Фазове автопідстроювання частоти обертання

Найкращі результати зі стабілізації швидкості дає зворотний зв'язок по положенню ротора з ФАПЧ (фазова автопідстроювання частоти). Електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням, керовані регулятором з ФАПЧ поведуться не гірше за синхронні двигуни. Такий алгоритм управління використовується електроприводами програвачів компакт-дисків, в яких для синхронізації використовується мітки на дисках. Ці мітки називаються WFCK та RFCK.

Швидкість обертання двигуна задається генератором, що задає. Фаза генератора, що задає, порівнюється з фазою сигналу з датчика положення ротора двигуна у ФД (фазовому детекторі). Фазовий детектор видає імпульсний сигнал, коефіцієнт заповнення якого пропорційно до затримки між імпульсом завдання і датчиком положення ротора. З цього сигналу виділяється постійна складова і проводиться компенсація зворотного зв'язку у ФНЧ (фільтр низької частоти), який потім надходить на ШИП (широтно-імпульсний перетворювач). ШИП, відповідно до вхідного сигналу, виробляє напругу для якоря ДПС (двигун постійного струму) на валу якого змонтований датчик положення. При обертанні двигуна датчик положення ротора періодично змінює свій стан, тим самим виробляючи сигнал зворотного зв'язку, який порівнюється в ФД. Далі цикли повторяться.

Незважаючи на складність опису, його реалізація у конкретних системах керування електроприводом може бути дуже простою. Схема однієї з перших таких систем керування електроприводом показана рис. 1.11 [8].

Ця схема була розроблена General Electric Semiconductor Products Dept для електроприводу магнітофонів У цій схемі генератор, що задає, зібраний на одноперехідному транзисторі Q1 і відносяться до нього елементах (R6, R7, R4, R5, C3). Живлення на нього подається з параметричного стабілізатора, що складається з резистора R1 та стабілітрона Z1. Частота генератора, що задає, а значить і швидкість обертання двигуна задається потенціометром R2. Імпульси генератора, що задає, відмикають основний тиристор Q2. Його комутація чи вимкнення здійснюється тиристором Q3, який керується оптотиристором Q4.

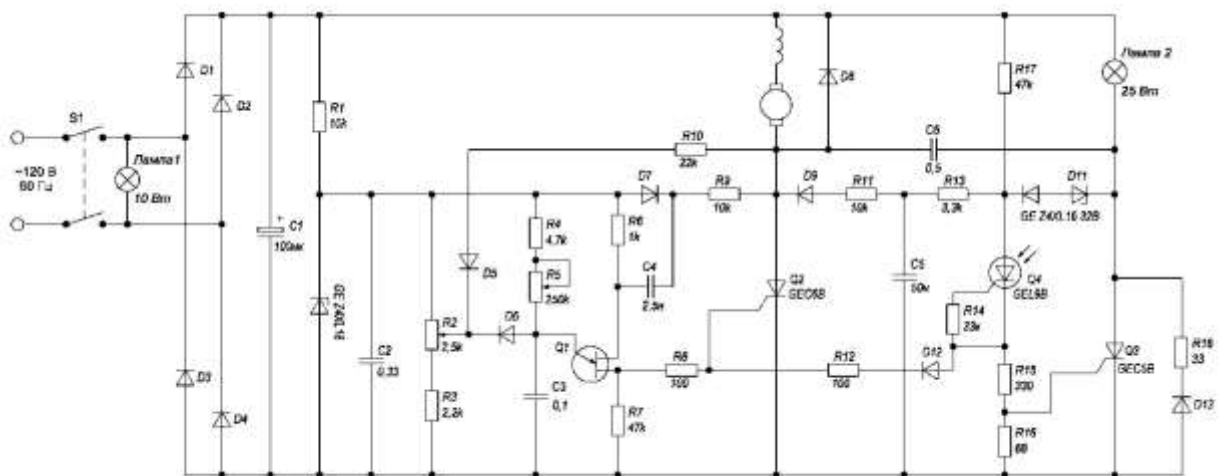


Рисунок 1.11 – Прецизійна стабілізація швидкості обертання двигуна постійного струму з АФПЛ, General Electric Semiconductor Products Dept [6]

Оптотиристор Q4 є складовою частиною датчика положення ротора. Інший його частиною є лампа 1 потужністю 10 Вт. Оптотиристор Q4 засвічується лампою в момент, коли щілина диска закріпленого на валу електромотора буде навпроти нього. Таким чином, ширина імпульсів напруги на двигуні, а значить і середнє значення напруги, виявляється пропорційною затримкою між імпульсами генератора, що задає, і датчика положення ротора

двигуна. Для стійкої роботи цього регулятора частоти обертання, ланцюг зворотного зв'язку включений фільтр низької частоти. Він складається із елементів R2, R3, R10, D5, D6. Лампа 2 служить для контролю частоти обертання двигуна

### 1.7 Позитивний зворотний зв'язок за силою струму якоря

Залежність частоти обертання від ЕРС перетворювача та струму якоря

$$\omega = \frac{E - RI}{K\Phi} , \quad (1.4)$$

де  $\omega$  – частота обертання;

$E$  – ЕРС перетворювача;

$R$  – сумарний опір перетворювача та якоря двигуна;

$I_a$  – сила струму якоря;

$K$  – конструктивний коефіцієнт;

$\Phi$  – магнітний потік.

Порівняно потужна схема електроприводу, що реалізує цей принцип управління, була описана в [9]. Схема електроприводу показано рис. 1.12.

На схемі показаний однополуперіодний керований випрямляч із горизонтальним СІФУ. Конденсатор С2 потрібний для зменшення швидкості наростання напруги на оптотиристорі U1 в момент замикання. Конденсатор С1 використовується для електромагнітної сумісності. Трансформатор Т1 є джерелом електроенергії для СІФУ. Трансформатор Т2 забезпечує позитивний зворотний зв'язок струму.

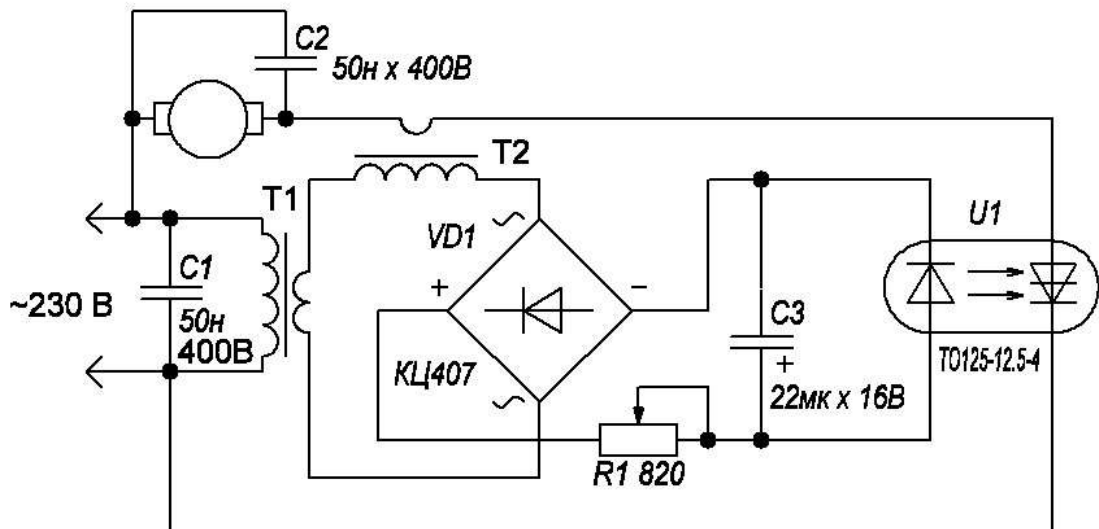


Рисунок 1.12 – Принципова схема електроприводу з ІR компенсацією

Діодний міст запобігає негативній напругі на світлодіоді оптотристора U1. C3 зтягує наростання напруги на оптотристорі U1, а R1 є задатчиком швидкості обертання. Незважаючи на простоту схеми, вона дуже складно налаштовується, тому що необхідно виготовити трансформатори T1 і T2 таким чином, щоб при нульовому опорі R1 не було навантаження світлодіода, що входить до складу оптотристора U1.

## 1.8 Спостерігач проти ЕРС

Залежність частоти обертання від напруги та сили струму якоря

$$\omega = \frac{U - R_{я} I_{я}}{K\Phi}, \quad (1.5)$$

де –  $\omega$  - частота обертання;

U - напруга на якорі;

R<sub>я</sub> - опір якоря двигуна;

I<sub>я</sub> – сила струму якоря;

K – конструктивний коефіцієнт;

Φ – магнітний потік.

Таким чином, якщо отримати сигнал пропорційний напрузі на якорі двигуна і відняти від нього сигнал пропорційний силі струму з правильними співвідношеннями перетворень, то по отриманій величині можна оцінити поточну швидкість обертання двигуна. За таким принципом реалізовано регулятори оборотів у багатьох електроприводах, здатних керувати електродвигуном потужністю до 1кВт. Схема виділення его сигналу, пропорційного проти-ЕРС, називається тахометричним мостом. На рис. 1.13 показано схему електроприводу ЦЕ1-4, що реалізує такий принцип управління. Він розрахований на керування ДПС потужністю 200 Вт.

Працює електропривод ЕТО1-4 в такий спосіб. Мережева напруга випрямляється діодним мостом, що складається з діодів Д1...Д4. На обмотку порушення двигуна подається струм через потенціометр R20, яким налаштовується величина цього струму. Напруга двигун подається через тиристор Д19, кутом відмикання якого керується середнє значення напруги на двигуні . Діод Д5 служить для забезпечення надійного замикання Д19 наприкінці кожного напівперіоду. Потенціометри R21 та R3 є тахометричним мостом.

Тахометричний міст працює в такий спосіб. На середній точці потенціометра R3 знаходиться позитивний потенціал пропорційний силі струму двигуна. Потенціометр R21 одним крайнім висновком підключений до клеми якоря двигуна, що має негативний потенціал щодо загального дроту, а іншим до середньої точки потенціометра R3, в якій напруга позитивно і пропорційно струму якоря. Таким чином, між крайніми затискачами потенціометра R21 буде напруга дорівнює різниці між напругою пропорційним струму двигуна і пропорційним струму якоря. Коефіцієнти перетворення налаштовуються за допомогою R3 та R21.

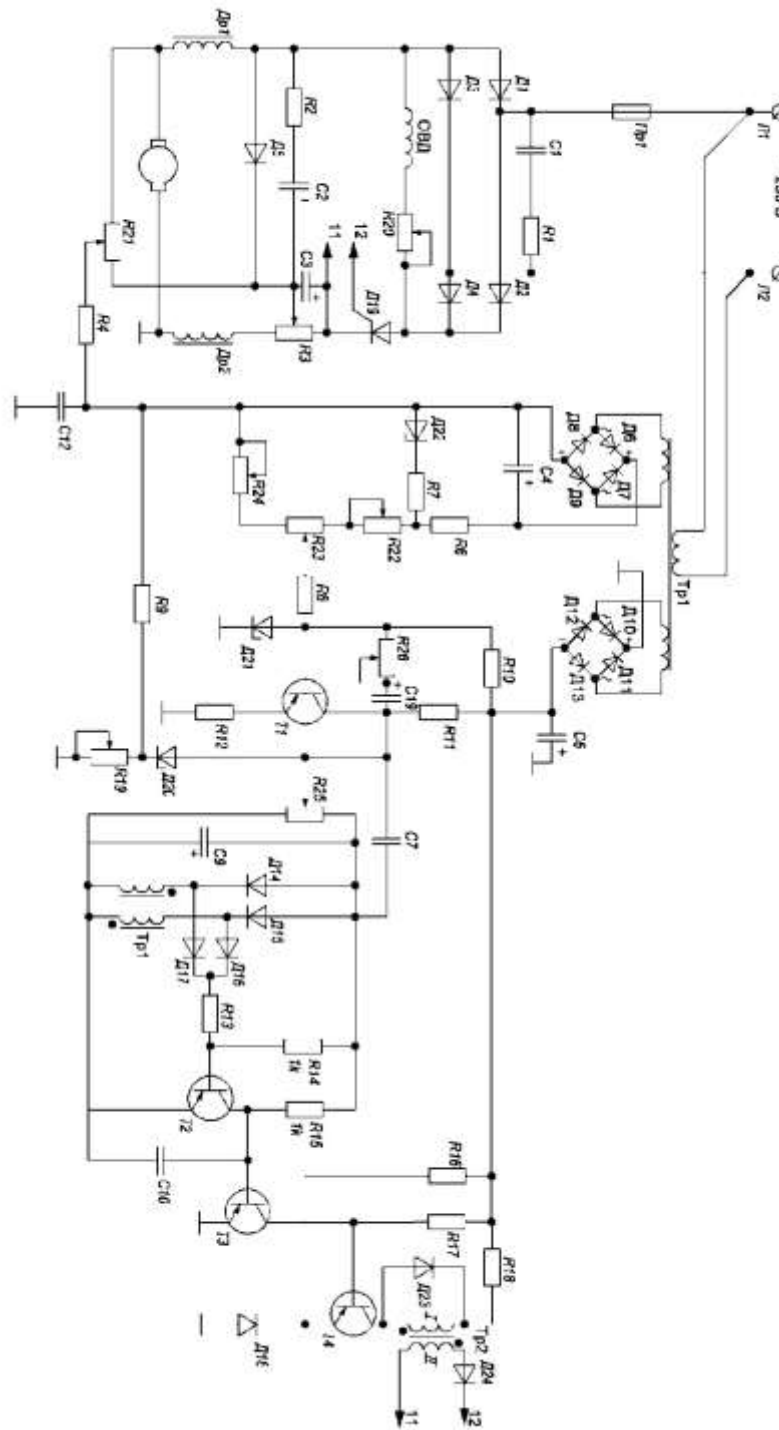


Рисунок 1.13 – Принципова схема електроприводу ЦЕ1-4

Цей електропривод складається з наступних вузлів: силовий міст, задатчик швидкості обертання, тахометричний міст, регулятор проти-ЕРС, генератор пилкоподібної напруги, формувач імпульсів, обмежувач граничного струму.

Чим вище двигун змінного резистора R3, тим сильніше впливатиме струм якоря на результуючий сигнал і чим лівіше R21 – тим більша частка напруги якоря. Далі до сигналу пропорційного проти-ЕРС, що має негативну полярність, додається напруга завдання. І тому служить вузол задатчика швидкості обертання. Задатчик швидкості обертання є ізольованим джерелом напруги. Рівень вихідної напруги якого можна налаштовувати. Він складається з діодного мосту Д6...Д8, обмотки трансформатора Т1, параметричного стабілізатора R6, R7, Д22 та потенціометрів, що регулюють напругу завдання. Потенціометрами R22 та R24 задаються межі регулювання швидкості обертання, а R23 – поточне значення. Ця напруга завдання послідовно з'єднується з сигналом з тахометричного моста через резистор R4. Полярність сигналу завдання збігається з полярністю сигналу мосту тахометра при нульовому струмі. Результуюча напруга надходить на вхід регулятора проти ЕРС через резистор R8. Регулятор прот іво-ЕРС – це підсилювач постійного струму із загальним емітером, який зі збільшенням сигналу із задатчика зменшує свою провідність. Регулятор проти-ЕРС виконаний на біполярному транзисторі прямої провідності Т1. Тому переміщенням двигуна змінного резистора R22 змінюється мінімальна швидкість, а R24 - максимальна. Резистор R8 та стабілітрон Д21 служать для захисту бази транзистора Т1 від небезпечної напруги. Підсилювач охоплений гнучким зворотним зв'язком через конденсатор С19 і R26, тобто він є аперіодичним ланкою. Вихід регулятора проти-ЕРС з'єднаний з вузлом струмообмеження. Вузол струмообмеження – це стабілітрон Д20 та потенціометр R19. Він обмежує напругу на виході регулятора проти-ЕРС величиною обернено пропорційною поточному значенню проти-ЕРС. Сигнал із виходу регулятора проти-ЕРС надходить на вхід СІФУ.

СІФУ (система імпульсно-фазового управління), використовується для генерації відпираючого імпульсу струму на тиристор, синхронно з частотою мережі живлення. При цьому імпульс зсувається за часом. СІФУ в

електроприводі ЦЕ1-4 працює за вертикальним принципом, тобто в ньому вхідна напруга порівнюється з поточним значенням напруги синхронізованого генератора з мережею. Як генератор синхронізованого з мережею використовується ГПН (генератор пилкоподібної напруги). СІФУ складається з ізолюваного джерела живлення (трансформатор Тр1, діоди Д14, Д15, конденсатор С9), ДПН та АЛЕ (нульоргану або компаратора). До ДПН належать такі елементи: транзистора прямої провідності Т2, діоди Д16, Д17, конденсатор С10, резистори R13, R14, R15. Транзистор Т2 працює у ключовому режимі. Це досягається за рахунок замикання зсуву надходить на базу транзистора з трансформатора Тр1, через діоди Д16, Д17 і резистор R13. Коли транзистор замкнений, то конденсатор С10 заряджається через резистор R15 струмом, що мало змінюється. Коли миттєве значення напруги мережі зникає, то діоди Д16 і Д17 запіараються і на транзистор Т2 приходить зсув зсуву через резистор R14. Транзистор Т2 відмикається і через нього конденсатор С10 розряджається. При надходженні наступного напівперіоду цикл повторюється. Ця пилкоподібна напруга з'єднується послідовно з напругою з виходу регулятора проти-РС. Отримана величина, що складається з пилки зміщеною напругою регулятора проти-ЕРС, щодо загального дроту, негативну область, приходить на вхід нуль-органу. Так як транзистор Т3 - це біполярний транзистор прямої провідності, то нульорган, виконаний за схемою із загальним емітером, відмикається тоді, коли на його вході негативне зміщення напруга. Так як ДПН видає лінійно зростаючу напругу, а на виході регулятора проти-ЕРС напруга завжди негативне, то час затримки між настанням нової напівхвилі мережевого напруги і відкриттям транзистор Т3 буде обернено пропорційно напрузі регулятора проти-ЕРС. Колекторний ланцюг транзистора Т3 з'єднаний з базою формувача імпульсів (ФІ). ФІ зібраний на транзисторі прямої провідності Т4. Він працює у ключовому режимі. Для надійного замикання Т4 його емітерний ланцюг включений джерело позитивного напруги, зібраного на діоді Д18 і резисторі R16. Він

використовується для зворотного зміщення транзистора Т4, тим самим зводячи колекторний струм до мінімуму за відсутності імпульсу, що відмикає. Отриманий таким чином імпульс через імпульсний Тр2 подається на затвор КУВ, тим самим відмикаючи його.

Незважаючи на архаїчність схеми електроприводу ЕТО1, такий алгоритм управління реалізується і в сучасних блоках, наприклад, в системі управління KBLC [107], виробництва KB ELECTRONICS, INC.

Регулятор оборотів KBLC розрахований управління двигуном приблизно тієї ж потужності, як і ЕТО1. Функціональні можливості такі самі: стабілізація швидкості за допомогою спостерігача проти-ЕРС і струмообмеження. Різниця тільки в електронних компонентах, що використовуються: привід ЕТО1 виконаний з використанням виключно дискретних компонентів, а в приводі KBLC використовується мікросхема зчотиревенного операційного підсилювача. Цим досягається простота налаштування незалежності роботи регулятора від навколишньої температури.

Залежно від модифікації регулятора швидкості, він може підключатися до мережі змінної напруги рівнем 110 або 230 В. Цей привід крім регульованої напруги якоря видає ще нерегульоване, але випрямлене, напруга для обмотки збудження. Принципова схема приводу показано рис. 1.14.

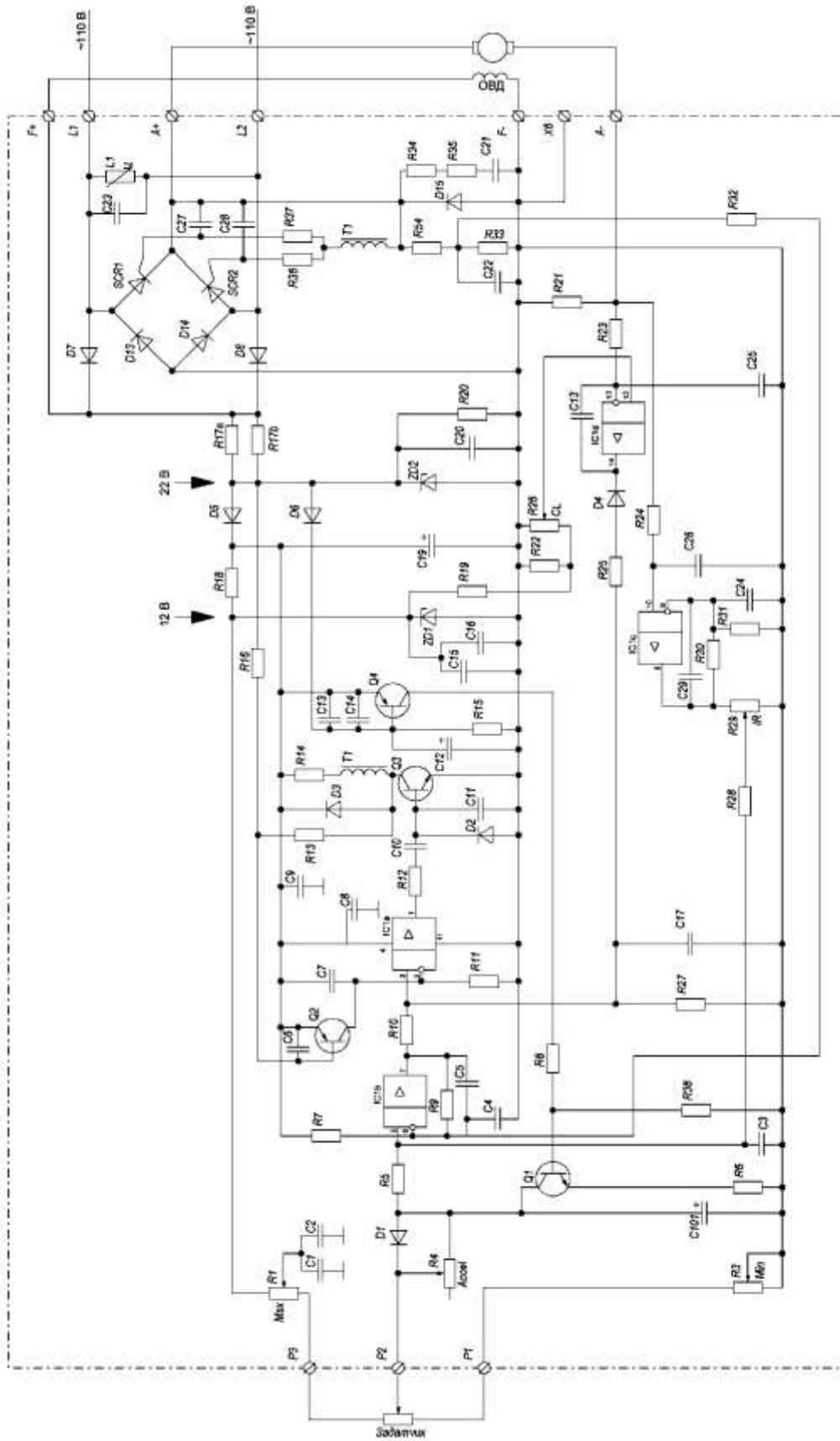


Рисунок 1.14 – Принципова схема електроприводу KBLC

KB ELECTRONICS, INC

Електропривод працює в такий спосіб. Паралельно затискачам, підключеним до мережі живлення, стоїть конденсатор С23 і варистор L1. Вони служать захисту від кидків напруги. Обмотка збудження двигуна (ОВД) з незалежним збудженням підключається до виходу випрямного моста утвореного діодами D7, D8, D13, D14. Середня напруга на ОВС обчислюється за формулою

$$U_{овд} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U, \quad (1.6)$$

де  $U_{овс}$  - напруга на обмотці збудження двигуна;

$U$  - СКЗ напруги мережі.

Тобто для мережного напруження рівного 110В, середнє значення струму ОВС ДПС дорівнюватиме 60 Вольтам, а для 230 Вольт - 103 Вольта. Цей випрямляч використовується для отримання 22 і 12 Вольт необхідних для живлення регулятора. Якір двигуна підключений до виходу випрямного моста, утвореного діодами D13, D14 і тиристорами SCR1, SCR2. Розмір сили струму якоря вимірюється шунтом R21, а напруга дільником, що складається з R54, R33, C22. Електронні компоненти R34, R35, C21 та діод D15 є демпфером комутаційних процесів у тиристорах SCR1 та SCR2.

Вони призначені зменшення швидкості наростання напруги при замиканні. Напруга з шунту R21 надходить на ФНЧ (фільтр низької частоти), виконаний на операційному підсилювачі IC1с і елементів, що відносяться до нього. Також воно приходить на вузол струмообмеження, виконаний на операційному підсилювачі IC1d і елементів, що відносяться до нього. При нормальній роботі напруга на вході, що не інвертує, більше сигналу шунта і тому впливу на роботу регулятора IC1d не надає, так як вихідна напруга IC1d дорівнює напруги насичення інтегрального операційного підсилювача, а значить включений послідовно з виходом діод замкнений і не проводить струм. Напруга з виходу ФНЧ, пропорційне струму якоря, надходить на вхід

регулятора проти-ЕРС. Регулятор проти-ЕРС зібраний на диференціальному підсилювачі ІС1b і елементів, що відносяться до нього. До цього ж неінвертованому входу ІС1b приходить сигнал завдання, а інвертує приходить сигнал з дільника напруги якоря (R54, R33), зміщене в позитивну сторону резистором R7. Таким чином, на входах підсилювача ІС1b обчислюється значення проти-ЕРС і з нього проводиться віднімання напруги завдання. У ланцюзі негативного зворотного зв'язку регулятора проти-ЕРС паралельно з'єднані резистор та конденсатор. Тобто регулятор проти-ЕРС є аперіодичною ланкою. Напруга з виходу регулятора проти-ЕРС надходить на неінвертуючий вхід СІФУ. СІФУ виконано на інтегральному підсилювачі ІС1a і елементів, що відносяться до нього. СІФУ виконано за вертикальним принципом, тобто на ньому порівнюються рівні напруги на вході із сигналом внутрішнього генератора, синхронізованого із мережею. Внутрішнім генератором є генератор лінійно спадної напруги, виконаний на Q2, C7, R11. Генератор лінійно спадної напруги працює наступним чином. У нормальному режимі транзистор Q2 замкнений напругою усунення надходить через резистор R16. Коли транзистор Q2 замкнений, конденсатор C7 заряджається через резистор R11, тим самим зменшуючи напругу на вході компаратора ІС1a, що інвертує. Коли напівхвиля напруги мережі закінчується, то напруга на параметричному стабілізаторі утвореному R17a, R17b, C20, ZD2, R20 звертається в нуль, а значить база транзистора Q2 зміщується в прямому напрямку нульовою напругою на резисторі R16. В результаті конденсатор C7 швидко розряджається через Q2, а значить напруга на вході ІС1a, що інвертує, зростає до напруги живлення мікросхеми ІС1. Після цього цикл роботи генератора починається заново. Компаратор ІС1a порівнює це лінійно спадаюче на інвертуючому вході з напругою регулятора проти-ЕРС. Чим більша напруга на виході регулятора проти-ЕРС, там швидше переключиться вихід ІС1a у стан позитивного насичення. Імпульси з виходу СІФУ надходять на вхід формувача

імпульсів, виконаного на транзисторі Q3 через диференціюючий ланцюжок R12, C10. Перехід базаемітера транзистора Q3 захищений від зворотних викидів напруги та «брязкоту» напруги при перемиканні IC1a за допомогою зворотного діода D2 та конденсатора C11. Отриманий таким чином імпульс через поділ трансформатор T1 подається на керуючі електроди тиристорів, тим самим відмикаючи один з них, який в даний момент зміщений в прямому напрямку.

Якщо сила струму якоря двигуна збільшиться до такого рівня, що напруга на струмовимірювальному шунті R21 стане вище за уставку «CL», заданим потенціометром R26, то вихідна напруга вузла струмообмеження, виконаного на IC1d, буде зменшуватися, тим самим зменшуючи напругу на вході СІФУ, а значить та зменшуючи середню напругу на якорі двигуна.

Крім цього плата KBLC містить вузол завдання швидкості реакції збільшення напруги завдання і параметричні стабілізатори напруги рівного 22 і 12 Вольт. Схема завдання швидкості реакції збільшення напруги завдання складається з інтегруючої ланцюжка (D1, R4, C101) і схеми скидання запам'ятованого рівня швидкості при включенні, що складається з Q4, C12, C13, C14, R15. Інтегруючий ланцюжок уповільнює наростання напруги завдання, але не перешкоджає його зменшенню.

## **1.9 Системи підпорядкованого регулювання**

Всі раніше розглянуті алгоритми регулювання швидкості обертання електричного двигуна постійного струму мають лише один контур зворотного зв'язку змінного стану пов'язаної зі швидкістю обертання двигуна. Електронні блоки, що реалізують такий алгоритм управління, як правило, мають лише дискретні електронні компоненти. Додавання до раніше розглянутих алгоритмів керування двигуном постійного струму внутрішнього контуру

негативного зворотного зв'язку за силою струму якоря дозволить досягти наступних якісних поліпшень:

- покращити лінійність;
- зменшити вплив напруги мережі на швидкість обертання;
- прискорити реакцію зміну гальмівного моменту опору ротора двигуна;
- зменшити час розгону чи гальмування;
- підвищити точність;
- обмежити силу струму в розумних межах, що особливо важливо для двигунів із постійними магнітами, в яких вони можуть розмагнітись.

З іншого боку, внутрішній контур зворотного зв'язку не може якісно підвищити точність кінцевої установки статичної швидкості, тому у випадках, коли головним фактором у виборі алгоритму, реалізованому з системі керування електроприводом постійного струму, є ціна, то перевага надається одному з раніше розглянутих алгоритмів, будь-який з яких можливо реалізувати використовуючи тільки дискретні компоненти, так як електронний блок створений з використанням тільки дискретних електронних компонентів дешевше електронного блоку тієї ж вихідної потужності, але містить плівкові мікросхеми в кілька разів.

Розвиток технології виробництва плівкових мікросхем робить їх дешевшим, а значить і використання систем підлеглого регулювання кращим. Для цього були розроблені спеціальні аналогові мікросхеми, які реалізують підпорядковане регулювання двигуном постійного струму із зворотним зв'язком за швидкістю. Тим не менш, системи з одним контуром зворотного зв'язку або навіть з прямим керуванням без зворотного зв'язку використовуються в нових розробках електроприводів потужністю до 1 кВт. Наприклад, практично весь ручний механізований інструмент продовжує використовувати пряме керування напругою. Це пов'язано ще з тим, що один датчик струму для таких систем може виявитися дорожчим або найбільше

пристрою регулювання обертів без негативного зворотного зв'язку за силою струму якоря постійного струму.

Силу струму електроприводах вимірюють трьома способами. Порівняння всіх трьох способів виміру сили струму.

1. Шунт. У цьому випадку буде потрібно підсилювач постійного струму з дуже низькою напругою усунення наведеного до входу. Наприклад, якщо використовувати як підсилювач шунту, інтегральний операційний підсилювач загального призначення, у якого напруга зміщення наведена до входу рано близько 10 мВ, то для коректного вимірювання сили струму з точністю близько 10%, знадобиться розмах напруги на шунті більше 100 мВ. У цьому випадку, при необхідності вимірювати силу струму до 10А, буде потрібно шунт який, згідно із законом Ома і Джоуля-Ленца, виділятиме в довкілля рівну теплову енергію

$$P = U \cdot I = 100\text{мВ} \times 10\text{А} = 1\text{Вт}, \quad (1.7)$$

де  $U$  – падіння напруги на шунт;

$I$  – сила струму, що проходить через шунт.

Резистор потужністю 1 Вт має габарити більше, ніж напівпровідниковий тріод у корпусі ТО-220, які використовуються в більшості систем керування двигунами постійного струму як електронний вентиль. Фотографія резистора номінальною потужністю 1 Вт і, порівняння розмірів, транзистора в корпусі ТО-220, показано рис. 1.36. Номінальні параметри електронних приладів – це гранично допустимі параметри, при яких гарантовано роботу протягом 1000 годин, більш тривала експлуатація їх призводить до їх руйнування. У потужних резисторів, при цьому «іржавіють» висновки, аж до урвища.

Тому, для тривалої експлуатації електронного блоку, треба використовувати шунт із хоча б із дворазовим запасом по потужності. Резистор з номінальною потужністю, що дорівнює 2 Ваттам, займає ще більше місця. Фотографія резистора потужністю 2 Ватта і, порівняння розмірів,

транзистора в корпусі ТО-220, показано рис. 1.39. Крім того, шунт виділятиме тепло, яке має розсіюватися у зовнішньому середовищі, а значить корпус регулятора обертання з таким шунтом не можна робити герметичним та маленьким.

Проблему збільшення габаритів системи керування двигуном із струмовимірювальним шунтом можна вирішити використанням спеціальних аналогових мікросхем, призначених для посилення падіння напруги на шунті. Ці мікросхеми мають критично важливим для такого використання властивістю: у них дуже низька напруга зміщення, приведена до входу.

Наприклад, у мікросхеми типу ina216, виробництва Texas Instruments, вказана на етикетці напруга зміщення приведена до входу дорівнює 30 мкВ, що на 3 порядки нижче, ніж у чотиривіркового операційного підсилювача загального призначення (lm324 або tl084). При цьому ціна мікросхеми ina216 у digikey, офіційного дистриб'ютора texas instrument складає 608.73 долара/1000 штук, а мікросхеми lm324 становить 103 долара/1000 штук. Тобто дорожче у 6 разів. Відповідно, використання струмового шунта призводить до значного подорожчання конструкції. Крім того, такий метод не дозволяє зробити ланцюги керування ізольованими від силового перетворювача та має обмеження за напругою.

2. Датчик струму, що використовує ефект Холла. Ефект Холла – це поява напруги на затискачах провідника, поміщеного в постійне магнітне поле при протіканні по провіднику поперечного струму. У найпростішому випадку, він складається з магнітопровід, схожого на магнітопровід трансформатора, в якому прорізана поперечна щілина, в яку вміщена гібридна мікросхема з трьома висновками, що видає напругу пропорційне магнітному потоку через магнітопровід. У цей магнітопровід вставляється провід, у якого необхідно виміряти силу струму, що проходить через нього. Такий датчик Холла називається «датчик прямого посилення ефект Холла».

Фрагмент схеми системи керування indramat tdm 1.2, що містить датчик струму, показано на рис. 1.15. На схемі видно ланцюг компенсації напруги зміщення, що дорівнює приблизно половині напруги живлення, характерного для датчиків Холла прямого посилення. Вона складається з резистора R7 та потенціометра P3.

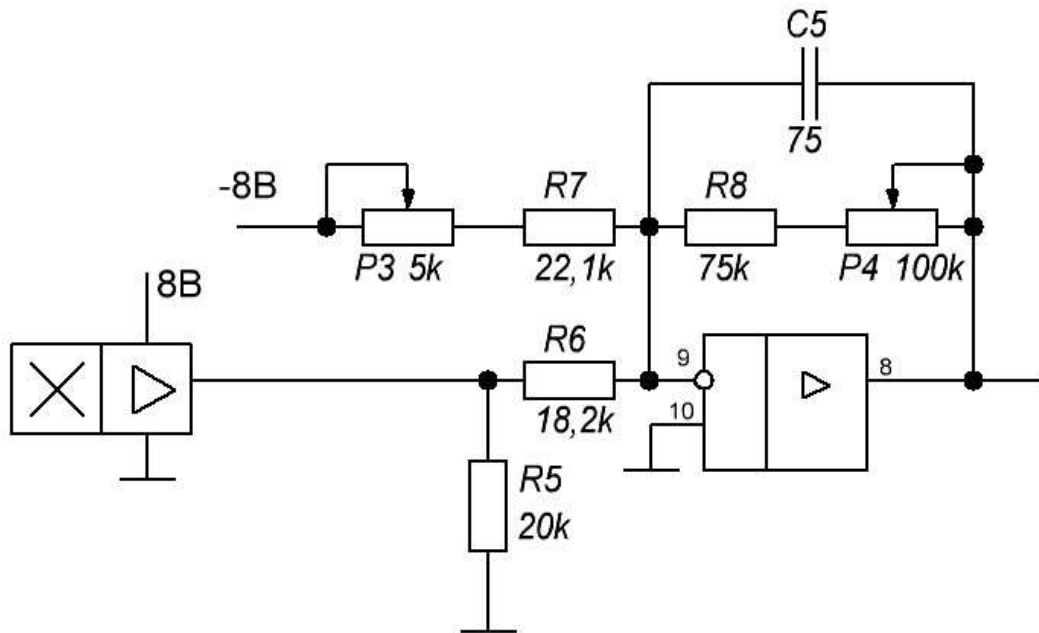


Рисунок 1.15 – Фрагмент схеми системи керування електроприводом indramat tdm 1.2

Такий датчик має дві недоліки:

- за відсутності струму у провіднику, в якому необхідно виміряти силу струму, він видає напругу приблизно рівну половині напруги живлення;
- існує дрейф нуля, близько 200мВ через гістерези.

Для їх компенсації датчик Холла додають контур розмагнічування феромагнітного сердечника. Такі датчики струму, на відміну від датчиків Холла прямого посилення, мають струмовий вихід. Тобто вони підключаються аналогічно до звичайних трансформаторів струму, коефіцієнт передачі струму якого вказується на етикетці. Схема датчика

струму LA55-P [106] показано рис. 1.16. Такі датчики струму називають "компенсаційний датчик Холла".

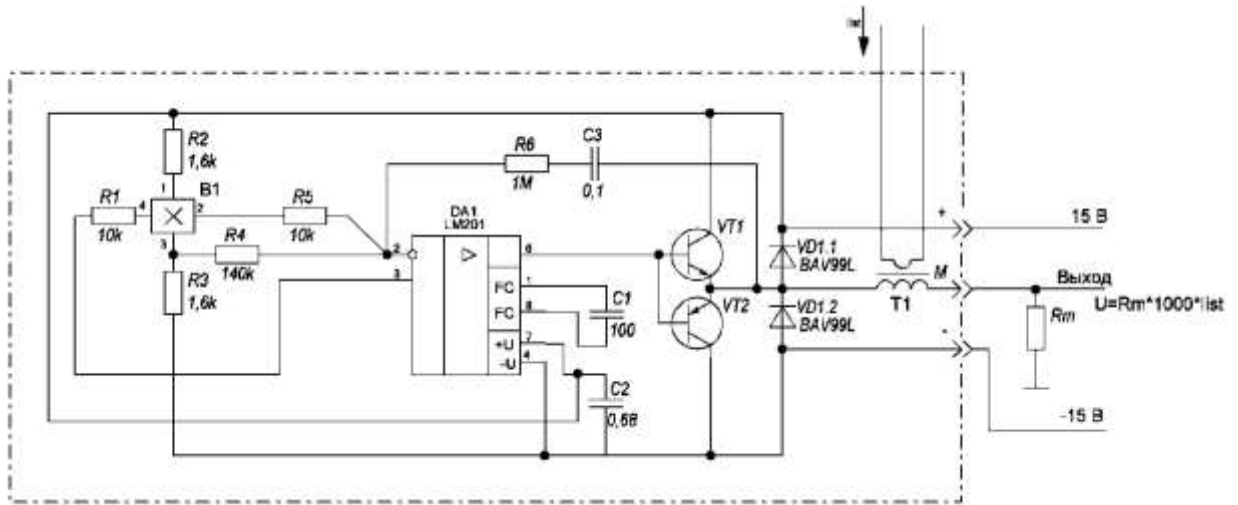


Рисунок 1.16 – Принципова схема датчика струму LA55-P

Як видно, датчик струму LA55-P складається з пасивного датчика Холла B1, напруга на поперечних пластинах якого посилюється диференціальним підсилювачем, що складається з інтегрального операційного підсилювача DA1 та емітерного повторювача, що складається з двох біполярних транзисторів VT1 і VT2. Напруга з виходу цього диференціального підсилювача подається на обмотку, що розмагнічує, яка вже за межами датчика струму з'єднується із загальним проводом через резистор. Таким чином, з точки зору зовнішнього ланцюга компенсаційний датчик Холла є вимірювальним трансформатором постійного струму.

Трансформатори струму мають дві істотні недоліки: вони великі і працюють на змінному струмі. Вони мають розміри навіть більше, ніж компенсаційні датчики Холла. Обидва типи датчиків струму містять трансформатор струму, тільки в магнітопроводі вимірювального трансформатора струму немає зазору і обмотки розмагнічування, а в компенсаційному датчику Холла є. Тому, щоб магнітопровід трансформатора струму не був у стані магнітного насичення феромагнітного сердечника, необхідно використовувати магнітну систему більшого розміру, ніж у

компенсаційному датчику Холла, в якому є обмотка розмагнічування і зазор в магнітопроводі для приміщення датчика Холла, який додатково лінеаризує ще криву намагнічування.

Системи керування електроприводом з однією петлею зворотного зв'язку використовуються у різноманітних приводах потужністю до 1 кВт, тому що в них немає постійного контролю сили струму. Вони використовуються, якщо необхідний компактний та дешевий електропривод.

В електроприводах потужністю 10 кВт і більше використовуються системи підпорядкованого регулювання, тобто системи з внутрішнім контуром негативного зворотного зв'язку струму. Додатково вони мають вузол захисту та діагностики. Основним зворотним зв'язком у більшості випадків є ООС за швидкістю. Регулятором швидкості є ПІ-регулятор, а регулятор підлеглого контуру швидкості – ПІ-регулятор або аперіодичний регулятор.

Тому найбільш важливим завданням є продовження терміну служби, а значить і діагностика несправностей, електроприводів з підлеглим керуванням, оскільки вони найдорожчі, важкі, складні та потужні з усіх інших типів.

Так як в них можуть бути силові перетворювачі різних топологій, залежно від року виробництва, потужності та швидкодії, але регулятори створені за однією загальною схемою, далі будуть аналізуватися тільки способи діагностики регуляторів підлеглого регулювання.

## 2. ІСНУЮЧІ СПОСОБИ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ У РЕГУЛЯТОРАХ

### 2.1. Перевірка електронних компонентів

Більшість напівпровідникових приладів виготовляються з кременю, через що іноді навіть триністори називають кремнієвими керованими випрямлячами. Необоротне руйнування кремнієвих біполярних напівпровідникових приладів виникає через розплавлення кременю, після кристалізації якого рп-перехід стає провідним в обох напрямках. Природно, якщо процес нагрівання продовжити до вибуху або випаровування вмісту напівпровідникового приладу, то рп-перехід стане просто ізолятором, але в цьому випадку корпус приладу матиме видимі механічні пошкодження.

Тобто в найпростішому випадку, справний біполярний напівпровідниковий прилад, тобто що складається тільки з р-п-переходів без МОП структур і переходів Шотки, повинен мати наступні властивості ВАХ між будь-якими двома висновками:

- механічно цілий корпус;
- між будь-якими двома висновками повинен бути нормально розімкненому стані або відмикатися при 400-700мВ.

З цього випливає, що в найпростішому випадку, перевірити біполярний напівпровідниковий прилад можна за допомогою мультиметра в режимі перевірки діодів. У цьому режимі мультиметр між щупами приладу видає струм у кілька мА, при напрузі нижче 1-3, показуючи на дисплеї падіння напруги між щупами. Деякі мультиметри при падінні напруги відповідного падіння напруги на типовому кремнієвому діоді видають короткий звуковий сигнал. ВАХ деяких типів мультиметрів у режимі перевірки діодів показано рис. 2.1. На рис. видно, що деякі прилади в режимі вимірювання стабілізують струм через навантаження, а інші просто використовують струмообмежуючий резистор, а fluke 175 може видавати напругу досягає 8 В.

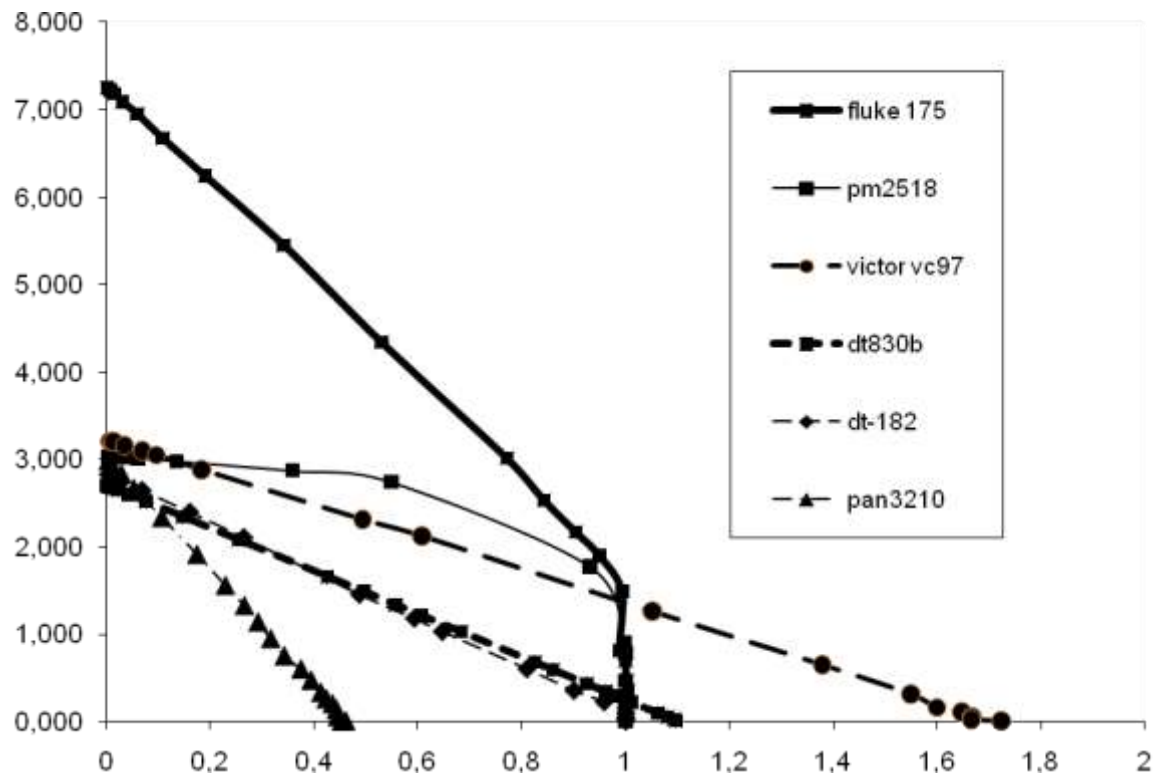


Рисунок 2.1 – ВАХ, у режимі перевірки напівпровідникових приладів, мультиметрів: fluke 175, philips pm2518, victor vc97, Carlo Gavazzi pan3210, dt182, dt-830b

Однак, плівкові мікросхеми, транзистори Дарлінгтона (складові) і тиристори мають складну внутрішню будову. Складовий транзистор може мати низький опір між базою (базами) і емітером, а майже всі КУВ між катодом і затвором мають низький опір, викликаний катодним шунтом.

Підвищена температура, крім повного руйнування напівпровідникового приладу, може призводити до деградації його характеристик, що викликаються зростанням дендритів та переміщенням домішок. Тобто прилад може нормально працювати при низькій напрузі та відповідно нормально перевірятися мультиметром. Такі несправності без випаювання з плати діагностувати практично неможливо. Для діагностики таких несправностей є характеріографи (curve tracer), який покаже всю ВАХ напівпровідникового приладу.

Крім того, таким методом неможливо перевірити уніполярні прилади, оскільки струм витоку через МОП структуру або через діод Шотки без випаювання електронного компонента неможливо.

Іншим швидко деградуєчим типом електронних компонентів є оксидні конденсатори та дроселі з магнітопроводом із порошкового заліза. В оксидних конденсаторах з часом, під дією електроліту, руйнується оксидний ізоляційний шар або випаровується електроліт, а в дроселях деградує полімерний ізолятор крупинок заліза, що одночасно є сполучною ланкою. Для діагностики несправності таких електронних пристроїв використовують спеціалізовані LCR-метри. Принцип їх роботи ґрунтується на вимірі активного та реактивного опору електричному струму на певних частотах, найчастіше на 1 кГц. Результат показує як індуктивності чи ємності з добротністю чи тангенсом кута втрат. Ці прилади значно дорожчі за мультиметри, оскільки вони значно точніші. Аналіз результатів вимірів LCR-метром вимагають великого досвіду, так як справні конденсатори на частоті близько 1 кГц мають електричну ємність в кілька разів менше номінальної і високий тангенс кута втрат, водночас повністю деградував конденсатор на частоті 100 Гц може показати ідеальні характеристики. Крім того, при деградації конденсатора спочатку збільшується тангенс кута втрат, величина якого зазвичай на корпус конденсатора не наноситься.

Крім напівпровідникових приладів, конденсаторів та дроселів на панелях регуляторів використовуються резистори. Ці деталі панелей електронних блоків перевіряються омметрами, що входять до мультиметрів. Влаштування вузла перевірки резисторів схоже на пристрій вузла перевірки напівпровідників.

Таким чином, для перевірки майже всіх простих типів електронних компонентів існують електровимірювальні прилади, які шляхом подачі електричного струму заданої частоти вимірюють його опір і на основі цих даних оператор робить висновок про його справність. Недоліком цього методу діагностики несправностей є необхідність випоювати деякі компоненти, які

зашунтовані паралельно стоять деталями, непридатність для напівпровідникових приладів, що володіють складною структурою, складність оцінки стану компонентів, що деградували і, найважливіше, цей спосіб діагностики не здатний протестувати функціонування панелі.

## 2.1 Перевірка функціонування всієї панелі

Методика налаштування діючого електроприводу та діагностика несправностей у зламаній системі керування електроприводу мало розроблена. У навчальній літературі, в основному, при описі стійкості електроприводу наводять різні критерії стійкості (кореневої, Гурвіца, Михайлова, Найквіста) для використання яких необхідно знати різні параметри об'єкта управління, які при налагодженні невідомі. Крім того, неможливо подавати на об'єкт тестуючі впливи для вимірювання відгуку, оскільки немає приладів для вимірювання механічних характеристик процесу та дуже велика потужність установки. Якщо навіть характеристики об'єкта управління відомі та розраховані за формулами диф. рівняння в операторній формі з ЛАФЧХ характеристиками, то налаштувальні двигуни, призначені для налаштування електроприводу, не проградуєвані.

Тому ці методики з теорії автоматичного регулювання марні.

З діагностикою несправностей ситуація схожа.

В даний час існує два способи діагностики несправностей у регуляторах.

1. Оцінювання АФЧХ розімкнутого контуру.
2. Методика, запропонована виробником конкретного електроприводу.

Перший метод вимагає дуже значних матеріальних витрат. У більшості випадків виробники електроприводів не пропонують стендів для перевірки панелей, що входять в електропривод і в керівництві не описують як його ремонтувати, а якщо такий стенд випускають, то він може мати істотні недоліки. Наприклад, на рис. 2.2 показано спрощену схему стенду СПМ-3



### 3 РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОГО СТЕНДУ

#### 3.1 Розробка алгоритму роботи стенду

Так як стенд призначений для тестування регулятора від електроприводу постійного струму підпорядкованого регулювання, то він повинен симулювати відсутні вузли в регуляторі. Тобто він має симулювати роботу ДПС, силового перетворювача, підсилювача, ШІМ чи СІФУ. Для простоти припустимо, що ці вузли системи управління не додають інерційності до загальної системи. Тоді вийде, що діагностичний стенд повинен симулювати лише роботу ДПС із встановленим на ньому тахогенератором. При цьому отримана структурна схема не повинна містити в собі зворотних зв'язків і коливальних ланок, так як при виготовленні симулятора можуть виникнути автоколивання, що важко зпередити. Але в той же час він повинен давати можливість виводити регулятор у режим автогенерації при неправильному налаштуванні. Так само бажано, щоб всі перетворення вхідних змінних у вихідні описувалися диференціальними рівняннями першого порядку. Структурна схема двигуна постійного струму показана рис. 3.1. З неї видно, що структурна схема має внутрішній зворотний зв'язок, який заважатиме при виготовленні стенду.

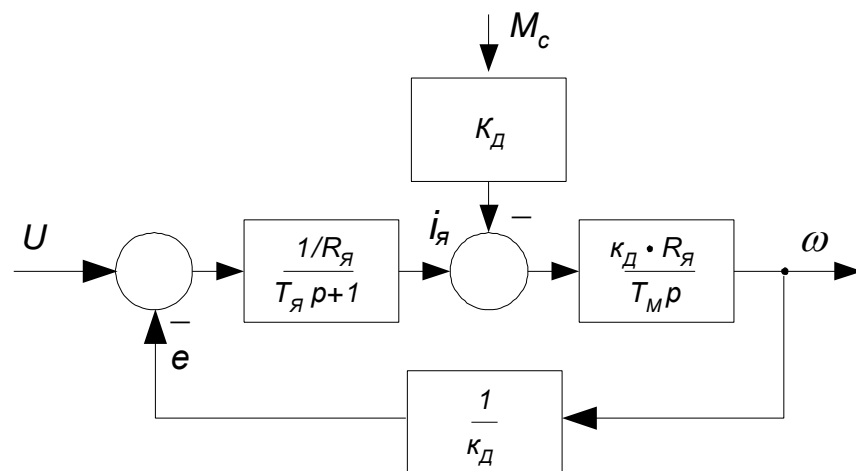


Рисунок 3.1 – Структурна схема двигуна постійного струму

Вихідною величиною в даному разі буде швидкість обертання  $\omega$ , яка регулюється зміною напруги  $U$ , що подається в якірне коло двигуна. Таким чином, треба встановити в динаміці залежність  $\omega=f(u)$ .

Запишемо рівняння електричної рівноваги для якірного кола двигуна, маючи на увазі, що в режимі двигуна напруга живлення обчислюється за формулою

$$u = L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + e, \quad (3.1)$$

де  $L_{\text{я}}, R_{\text{я}}$  - індуктивність і активний опір кола якоря;

$e$  - проти-ЕРС (електрорушійна сила) двигуна.

Для режиму розгону двигуна можна записати рівняння динаміки у вигляді [10]:

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{де}} - M_{\text{ст}},$$

де  $M_{\text{дин}}, M_{\text{де}}, M_{\text{ст}}$  - відповідно динамічний, двигунів і статичний моменти двигуна. Коли статичний момент невеликий, тобто  $M_{\text{ст}} \approx 0$ , то можна записати

$$J \frac{d\omega}{dt} = c i_{\text{я}},$$

звідки

$$i_{\text{я}} = \frac{J}{c} \frac{d\omega}{dt},$$

де  $J$  - момент інерції двигуна;  $c$  - стала струму.

Підставляючи знайдене значення  $i_{\text{я}}$  в рівняння електричної рівноваги кола якоря двигуна, після деяких перетворень дістанемо

$$\frac{R_{\text{я}} L_{\text{я}} J}{R_{\text{я}} c} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{R_{\text{я}} J}{c} \frac{d\omega}{dt} + c_e \omega = u \quad (3.2).$$

Введемо позначення:

$$\frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = T_{\text{я}}; \quad \frac{R_{\text{я}} J}{c c_e} = T_{\text{М}}; \quad \frac{1}{c_e} = k_{\text{Д}},$$

$$T_{\text{я}} = \frac{0,028}{0,28} = 0,1\text{с}.$$

Коефіцієнт двигуна  $k_D$  визначимо за паспортними даними для номінального режиму у статиці:

$$c_e \omega = u - i_a R_a,$$

Звідки

$$c_e = \frac{u - i_a R_a}{\omega}. \quad (3.3)$$

$$k_D = \frac{1}{c_e} = \frac{1}{\frac{u - i_a R_a}{\omega}} = \frac{\omega}{u - i_a R_a} = \frac{\omega}{U_{ян} - I_{ян} R_a} = \frac{314}{186 - 43 \cdot 0,28} = \frac{314}{173,96} = 1,805 \frac{\text{рад}}{\text{В} \cdot \text{с}}.$$

При цьому рівняння динаміки двигуна постійного струму в операторній формі матиме вигляд

$$(T_J T_M p^2 + T_M p + 1) \omega = k_D u.$$

Та остаточно передатна функція двигуна буде

$$W(p) = \frac{k_D}{T_J T_M p^2 + T_J p + 1} \quad (3.4).$$

Якщо  $T_M = \frac{R_a J}{c c_e} > 2T_J = 2\sqrt{\frac{L_a J}{c c_e}}$ , або  $R_a \sqrt{\frac{J}{c c_e}} > 2\sqrt{L_a}$ , то двигун при даному

співвідношенні параметрів буде аперіодичною ланкою другого порядку, а в протилежному випадку – коливальною ланкою.

Визначимо коефіцієнт  $T_M$ :

$$T_M = \frac{J R_a}{k^2}, \text{ де } k = \frac{1}{k_D},$$

тоді

$$T_M = J R_a k_D^2 = 0,28 \cdot 0,28 \cdot 3,258 = 0,255 \text{ с.}$$

Таким чином  $T_M = 0,255 > 2 * T_J = 0,2$ , тобто двигун є аперіодичною ланкою другого порядку.

Аналіз передаточної функції двигуна постійного струму з незалежним збудженням може бути представлена послідовним з'єднанням аперіодичної ланки першого порядку і інтегруючої ланки, охопленої від'ємним зворотнім зв'язком по частоті обертання.

З урахуванням наведеної структурної схеми двигуна отримуємо повний вираз для передаточної функції в залежності від обох зовнішніх впливів:

$$\omega = U_{\text{я}} \frac{\kappa_{\text{д}}}{T_{\text{м}} T_{\text{я}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1} - M_{\text{с}} \frac{R_{\text{я}} \kappa_{\text{д}} (T_{\text{я}} p + 1)}{T_{\text{м}} T_{\text{я}} p^2 + T_{\text{м}} p + 1} \quad (3.5)$$

Підставимо розраховані значення:

$$\omega = U_{\text{я}} \frac{1,805}{0,0255 p^2 + 0,255 p + 1} - M_{\text{с}} \frac{0,505 \cdot (0,1 p + 1)}{0,0255 p^2 + 0,255 p + 1}$$

Потрібно відмітити, що в статичному режимі (при  $p = 0$ ) формула (3.5) співпадає з відомою формулою механічної характеристики ДПС:

$$\omega_{\text{ст}} = U_{\text{я}} \kappa_{\text{д}} - M_{\text{с}} R_{\text{я}} \kappa_{\text{д}}^2 = \frac{U_{\text{я}}}{C\Phi} - M_{\text{с}} \frac{R_{\text{я}}}{(C\Phi)^2},$$

$$\omega_{\text{ст}} = 1,805 \cdot U_{\text{я}} - 0,912 \cdot M_{\text{с}}$$

Функціональна схема стенда з симулятором ДПС, який реалізує перетворення напруги РТ на напругу ТГ та датчика струму, показано на рис. 3.2.

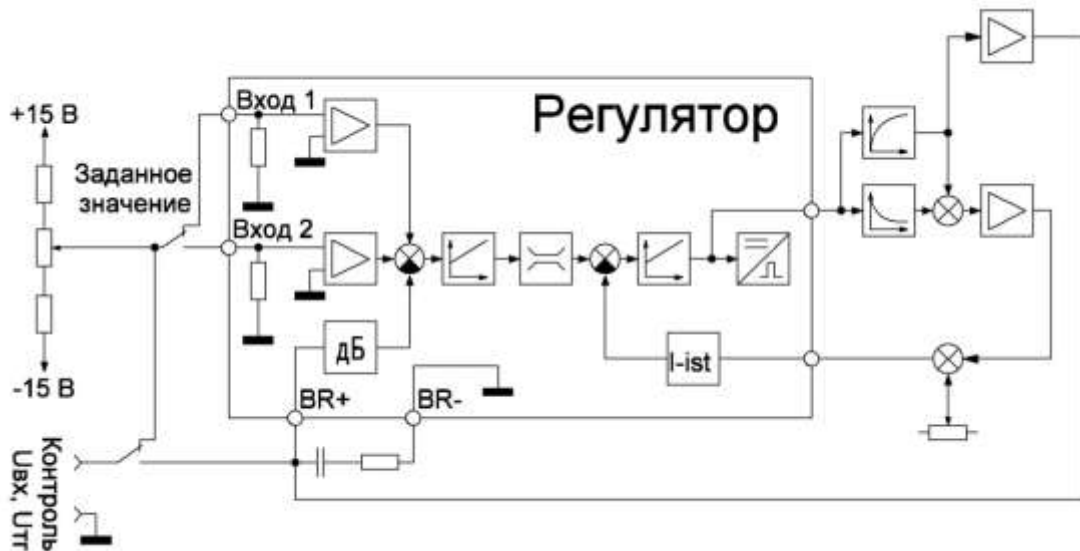


Рисунок 3.2 – Функціональна схема стенду діагностики системи керування із симулятором ДПС

### 3.2 Розробка підсилювача напруги

Тахогенератор змонтований на роторі двигуна постійного струму видає постійну напругу більше 30 В, а типовий операційний підсилювач може оперувати напругою з амплітудою нижче 10 В. Тобто в симуляторі двигуна постійного струму, що розробляється, повинен бути підсилювач постійного струму який буде перетворювати вхідний сигнал амплітудою амплітудою вище 30 В. Смуга пропускання у нього повинна бути не нижче 1кГц. Схема підсилювача напруги складається з мікросхеми ОУ загального призначення та двотактного вихідного каскаду на біполярних транзисторах, включених за схемою із загальним емітером. Ця схема, на відміну від інших раніше відомих, використовує лише два додаткові транзистори. Але в той же час має один дуже важливий недолік: сигнал з операційного підсилювача на бази транзисторів подається через резистори, які одночасно задають робочу точку транзисторів. Тому лише невелику частину від максимально допустимого вихідного струму ОУ пройде через перехід база-емітер транзистора, тим самим обмеживши посилення за потужністю та швидкодією.

Для подолання цих недоліків була розроблена схема, в якій сигнал з операційного підсилювача на біполярні транзистори подається через стабілітрони та використана мікросхема з внутрішньою корекцією, тим самим вдалося досягти 4 поліпшень:

1. Відсутність прив'язки до конкретної моделі мікросхеми операційного підсилювача, полегшивши тим самим майбутню експлуатацію.
2. Зменшення кількості використаних електронних компонентів.
3. Розширення смуги пропускання на кілька декад (більше ніж у сто разів), оскільки у стабілітрона порівняно з резисторами у 100 разів менше диференціальний опір.
4. Дозволяє створювати підсилювачі, розраховані на вихідну напругу рівну 400В, без погіршення інших показників.

Схема підсилювача показано рис. 3.3.

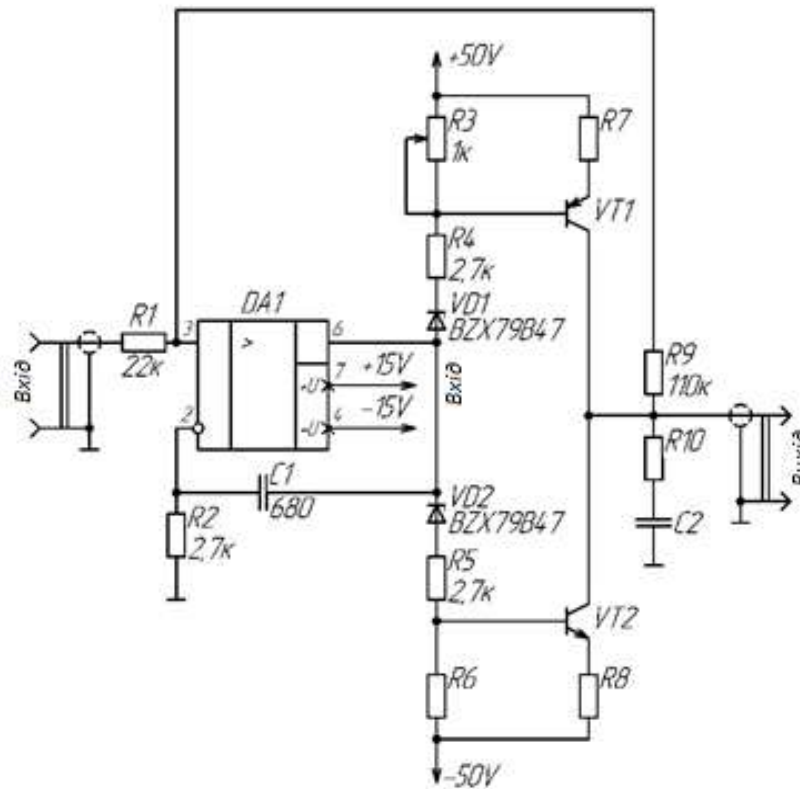


Рисунок 3.3 – Схема підсилювача постійного струму

Використовувати у вихідному каскаді польові транзистори не рекомендується, оскільки за її використанні виникають високі нелінійні спотворення. R2 та C1 запобігають автогенерації підсилювача за рахунок зменшення посилення ОУ по змінному струму. R4 і R5 обмежується струм стабілітронів VD1 і VD2 на допустимому рівні.

Резистори R6 і R3 використовуються для протікання зворотного струму колектора (у довідниках позначаються як  $I_{CBO}$  або  $I_{KBO}$ ) та встановлення струму спокою транзисторів VT1 та VT2. Резистори R7 і R8 обмежують максимальний струм транзисторів у допустимих межах і створюють місцевий зворотний зв'язок, що сприяє температурній стабільності, їх значення

Транзистори VT1 і VT2 служать для масштабування слабкого сигналу операційного підсилювача, вони вибираються з розрахунку  $I_{CEO} \cdot S$ , де  $I_{CEO}$

гранично допустима напруга колектор-емітер при обірваній базі  $V$  повна напруга між плюсом і мінусом живлення.

Діоди Зенера  $VD1$  і  $VD2$  зміщують вихідний сигнал операційного підсилювача на величину, необхідну управління транзисторами. Їх напруга стабілізації вибирається на один-два номіналу менше (5%-10%), ніж напруга між загальним проводом та шиною живлення емітера відповідного транзистора. При дуже великих напругах живлення, опір  $R9$  може наблизитися до 1 МОм, що не рекомендується, так як це мінімальна допустима величина опору ізоляції у вторинних ланцюгах. У цьому випадку на виході підсилювача можна використовувати дільник напруги.  $R10$  та  $C2$  служать для поліпшення якості перехідного процесу.

Для аналізу впливу параметрів мікросхеми операційного підсилювача та узгоджених пар напівпровідникових тріодів, схема була протестована з двома моделями мікросхем ОУ різної швидкодії ( $\mu A741$  с  $SR=0,5$  В/мкс та  $TL081$  с  $SR=8$  В/мкс) та двома типами комплементарних пар транзисторів. Усього вийшло 4 схеми, номінали налаштовуваних компонентів якої показані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Номінали настроюваних компонентів схеми підсилювача постійного струму

Компонент	Схема			
	$\mu A741$ , TIP3xC	TL081, TIP3xC	741, BDX5xC	TL081, BDX5xC
DA1	$\mu A741$	TL081	$\mu A741$	TL081
C2, нФ	47	2,2	4,7	перемичка
R6, Ом	470	470	560	560
R7, R8, Ом	47	47	22	22
R10, ком	7,5	8,2	8,2	4,6
VT1	TIP32C	TIP32C	BDX54C	BDX54C
VT2	TIP31C	TIP31C	BDX53C	BDX53C

Таким чином, розроблена схема підсилювача постійного струму показує найкращі результати при використанні складових транзисторів та

швидкодіючого ОУ, хоча для симулятора ДПС підходить будь-який вибір активних компонентів.

### 3.3 Розробка принципової схеми

Для тестування розробленого алгоритму роботи симулятора двигуна постійного струму була розроблена принципова схема діагностичного стенда для електроприводу СТП-5. Спрощена принципова схема стенду показана рис. 3.4, у цій схемі не показаний фрагмент необхідний перевірки спрацьовування захистів.

У цього електроприводу принципова схема регулятора відрізняються конструкції ІПП, підсилювача та силового перетворювача: у нього силовий перетворювач виконаний на БТІЗ.

Опис роботи стенду.

R30 та R31 є задатчиками швидкості обертання.

C6 і R29 запобігають спрацьовування захисту обриву тахогенератора.

R1, R3, R4, DD1, DA1.1 – генератор меандру частотою 8,5 кГц, необхідний функціонування вузла контролю обриву тахогенератора.

VD1, VD2, R2, DA1.2 – вузол захисту стенду від несправностей у модулі управління.

R5, DA1.4, C3, R7 – аперіодична ланка перетворююча напруга на виході регулятора струму сигнал тахогенератора.

R10, R13, DA2.3, C6, VD3, VD4, R21, R22, R23, R24, R27, C5 – підсилювач постійного струму необхідний узгодження рівнів.

R6, R7, R8, R14, R15, R20, C2, C4, DA1.3, DA2.4 - вузол реалізує виконання формули (3.5).

R16, R17, DA2.1 – симуляція зовнішнього гальмівного моменту.

R26, R25, R28, DA2.2 – підсумовування двох складових напруги на датчику струму, одне з яких залежить від виходу РС.

С7, L1 – Загороджувальний фільтр на 8,5 кГц, потрібний для запобігання взаємному впливу ланцюга контролю обриву тахогенератора та вузла узгодження рівнів ТГ з ОУ.

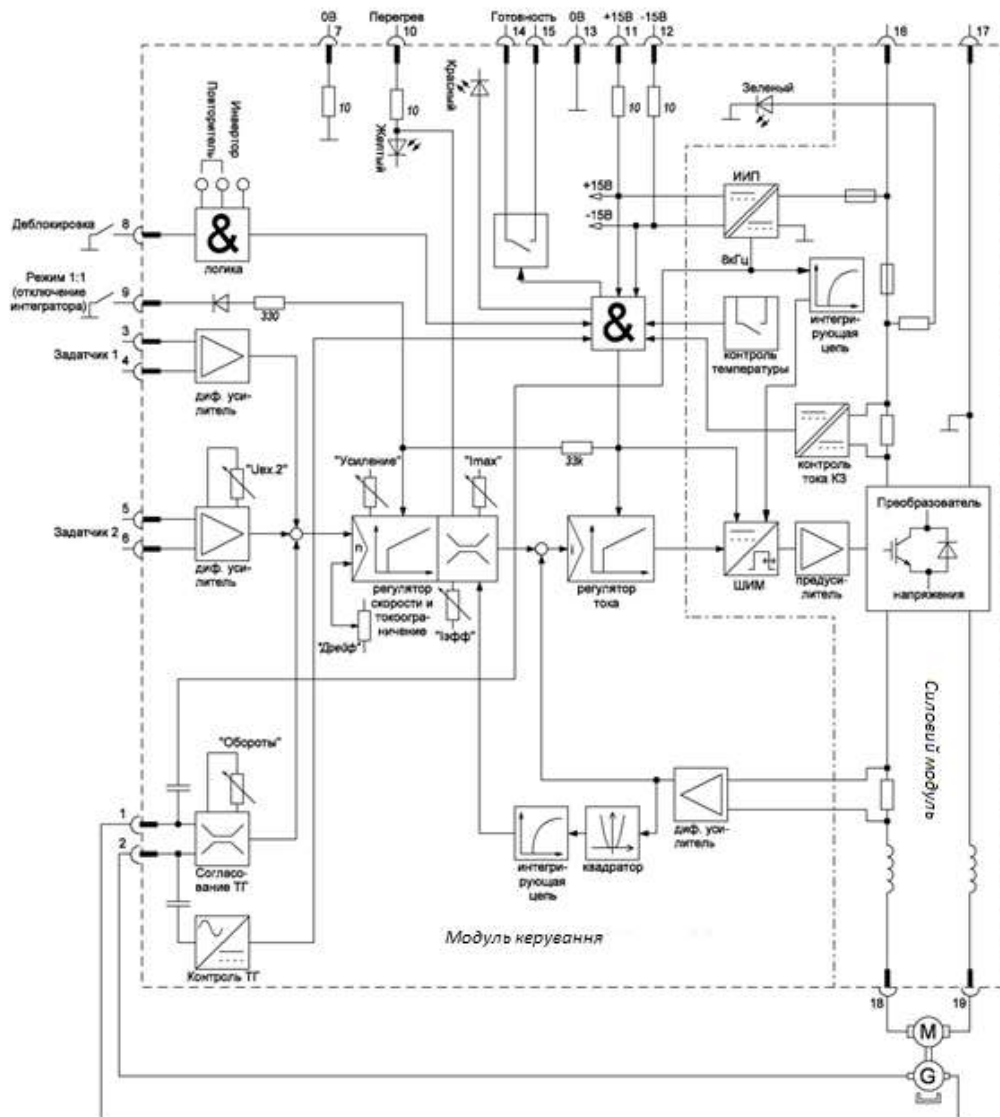


Рисунок 3.5 – Принципова схема розробленого стенду

## ВИСНОВКИ

1. Діагностичний стенд можна зібрати, використовуючи лише 3 мікросхеми малого ступеня інтеграції, 6 дискретних напівпровідникових приладів, 30 резисторів, один дросель та 7 конденсаторів, в результаті підсумкова ціна виходить на кілька порядків дешевше, ніж діагностичний стенд «ТЕСТ-Д».

2. Отримано спрощене рівняння двигуна постійного струму, на основі яких можна створити симулятор ДПС, придатний для вбудовування в стенд діагностики плат системи управління ДПС.

3. У підсилювачі постійного струму підвищеної напруги необов'язково використовувати 4 високовольтні транзистори, достатньо двох.

4. МОП-ПС, у підсилювачі узгодження з входом ТГ, використовувати як вихідний каскад посилення із загальним джерелом не можна.

5. У підсилювачі постійного струму, схема якого показана на рис. 3.4, вихідний каскад краще робити на складових транзисторах, так як в цьому випадку цей підсилювач матиме ширшу смугу пропускання при низьких навантаженнях.

6. Найбільший вплив на швидкодію підсилювача напруги з дискретними біполярними транзисторами на виході та мікросхемою ОУ на вході має тип мікросхеми ОУ, а не тип тріодів на виході.

7. Розроблений підсилювач постійного струму з мікросхемою ОУ та двома тріодами на виході, працює, без помітних лінійних спотворень, у смузі частот від 0 Гц до 10 кГц.

## Список використаних джерел

1. Зеркалов Д.В. Енергозбереження в Україні [Електронний ресурс] : У п'яти книгах. Книга друга: Організація використання енергоресурсів. Довідник / Д. В. Зеркалов. – Електрон. дані. – К. : Основа, 2009.
2. Онушко В.В., Шефер О.В. Електричні машини: навчальний посібник. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – 536 с.
3. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій: Підручник. - К.: Вища шк., 1995. - 519с.
4. М.С. Сегеда «Електричні мережі та системи». Підручник - Львів. Видавництво Національного університету «Львівська політехніка»,2007.
5. Зорін В.В., Штогрін Є.А., Буйний Р.О. Електричні мережі та системи: навчальний посібник для студентів вищ. техн. навч. закл.– Ніжин ТОВ “Видавництво”Аспект-поліграф”, 2011. – 248 с
6. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепиков В. Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. — К.: Либідь, 2005. — 680 с.
7. Ппп
8. Ддж
9. Рроо
10. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. — 2-ге вид., перероб. — К.: Либідь, 2007. — 656 с.

# ДОДАТКИ

## 2. EXISTING METHODS OF DIAGNOSING FAILURES IN REGULATORS

### 2.2. Inspection of electronic components

Most semiconductor devices are made of silicon, which is why transistors are sometimes called silicon-controlled rectifiers. Irreversible destruction of silicon bipolar semiconductor devices occurs due to the melting of silicon, after crystallization of which the pn junction becomes conductive in both directions. Naturally, if the heating process is continued until the explosion or evaporation of the contents of the semiconductor device, the pn-junction will simply become an insulator, but in this case the device body will have visible mechanical damage.

That is, in the simplest case, a working bipolar semiconductor device, i.e., consisting only of p - n junctions without MOSFET structures and Schottky junctions, should have the following I-V characteristics between any two terminals:

- mechanically whole body;
- between any two terminals must be normally open or open at 400-700mV.

It follows that in the simplest case, you can check a bipolar semiconductor device using a multimeter in the diode test mode. In this mode, the multimeter between the probes of the device outputs a current of several mA, at a voltage below 1-3, showing the voltage drop between the probes on the display. Some multimeters emit a short beep when the voltage drops corresponding to the voltage drop across a typical silicon diode. The AC current of some types of multimeters in the diode test mode is shown in fig. 2.1. In fig. it can be seen that some instruments in measurement mode stabilize the current through the load, while others simply use a current-limiting resistor, and the fluke 175 can output voltages as high as 8V.

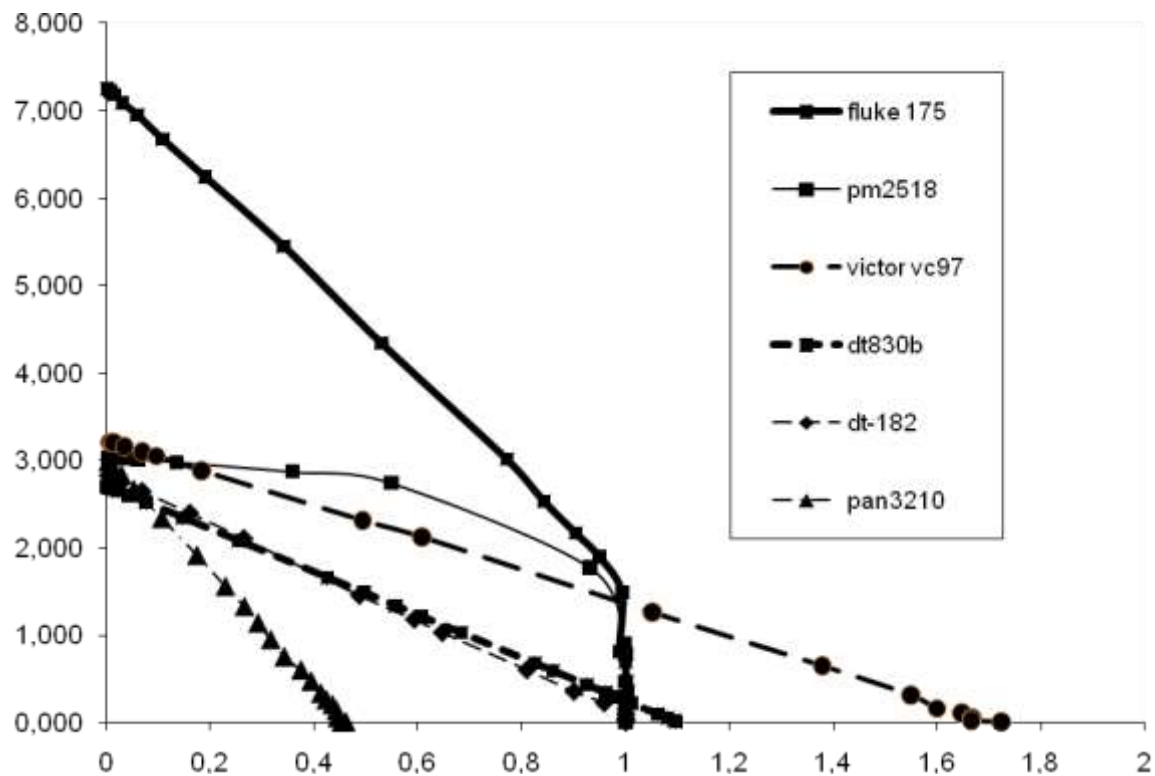


Figure 2.1 - IVA, in the mode of testing semiconductor devices, multimeters : fluke 175, philips pm2518, victor vc97, Carlo Gavazzi pan3210, dt182, dt-830b

However, film microcircuits, Darlington transistors (components) and thyristors have complex internal structures. A component transistor may have a low resistance between the base(s) and the emitter, and almost all CUVs have a low resistance between the cathode and the gate caused by the cathode shunt.

Elevated temperature, in addition to the complete destruction of a semiconductor device, can lead to the degradation of its characteristics caused by the growth of dendrites and the movement of impurities. That is, the device can work normally at low voltage and, accordingly, can be checked normally with a multimeter . It is almost impossible to diagnose such malfunctions without soldering from the board. For diagnosing such malfunctions, there are characteristic graphs ( curve tracer ) which will show the entire IVA of the semiconductor device.

In addition, it is impossible to check unipolar devices with this method, since the leakage current through the MOSFET structure or through the Schottky diode without soldering the electronic component is impossible.

Another fast-degrading type of electronic component is oxide capacitors and chokes with iron powder cores. In oxide capacitors, over time, under the action of the electrolyte, the oxide insulating layer is destroyed or the electrolyte evaporates, and in chokes, the polymer insulator of iron grains, which is also a connecting link, degrades. Specialized LCR meters are used to diagnose malfunctions of such electronic devices. The principle of their operation is based on the measurement of active and reactive resistance to electric current at certain frequencies, most often at 1 kHz . The result shows both inductances or capacitances with Q factor or loss tangent. These devices are much more expensive than multimeters because they are much more accurate. Analysis of the results of LCR-meter measurements requires a lot of experience, since good capacitors at a frequency of about 1 kHz have an electrical capacity several times less than the nominal one and a high tangent of the loss angle, while at the same time a completely degraded capacitor at a frequency of 100 Hz can show ideal characteristics. In addition, when the capacitor degrades, the tangent of the loss angle first increases, the value of which is usually not applied to the capacitor case.

In addition to semiconductor devices, capacitors and chokes, resistors are used on regulator panels. These parts of the panels of the electronic units are checked by the ohmmeters included in the multimeters . The arrangement of the resistor inspection unit is similar to the arrangement of the semiconductor inspection unit.

Thus, to check almost all simple types of electronic components, there are electrical measuring devices that measure its resistance by supplying an electric current of a given frequency, and based on these data, the operator makes a conclusion about its serviceability. The disadvantage of this method of fault diagnosis is the need to solder some components that are shunted by parallel parts, unsuitability for semiconductor devices with a complex structure, the difficulty of assessing the state of degraded components and, most importantly, this method of diagnosis is not capable of testing the functioning of the panel.

### 3.4 Checking the operation of the entire panel

The technique of setting up an operating electric drive and diagnosing malfunctions in a broken electric drive control system is poorly developed. In the educational literature, mainly when describing the stability of the electric drive, various stability criteria are given (Korenevoi, Hurvitsa, Mikhailov, Nyquist ), for the use of which it is necessary to know various parameters of the control object, which are unknown during debugging. In addition, it is impossible to apply test impacts to the object to measure the response, since there are no devices for measuring the mechanical characteristics of the process and the power of the installation is very large. If even the characteristics of the control object are known and calculated according to the formulas of diff . equations in the operator form with LAFCH characteristics, then the tuning motors intended for tuning the electric drive are not graduated.

Therefore, these techniques from the theory of automatic regulation are useless.

fault diagnosis .

Currently, there are two methods of diagnosing malfunctions in regulators.

3. Evaluation of the open circuit AFC.
4. The method proposed by the manufacturer of a specific electric drive.

The first method requires very significant material costs. In most cases, manufacturers of electric drives do not offer stands for checking the panels included in the electric drive and the manual does not describe how to repair it, and if such a stand is produced, it may have significant flaws. For example, in fig. 2.2 shows a simplified diagram of the SPM-3 stand (the name means the stand for testing modules). SPM-3 is designed for panels that are part of the PT-240 electric drive control system and similar seidel str-54k and kuka trm .

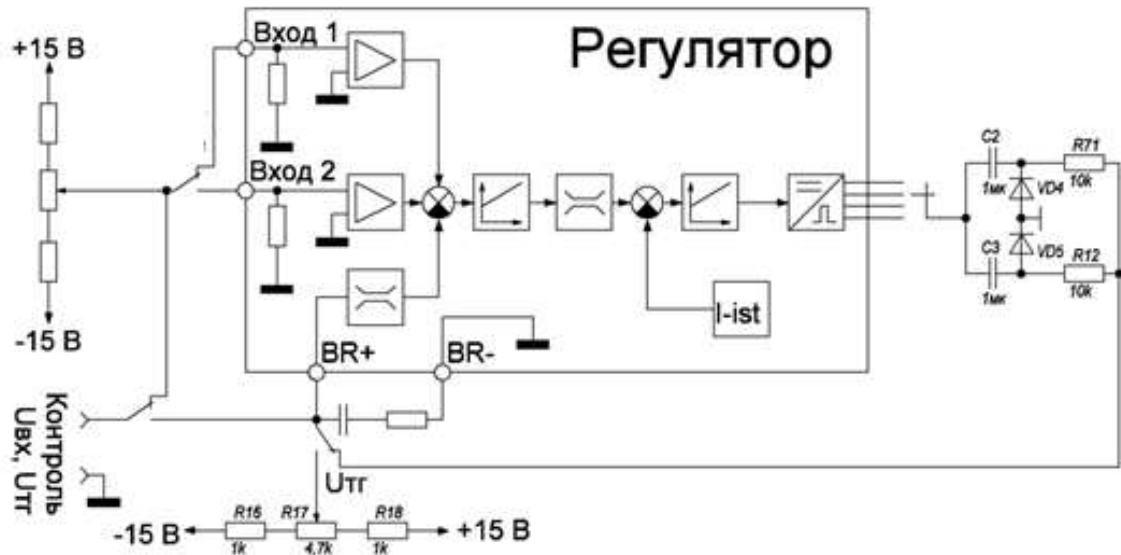


Figure 2.2 – Simplified scheme of the SPM-3 stand

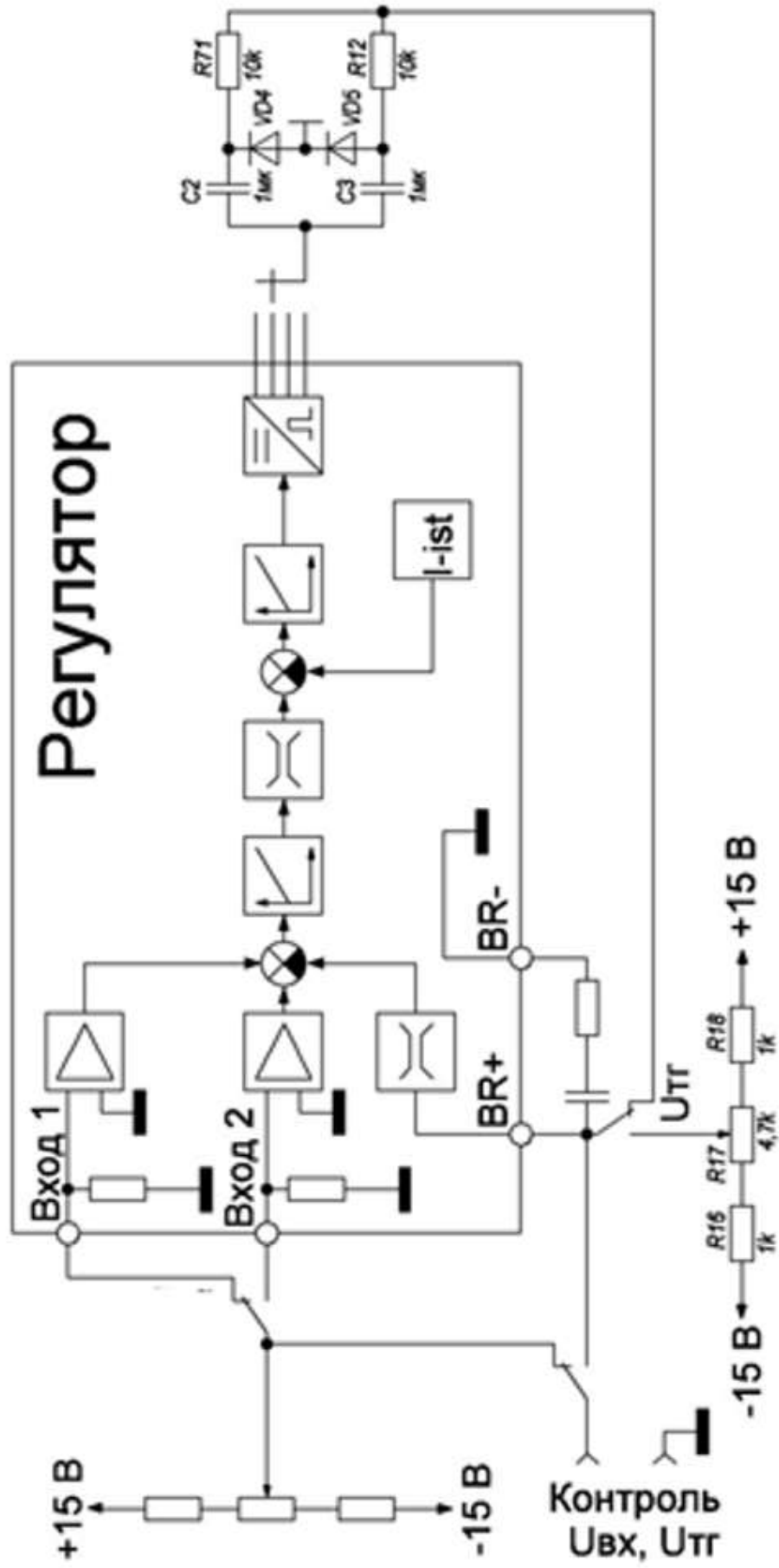
The schematic does not show the components related to power supply and protection testing.

Although this bench emulates velocity feedback, it is so weak that a working regulator behaves almost like a comparator with a delay.

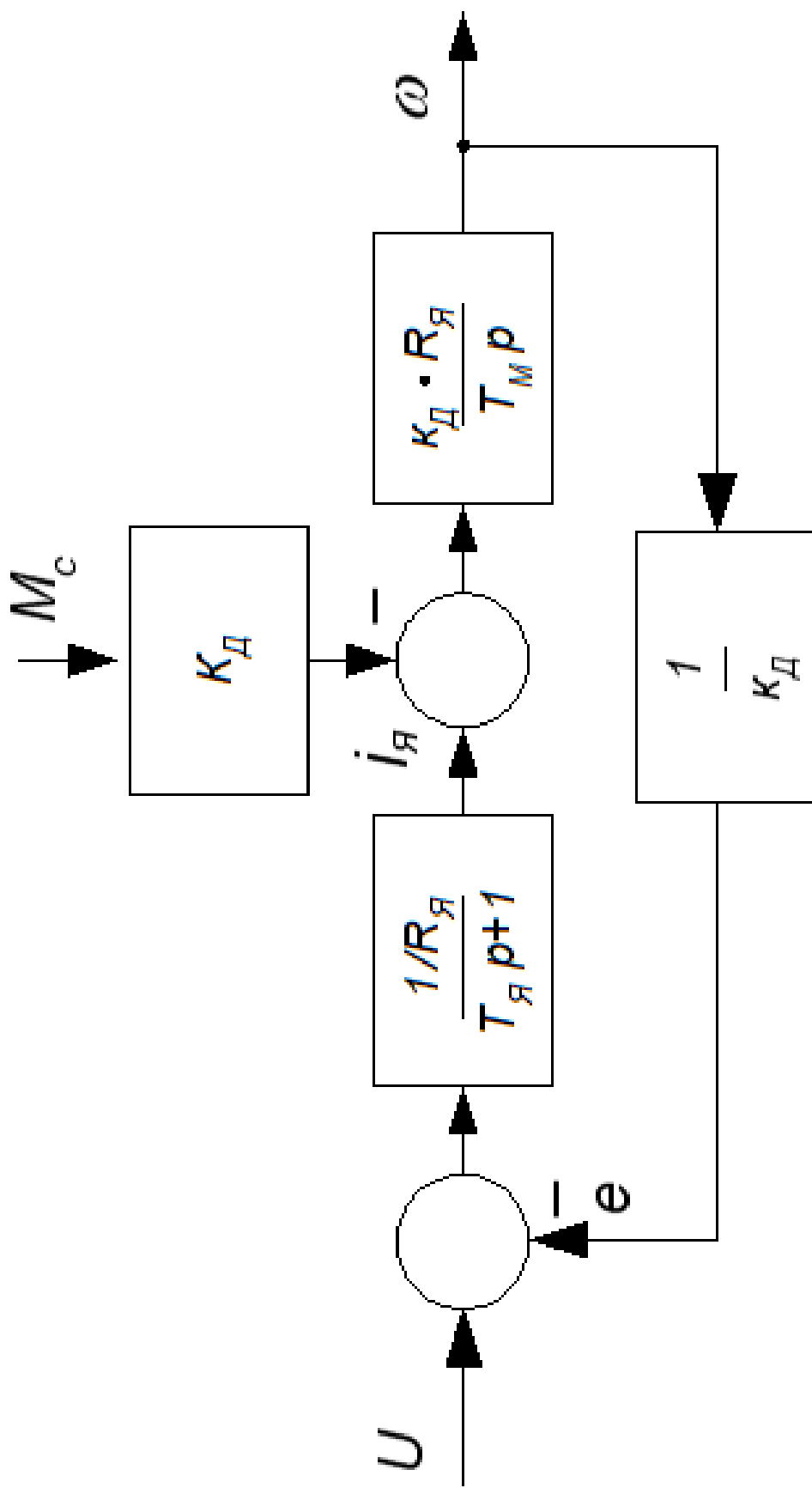
At present, there is no simple and affordable general technique for diagnosing panels (blocks or boards) from direct current electric drive control systems that control the engine according to the subordinate control algorithm, and the diagnosis of individual electronic components is not always possible.

# Спрощена схема стенду СІМ-3

1

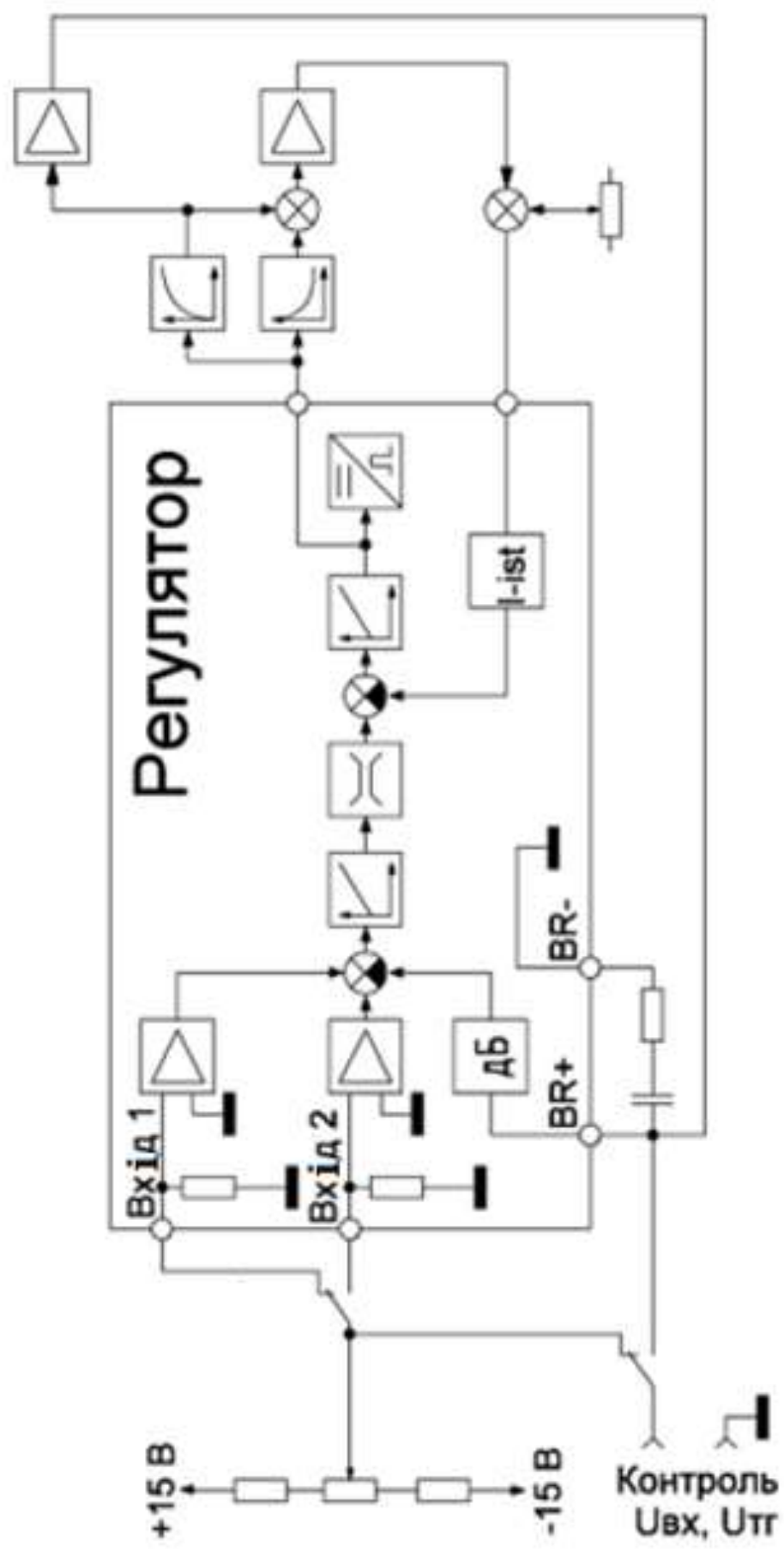


## Структурна схема двигуна постійного струму



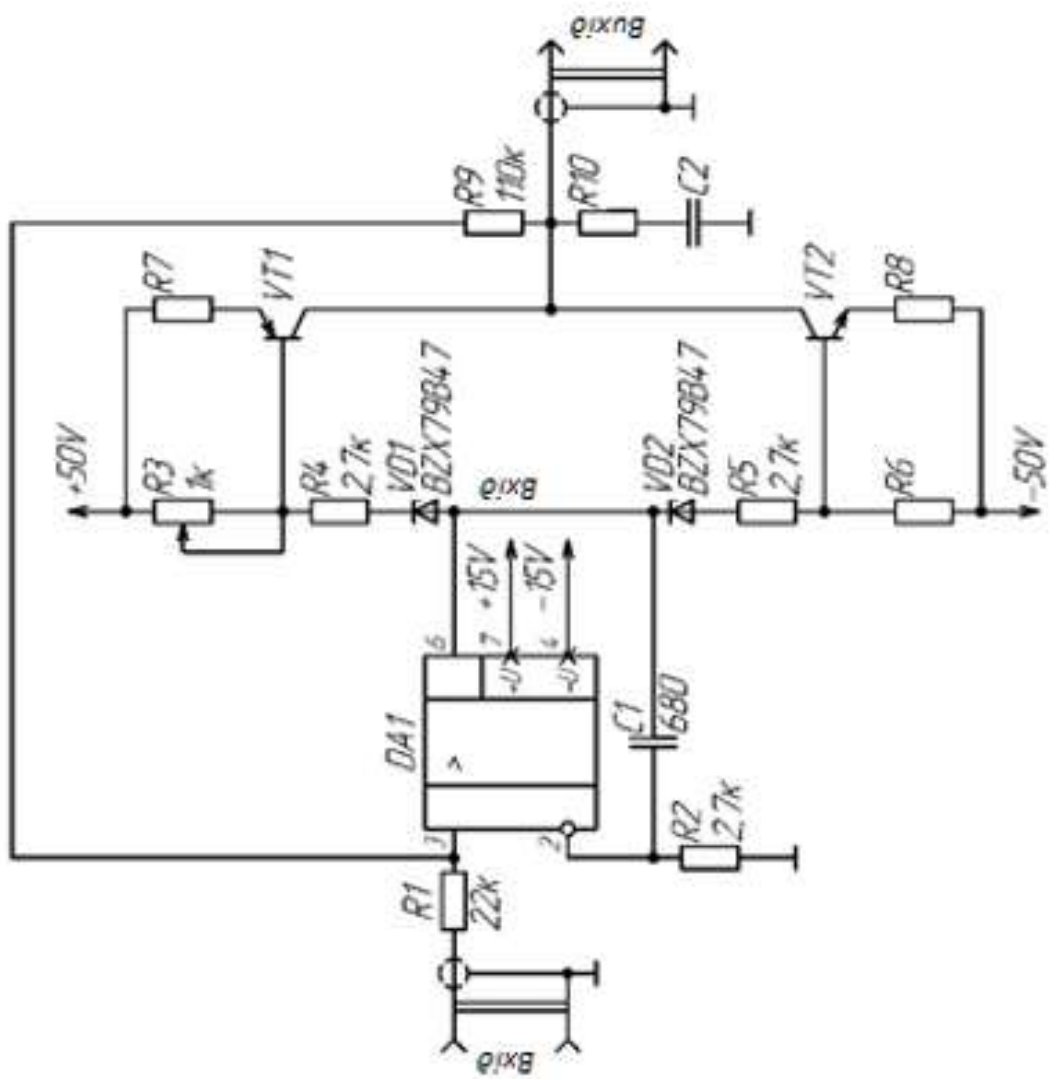
Функциональна схема стенду диагностики  
системы керування із симулятором ДПС

3



# Схема підсилювача постійного струму

4



# Принципова схема розробленого стенду

5

