



Міністерство освіти і науки України

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій

**Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та
електротехніки**

Конспект лекцій

з дисципліни

**«УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИМИ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ»**

**Для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та
заочної форми навчання, спеціальностей:**

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Харків

2023

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій
Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та
електротехніки

Конспект лекцій
з дисципліни
**«УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИМИ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ»**

**Для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та
заочної форми навчання, спеціальностей:
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Затверджено
рішенням Науково-методичної ради
Факультету ФЕРКТ
Протокол № 1
від 31.10.2023 р.

Харків
2023

УДК 621.3

E11

Схвалено
на засіданні кафедри
електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки
Протокол № 2
Від 25.09.2023

Рецензенти:

О.О. Мірошник, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Державного біотехнологічного університету;
М.Ю. Середин, консультант з обслуговування та ремонту електронного обладнання бурового верстату, бурового управління “УКРБУРГАЗ”.

Управління енергоефективними електромеханічними перетворювачами: конспект лекцій з дисципліни “ ” для здобувачів другого (магістерського) РВО, денної та заочної форми навчання спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. / Держ. біотехнол. у-т; упоряд.: Ю. М. Хандола, В. В. Гузенко. - Харків: [б. в.], 2023. 108 с.

Конспект лекцій з дисципліни “Управління енергоефективними електромеханічними перетворювачами” складені у відповідності до навчального плану. Видання включає рекомендації призначені для отримання практичних навичок в вирішенні теоретичних питань з дисципліни.

УДК 621.3

Відповідальний за випуск : В.В. Гузенко, канд. техн. наук, доцент

© Хандола Ю.М., Гузенко В.В. упорядкування, 2023
© ДБТУ, 2023

ЛЕКЦІЯ 1

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНОТРОНІКИ

План лекції:

- 1.1. Функціональна електромеханотроніка
- 1.2. Наукові основи електромеханотроніки
- 1.3. Зв'язок електромеханотроніки з електроенергетикою й електроприводом
- 1.4. Сучасна електромеханіка

1.1. Функціональна електромеханотроніка

Механотронні перетворювачі - це складні системи, які можна розглядати на різних рівнях деталізації й декомпозиції. Найбільшими елементами є енергетична (ЕПС) і інформаційна (ІПС) підсистеми, які виділяються за функціональною ознакою (рис 1.1).

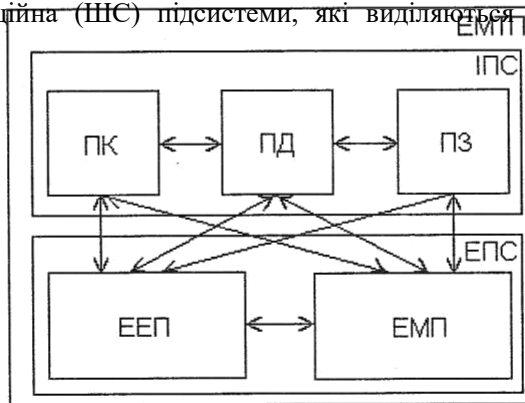


Рис. 1.1. Енергетична й інформаційна підсистеми ЕМТП

Основні вузли ЕПС - електромеханічний перетворювач (ЕМП) і енергетичний електронний пристрій (ЕЕП). Інформаційну підсистему утворюють пристрій керування (ПК), діагностування (ПД) й захисту (ПЗ).

Кожна підсистема вирішує свою, достатньо самостійну групу завдань.

Енергетична підсистема забезпечує перебіг процесів електромеханічного перетворення енергії відповідно до призначення перетворювача й до заданої

вихідної потужності. Ці процеси обов'язково супроводжуються вторинними енергетичними процесами іншої суті - електромагнітними, тепловими, гідродинамічними, аеродинамічними.

інформаційній підсистемі присутні інформаційні процеси керування й діагностування, які забезпечують перебіг за заданим законом і з необхідною точністю контрольованих енергетичних процесів, а також захист ЕМТП.

Елементну базу функціональної електромеханотроніки утворюють пристрої й прилади електромеханіки й електроніки. До перших належать електромеханічні перетворювачі (синхронні, асинхронні тощо), трансформатори, електровимірювальні прилади. До електронних приладів й пристроїв належать діоди, транзистори, тиристори й інші елементи, а також пристрої, які створюються на їх основі і утворюють електронні компоненти електромеханотроніки.

За функціональним призначенням електронні компоненти поділяють на електронні компоненти енергетичного (ЕКЕ) і інформаційного (ЕКІ) призначення.

До електронних компонентів енергетичного призначення належать перемикальні й випростувальні електронні пристрої, інвертори, перетворювачі частоти. ЕКЕ забезпечують зміну параметрів електроенергії (перетворення змінного струму в постійний і навпаки, регулювання частоти струму й напруги), а також перемикання в силових колах ЕМТП.

До основних ЕКІ належать транзисторні підсилювачі, імпульсні інформаційні пристрої, цифрові інформаційні пристрої, цифрові й аналогові перетворювачі, мікропроцесори.

Пристрої інформаційної підсистеми утворюються із електронних компонентів інформаційного призначення та інших приладів, які традиційно застосовують в автоматизованому електроприводі, системах автоматичного керування й системній автоматичності.

Функціональна електромеханотроніка об'єднує проблеми й вирішує завдання, які пов'язані з визначенням складу, порядку і взаємодії всіх частин (елементи, блоки, пристрої), які утворюють електромеханотронний перетворювач і його підсистеми. Внаслідок цього визначаються структури ЕМТП, ЕПС ® ШС, їхні принципові електричні схеми й рівні дискретності або, навпаки, інтеграції елементної бази.

Вирішення цих завдань здійснюється в декілька етапів.

На першому етапі, який можна назвати структурно-параметричним аналізом, вирішуються завдання, які пов'язані з вибором принципових технічних рішень і які визначають загальну структуру ЕМТП й основні параметри, що відображають зв'язки ЕМТП з іншими технічними пристроями й системами, а також умови функціонування ЕМТП в навколишньому середовищі. Внаслідок розв'язання завдань цього етапу вибирають один або декілька найраціональ-

ніших варіантів ЕМТП, які належить детальніше розглянути на подальших рівнях функціонального аналізу.

Наступним етапом є функціонально-параметричний аналіз. На цьому рівні розв'язують завдання, які пов'язані з вибором функціональних схем ЕМТП й аналізом процесів їхнього функціонування. Функціональні схеми складають за допомогою вивчення можливостей практичної реалізації вибраних на першому етапі структурно-параметричних варіантів ЕМТП. Для кожної схеми розраховують функціональні показники, характеристики й процеси у можливих режимах нормальної й аварійної експлуатації ЕМТП. Оцінюють відповідність отриманих показників й характеристик вимогам технічного завдання на ЕМТП. За необхідності вносять корективи у рішення першого етапу.

Внаслідок функціонально-параметричного аналізу відсіюються незадовільні структурно-параметричні варіанти ЕМТП й кількість останніх, зазвичай, скорочується до одного-двох.

Третім етапом функціонального аналізу є конструкторсько-технологічний розгляд найраціональніших за даними функціонально-параметричного аналізу варіантів. При цьому розв'язують завдання, які пов'язані з вибором детальних конструктивних схем і елементів ЕМТП, технологічних процесів їхнього виготовлення й компоновки, а також правил експлуатації.

1.2. Наукові основи електромеханотроніки

Можна також вважати, що електромеханотроніка є розділом електромеханіки, змістом якого є теорія, методи розрахунку й конструювання електромеханічних перетворювачів, суміщених з електронними компонентами зміни параметрів, керування, діагностики й захисту.

Звідси електромеханотроніка (ЕМТ) як наука утворюється на стику трьох класичних наук

$$EMT = EM + E + K, \quad (1.1)$$

де EM - електромеханіка; E - електроніка; K - кібернетика.

Аналогічно, як і електромеханіка, ЕМТ у механічному плані забезпечує розроблення електромеханічних перетворювачів, наприклад, електричних машин, електровимірних приладів і електричних апаратів, суміщених з електронними компонентами, які називаються електромеханотронними перетворювачами.

Структурне й функціональне суміщення ЕМП з електронними пристроями (ЕП) дає змогу отримати електромеханотронний перетворювач (ЕМТП).

До ЕП належать напівпровідникові прилади (діоди, транзистори, тиристори тощо) і статичні перетворювачі роду струму й частоти, інтегральні мікросхеми, мікропроцесори, мікро-ЕОМ, ЕОМ.

Наявність у ЕМТП двох підсистем (ЕПС і ШС) і, відповідно, одночасний перебіг в ЕМТП енергетичних й інформаційних процесів зумовлює принципову відмінність ЕМТП від електричних машин традиційного виконання.

Урахування присутності й взаємовпливу ЕПС і ШС в складі ЕМТП вимагає використання в електромеханотроніці законів й методології кібернетики. За їхньої допомоги здійснюється теоретичний аналіз й розробляються математичні моделі ЕМТП, які відповідають рівнянням

$$EMTP = EMP + EP \quad (1.2)$$

$$EMTP - EPC + IPC \quad (1.3)$$

Вихідним при цьому є фундаментальне положення кібернетики, відповідно до якого енергію й інформацію можна розглядати як різні функції одного і того самого аргументу - стану ЕМТП як складної динамічної системи.

Наявність ЕП перетворює ЕМТП у складний технічний пристрій, який конструктивно й функціонально об'єднує ЕМП із системами автоматичного керування (САК) або регулювання (САР), діагностики (САД) і захисту (САЗ)

$$EMTP = EMP + CAK(CAP) + CAD + CAZ + \dots \quad (1.4)$$

Склад і конструкція ЕМТП за приведеним рівнянням забезпечує виконання вимог підвищення надійності й стійкості роботи перетворювача, вихід на режими самонавчання й адаптації, а також можливість перебору й організації включення одних і тих самих модулів для отримання різноманітних функціональних реалізацій.

Зв'язок між інформаційними й енергетичними показниками стану ЕМТП не завжди є однозначним. Взаємовплив інформаційних та енергетичних характеристик проявляється через обмеження, які накладаються заданими показниками ЕМТП. Взаємозв'язок інформаційних й енергетичних процесів в ЕМТП, зазвичай, здійснюється за принципом зворотного зв'язку. Найбільше енергії за одиницю часу ЕМТП споживає або віддає в перехідних динамічних режимах роботи, тому зворотний зв'язок в найвищому ступені проявляється в динамічних режимах роботи.

Наявність в ЕМТП зворотних зв'язків призводить до необхідності опису й аналізу ЕМТП як багатоконтурної й багатопов'язаної динамічної системи.

Ці обставини, а також те, що ЕМТП є автоматичною системою, яка працює в режимах з неперервним або дискретним керуванням, змушують під час розроблення математичних моделей й методик аналізу й синтезу ЕМТП використовувати методологію й моделі тих розділів технічної кібернетики, які належать до теорії систем автоматичного керування. Ці методики становлять

наукову основу аналізу робочих процесів в ЕМТП. За їхньою допомогою можна аналізувати поведінку ЕМТП, оцінювати стійкість роботи, знаходити показники якості й характеристики точності функціонування.

Для математичного опису ЕМТП використовують передавальні функції й частотні характеристики, якщо ЕМТП можна розглядати як лінеаризовану систему. В інших випадках доцільно застосовувати векторно-матричні моделі й методи теорії простору станів та спектрального розкладання матриць.

Наукову основу синтезу ЕМТП, яка забезпечує розв'язання завдань вибору структур й параметрів елементів ЕПС та ШС, які відповідають заданим технічним вимогам за запасом стійкості, показниками якості й точності при урахуванні обмежень: за надійністю функціонування, за масо-габаритними показниками, за вартістю й іншими показниками, складають наступні положення.

погляду кібернетики це завдання можна розв'язувати двома способами:

першому з них вважається, що показники ЕПС є заданими й синтезу підлягають структура ШС й параметри її елементів; в другому вважаються заданими основні параметри й показники ЕПС та пристроїв ШС і синтезуються підсилювальні й коректувальні пристрої ЕМТП.

1.3. Зв'язок електромеханотроніки з електроенергетикою й електроприводом

Електромеханотронні перетворювачі є технічними пристроями, які призначені для використання в системах електропривода, генерування електроенергії та інших технічних установках.

Відокремлення електромеханотроніки в самостійний науковий напрямок електротехніки відбулося поступово і було зумовлено спочатку необхідністю удосконалення пристроїв електромеханіки та їхнім функціональним й конструктивним суміщенням з електронними приладами, а потім створенням нових електричних машин: вентильних й крокових двигунів, синхронних машин з самозбудженням тощо.

Під час обговорення питань удосконалення й створення нових електричних машин за допомогою електронізації у деяких спеціалістів виникла думка, що завдання, які розв'язували при цьому в електромеханотроніці, автоматизованому електроприводі й електроенергетиці, є однаковими і що відокремлення ЕМТ в окремий розділ електромеханіки є неправомірним. Це неодноразово обговорювали на наукових семінарах і нарадах й визнали помилковим за таких міркувань.

Відомо, що електричним приводом називають електромеханічний пристрій, який слугує для приведення в рух робочих органів машин й керування технологічними процесами і який складається з передавального пристрою, електродвигунного пристрою, перетворювального пристрою й керувального пристрою (ГОСТ16593-79. Електроприводи. Терміни й визначення).

Там само оговорено, що передавальним є пристрій, який містить механічні передачі й з'єднувальні муфти, необхідні для передачі механічної енергії, яку виробляє електричний двигун, виконавчому механізмові. Зазначено, що перетворювальний пристрій призначений для керування потоком електричної енергії, яка надходить з мережі, з метою регулювання режимів роботи двигуна

механізму. Він належить до енергетичної виконавчої частини керування електроприводом.

Керувальний пристрій в електроприводі - це інформаційна слабкострумова частина системи керування, яка призначена для фіксування й оброблення інформації про задавальні впливи й стан системи та формування на її основі сигналів керування перетворювальним, електродвигунним й передавальним пристроями.

Принципова різниця між ЕМТП і електроприводом полягає в тому, що керування в електроприводі здійснюється з урахуванням вимог, які задають робочий механізм й технологічний процес. Інформаційна підсистема ЕМТП розробляється й призначається для забезпечення роботи енергетичної підсистеми, яка містить ЕМП й ЕЕП, поза будь-яким робочим механізмом.

На сьогодні, можливо, точнішим визначенням електропривода може бути: ***електропривод - це електромеханічна система, яка складається з електродвигунного й перетворювального (електромеханотронного) пристроїв, системи керування, механічної передачі й робочого органа, яка призначена для приведення робочого органа в рух й керування цим рухом за необхідним законом.***

Це визначення електропривода, а також наведені вище формулювання, які стосуються електромеханотроніки й електромеханотронних перетворювачів, дають змогу навести структурну схему електропривода (рис. 1.2), з якої витікає, що ЕМТП треба розглядати як складний електротехнічний пристрій, який має свої енергетичну й інформаційну підсистеми (див. рис. 1.1) і який входить до складу електропривода й керується окремою системою автоматичного керування (САК) відповідно до призначення й вимог робочого механізму (РМ).

Так само вирішують питання і з генераторними агрегатами (рис. 1.3), які використовують в електроенергетиці. ШС, яка входить до складу ЕМТП, забезпечує його функціонування поза вимогами навантаження або, іншими словами, враховуючи вимоги, які витікають з принципу дії ЕМТП. Спеціальна

САК, яка показана на рис. 1.3 поза ЕМТП, забезпечує регулювання вихідних показників ЕМТП (напруга, частота струму) з урахуванням заданих номінальних значень і збурень, які залежать від режиму роботи й умов функціонування привідного двигуна й навантаження.

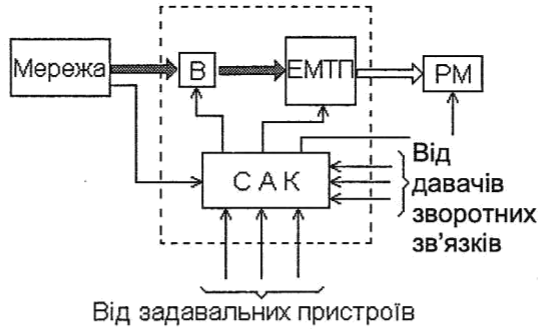


Рис. 1.2. Структурна схема електропривода

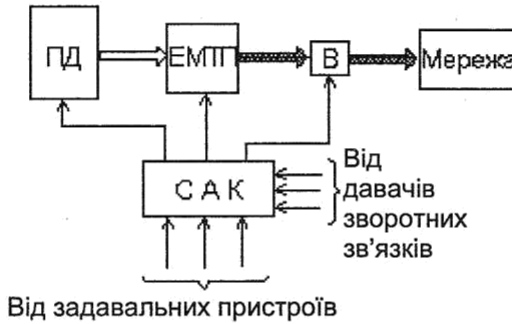


Рис. 1.3. Структурна схема генераторного агрегата

® окремих випадках, коли відомо призначення ЕМТП і його створюють для конкретного робочого механізму (або генераторного агрегату), ШС ЕМТП може бути суміщена з САК електропривода (агрегату).

У наступних розділах розглянуто основні елементи та пристрої електромеханіки й електроніки, які використовують у вигляді електромеханічних перетворювачів та електронних компонент в складі електромеханотронних перетворювачів.

1.4. Сучасна електромеханіка

Електромеханіка як наука забезпечує дослідження, розроблення й виробництво електромеханічних перетворювачів енергії, до яких належать в загальному випадку не тільки електричні машини, але й електричні апарати, електровимірні прилади та інші пристрої, в яких електрична енергія перетворюється в механічну й навпаки під час переміщення провідників у магнітному полі.

Теорія електромеханічного перетворення енергії базується на рівняннях електромагнітного поля (рівняннях Максвелла) та рівняннях Кірхгофа. Оскільки магнітне поле невіддільне від струмів, що його створюють, а струми не можуть існувати без магнітного поля, то в основі більшості сучасних методик розрахунку ЕМП знаходиться підхід, коли визначається зображення магнітного поля в робочих проміжках ЕМП і у просторі біля обмоток, обчислюються магнітні потоки й потокозчеплення обмоток і через них записують рівняння рівноваги напруг. Через струми і (або) потокозчеплення визначають електро- магнітні сили й моменти, які діють в ЕМП.

Як основну математичну модель ЕМП із безмежним спектром просторових і часових гармонік магнітного поля й будь-якою кількістю контурів на статорі й роторі в сучасній електромеханіці використовують модель узагальненого електромеханічного перетворювача - електричної машини з m обмотками на статорі й n обмотками на роторі.

Розрахунок власних і взаємних індуктивностей обмоток в ЕМП із порівняно невеликими повітряними проміжками зазвичай виконується з використанням понять про провідності, які відповідають потокам пазового, лобового й диференціального розсіяння.

До основних допущень, які використовують у розрахунках ЕМП, належать такі:

- головне (робоче) магнітне поле плоскопаралельне;
- індуктивні опори різного роду розсіянь не залежать від головного поля один від іншого;
- © зубчасті поверхні осердь статора й ротора можна замінити гладкими поверхнями і враховувати зубчастість за допомогою коефіцієнтів нерівномірності повітряного проміжку;
 - © магнітна проникність сталі в осердях безмежно велика, а вплив насичення на індуктивні опори враховують за допомогою коефіцієнтів насичення;
- робочі характеристики ЕМП розраховують з урахуванням тільки основних гармонік струму й магнітного потоку, нехтуючи вищими гармоніками;
- здебільшого не враховують вихрові струми в магнітопроводах.

До завдань електромеханіки, які виникли у зв'язку з електронізацією електромашинобудування і вимагають розв'язання, належать:

- створення теорії й методів розрахунку високопрецизійних і надмініатюрних ЕМП;
- розроблення математичних моделей і методик розрахунку ЕМП, які працюють разом із напівпровідниковими перетворювачами в несиметричних перехідних і імпульсних режимах;
- розроблення теорій і способів математичного моделювання ЕМП із постійними магнітами, які працюють у перехідних і несиметричних режимах;
- підвищення коефіцієнта віддачі перетворювачів, які працюють із несинусоїдними струмами й напругами.

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте електромеханотронні перетворювачі з погляду функціональної електромеханотроніки.
2. Опишіть енергетичну й інформаційну підсистеми електромеханотронних перетворювачів.
3. Подайте класифікацію електронних компонентів електромеханотронних перетворювачів.
4. Які завдання, вирішує функціональна електромеханотроніка; етапи вирішення цих завдань?
5. Як можна класифікувати електромеханічні перетворювачі?
6. Які наукові основи електромеханотроніки?
7. На яких класичних науках базується електромеханотроніка?
8. Які основні допущення використовуються у розрахунках ЕМП?
9. Які головні ознаки визначають риси нових сучасних систем електромеханіки?
10. Що є основною сутністю сучасної електромеханіки?

ЛЕКЦІЯ 2

План лекції

1. Електромеханічні перетворювачі
2. Спеціальні електромеханічні перетворювачі
3. Електромеханічні перетворювачі в електромеханотроніці

1. Електромеханічні перетворювачі

На основі теорії й технологій електромеханіки на теперішній час у світі щорічно виготовляють багато мільйонів електричних машин - електромеханічних перетворювачів. Кількість їхніх типорозмірів і модифікацій перевищує порядок $10^3 - 10^4$.

Залежно від роду струму, який віддається навантаженню або споживається з мережі, електричні машини - електромеханічні перетворювачі - поділяють на ЕМП:

* *змінного* струму:

синхронну.

явнополюсні з обмотками збудження,
які живляться постійним струмом;
неявнополюсні з обмотками збудження, які
живляться постійним струмом;
спеціальні:

- => реактивні;
з пазуроподібними полюсами;
- => індукторні;
- => з постійними магнітами;
- => гістерезисні;

асинхронні:

з короткозамкненим ротором;
з фазним ротором;
з масивним ротором;
з порожнистим немагнітним ротором;
лінійні;
дугові;
виконавчі;
тахогенератори;
колекторні;

трансформатори:

- двообмоткові;
- багатообмоткові;
- автотрансформатори;
- спеціального призначення:
 - => з обертовим магнітним полем;
 - => обертальні (лінійні й синусно-косинусні);

постійного струму:

0 з механічним комутатором-колектором:

спеціальні:

- з постійними магнітами;
- з безпазовим якорем;
- з друкованим якорем;
- уніполярні тощо.

Незважаючи на те, що колекторні двигуни постійного струму у два-три рази дорожчі від асинхронних короткозамкнених двигунів і менше надійні через наявність колектора, їх все ще поширено застосовують у всіх випадках, коли від ЕМП вимагається глибоке регулювання частоти обертання з високим коефіцієнтом віддачі (електротяга, кранові двигуни, прокатні стани, автоматика тощо).

Нижче буде показано, що заміна механічного комутатора-колектора напівпровідниковим комутатором дає змогу підвищити надійність машин постійного струму, зберігши незмінними їхні переваги перед машинами змінного струму щодо регулювальних можливостей.

2. Спеціальні електромеханічні перетворювачі

Поділ електричних машин на звичайні, або машини загального призначення, і спеціальні є умовним.

Машини, описані вище, належать до машин загального призначення й їх поширено застосовують практично у всіх галузях техніки. Тому вони більше відомі. Спеціальні ЕМП частіше застосовують як машини малої потужності в автоматиці, інформаційно-вимірювальній техніці, соціально-побутовій сфері тощо.

Наведемо короткі відомості про спеціальні ЕМП, оскільки часто саме вони є основою для створення електромеханотронних перетворювачів.

Синхронні генератори й тахогенератори з постійними магнітами відзначаються підвищеною надійністю через відсутність ковзного контакту й джерела постійного струму (ПМ). У них статор, ідентичний статорові звичайних СМ, - ротор може бути виконаний зіркоподібним (рис. 1.4, а), у вигляді циліндра (рис. 1.4, б), з пазуроподібними полюсами (рис. 1.4, в).

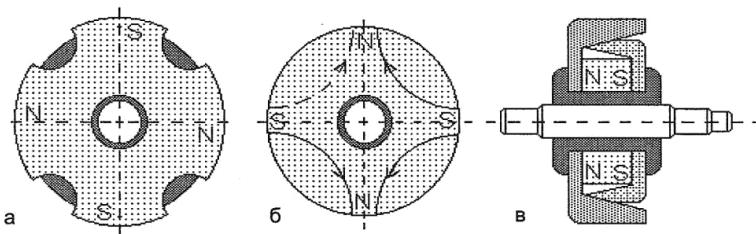


Рис. 1.4. Модифікації роторів із постійними магнітами

Недоліком СГ із постійними магнітами є неможливість регулювання вихідної напруги через канал збудження.

Синхронні двигуни з постійними магнітами мають статор такий самий, а на роторі, крім постійного магніту, можна розміщувати короткозамкнену обмотку типу вивіркової клітки, яка має значення пускової або демпферної обмотки.

Недолік - велика кратність пускового струму.

Реактивні синхронні двигуни не мають обмотки збудження на роторі явнопольсного виконання. Обертальний момент створюється за рахунок різниці магнітних провідностей ротора по поздовжній і поперечній осях. Вони' вирізняються надійністю конструкції, мають енергетичні й пускові характеристики, близькі до СД із постійними магнітами. До недоліків можна зарахувати те, що вони мають гірші синхронізуючі властивості.

Гістерезисні синхронні двигуни конструктивно виконують так, як і СД із ПМ, тобто з роторами з магнітотвердих матеріалів. На відміну від СД із ПМ, ротори яких попередньо намагнічують у спеціальних установках, ротор гістерезисного СД намагнічується обертовим магнітним полем статора під час пуску. Ці двигуни мають такі переваги: великі пускові й синхронізуючі моменти, незалежність моменту входу в синхронізм від моменту інерції, плавність входу в синхронізм, термостабільність характеристик, невелика кратність пускового струму, високий коефіцієнт віддачі, малий час розгону.

Велика механічна міцність і симетрія ротора дають можливість створювати гістерезисні СД на високі частоти обертання.

Недоліки: невисоке значення коефіцієнта потужності (0.3-0.45), схильність до гойдань ротора під час різких змін навантаження, висока вартість якісних магнітотвердих матеріалів.

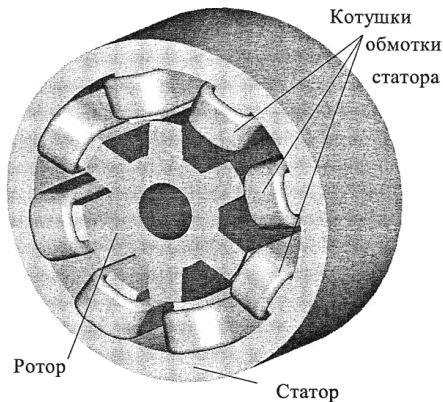


Рис. 1.5. Реактивний синхронний двигун

Індукторні синхронні машини мають зубчастий ротор без обмоток і статор із двома обмотками - змінного й постійного струму. Обмотка постійного струму є обмоткою збудження. Зміна потоку, який проходить через обмотку змінного струму й індукуює в ній змінну ЕРС, зумовлена зубчастістю ротора, який обертається. Частота зміни ЕРС залежить від кількості зубців ротора й частоти обертання ротора.

Індукторну СМ, яку використовують у двигунному режимі, називають *редукторним двигуном*.

За своїми властивостями індукторні СМ не відрізняються від звичайних, але поступаються за масо-габаритними показниками: їхні розміри й маса значно більші через те, що постійну складову магнітного потоку збудження корисно не використовують.

Двигуни з ротором, який котиться, мають статор із двома обмотками й ротор без зубців і обмоток. Обмотка змінного струму створює обертове двополюсне магнітне поле, друга обмотка, яка живиться постійним струмом, створює уніполярне поле. Під дією результуючого поля ротор переміщується по внутрішньому розточуванні статора з невеликою швидкістю.

Недоліки: підвищені вібрації й шуми, а також необхідність використання складних муфт для приєднання до привідних механізмів.

Однофазні асинхронні двигуни мають розподілену обмотку, яка розмі- шена в пазах осердя статора, займає дві третини периметра його розточки і живиться однофазним змінним струмом. Ротор, як правило, короткозамкнений. Якщо однофазний АД має одну тільки робочу обмотку, то він не розвиває пускового моменту. Для отримання пускового моменту однофазний АД пови- нен мати дві обмотки: робочу й пускову, які зсунуті одна щодо іншої на 90 електричних градусів.

Однофазні АД поступаються за своїми показниками трифазним АД, і їх застосовують тоді, коли немає джерел трифазного струму (у побутових при- ладах тощо).

Однофазні двигуни з екранованими полюсами мають статор, на полюсах якого розміщена однофазна обмотка, на роторі - короткозамкнена обмотка (рис. 1.6). Частина наконечника кожного полюса, яка відповідає збігаючій стороні, охоплюється короткозамкненим витком. Між наконечниками полюсів можна установлювати магнітні шунти.

Двигуни такого типу застосовують для привода побутових вентиляторів, електропрогрівачів, магнітофонів тощо.

Поворотні трансформатори являють собою малопотужні індукційні ЕМП змінного струму, які використовуються для перетворення кута повороту ротора в електричний сигнал - напругу, яка змінюється за відповідною залежністю від цього кута. Основними типами поворотних трансформаторів (ПТ) є двополюсні ПТ із двома взаємно перпендикулярними обмотками на статорі й такими самими на роторі, багатопольсні ПТ, індукційні редуктосини й індуктосини, функціональні ПТ і індукційні потенціометри.

Лінійні асинхронні двигуни мають витягнутий у площині магнітопровід із зубцями й обмоткою, яка створює біжуче магнітне поле. Ротор, який має форму паралелепіпеда, можна виконати з короткозамкненою обмоткою або масивним.

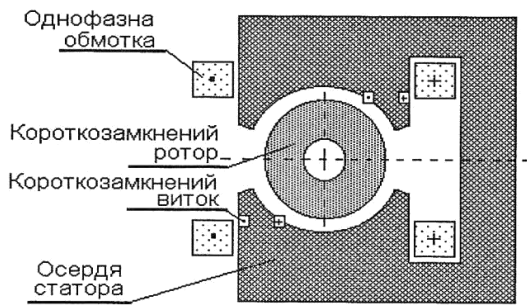


Рис. 1.6. Конструктивна схема однофазного екранованого асинхронного двигуна

Техніко-економічні показники лінійних АД дещо гірші, ніж у звичайних кругових АД через примежові ефекти, які виникають через розімкненість магнітопровода.

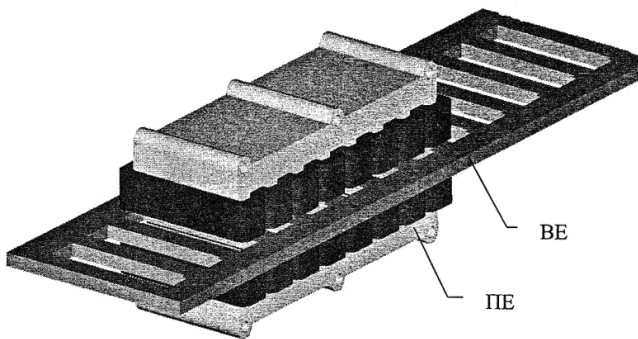


Рис. 1.7. Лінійний двигун двобічної конструкції

Лінійні індукторні двигуни можна виконувати однобічними (див. рис. В.7) і двобічними (рис. 1.7, 1.8, 1.9), з повздовжнім, поперечним (рис. 1.9) і поздовжньо-поперечним (рис. 1.8) замиканням магнітного потоку, з рухомих первинним або вторинним елементом.

Машини постійного струму з постійними магнітами за принципом дії й улаштуванням якоря з колектором не відрізняються від машин постійного

струму з електромагнітним збудженням. Відмінність лише в тому, що магнітне поле збудження створюють постійні магніти.

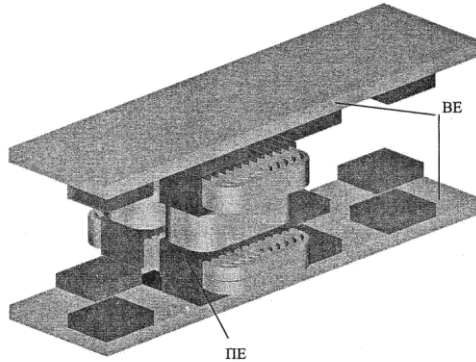


Рис. 1.8. Лінійний двигун двобічної конструкції з поздовжньо-поперечним магнітним потток

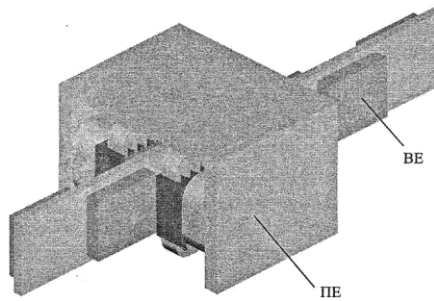


Рис. 1.9. Лінійний індукторний двигун з поперечним магнітним потоком

ЕМП із ПМ мають порівняно зі звичайними ЕМП постійного струму вищий коефіцієнт віддачі, кращі умови охолодження, менші габарити й масу за невеликих номінальних потужностей. Разом з тим вони мають і суттєві недоліки: погані регульовальні властивості, гірші, ніж у машин з електро-магнітним збудженням, масо-габаритні й вартісні показники при потужностях, вищих за сотні ват, технологічні труднощі під час виготовлення ПМ.

Електромеханічні перетворювачі з гладким якорем вирізняються тим, що їхні якірні обмотки розміщуються не в пазах, а на зовнішній поверхні гладких феромагнітних осердь. До цієї поверхні обмотку приклеюють спеціальними смолами. Обмотки можна розміщувати в ізольованих гільзах, а потім разом із ними приклеювати до поверхні якоря. Іншим способом виконання обмоток є фотохімічний, який застосовують для виготовлення друкованих плат.

Крім циліндричного виконання ЕМП, використовується торцеве виконання, в якому якір виготовляється у вигляді ізоляційного диска з наклеєними або витравленими провідниками. Колектором у цьому випадку слугує спеціально виділена зона в активній частині провідників якоря.

Відсутність пазів дає змогу зменшити індуктивність обмотки якоря й реактивні ЕРС у комутуючих секціях. Зменшуються діаметр якоря, момент інерції й електромеханічна стала часу. Ці властивості є вельми цінними під час використання безпазових ЕМП як швидкодіючих виконавчих двигунів у системах автоматики.

Недоліком безпазових двигунів є те, що через збільшення повітряного проміжку в них необхідно значно збільшувати МРС обмоток збудження, збільшення МРС призводить до збільшення розмірів і маси ЕМП із гладким якорем порівняно з ЕМП з електромагнітним збудженням.

3. Електромеханічні перетворювачі в електромеханотроніці

Відомості про основні й спеціальні модифікації ЕМ, їхні властивості й характеристики, які наведені вище, належать до машин - електромеханічних перетворювачів, які поширено застосовують як двигуни й генератори в електроенергетиці, електроприводі, автоматичі та інших галузях техніки.

Саме ці ЕМП поєднуються з електронними компонентами для поліпшення регулювальних характеристик, забезпечення самозбудження, підвищення надійності, отримання високопрецизійних приладів і створення нових ЕМ.

Розглянуті моделі дають змогу враховувати властивості ЕМП під час створення ЕМТП насамперед у принциповому плані, тобто на рівні принципів дії і якісного аналізу процесів і робочих характеристик. Здебільшого на цьому рівні і відбувається створення нових електромеханотронних перетворювачів.

Отримання точніших розрахункових даних і, відповідно, точніший аналіз різних структурних схем та виконань ЕМТП вимагає обов'язкового урахування не тільки основних гармонік МРС, ЕРС і струмів, але і вищих гармонічних, які можуть зробити роботу ЕМТП неможливою, або значно погіршити їхні вихідні характеристики.

Контрольні запитання

1. Які основні функції електромеханічних систем?
2. Які головні ознаки електротехнічних систем, які приходять на зміну традиційним електромеханічним перетворювачам?
3. Як можна класифікувати електромеханотронні перетворювачі?
4. Що належить до поняття функціональної електромеханотроніки?

5. Охарактеризуйте новий напрям розвитку електромеханіки - електромеханотроніку.
6. Опишіть вихідні положення, які належать до електромеханотроніки.
7. Охарактеризуйте відмінність між електромеханотронікою і електроприводом.
8. Дайте визначення галузей і розділів науки, які є базою електромеханотроніки.
9. Що надало поштовху виникненню нового напрямку електромеханіки електромеханотроніки'?
10. У чому полягає зв'язок електромеханотроніки з електроенергетикою та електроприводом?
11. Що можна зарахувати до спеціальних електромеханічних перетворювачів?
12. Які основні етапи становлення електромеханотроніки як окремого напрямку розвитку електромеханіки?

ЛЕКЦІЯ 3

РОЗДІЛ 2

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

ЕЛЕКТРОМЕХАНОТРОНІКИ

План лекції:

2.1. Сучасна електроніка

2.2. Напівпровідникові прилади та елементи

2.1. Сучасна електроніка

Електроніка як наука забезпечує дослідження, розроблення, виробництво й застосування різноманітних електронних приладів та пристроїв на їхній основі.

До електронних приладів належать прилади, робота яких базується на протіканні електричного струму у твердих напівпровідниках, вакуумі та газі. Їх поділяють на напівпровідникові та електровакуумні.

Спільною властивістю електронних приладів щодо їхньої поведінки в електричному колі є те, що вони мають суттєво нелінійні вольт-амперні характеристики, що і визначає галузі їхнього застосування.

Електроніка поділяється на фізичну й технічну. Фізична забезпечує вивчення й розроблення теорії електронних і іонних процесів. У технічній електроніці на основі ідей і теорій фізичної електроніки розробляють електронні прилади й забезпечується їхнє застосування в техніці. Розділ технічної електроніки, який пов'язаний з розробленням та застосуванням електронних приладів та пристроїв на їхній основі у промисловості, називається промисловою електронікою.

погляду електромеханотроніки становлять інтерес передусім дві галузі технічної електроніки: енергетична електроніка та інформаційна електроніка.

Енергетична електроніка переважно займається розробленням і впровадженням силових напівпровідникових приладів і електронних перетворювачів на їхній основі: випростувачів (перетворювачів змінного струму в постійний), інверторів (перетворювачів постійного струму у змінний), перетворювачів частоти й регульованих перетворювачів постійної й змінної напруг.

Інформаційна електроніка займається електронними приладами й пристроями для передавання, оброблення й відображення інформації. Сюди належать

підсилювачі сигналів, генератори напруг різної форми, логічні схеми, лічильники, індикаторні пристрої тощо.

Для більшості сучасних інформаційних електронних пристроїв характерні поширені функціональні можливості, висока швидкодія та надійність. Розвиток інформаційної електроніки пов'язують з удосконаленням і застосуванням інтегральних мікросхем.

Розділ електроніки, який пов'язаний з розробленням інтегральних мікросхем (ІМС), відокремився в особливу галузь - мікроелектроніку. ІМС поділяються на середні інтегральні схеми (СІС), які містять до 500 напівпровідникових елементів, великі (ВІС) - містять від 500 до 1000 елементів, та надвеликі інтегральні схеми (НВІС) - містять понад 1000 елементів.

На базі ВІС в 1971 р. були створені й отримують щораз більший розвиток *мікропроцесори*, які являють собою складні логічні пристрої і реалізують функції, що задаються програмами і можуть змінюватись за бажанням споживача.

ІМС, в яких використовуються для перетворення інформації неелектричні ефекти, отримали назву функціональних ІМС. Їх розробленням займається функціональна мікроелектроніка, яка забезпечує створення акусто-, опто-, і магнітоелектронних ІМС.

електромеханотроніці використовують або можна використовувати майже всі відомі напівпровідникові прилади (діоди, транзистори, тиристори) та багато пристроїв мікроелектроніки (мікросхеми, мікропроцесори, мікро-ЕОМ тощо).

Усім напівпровідникам і пристроям електроніки притаманні характерні ознаки, які потрібно враховувати під час створення ЕМТП:

- значна залежність провідності від температури;
- залежність провідності від різних зовнішніх чинників: освітлення, іонізуючого опромінення тощо;
- висока сприйнятливості до чужорідних домішок;
- параметри й характеристики окремих типів напівпровідникових приладів можуть мати значний розкид, а також погіршуватись із плином часу (старіння).

Аналіз стану і напрямків розвитку електроніки показує, що ефекти та явища, які в ній уже використовуються, дають змогу створювати багатофункціональні та надмініатюрні електронні схеми.

2.2. Напівпровідникові прилади та елементи

Елементну базу сучасної електроніки й мікроелектроніки становлять активні й пасивні напівпровідникові та плівкові елементи.

До активних елементів належать прилади, серед яких основними є транзистори й тиристори. На їхній основі з використанням спеціальних технологій створюються модифікації приладів, які розрізняються характеристиками, конструктивними виконаннями та ступенем мініатюризації.

Напівпровідникові прилади на великі струми й напруги утворюють базу для розвитку енергетичної електроніки; надмініатюрні прилади створюються на основі технологій інтегральної мікроелектроніки і є базою для виробництва ІМС і базою переважно для інформаційної електроніки.

До пасивних елементів енергетичної електроніки зараховують резистори, конденсатори, котушки індуктивності традиційних виконань. До пасивних елементів мікроелектроніки належать напівпровідникові інтегральні резистори й конденсатори, а також плівкові індуктивні елементи й конденсатори.

Розглянемо основні типи напівпровідникових приладів із погляду їхніх основних властивостей і модифікацій, які використовують в енергетичній електроніці і, отже, в енергетичних підсистемах ЕМТП.

Напівпровідникові діоди належать до найпростіших напівпровідникових приладів, які мають два зовнішні виводи й один РМ-перехід (рис. 2.1).

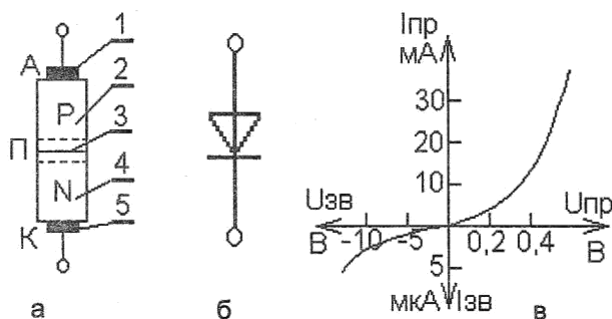


Рис. 2.1. Структура (а), умовне позначення (б) та вольт-амперна характеристика (в) діода:

1 - анод (А); 2 - Р-область; 3 - РИ-перехід (П); 4 - N-область; 5 - катод (К)

Зображена на рис. 2.1 вольт-амперна характеристика дає уявлення про типові значення прямих $I_{i,р}$, $I_{пр}$ і зворотних $I_{зв}$, $I_{зв}$ напруг і струмів, а також, відповідно, про значення опорів постійному струмові: у прямому напрямку опір діода в $10^3 - 10^4$ разів менший, ніж у зворотному.

За фізичними властивостями та призначенням діоди поділяють на випростувальні, імпульсні, стабілітрони, варикапи, високо- і надвисокочастотні, тунельні фотодіоди й світлодіоди.

Транзистори застосовують в електромеханотроніці для підсилення електричних сигналів за потужністю, а також для перемикання електричних кіл. У транзисторах може бути різна кількість переходів між областями з різною провідністю і не менше трьох виводів. За структурними ознаками й принципом дії розрізняють біполярні та польові транзистори.

Біполярний транзистор - напівпровідниковий триелектродний прилад із двома взаємодіючими РУ-переходами і трьома, що чергуються, областями з різними типами провідності (УРУ- або РУР-типів). Біполярним транзистор називається тому, що його робота базується на використанні носіїв зарядів обидвох знаків.

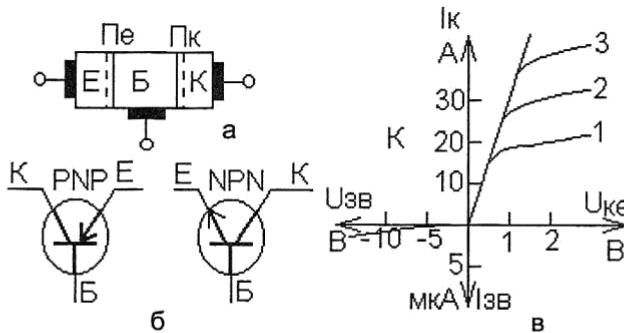


Рис. 2.2. Структурна схема (а), умовні позначення (б) і вольт-амперні характеристики (в) біполярного транзистора

Польові (уніполярні) транзистори - напівпровідникові прилади, струми у структурі яких залежать від напруженості керуючого електричного поля або напруги і утворюються носіями тільки одного знака - електронами або дірками. Тому їх ще називають уніполярними транзисторами. Основною їх ознакою

відсутність на шляху протікання струму р-и-переходів (рис. 2.3), а зона, по якій протікає струм, називається *каналом*. Канал має два виводи: *витік* (*B*) - звідки рухаються вільні носії зарядів, і *стік* (*C*) - куди ці заряди стікаються. Третій вивід, який сполучений зі зоною напівпровідника протилежного до каналу типу провідності, називають *затвором* (*3*), що використовується для регулювання площі перетину каналу.

На відміну від біполярних транзисторів, які керуються електричним струмом і через це споживають відчутну потужність із кола керування, польові транзистори практично не споживають струму (струм затвору $I_p \sim 10^{-9} A$) і потужності на своєму вході.

Залежно від типу провідності каналу їх поділяють на транзистори з р-каналом або л-каналом, чим визначається полярність прикладеної напруги (рис. 2.3).

Під дією напруги $u_{св}$ вільні носії заряду утворюють в каналі (в центральній частині транзистора) струм, величину якого можна регулювати напругою $u_{вз}$ за сталої напруги $u_{св}$

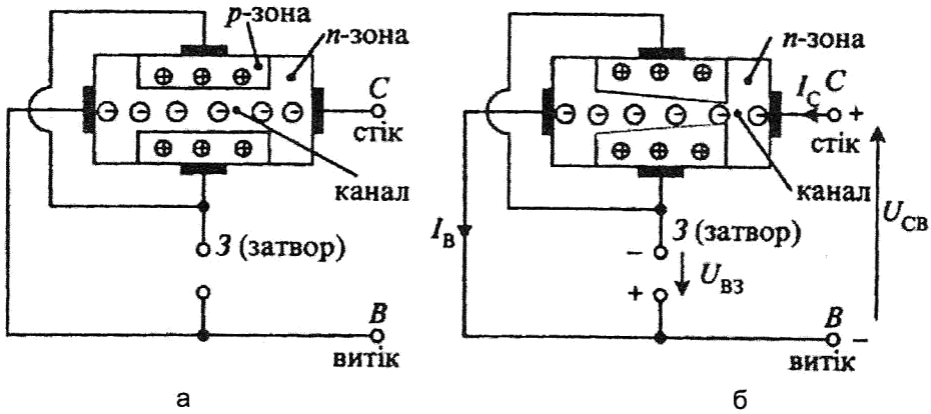


Рис. 2.3. Польовий транзистор з п-каналом:
а - структура; б - робочий режим

Залежність між струмом і напругою виходу для певної схеми ввімкнення транзистора називають вихідною характеристикою. Переважно це сімейство характеристик для фіксованих значень вхідної величини. На рис. 2.4 показано вихідні характеристики $I_c = f(u_{св})$ для польового транзистора з n-каналом (рис. 2.5), увімкненого за схемою зі спільним витоком.

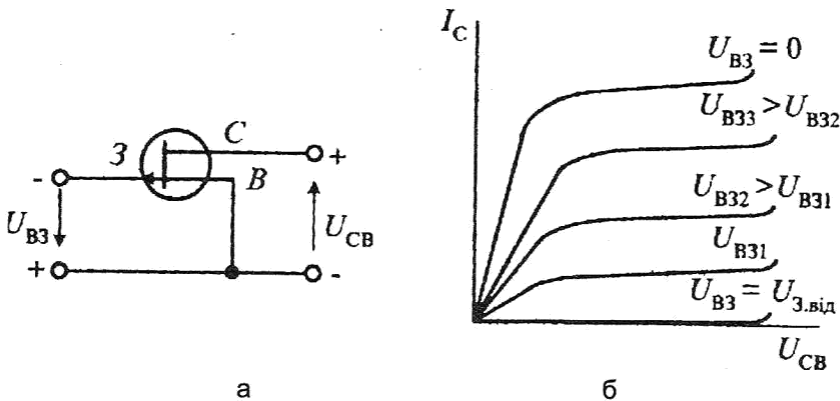


Рис. 2.4. Польовий транзистор з п-каналом:
а - схема увімкнення зі спільним витоком; б - вихідна характеристика

Сучасні польові транзистори виконують з ізолюваним від каналу затвором. Введення шару діелектрика зменшує струм спливу. Такі транзистори називають МДН (метал-діелектрик-напівпровідник) або МОН (метал-оксид-напівпровідник). Схемні позначення таких транзисторів зображено на рис. 2.5.

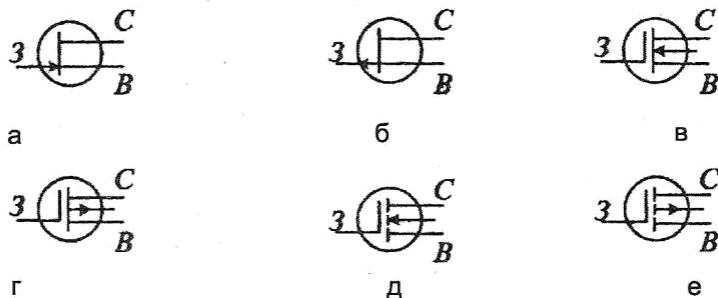


Рис. 2.5. Схемні позначення польових транзисторів:
 а-з р-каналом; б-з n-каналом; в-і г-з ізолюваним затвором
 вбудованим n-каналом та р-каналом; д-і е-з ізолюваним затвором
 індуктованими n-каналом та р-каналом

Польові транзистори мають деякі переваги перед біполярними транзисторами: струм і потужність вхідного сигналу менші; для живлення пристроїв на польових транзисторах можна використовувати менш стабільне джерело живлення; польові транзистори технологічніші й дешевші за біполярні; на них менше впливає температура. Але біполярні транзистори можуть працювати на вищих частотах, переважають польові транзистори за максимально дозволеними струмами у вихідних колах (на два порядки) та максимально дозволеними значеннями потужності розсіяння (в 4-6 разів).

Біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT) останнім часом домінують серед всіх типів приладів силової електроніки. На основі польових та біполярних транзисторів з ізолюваним затвором (MOSFET і IGBT) створюють інтегровані структури - силові інтегральні схеми (Power IC), інтелектуальні силові інтегральні схеми (Smart Power IC) та гібридні модулі. Польові транзистори MOSFET відіграють важливу роль у діапазоні малих і середніх потужностей. Біполярні транзистори з ізолюваним затвором IGBT є основою сучасної силової електроніки і забезпечують комутацію струмів до 1800 А і напруг до 4500 В. Системна інтеграція, тобто об'єднання в одному пристрої силових комутаційних елементів з елементами керування, діагностики і захистів є перспективним шляхом розвитку силової електроніки.

Тиристори належать до найуживаніших перемикальних напівпровідникових приладів, тобто здатних знаходитись в одному з двох стійких станів: відкритому й закритому.

Тиристри відрізняються за кількістю виводів: тиристри з двома виводами називаються діодними тиристорами або диністорами; тиристри з трьома виводами - тріодними тиристорами або триністорами.

Значення максимального струму I_{max} (точка А на рис. 2.6), за якого на диністорі є невеликий прямий спадок напруги $I_{відк}$, належить до головних показників приладу.

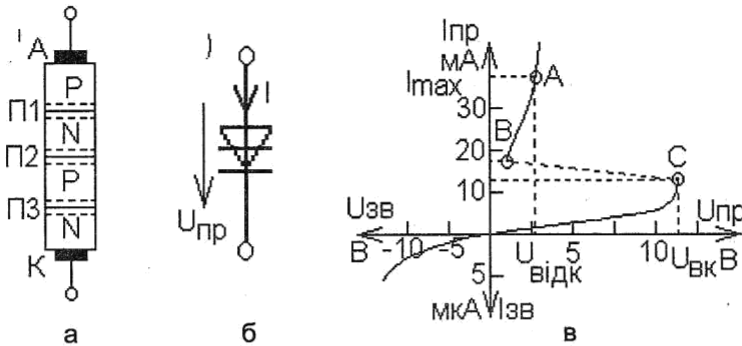


Рис. 2.6. Структура (а), умовне позначення (б) і вольт-амперна характеристика диністора (в)

Для вмикання диністора до нього у прямому напрямку потрібно прикласти напругу $I_{пр} > u_{вк}$. Під час прикладання зворотної напруги диністор завжди запирається.

Тріодний тиристор (триністор) - керований перемикальний прилад. Стан триністора залежить від значення прикладеної прямої напруги $I_{пр}$ та значення керуючої напруги $I_{к}$, яка прикладена між керуючим електродом (КЕ) та катодом (К). За зворотної напруги, прикладеної між анодом і катодом, триністор завжди запертий незалежно від напруги керування $I_{к}$, опір великий, анодний струм відсутній.

Недоліком триністорів є те, що їх неможливо заперти за допомогою сигналу керування.

Цей недолік усунуто у триністорах, що запираються, які можна заперти поданням імпульсу напруги зворотного знака порівняно із знаком напруги, яка їх відкриває. Ці триністри поки що не набули поширеного впровадження через порівняно малі значення дозволеного прямого струму.

Крім триністорів, що запираються, розроблені симетричні триністри, або симістри, які мають п'ятишарову структуру PАПАР або АРАРА, що відкривається за будь-якої полярності напруги і проводить струм в обидвох напрямках.

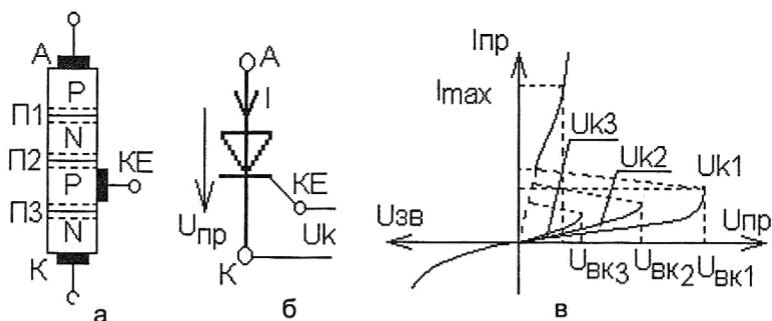


Рис. 2.7. Структура (а), умовне позначення (б) та вольт-амперна характеристика триністора (в)

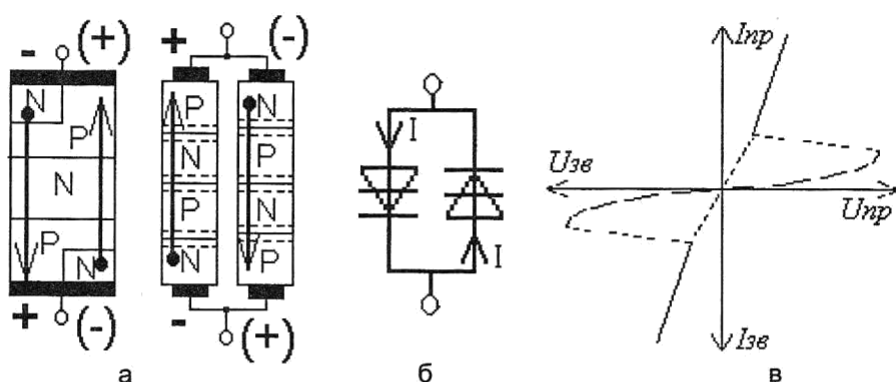


Рис. 2.8. Структура (а) симістора, його заміна двома діодовими тиристорами (б) та вольт-амперна характеристика (в)

Основна галузь застосування тиристорів - енергетична електроніка. Сучасні потужні тиристори мають максимально дозволений середній прямий струм на рівні 1000-2000 А, дозволена робоча напругу - 1000-4000 В.

Електронні прилади енергетичних підсистем електромеханотроніки, як правило, є дискретними, мають індивідуальне конструктивне оформлення, і до їхнього складу входить не тільки напівпровідниковий кристал, активне ядро приладу, але і достатньо розвинена конструктивна оболонка.

Біполярні інтегральні транзистори зазвичай виконують на УРІЧ-структурах, які використовують дешевші підкладки з кремнію з провідністю Р-типу. Тому ІМРІЧ-транзистори економічніші і мають кращі, ніж РІР-прилади, підсилювальні й частотні властивості.

Інтегральні діоди поділяють на дві групи: діоди на РІЧ-переходах і діоди, які виконані на основі діодного увімкнення біполярних інтегральних транзисторів. Як інтегральні діоди виконують також тунельні діоди, стабілітрони.

Діодне увімкнення - найпоширеніший спосіб виконання інтегральних діодів і забезпечує регулювання їхніх параметрів: прямого спадку напруги, зворотного струму, напруги пробою та часу перемикання. Регулювання здійснюється зміною схеми сполучення без зміни його внутрішньої структури.

Плівкові інтегральні пасивні елементи поділяють на індуктивні елементи, конденсатори та резистори. До них належать плівкові сполучення, які виконуються в ІМС із плівок високопровідних матеріалів (срібло, мідь, золото тощо).

Плівкові індуктивні елементи створюються у вигляді круглих або квадратних спіралей з провідних плівок. Індуктивність таких елементів не перевищує 5-20 мкГн, добротність - 50 і використовують їх на частотах, вище 200 Гц.

Плівкові інтегральні конденсатори можуть мати одинарну і багатошарову структуру. Одинарні структури забезпечують отримання ємностей в одинарності пікофарад, багатошарові - в сотні пікофарад.

Плівкові інтегральні резистори виготовляють у вигляді смужок із резистивних (хром, нікель, тантал, ніхром, кермет, напівпровідники із широкою забороненою зоною) плівок із двома омичними контактами. Номінальне значення опорів таких резисторів може досягати сотень кілоом.

Контрольні запитання

1. Які напівпровідникові прилади зараховують до приладів функціональної мікроелектроніки?
2. На які дві галузі поділяють технічну електроніку?
3. Дайте характеристику галузям технічної електроніки.
4. Що можна зарахувати до енергетичних електронних приладів?
5. Наведіть схему і поясніть принцип роботи самозахисеного транзисторного ключа.
6. Що таке транзистор Дарлінгтона? Наведіть його схему.
7. Поясніть принцип роботи складеного комплементарного потрійного транзисторного ключа.
8. Подайте принципову схему і сформулюйте принцип роботи тиристорного ключа постійного струму.
9. Наведіть структурну схему та вольт-амперні характеристики біполярного транзистора.
10. Опишіть транзисторний ключ постійного струму та його контактний варіант.
11. Подайте характеристику й опишіть перспективи застосування біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT).
12. Наведіть схему та опишіть принцип роботи магніто-транзисторного ключа.
13. Наведіть схеми та дайте характеристику силовим ключам на транзисторах.

ЛЕКЦІЯ 4

План лекції:

1. Прилади функціональної мікроелектроніки
2. Електронні пристрої електромеханотроніки
3. Енергетичні електронні пристрої
4. Керовані перемикачі на тиристорах

Прилади функціональної мікроелектроніки

До приладів функціональної мікроелектроніки належать напівпровідникові прилади, під час створення яких використовують різні неелектричні ефекти.

Оптоелектронні напівпровідникові прилади основані на використанні внутрішнього фотоефекту, який полягає в тому, що під час дії світлового випромінювання в деяких напівпровідниках відбувається утворення пар носіїв зарядів - електронів і дірок. Ці додаткові носії збільшують електричну провідність за рахунок так званої додаткової фотопровідності. У деяких матеріалах за рахунок фотогенерації електронів і дірок виникає фото-ЕРС, що дає змогу створювати прилади, які використовуються як джерела струму. Під час рекомбінації електронів і дірок у деяких напівпровідниках виникає випромінювання, що використовується для створення приладів - джерел випромінювання.

Під час використання одночасно двох ефектів створюються оптрони приладів, які поєднують у собі властивості джерел і приймачів випромінювання.

Оптоелектронні прилади виготовляють як у вигляді дискретних елементів, так у складі ІМС. Найпоширенішими є фоторезистори, фотодіоди та фототранзистори.

Фоторезистори (ФР) характеризуються питомою чутливістю $S_{\text{пнт}} = \frac{I_{\text{ф}}}{I_{\text{св}}}$, V/B

де B - світловий потік. Чутливість становить $(10^2 - 10^3) \text{ мкВ/лм}$.

$B_{\text{лм}}$

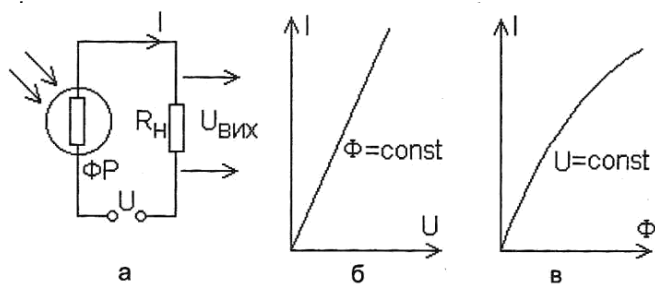


Рис. 2.9. Схема сполучення (а), вольт-амперна (б) та енергетична (в) характеристики фоторезистора

Опір освітленого ФР на 2-3 порядки менший, ніж темного. Недоліками є велика інерційність та значна залежність опору від температури.

На основі ФР створюються різноманітні схеми вимірювальної техніки, телекерування й сигналізації.

Фотодіоди (ФД) вирізняються з-поміж звичайних переважно тим, що в їхні корпуси вбудовують прозорі для світла вікна. Використовується два варіанти освітлення кристалів ФД - паралельно й перпендикулярно до площин їхніх РІ-переходів.

Фотодіоди можна використовувати у генераторних режимах, коли відсутня зовнішня напруга u (рис. 2.10, а) і резистор навантаження сполучений із затискачами ФД.

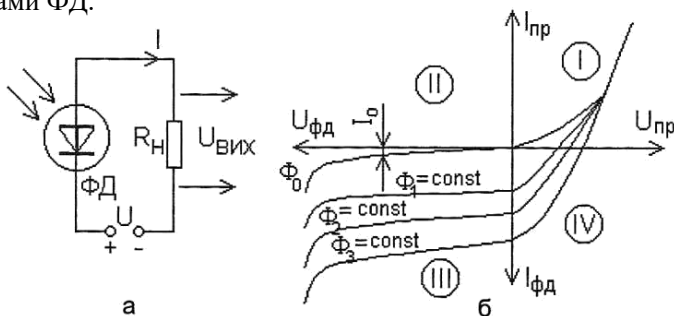


Рис. 2.10. Схема сполучення (а) і вольт-амперна характеристика фотодіода (б)

Вольт-амперні характеристики ФД, які застосовують у фотодіодному й генераторному режимах, показані на рис. 2.10. У першому квадранті, який відповідає прикладенню прямої напруги, характеристики для різних світлових потоків зливаються. У цьому режимі ФД фактично не використовуються.

Фотодіоди можна використовувати у тих самих пристроях, що і фоторезистори, забезпечуючи при цьому кращі результати.

Фототранзистори - звичайні транзистори (біполярні, польові, МДНП (метал-діелектрик-напівпровідник) - транзистори зі світлопропускним віконцем у корпусі. Замість струму бази для керування використовується світловий потік. Робоча напруга - 10-15 В, темновий струм - 10-10₂ мкА, світловий (робочий) струм - десятки міліампер, гранична частота залежить від способу виготовлення і може знаходитись у межах від декількох кілогерц до декількох мегагерц. Недолік фототранзисторів - порівняно високий рівень власних шумів.

Фототиристоры можуть керуватись світловим потоком так само, як триодні тиристоры керуються напругою, яка подається на електрод керування. Фототиристоры застосовують в різних автоматичних пристроях як безконтактні ключі для комутації значних напруг і потужностей, вони мають невеликі розміри, малий час увімкнення, незначні втрати потужності в увімкненому стані.

Світлодіоди - напівпровідникові діоди, які випромінюють світло під час протікання через них прямого струму. На основі світлодіодів створюються точкові джерела світла й знакові індикатори.

Оптрони - прилади, які складаються із джерела й приймача світла, між якими є оптичний зв'язок. Для успішної роботи оптрона важливим є узгодженість джерела й приймача за спектральними характеристиками. Максимум спектральної чутливості фотоприймача повинен збігатися з максимумом випромінювання світлодіода.

В електромеханотроніці оптоелектронні прилади використовують для гальванічного розділення електронних схем, в давачах розташування - як ключі.

Прилади п'єзоелектроніки розробляють з використанням прямого й зворотного п'єзоелектричних ефектів, які виникають у матеріалах, що називаються п'єзоелектриками (кristали кварцу, сегнетової солі, титанат барію).

Прямий п'єзоэффект полягає в тому, що під час тиску на тіло з п'єзоелектрика на протилежних гранях тіла виникають однакові, але різні за знаком електричні заряди. За зміни знака деформації (не стискувати, а розтягувати п'єзоелектрик) заряди на гранях змінюються на протилежні.

Зворотний п'єзоэффект полягає в тому, що під дією електричного поля п'єзоелектрик стискується або розширюється залежно від напрямку дії електричного поля.

На використанні п'єзоелектричних ефектів основана робота кварцових резонаторів, які застосовують в еталонах частоти, у смугових електричних фільтрах. Велику групу п'єзоелектричних приладів утворюють різного виду п'єзодавачі, які реагують на тиск, пересування, прискорення.

Для електромеханотроніки становлять інтерес п'єзоелектричні трансформатори та п'єзоелектричні двигуни.

п'єзоелектричних трансформаторах п'єзоелемент має три або більшу кількість електродів, які сполучені з джерелом змінної напруги й навантаженням. Як і звичайні трансформатори, п'єзоелектричні трансформатори можуть підсилювати сигнал за напругою або струмом, перетворювати навантажувальний опір, здійснювати фазовий зсув на 180° . Вони мають такі переваги: простота устрою, невеликі розміри, можливість роботи як при низьких, так і при високих частотах, розмаїття конструктивних виконань.

Прилади магнітоелектроніки базуються на використанні ефектів, які виникають у феромагнітних матеріалах і напівпровідниках під час діяння магнітного поля. Па зміні внутрішнього опору напівпровідників базується робота магнітодіодів, магнітотранзисторів і магнітотиристорів. Наприклад, вольт-амперні характеристики магнітодіодів мають вигляд, зображений нарис. 2.11.

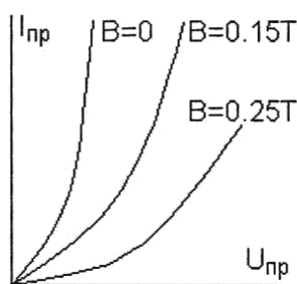


Рис. 2.11. Вольт-амперні характеристики магнітодіодів

магнітодіодами можна створювати різноманітні пристрої електро-механотроніки: вентильні двигуни, магнітодіодні підсилювачі, безконтактні реле струму, давачі розміщення тощо.

Магніторезистори - напівпровідникові резистори, опір яких змінюється під дією магнітного поля. Їх застосовують у вимірювальній техніці (наприклад, для вимірювання магнітної індукції) як безконтактні давачі переміщень, в безконтактних вимикачах і перемикачах тощо.

Перетворювачі або давачі Холла також належать до приладів магнітоелектроніки. Їхня робота базується на використанні ефекту Холла, який полягає в тому, що в напівпровідниках під час протікання струму в магнітному полі, напрям якого перпендикулярний до напрямку струму, виникає поперечна різниця потенціалів. Перетворювачі Холла використовуються для безконтактного вимірювання електричної потужності, створення давачів переміщення, кута прискорення тощо.

Можливі й інші виконання приладів, які використовують технології й ефекти з мікроелектроніки. Важливо мати на увазі, що застосування відомих

приладів та створення нових спеціально для електромеханотроніки визначається завданнями й обмеженнями (за надійністю, вартістю, швидкістю) під час розроблення будь-якого, а особливо перспективного, технічного пристрою. Прийняття правильного рішення залежить від аналізу й порівняння альтернативних варіантів.

будь-якому разі уже наявні прилади відкривають великі можливості для створення різноманітних пристроїв електромеханотроніки.

2.3. Електронні пристрої електромеханотроніки

Напівпровідникові прилади й елементи, а також прилади функціональної мікроелектроніки є основою для створення електронних пристроїв, що входять до складу ЕМТП і є їхніми важливими компонентами.

Електронні пристрої ЕМТП за функціональним призначенням поділяють на пристрої, які входять до складу енергетичної підсистеми ЕМТП і називаються енергетичними електронними пристроями, і пристрої інформаційної підсистеми, які називаються інформаційними електронними пристроями.

Енергетичні електронні пристрої об'єднують електронні прилади, вузли модулі, які призначені для здійснення разом з ЕМП електромеханічного перетворення енергії. Ці пристрої називаються енергетичними, оскільки саме в них циркулюють основні потоки енергії і існують порівняно великі струми, напруги й сили, які відповідають номінальній потужності ЕМТП.

Інформаційні електронні пристрої забезпечують керування роботою енергетичної підсистеми, її діагностування й захист. В утворюваній ними інформаційній підсистемі ЕМТП немає необхідності передавати великі потоки енергії, і її пристрої можна розраховувати на малі електричні струми й напруги. Кращим є застосування в ЕМТП інформаційних пристроїв, які виконані на основі ІМС і мікропроцесорів і, відповідно, мають мінімальні розміри й масу.

2.4. Енергетичні електронні пристрої

Енергетичні електронні пристрої (ЕЕП) в електромеханотроніці використовують як електронні компоненти, які забезпечують перемикання в схемах, перетворення змінного струму в постійний і навпаки, перетворення частоти струму, регулювання параметрів та вихідних характеристик. За допомогою

ЕЕП-перемикачів здійснюється заміна механічного колектора у ВД. Використовуючи напівпровідникові випростувані, можна приєднувати ЕМП постійного струму до мережі змінного струму. За допомогою інверторів електромеханічні перетворювачі змінного струму приєднують до мережі постійного струму.

Розглянемо основні схеми і показники ЕЕП, які найчастіше використовують в електромеханотроніці.

Перемикальні електронні пристрої (ПЕП). Їх називають також напівпровідниковими перемикачами й ключами, вони містять як основні прилади транзистори або тиристри, які керуються невеликими, за значеннями, струмовими імпульсами.

електромеханотроніці використовують керовані ПЕП постійного і змінного струмів.

Керований ПЕП змінного струму має двобічну провідність за наявності керувального сигналу і забезпечує безперервне протікання знакозмінного струму. За відсутності керувального сигналу такий перемикач запертий в двох напрямках. Час відкритого стану перемикача відповідає тривалості керувального сигналу.

Як керовані ПЕП змінного струму можна використовувати симетричні транзистори (рис. 2.12, а) або керовані симістри (рис. 2.12, б), а також пристрої двома транзисторами, які сполучені за схемою, зображеною на рис. 2.12, в. Діоди $VD1$ та $VD2$ в цій схемі застосовують для обмеження зворотних струмів, керувальні сигнали на обидва транзистори подаються синхронно.

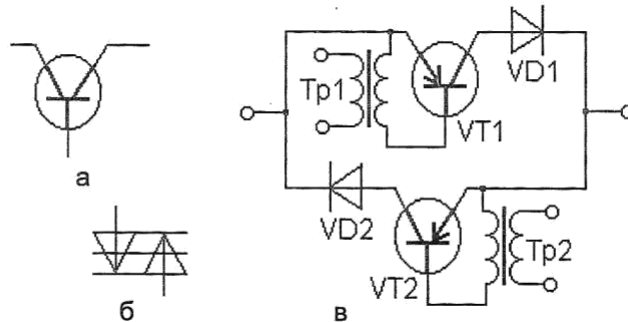


Рис. 2.12. Керовані перемикачі змінного струму

Керований ПЕП постійного струму має однібічну провідність за наявності керувального сигналу.

На рис. 2.13 показано транзисторну ключову схему із спільним емітером та її релейний еквівалент. Під час протікання базового струму I_b в показаному на рисунку напрямку транзистор відкривається, через опір K_k протікає

колекторний струм і з нього можна знімати вихідну напругу. Для запирання транзисторного ключа необхідно зняти напругу u_m . При цьому до базово-емітерного переходу буде прикладена напруга зміщення $u_{ш}$, дія якої еквівалентна дії пружини повернення реле (рис. 2.13, б).

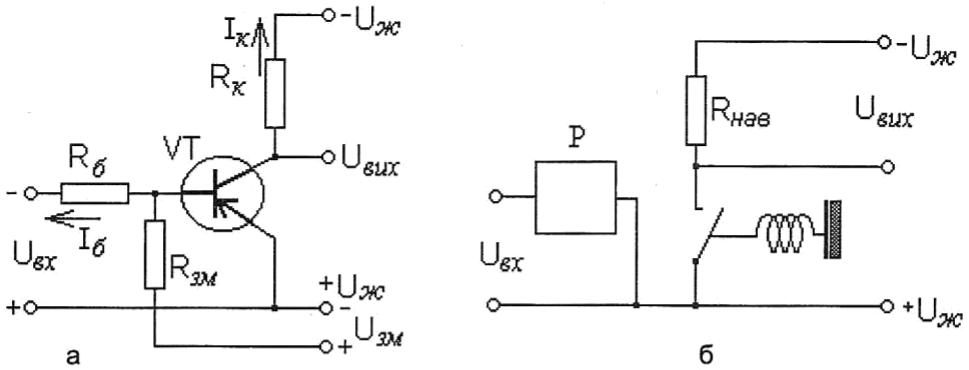


Рис. 2.13. Керований перемикач постійного струму (а) та його контактний варіант (б)

ПЕП постійного струму відкритий в одному напрямку і пропускає струм тільки одного знака.

Напівпровідникові прилади за необхідності можна виконувати складеними, тобто вони можуть містити в собі декілька паралельно і послідовно сполучених приладів. Прикладом може слугувати подвійний складений транзистор, який ще називається транзистором Дарлінгтона (рис. 2.14).

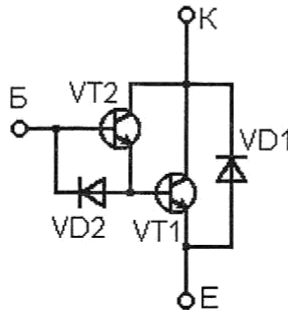


Рис. 2.14. Схема транзистора Дарлінгтона

Виконання складених транзисторів на основі транзисторів різних типів провідності (рис. 2.15), так званих комплементарних транзисторів, дає змогу забезпечити низький вхідний опір ключа, що характерно для ключів на основі

одиничних транзисторів, і, як наслідок, зменшити необхідну величину напруги й потужності пристрою керування.

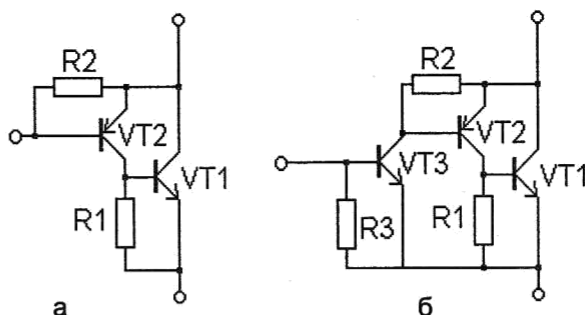


Рис. 2.15. Складені комплементарні подвійний (а) та потрійний транзисторні ключі (б)

На початку 1980-х рр. у ВД почали застосовувати магніто-транзисторні ключі (МТК), які забезпечують пропорційно-струмове керування напівпровідниковими ключами. МТК (рис. 2.16, а) складається з двох транзисторів VT_1 , VT_2 і струмового трансформатора T з магнітно-зв'язаними секційними обмотками в колах баз і колекторів.

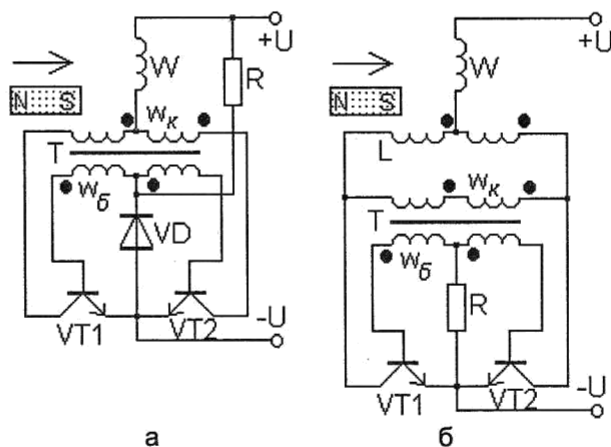


Рис. 2.16. Магніто-транзисторні ключі

Для здійснення позитивного зворотного зв'язку колектор і база кожного транзистора МТК сполучені з різнойменними вивідними кінцями колекторних і базових обмоток струмового трансформатора.

Під час подання напруги живлення на МТК у ньому виникають автоколивання (резистор $i?$ і діод ПО полегшують збудження автоколивань). На базових і колекторних обмотках трансформатора виникають прямокутні імпульси напруги, які забезпечують перемикання транзисторів $УТ1$ і $УТ2$ в протифазі. Оскільки напруга на базових обмотках МТК дорівнює сумі спадків напруг на базо-емітерному переході відкритого транзистора і на діоді ПО (всього близько 1.5 В), то за умови забезпечення нерівності $m > \nu$) $m > \kappa$ (реально $i \cdot y^{\wedge} \kappa = 4 \dots 5$) напруга на колекторній обмотці виявляється набагато меншою за напругу живлення (за напруги живлення 30 В - приблизно в сто разів). Це забезпечує високий коефіцієнт віддачі МТК - до 98 %. Високий коефіцієнт віддачі, здатність комутувати великі струми й напруги і можливість керування роботою МТК за допомогою постійного магніту - сигнального елементу ДПР - вигідно його вирізняють.

Керування МТК можна здійснювати також, впливаючи зовнішнім магнітним полем на магніточутливий елемент, який сполучений паралельно до цілої первинної або вторинної обмотки трансформатора (рис. 2.16, б) або тільки до їхньої частини. Таким елементом може бути дросель насичення B , який виконаний з матеріалу з прямокутною петлею гістерезису.

Для зменшення кількості силових транзисторів й амплітуди високочастотних пульсацій напруги на секціях якірної обмотки доцільно, особливо за великої потужності ВД, виконувати МТК за схемою складеного транзистора (рис. 2.17, а).

Зрив і збудження коливань в МТК можна здійснювати не тільки за допомогою постійного магніту, але і електричним сигналом. Схема такого ключа показана на рис. 2.17, б. Основою його є МТК, який складений за схемою рис. 2.17, а. Додатковий транзистор $УТ4$ забезпечує керування МТК не тільки постійним магнітом, але і сигналом u_{κ} , що розширює функціональні можливості МТК за використання, наприклад, в регульованих широтно-імпульсною модуляцією ВД.

самозахисених транзисторних ключах, здійснюється контроль за струмом колектора й запирання їх під час перевищення рівня уставки захисту (рис. 2.18). Застосування таких ключів у ВД вирішує також питання захисту ключів комутатора за аварійних перевищень їхнього навантаження.

Працює ключ так. Подаванням напруги керування 14 на базу силового транзисторного ключа $ТК$ він відкривається й утримується в режимі насичення. Транзистори $УТ1$ й $УТ2$ заперті. Під час зростання струму через транзисторний ключ $ТК$ за межі допустимого він виходить з насичення, зростає його колектор-емітерна напруга й через $Я_{зах}$ починає відкриватись транзистор $УТ1$. При цьому ще більше зростає колектор-емітерна напруга на силовому ключі $ТК$. Відбу-

вається лавиноподібне запирання силового ключа TK . Транзистор $VT2$ слугує для короткочасного запирання транзистора $VT1$ під час увімкнення силового транзисторного ключа TK .

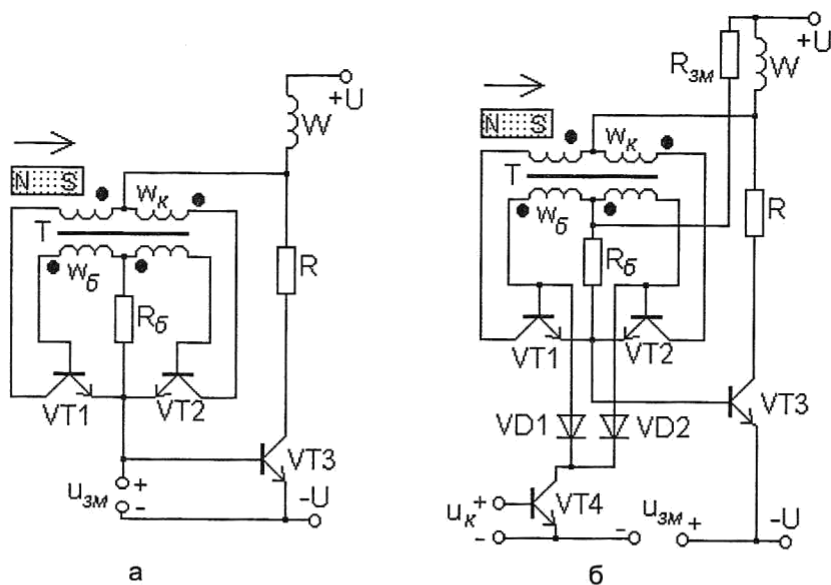


Рис. 2.17. Принципові схеми магнітно-транзисторних ключів

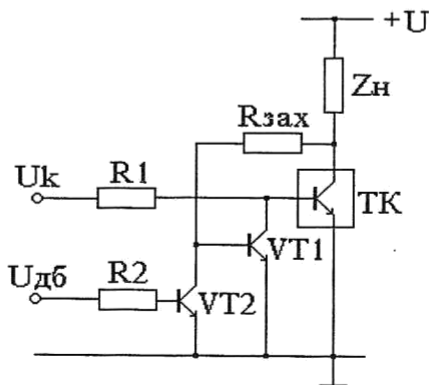


Рис. 2.18. Принципова електрична схема самозахисного транзисторного ключа

2.5. Керовані перемикачі на тиристорах

Керовані перемикачі на тиристорах, які вимикаються за допомогою комутаційних ЕРС, що виникають в комутованих силових колах, називаються перемикачами з природною комутацією.

Перемикачі на тиристорах можна зробити керованими, використовуючи вузли примусової комутації. Схеми комутаційних вузлів містять конденсатори, дроселі, діоди і тиристри. Їхня робота здебільшого базується на використанні зарядженого конденсатора, який сполучається паралельно до комутованого тиристора або послідовно до нього.

Схеми примусової конденсаторної комутації можуть бути одно- і двоступінчастими. У схемах з одноступінчастою комутацією струм, який протікає через тиристор до його вимкнення, переводиться на робочий тиристор, який відкривається. У таких схемах процесами увімкнення або вимкнення не можна керувати окремо, оскільки вимкнення одного робочого тиристора відбувається під час увімкнення наступного тиристора (рис. 2.19).

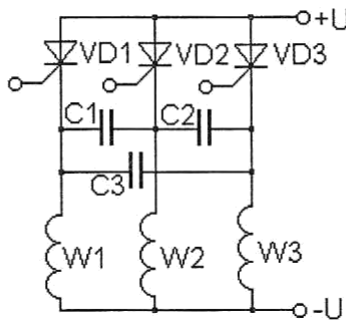


Рис. 2.19. Тиристорний комутатор з одноступінчастою конденсаторною комутацією

Схеми з двоступінчастою комутацією дають змогу вимкати увімкнений тиристор незалежно від того, вмикається чи ні наступний тиристор. Такі схеми забезпечують гнучкіше керування роботою перемикачів.

Відомі схеми комутаційних вузлів поділяють на схеми з паралельною (рис. 2.20) та послідовною комутацією.

На рис. 2.20 показана принципова схема керованого тиристорного ключа двоступінчастою паралельною конденсаторною комутацією. Працює схема так: за увімкненого основного робочого тиристора конденсатор заряджається до напруги u_c через зарядний резистор R_3 . Коли ж вмикається додатковий

тиристор, VS_{∂} до катода основного тиристора прикладається напруга комутаційного конденсатора $C V$, якою він і запирається.

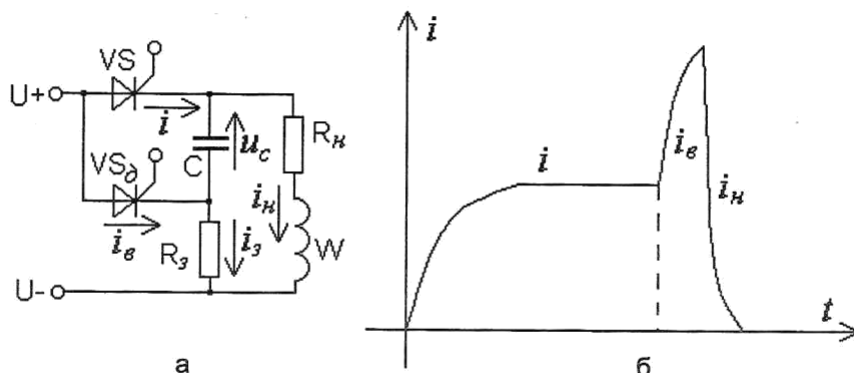


Рис. 2.20. Тиристорний ключ з двоступінчастою паралельною конденсаторною комутацією

Тиристорний ключ з двоступінчастою послідовною конденсаторною комутацією показаний на рис. 2.21.

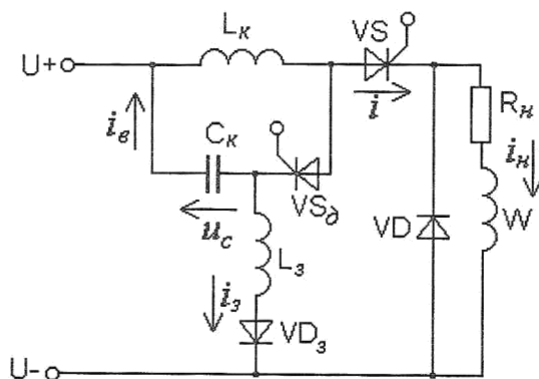


Рис. 2.21. Принципова електрична схема тиристорного ключа з послідовною конденсаторною комутацією

Зовнішні характеристики перетворювачів з послідовною комутацією є “жорсткіші”, ніж за паралельної комутації.

Контрольні запитання

1. Які відмінні ознаки характерні для напівпровідників і пристроїв електроніки, що мають бути враховані під час створення ЕМТП?
2. Перечисліть і охарактеризуйте прилади функціональної мікроелектроніки.

3. Подайте структуру, умовне позначення та вольт-амперні характеристики тиристорів.
4. Що таке магніотранзисторні ключі?
5. Наведіть структурну схему, вольт-амперні характеристики та типи польових транзисторів.
6. Які є типи тиристорів, їхня структура і вольт-амперні характеристики?
7. Наведіть схему керованого перемикача постійного струму на транзисторі та його контактний варіант.
8. За якими властивостями електронні пристрої електромеханотроніки поділяють на енергетичні та інформаційні?
9. Що таке двоступінчаста комутація тиристорів і які можливі схеми двоступінчастої комутації?
10. Наведіть схему керованого перемикача на тиристорах з двоступінчастою паралельною комутацією.
11. Наведіть схему керованого перемикача на тиристорах з двоступінчастою послідовною конденсаторною комутацією.

ЛЕКЦІЯ 5
РОЗДІЛ 3
ВУЗЛИ І ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНОТРОНІКИ

План лекції:

- 3.1. Силові комутатори
- 3.1.1. Мостовий комутатор
- 3.1.2. Трифазний реверсивний комутатор
- 3.1.3. Нереверсивні комутатори
- 3.1.4. Однопівперіодні комутатори з буферами енергії

3.1. Силові комутатори

Поняття силового комутатора найчастіше належить до вентильних двигунів (ВД) та крокових двигунів (КД), які є одними з найвиразніших екземплярів електромеханотронних перетворювачів.

Структура комутатора визначається функціональним призначенням ВД і загальному вигляді складається з таких основних вузлів:

вузол силових ключів: силові ключі є основними елементами комутатора; вони виконують функції електронного колектора і здійснюють комутацію струмів в секціях ЕМП; в керованих двигунах силові ключі, як правило, одночасно є елементами, які виконують функції керування потужністю, яка підводиться до двигуна;

вузол формування сигналів давача положення ротора: елементи цього вузла виконують такі функції:

- підсилення сигналів первинного ДПР;
- логічні дії для отримання сигналів визначеної тривалості й форми;
- зсув сигналів ДПР у часі (затримка);
- імпульсна модуляція.

Цей вузол може бути і відсутнім.

и вузол Формування сигналів давачів керування і давачів зворотних зв'язків:

- до операцій, які виконуються цим вузлом, належать: комутація електричних кіл за сигналами давачів керування;
- виконання операцій додавання, множення, диференціювання, інтегрування сигналів;
- логічні дії, які пов'язані з отриманням сигналів визначеної тривалості, форми й послідовності;

вузол Формування сигналів контролю режиму роботи й захисту
двигу- на, який виконує такі функції:

захист двигуна під час аварійного стану;
захист ключів комутатора від перенапруг;
обмеження пускових струмів; уведення резервних
елементів та вузлів.

3.1.1. Мостовий комутатор

На рис. 3.1 показано схему однофазного мостового (реверсивного) комутатора.

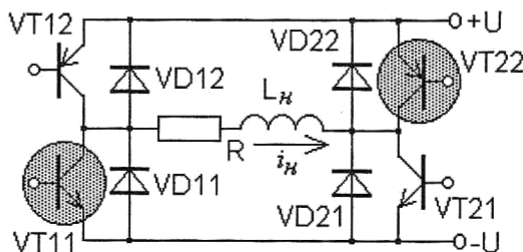


Рис. 3.1. Принципова електрична схема мостового комутатора

такій схемі доцільно застосовувати у верхній і нижній групах ключів комплементарні транзистори, причому сполучати їх так, щоб навантаження було сполучено з колекторами транзисторів. У цьому випадку керувати обома транзисторами (наприклад, $VT11$ і $VT22$) можна одним керувальним ключем.

Діоди $VD11$ - $VD22$ слугують для розряду енергії магнітного поля, яка нагромаджується в індуктивності навантаження L_n . Наприклад, під час вимкнення силових ключів $VT11$ і $VT22$ під дією ЕРС самоіндукції, напрям якої завжди збігається з напрямом струму, який вимикається, відкриваються діоди $VD11$ і $VD22$, через які і відбувається розряд енергії магнітного поля на джерело живлення. При цьому варто пам'ятати, що у разі застосування як джерела живлення напівпровідникового випростувана, необхідно передбачити елемент, який міг би прийняти цю енергію (наприклад, конденсатор).

мостовому комутаторі можна замінити одну пару повністю керованих транзисторних ключів на напівкеровані тиристорні ключі (рис. 3.2).

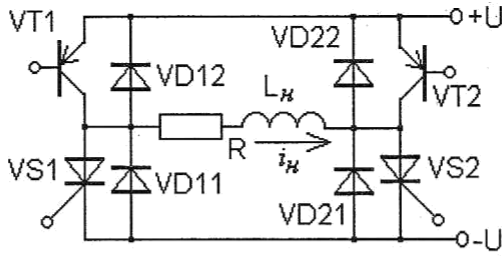
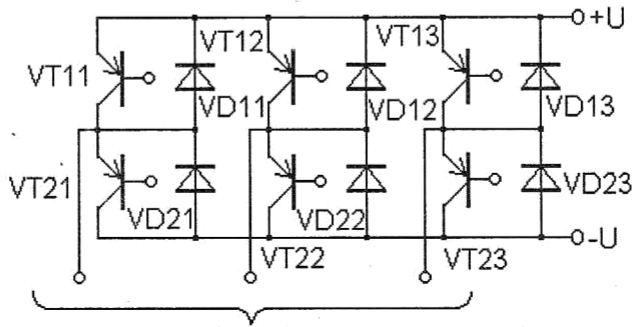


Рис. 3.2. Принципова електрична схема транзисторно-тиристорного мостового комутатора

Для протікання струму в показаному на рис. 3.2 напрямку вмикають транзисторний ключ $VT1$ та тиристор $VB2$. Вимикають струм закривання транзисторного ключа $VT1$. Під дією ЕРС самоіндукції, напрям якої збігається з напрямом струму, який зменшується, відкриваються діоди $VD22$ та $VD11$, тиристор $VB2$ запирається.

3.1.2. Трифазний реверсивний комутатор

Для забезпечення роботи трисекційного вентильного двигуна з постійними магнітами слугує трифазний мостовий (реверсивний) комутатор, принципова схема якого зображена на рис. 3.3.



до навантаження (секції якорної обмотки)
Рис. 3.3. Трифазний мостовий реверсивний комутатор

цій схемі кожний транзисторний ключ керується окремо. Діоди $VD11$ - $VD23$ слугують для захисту силових транзисторів від перенапруг при їхньому запиранні.

3.1.3. Неревверсивні комутатори

Малопотужні вентильні двигуни з постійними магнітами, з метою зменшення кількості силових транзисторних ключів, а також ВД з пасивними роторами, керуються неревверсивними (однопівперіодними) комутаторами.

Схема одного з таких комутаторів, який можна назвати напівмостовим, зображена на рис. 3.4.

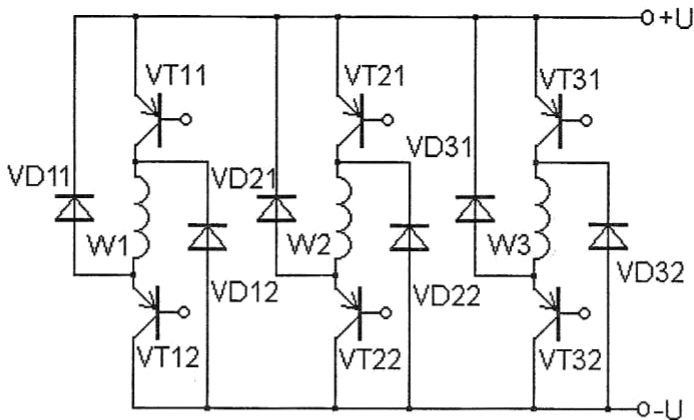


Рис. 3.4. Однопівперіодний трифазний транзисторний комутатор вентильного двигуна

Поширене розповсюдження вентильних реактивних двигунів стримується їх невисокими енергетичними показниками, що зумовлено необхідністю розсіювання запасеної в електромагнітному полі енергії під час комутації струму в секціях транзисторними ключами з метою захисту їх від перенапруг. Найяскравіше це проявляється у вентильних двигунах з однопівперіодним комутатором зі стабілітронним приймачем енергії магнітного поля (рис. 3.5).

Дещо кращі енергетичні показники мають ВД з комутатором, в якому паралельно до кожної секції і зустрічно до джерела живлення сполучені диністори (рис. 3.6).

Недоліком цього ВД є невисокий коефіцієнт віддачі, внаслідок того, що вимкнення струму в силових транзисторах комутатора до моменту увімкнення диністорів відбувається за значної напруги і призводить до втрат енергії та нагрівання транзисторів, а також невисока надійність через розкид параметрів диністорів.

Відомі також вентильні двигуни з однопівперіодними комутаторами, в яких з метою підвищення коефіцієнта віддачі паралельно до кожної секції якірної обмотки і зустрічно до джерела живлення приєднані послідовно сполучені діод і транзистор, причому база транзистора сполучена з давачем

струму, приєднаного послідовно до секції через релейний елемент. Такий ВД має невисокі енергетичні показники, внаслідок того, що енергія магнітного поля виділяється на датчиках струму, а також внаслідок виникнення гальмівного моменту під час затримування вимкнення струму секції.

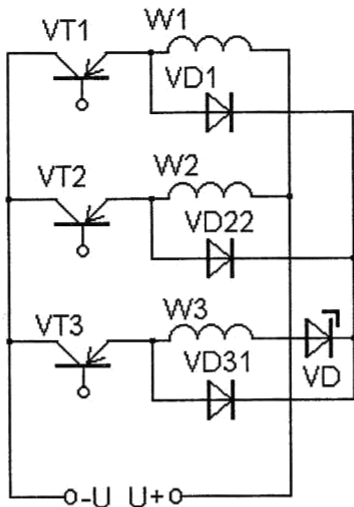


Рис. 3.5. Однопівперіодний транзисторний комутатор зі стабілітронним приймачем енергії

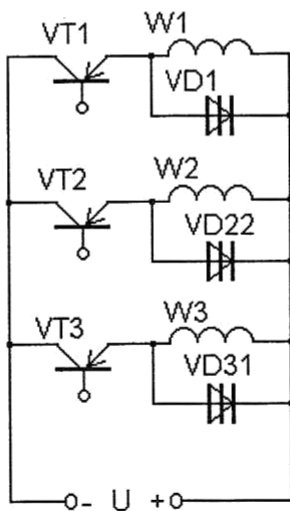


Рис. 3.6. Однопівперіодний комутатор з диністорами

3.1.4. Однопівперіодні комутатори з буферами енергії

теорії електромагнітного перетворення енергії відомо, що електрична енергія, яка надходить в контур електромеханічного перетворювача з джерела, витрачається на виконання корисної роботи, на теплові втрати та на зміну енергії магнітного поля. У машині, в якій струми, індуктивності тощо періодично змінюються, енергія магнітного поля не втрачається незворотно, а тільки обмінюється між індуктивно зв'язаними контурами. У ВД з однопівперіодною комутацією струму енергія, яка запасена в магнітному полі секції якірної обмотки, під час вимкнення останньої розряджається на елементах схеми комутації.

В індукторних машинах електромеханічне перетворення енергії здійснюється за рахунок модуляції параметрів машини. У машинах з ненасиченим магнітним колом енергія, яка запасається магнітним полем, дорівнює енергії, яка перетворюється в механічну, а тому коефіцієнт віддачі ВД з ЕМП індукторного типу та з однопівперіодним комутатором традиційного виконання навіть за нехтування тепловими втратами всередині машини не може перевищити 50 %.

Звідси можна дійти висновку, що для поліпшення енергетичних показників вентильного двигуна з пасивним ротором одним із найефективніших способів є використання енергії, яка запасена в магнітному полі якірної обмотки, для форсування вмикання струму секції.

Отже, завдання створення вентильного двигуна на базі простої, дешевої і технологічної індукторної машини значною мірою зводиться до необхідності створення нових схемних вирішень, які дадуть можливість використати енергію, нагромаджену в магнітному полі секції обмотки якоря, для виконання корисної роботи.

На рис. 3.7 зображена одна зі схем транзисторного комутатора з послідовними ємнісними накопичувачами (буферами енергії), принцип роботи якої полягає ось у чому: коли ротор займе положення кута вмикання θ (рис. 3.8), сигнали $K1 - K4$ ДПР відкриють силові ключі $VT1$ і $VT4$, які залишатимуться у відкритому стані протягом кута комутації α . Секція обмотки якоря ЕМП m_i отримує живлення від джерела і послідовно згідно з ним сполученого і зарядженого в попередньому циклі конденсатора CI через ці ключі. Діод $UB1$ буде закритим прикладеною до нього в зворотному напрямку напругою конденсатора CI . Струм секції j_i форсовано зростає, конденсатор CI розряджається, і коли напруга на ньому досягне значення нуля, відкриється діод

УВІ, секція *ууі* приєднується до джерела живлення по колу: діод *УВІ*, транзисторний ключ *УТІ*. Під дією електромагнітного моменту ротор провертається, і при досягненні значення кута комутації у закриваються ключі *УТІ* і *УТ4*.

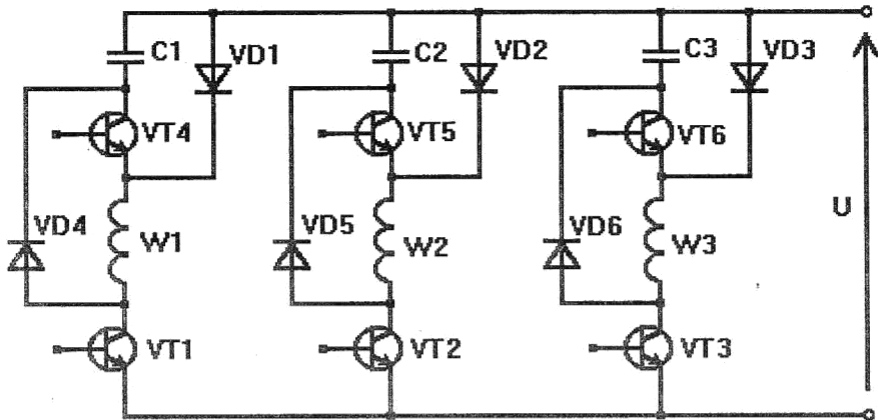


Рис. 3.7. Принципова електрична схема транзисторного комутатора з послідовними ємнісними нагромаджувачами в кожній секції

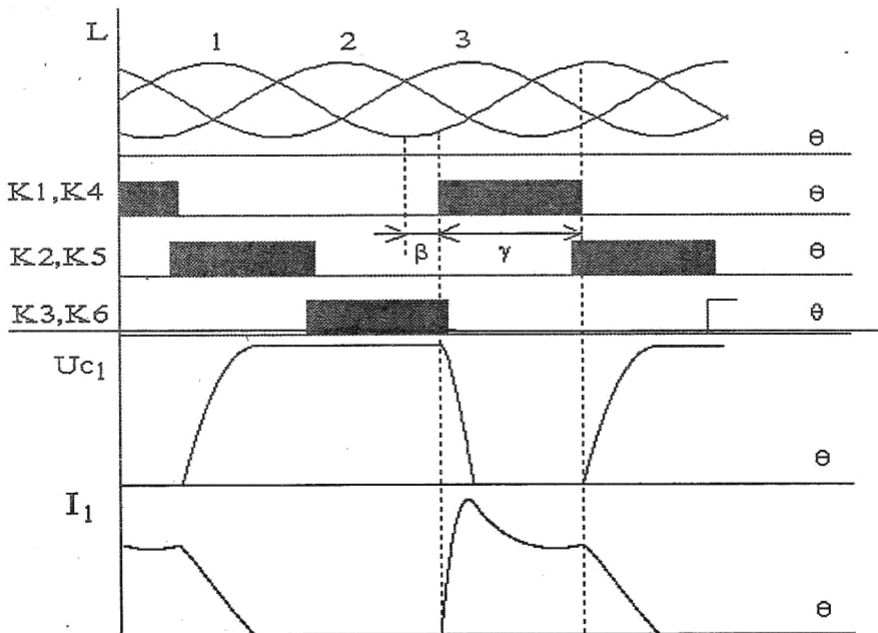


Рис.3.8. Індуктивність та струм секції, діаграма роботи транзисторних ключів та напруга на нагромаджувальному конденсаторі

Під дією ЕРС самоіндукції струм секції $i > I$ почне протікати по колу: діод $VB4$, конденсатор CI , діод $VB1$. Конденсатор CI заряджається, струм секції формовано зменшується. Для інших секцій цей процес повторюватиметься через кут $2 \cdot \alpha / m$, де m - кількість секцій. При цьому розв'язують три завдання: по-перше, утилізується енергія, запасена в електромагнітному полі якоря ЕМП; по-друге, обмежується наростання напруги на колектор-емітерному переході транзисторного ключа комутатора до рівня допустимого; по-третє, за рахунок майже миттєвого перехоплення струму вимикання транзистора колом заряду конденсатора значно зменшуються динамічні втрати на перемикання транзистора комутатора. Розрахунки і експериментальні дослідження показують, що застосування схем з СНЕ у ВД з пасивним ротором покращують його коефіцієнт віддачі в 1.7-1.8 раза порівняно зі схемою з стабілітронним захистом від перенапруг на силових ключах комутатора.

Схему комутатора з ємнісним буфером енергії можна побудувати і на одному конденсаторі.

Схема транзисторного комутатора з одним послідовним буфером енергії зображена на рис. 3.9.

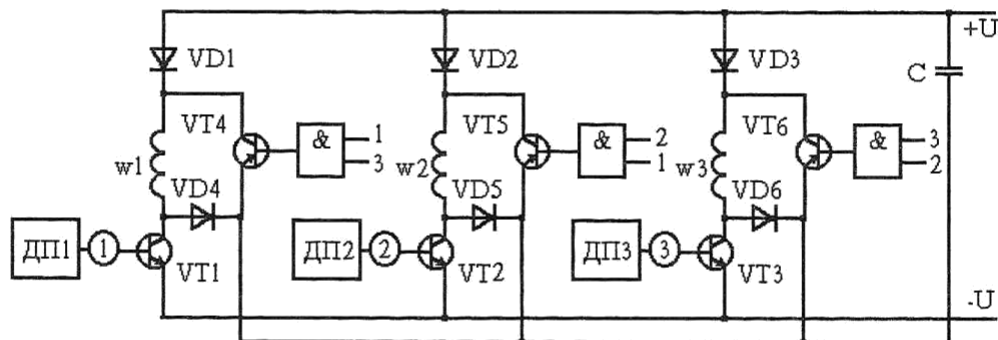


Рис.3.9. Транзисторний комутатор ВД з послідовним ємнісним нагромаджувачем (буфером енергії)

Транзистори $VT1 - VT3$ - силові ключі ЕК, керовані сигналами ДПП $ДПП1 - ДПП3$ (на рис. 3.10 зображені як $K1 - K3$), кут активної зони сигнального сектора якого більший, ніж $2 \cdot \alpha$ і менший, ніж α - n електричних радіан (m - кількість секцій обмотки якоря ВД). Під час закривання, наприклад, ключа $VT1$ струм секції $w1$ під дією електрорушійної сили самоіндукції протікатиме по колу: діод $VD4$, конденсатор C , діод $VB1$, заряджаючи при цьому конденсатор C (транзистор $VT4$, який керується сигналом $K4$, при цьому, як видно з рис. 8.10, закритий). Енергія магнітного поля передається в електростатичне поле конденсатора. Одночасно здійснюється захист силового ключа $VT1$ від перенапруги.

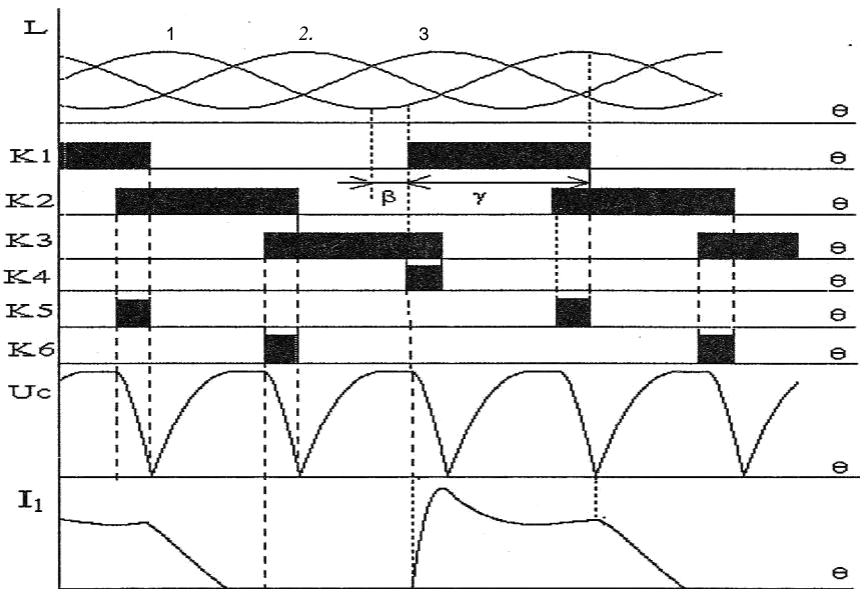


Рис. 3.10. Діаграма роботи транзисторних ключів, напруга на конденсаторі та струм секції ВД з послідовним буфером енергії

Під час вмикання наступної секції $\nu 3$ одночасно з силовим ключем $УТ3$ сигналом схеми логічного попарного збігу сигналів суміжних каналів ДПР вмикається і транзистор $УТ6$. До секції $m > 3$ прикладаються напруга джерела живлення і послідовно згідно з нею сполучена напруга конденсатора C , внаслідок чого струм у секції наростає форсовано. Діод $УО3$ при цьому закритий прикладеною до нього в зворотному напрямку напругою конденсатора. Конденсатор розряджається, віддаючи енергію, яка була нагромаджена в електростатичному полі, у секцію $\nu 3$. Коли напруга на конденсаторі зменшиться до нуля, відкриється діод $УВ3$ і секція $m > 3$ отримуватиме живлення від джерела по колу: діод $УО3$, транзистор $УТ3$.

При подальшому обертанні ротора закривається силовий транзистор $УТ2$ цикл повторюється.

Зауважимо, що заряд конденсатора здійснюється однополярною напругою. Отже, можна застосовувати, як нагромаджувальний, електролітичний конденсатор. При цьому масо-габаритні показники буфера значно кращі, ніж постійних магнітів збудження, крім того, встановлюється він, на відміну від останніх, на нерухомій частині ВД, найчастіше, за межами електромеханічного перетворювача.

Ємність нагромаджувального конденсатора вибирають, з одного боку, враховуючи умову обмеження напруги на силових ключах до рівня допустимої, з іншого, повного розряду конденсатора за час відкритого стану транзисторів $УТ4$. $УТ6$.

ВД з однопівперіодним комутатором є, без сумніву, найпростішими й найнадійнішими. Однак вони поступаються іншим ВД за використанням активних матеріалів. Для покращання використання електричної машини збільшують електромагнітні навантаження та активну зону сигнального сектора ДПР. При цьому в різні моменти часу до джерела живлення приєднується різна кількість секцій, що зумовлює значні пульсації струму живлення ВД. А це є небажаним під час використання ВД в малопотужних регульованих електроприводах, які живляться від джерел обмеженої потужності.

Покращити енергетичні показники й зменшити пульсації струму джерела живлення ВД з пасивним ротором дає змогу однопівперіодний комутатор з паралельним приєднанням нагромаджувального конденсатора.

На рис. 3.11 показано принципову електричну схему вентильного реактивного двигуна з паралельним буфером енергії.

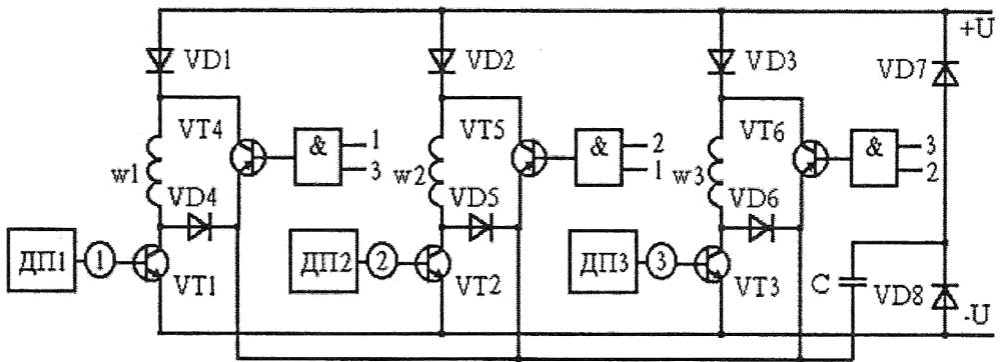


Рис. 3.11. Транзисторний комутатор з паралельним буфером енергії

Припустимо, що в конкретний момент часу сигналом $K1$ ДПР (див. рис. 3.12) відкритий транзисторний ключ $VT1$. У секції $m>1$ протікає струм по колу: джерело живлення, діод $УВ1$, секція $и>1$, транзистор $УТ1$. Конденсатор при цьому заряджений напругою, яка більша від напруги джерела живлення, за рахунок вимикання струму в попередній секції, про що буде зазначено нижче. Повертаючи ротор на деякий кут, сигнал $K2$ ДПР відкриє транзисторний ключ $УТ2$ і, одночасно, сигнал логічної схеми попарного збігу сигналів суміжних каналів ДПР $K5$ відкриє транзистор $УТ5$. Напруга конденсатора C прикладеться до секції $и>2$ і через неї починає протікати струм по колу: конденсатор C , транзистор $УТ5$, секція $и>2$, силовий ключ $УТ2$, діод $УВ8$. Конденсатор розряджається і секція $м>2$ на інтервалі перекриття сигналів суміжних каналів ДПР отримує живлення тільки за рахунок енергії, нагромадженої в конденсаторі, до джерела живлення приєднана лише секція $ч>1$. При цьому ротор

продовжує обертатись і в деякий момент часу сигнал $K1$ ДПР закриє силовий ключ $UT1$, а сигнал $K5$ з виходу схеми логічного збігу вимкне транзистор $UT5$. Конденсатор припиняє свій розряд і струм через секцію $n > 2$ тепер протікатиме під дією напруги джерела живлення. Струм секції m під дією ЕРС самоіндукції починає протікати через діод $UB4$, конденсатор C , діоди $UB7$ і $UB1$, заряджаючи при цьому конденсатор. Відбувається форсоване вимикання секції m . Енергія магнітного поля передається в електростатичне поле конденсатора C , заряджаючи його до напруги, яка більша від напруги джерела живлення і зберігається до наступної зміни структури схеми. Одночасно здійснюється захист силових ключів ЕК від перенапруг.

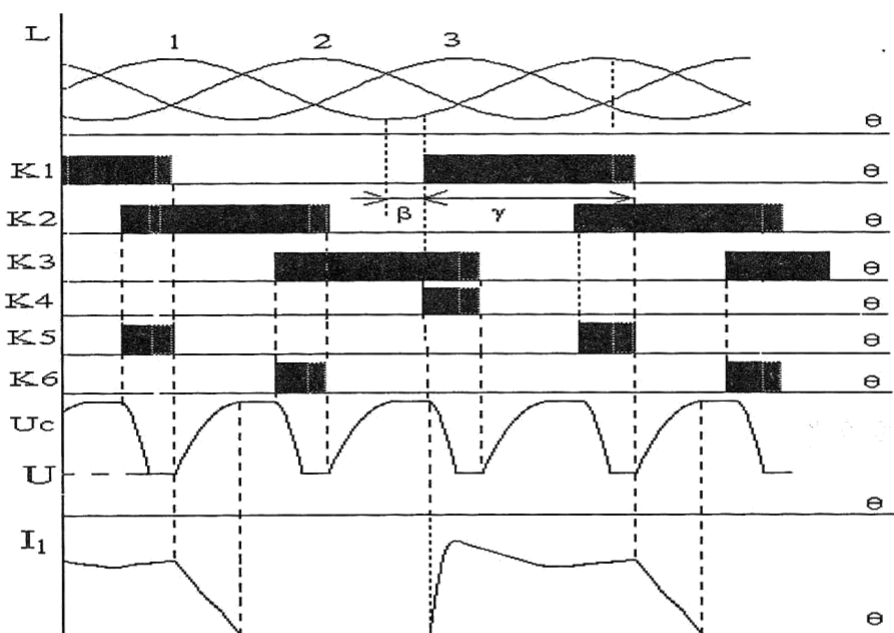


Рис. 3.12. До схеми транзисторного комутатора з паралельним ЕНЕ

Величину ємності конденсатора вибирають за умови обмеження напруги на силових ключах до рівня допустимої, щоб він при номінальному режимі роботи за час перекриття сигналів ДПР не встигав розрядитись до напруги джерела живлення. Цим буде забезпечено живлення секції, що вмикається енергією поля конденсатора і в кожен момент часу тільки одна секція ЕМП буде приєднана до джерела живлення, а отже, будуть відсутні пульсації струму джерела живлення, які зумовлені почерговим приєднанням то однієї, то двох секцій.

Через секцію $m > 1$ струм перестає протікати, коли конденсатор зарядиться.

При подальшому повороті ротора відкривається транзисторний ключ $UT3$ і транзистор $UT6$ і цикл повторюється.

Алгоритм роботи схеми ЕК з послідовним ЄНЕ дає змогу спростити схему перетворення нагромадженої в секціях двигуна енергії. При цьому ефективність використання реактивної енергії зменшується незначно, а надійність роботи схеми підвищується у зв'язку зі зменшенням кількості потужних електронних елементів схеми.

На рис. 3.13 показана схема ВД з послідовним ЄНЕ і спільним колом форсування, робота якого відбувається так.

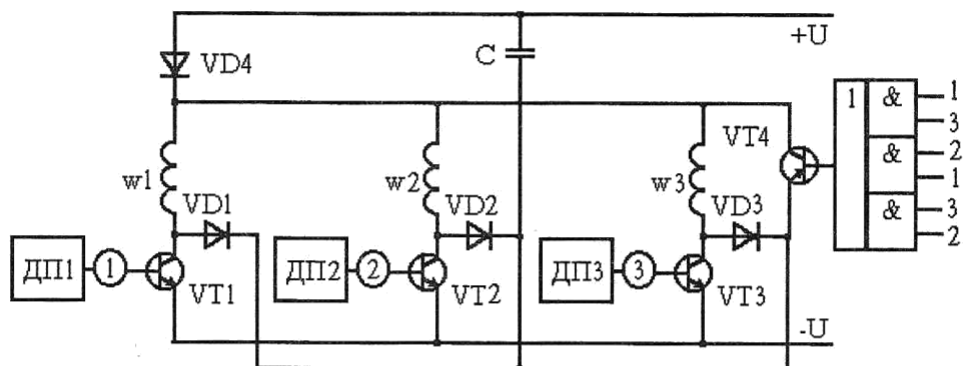


Рис. 3.13. Вентильний двигун з послідовним буфером енергії й спільним колом підживлення секцій

Припустимо, що в цей момент часу сигналом $K1$ ДПР закривається силовий ключ $UT1$ (див. рис. 3.14). Одночасно з ним сигналом $K4$ закривається

ключ $UT4$. Струм секції $m>1$ під дією ЕРС самоіндукції починає протікати через діод $VD4$, конденсатор C , діод $УБ1$, заряджаючи конденсатор C . Відбувається форсоване спадання струму в секції $m>1$. При закінченні спадання струму в секції $m>1$ конденсатор зарядиться до напруги, яка при ідеальних елементах схеми збережеться до наступної зміни структури схеми.

Під час повороту ротора на деякий кут сигнал $K3$ ДПР і сигнал $K4$ з виходу блока логічного попарного збігу сигналів суміжних каналів ДПР одночасно відкривають транзисторні ключі $UT3$ і $UT4$. До секції $y2$ і $y3$ підводиться напруга джерела живлення і послідовно, згідно з нею сполучена, напруга конденсатора C через діод $У14$, транзисторні ключі $UT2$ і $UT3$ відповідно і транзистор $UT4$. Конденсатор розряджається, віддаючи енергію в секції $y2$ і $y3$ якірної обмотки, а струм в секціях наростає форсовано.

За подальшого повороту ротора закриваються транзисторні ключі $UT2$ і $UT4$ і цикл повторюється.

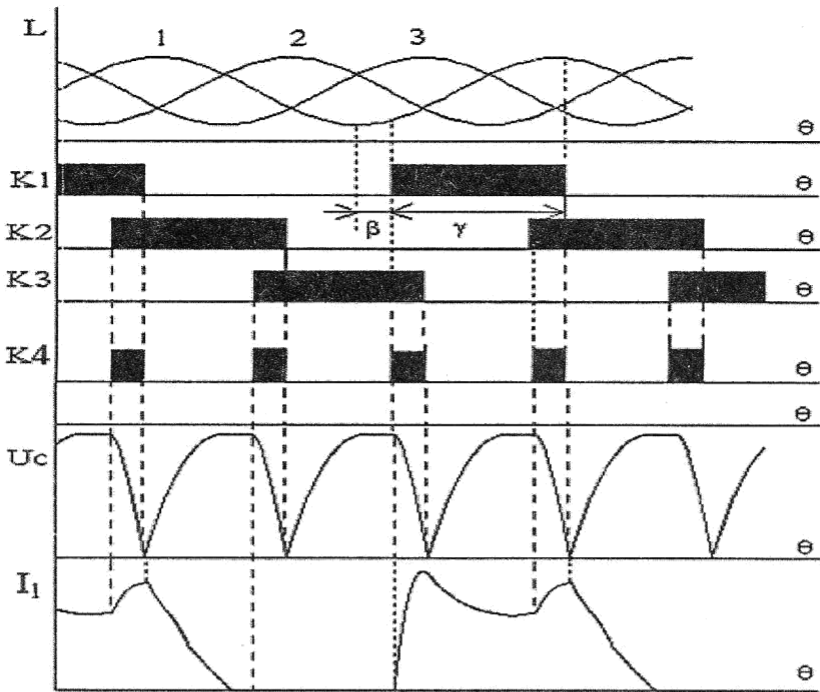


Рис. 3.14. До транзисторного комутатора з послідовним ЄНЕ й спільним колом підживлення

Практично вся енергія магнітного поля, яка була накопичена в секції, що вимикається, переходить в електростатичне поле конденсатора, а при вмиканні наступної секції передається в увімкнуті секції, виконуючи, отже, корисну роботу, одночасно забезпечуючи і захист ключів комутатора від перенапруг.

Аналогічно можна підвищити надійність і ВД з паралельним ЄНЕ, замінивши окремі транзисторні ключі і діоди підживлення секцій спільним ключем і діодом. Схема перетворюється до вигляду, який показано на рис. 3.15.

цьому комутаторі керування підживлювальним транзисторним ключем *УТ4* здійснюється, як і в попередньому випадку, сигналом схеми виявлення збігу сигналів суміжних каналів ДПР.

Заряд конденсатора тут відбувається так само, як і у ВД з послідовним ЄНЕ: через діоди *УВ1 - УВ3* і діод *УВ4*. Відбувається форсоване спадання струму в секції. Конденсатор заряджається до напруги, яка більша від напруги джерела живлення.

При деякому положенні ротора одночасно відкриваються один із силових ключів і підживлювальний ключ *УТ4*. Дві секції якірної обмотки під'єднуються до напруги конденсатора (діод *УВ4* буде закритий напругою конденсатора, яка

вища від напруги живлення). Конденсатор розряджається і при досягненні напруги на ньому величини напруги джерела живлення відкривається діод УБ4 і секції надалі споживають енергію від джерела живлення.

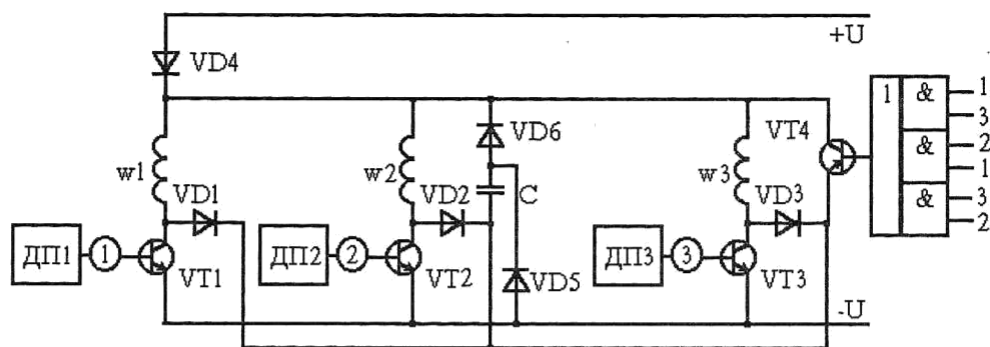


Рис. 3.15. Вентильний двигун з паралельним буфером й спільним колом форсування

Таким чином всі запропоновані схеми вентильного двигуна з ЕМП з пасивним ротором дають змогу використовувати енергію, яка накопичена в магнітному полі якірної обмотки для виконання корисної роботи, підвищуючи використання двигуна, і наближають техніко-економічні показники вентильного реактивного двигуна до показників такого високовикористаного двигуна, як асинхронний.

Проведеними теоретичними і експериментальними дослідженнями ЕМП пасивним ротором різних конструктивних виконань (для обертових, лінійних і модульних конструкцій) встановлено, що коефіцієнт віддачі вентильного реактивного двигуна з керуванням від ЕК з ЄНЕ підвищується в 1,6-1,8 рази порівняно з керуванням цих же двигунів від традиційних ЕК з елементами розсіювання енергії, яка накопичується в магнітному полі статора і захисту транзисторних ключів від перенапруг. Спеціально спроектовані параметричні перетворювачі з запропонованими ЕК забезпечують енергетичні показники на рівні колекторних машин постійного струму і можуть з успіхом застосовуватись в регульованих електроприводах малої потужності. Відчутні переваги такі ВД мають в області низьких частот обертання (до 100-600 об/хв).

Для підтвердження ефективності запропонованих схем комутаторів вентильного реактивного двигуна з погляду поліпшення енергетичних показників та використання його електромеханічного перетворювача на рис. 3.16 показано експериментальні статичні характеристики експериментальних взірців ВРД.

Порівняння зображених характеристик свідчить, що застосування буферів енергії забезпечує зростання коефіцієнта віддачі до 20 % і використання ЕМП до 70 % (наприклад, при значенні моменту навантаження 0,6 Нм).

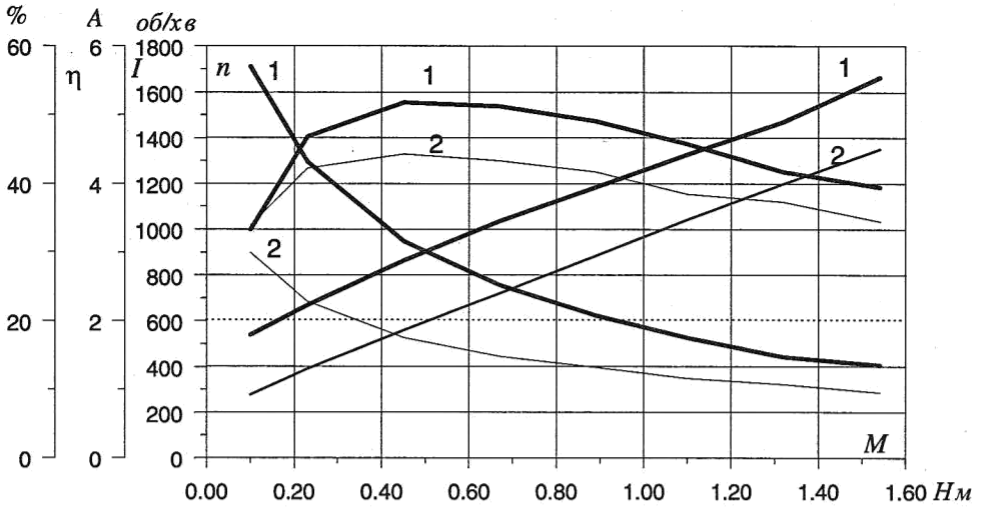


Рис. 3.16. Статичні характеристики експериментального зрізця ВРД у функції моменту:
 1-3 комутатором з послідовними буферами в кожній секції;
 2-3 напівмостовим комутатором

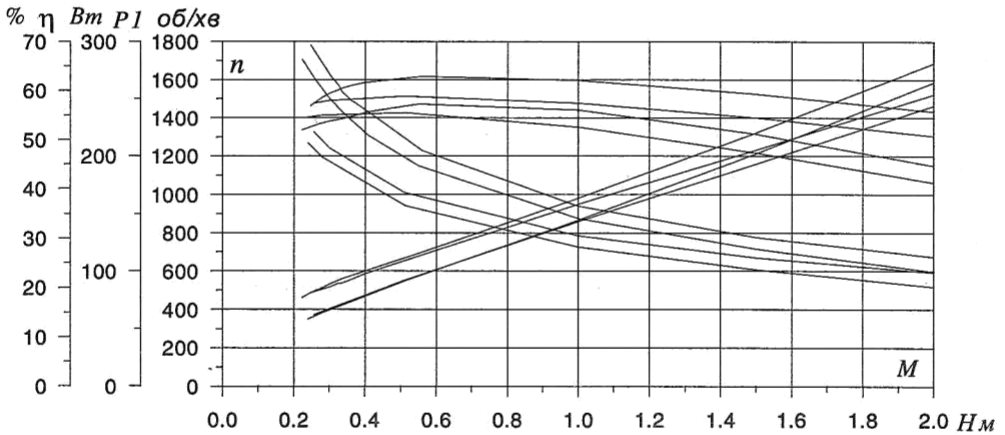


Рис. 3.17. Порівняння робочих характеристик ВРД з різними схемами комутатора:
 окремі в кожній секції буфери;----- спільні послідовний буфер
 й підживлювальний ключ;----- паралельний буфер й окремі
 в кожній секції підживлювальні ключі;----- паралельний накопичувач
 й спільний підживлювальний ключ

Кожна із запропонованих схем електронних комутаторів з смісними буферами енергії має свої переваги й недоліки. Так, схема з окремими буферами в кожній секції якірної обмотки (рис. 3.7) потребує в t разів більше

накопичувальних конденсаторів, але має простішу схему керування силовими ключами й менший рівень максимальної перенапруги на них, ніж схема з одним послідовним ємнісним буфером (рис. 3.9). Крім того, всі вони мають відмінність за енергетичними показниками. На рис. 3.17 показано порівняння статичних характеристик взірця ВРД з різними схемами комутатора.

Експериментальні дослідження запропонованих схем комутаторів показують, що кращі і практично однакові енергетичні показники мають комутатори з послідовними буферами в кожній секції обмотки статора й спільним накопичувачем, але з окремими підживлювальними ключами (рис. 3.7 та 3.9) - характеристики зображені на рис. 3.17 суцільною лінією.

Запропоновані схемні вирішення ЕК достатньо універсальні і за відповідної організації керування підживлювальними ключами їх успішно можна застосовувати в крокових двигунах і в ВД зі збудженням від постійних магнітів.

Контрольні запитання.

1. Охарактеризуйте основні вузли структури електронних комутаторів вентильних двигунів.
2. Наведіть принципову схему і опишіть роботу мостового транзисторного комутатора.
3. Наведіть принципову схему і опишіть роботу напівмостового транзисторного комутатора.
4. Наведіть принципову схему трифазного транзисторного реверсивного комутатора та принцип його роботи.
5. Наведіть схему і принцип роботи трифазного однопівперіодного комутатора зі стабілітронним приймачем енергії.
6. Наведіть принципову схему і опис роботи однопівперіодного комутатора з диністорами.
7. Наведіть принципову схему транзисторно-тиристорного мостового комутатора та принцип її роботи.
8. Наведіть схему і опишіть принцип роботи трифазного транзисторного комутатора ВД з послідовним буфером енергії.

ЛЕКЦІЯ 6

План лекції:

3.2. Конструктивні схеми ЕМП вентильних двигунів

3.3.1. Класифікація ДПР

3.3.2. Експлуатаційно-технічні вимоги до ДПР

3.3.3. Давачі положення з індуктивними елементами

3.3.4. Давач з елементами Холла

3.2. Конструктивні схеми ЕМП вентильних двигунів

Характерною особливістю ВД є те, що вони мають надзвичайно поширену різноманітність конструкцій і схем, що дає змогу використовувати їх для різних систем електропривода, режимів експлуатації та умов роботи.

Закладену уже принципом роботи складність вентильного двигуна варто використати для виконання не тільки функцій простого приведення в рух виконавчого механізму, але й для позиційного, моментного тощо приводів. Наявність повністю керованого електронного інвертора (силового транзисторного комутатора) та первинного давача позиційного зворотного зв'язку (давача положення ротора) дає змогу із залученням тільки малопотужних (не силових) додаткових схем формування керувальних сигналів організувати ці режими роботи.

Як показують проведені дослідження, для забезпечення точності позиціонування та підвищення стійкості роботи електронних компонентів в електромеханічних перетворювачах вентильних двигунів необхідно застосовувати конструкції статорів, які забезпечують відсутність електромагнітних зв'язків між секціями.

Для використання у вентильних двигунах з усього різноманіття індукторних електромеханічних перетворювачів найдоцільнішими є конструкції з явновраженими полюсами на статорі, в яких можна забезпечити магнітну ізоляцію окремих секцій.

Найвідоміша з них є конструкція, яка зображена на рис. 3.18. Назвемо її класичною.

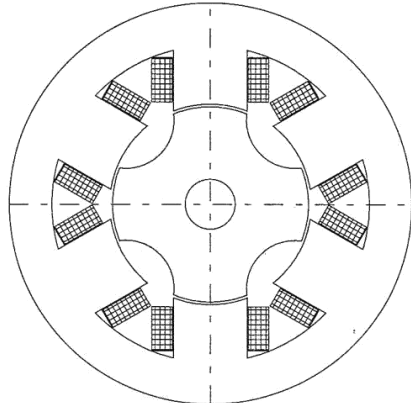


Рис. 3.18. Конструктивна схема трисекційного електромеханічного перетворювача ВД з пасивним ротором (класична конструкція)

До її позитивних ознак можна зарахувати такі: проста конструкція статора і ротора; висока технологічність виконання обмотки статора; низька вартість виготовлення; відсутність реактивного моменту; низька вартість матеріалів, а також можливість створення порівняно великих рушійних моментів.

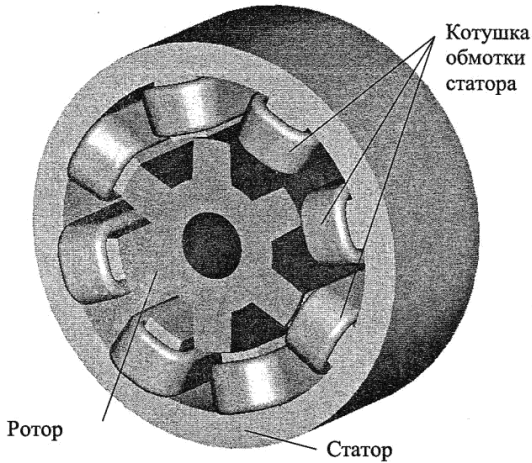


Рис. 3.19. Чотирисекційний ЕМП вентильного двигуна класичної конструкції

Недоліками є те, що під час її застосування на інтервалі одночасного збудження суміжних секцій можливий деякий їх взаємний вплив, що може бути джерелом незначного збільшення втрат у міді і пульсацій електро- магнітного моменту. Щоправда, дещо зменшити цей вплив можна, сполучивши суміжні секції так, щоб вони створювали зустрічні магнітні потоки.

Кількості зубців статора і ротора для цієї конструкції пов'язані спів- відношенням

$$\frac{z}{m} < 7 = (i), 2, 3, \dots \quad (3.1)$$

де m - кількість секцій обмотки статора; z - кількість зубців статора на одну секцію.

Варто відзначити, що наведена конструкція є відома й поширено застосовується під час побудови електромеханічних перетворювачів крокових двигунів

Деколи для збільшення електромагнітного моменту можна застосовувати конструкцію зі збільшеною кількістю полюсів статора і ротора (рис. 3.20).

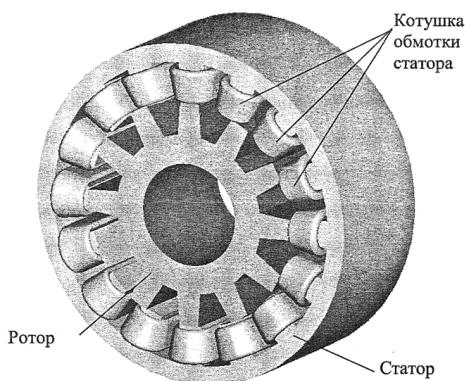


Рис. 3.20. Чотирисекційний ЕМП ВД зі збільшеною кількістю полюсів

Збільшення електромагнітного моменту можливе також і за виконання статора з двома зубцями на один полюс (рис. 3.21).

Також можливе виготовлення електромеханічного перетворювача вентилювального двигуна зі зовнішнім ротором (рис. 3.22). Такий варіант можна застосовувати, наприклад, як електропривід мотор-колеса або барабана автоматичної пральної машини.

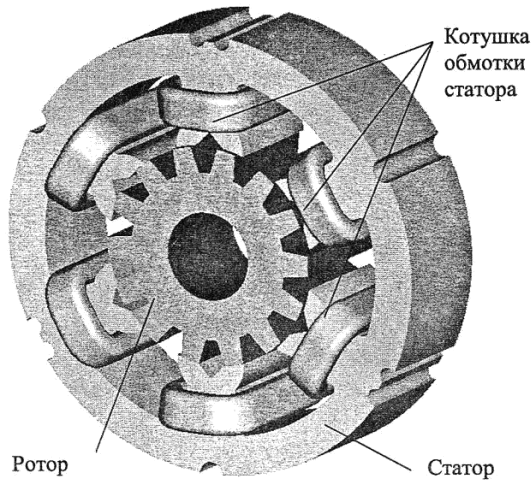


Рис. 3.21. Трисекційний ЕМП ВД з двома зубцями на полюс

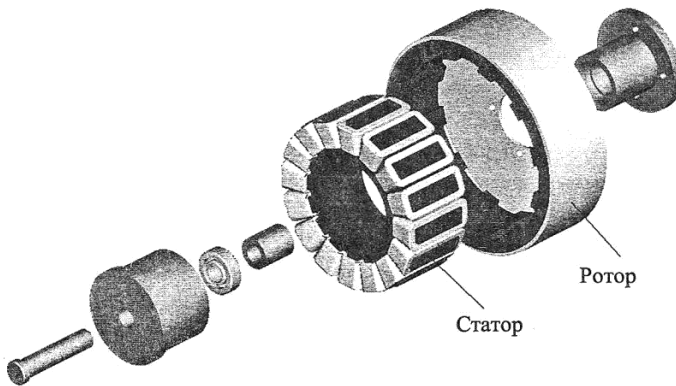


Рис. 3.22. Конструкція ЕМП ВД зі зовнішнім ротором

На базі класичної конструкції ЕМП ВД можна побудувати статор, який дає змогу використати безвідходний розкрій сталі (див. рис. 3.24), зменшити витрату міді і повніше використати об'єм активної частини машини (рис. 3.23). Назвемо його статором з Т-подібними елементами.

Статор складають так: з Т-подібних виштамповок набирають зубці, на які накладають зосереджені каркасні чи безкаркасні котушки обмотки. Їх вкла-

дають у пази на зовнішній стороні внутрішнього монтажного кільця. Ярмо складається з двох половинок, які виготовляють у вигляді намотаних зі смужки ізолюваної електротехнічної сталі тороїдальних кілець, які монтують до бокових торців Т-подібних зубців. Після фіксації елементів статора в єдиній монолітній структурі розточують внутрішнє монтажне кільце.

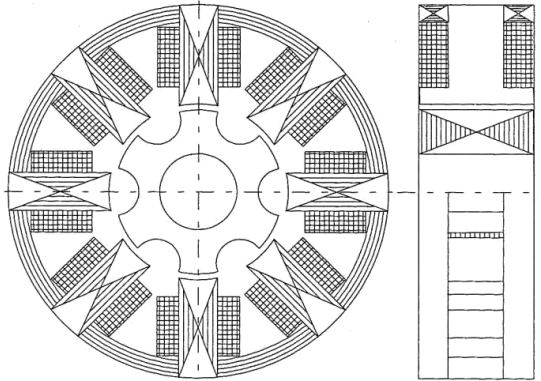


Рис. 3.23. Електромеханічний перетворювач з Т-подібними елементами статора

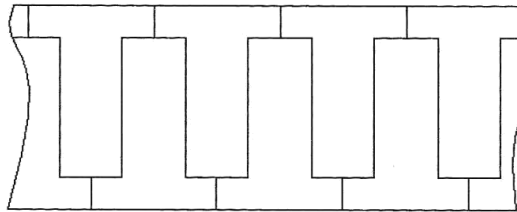


Рис. 3.24. Безвідходний розкрій сталі для елементів статора

Цю конструкцію доцільно використовувати в тих випадках, коли необхідний малий аксіальний розмір силової частини вентильного двигуна за однакових інших умов.

Недоліком такої конструкції можна вважати нетехнологічність її складання й неможливість отримання високих значень індукції у повітряному проміжку через насичення основи зубця.

Ще одна конструкція, яка повністю використовує аксіальну довжину машини як активну частину, зображена на рис. 3.25. Назвемо її електромеханічним перетворювачем з аксіальним магнітним потоком. Її доцільно використовувати у випадку, коли необхідно отримати мінімальну аксіальну довжину машини (наприклад, у приводі піднімання скла в дверях автомобіля) і повну магнітну ізоляцію секцій обмотки статора.

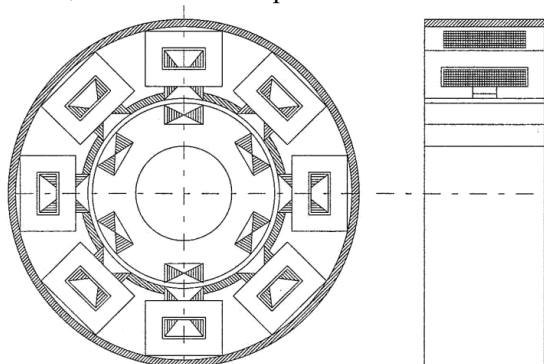


Рис. 3.25. ЕМП з аксіальним магнітним потоком статора

Тут зубці статора шихтують з Г-подібних пластин електротехнічної сталі каркасних котушок зосередженої обмотки статора так, щоб отримати структуру з С-подібним осердям, охопленим котушкою. Отримані таким способом елементи монтують в зовнішніх пазах внутрішнього монтажного кільця і охоплюють складений статор зовнішнім корпусом. Конструкцію фіксують зв'язуючим матеріалом, наприклад, епоксидною смолою, після чого розточують внутрішнє монтажне кільце. Ротор виготовляють з шихтованих прямокутних пластин електротехнічної сталі, які також фіксують за допомогою того самого матеріалу.

Конструкція повністю використовує довжину машини, а котушки обмотки статора збільшують діаметр машини.

Недолік - складна технологія складання, збільшення потоків розсіяння і неможливість отримання граничних значень індукції у повітряному проміжку.

На кафедрі електричних машин і апаратів Національного університету "Львівська політехніка" запропонована конструкція ЕМП на ЕГ-подібних елементах (рис. 3.26), яка, як і наведена вище конструкція з С-подібними елементами, забезпечує повну магнітну ізоляцію секцій ВД.

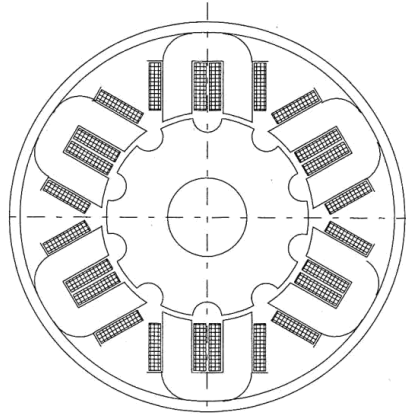


Рис. 3.26. II-подібна конструктивна схема активної частини ЕМП ВД

Елементи статора складають з II-подібних осердь, які виготовляють намотуванням смужки з електротехнічної сталі у вигляді літери О з подальшим розрізанням на дві частини. На підготовані таким способом осердя укладають дві котушки обмотки статора. З цих елементів знову ж таки на зовнішній стороні внутрішнього монтажного кільця збирають статор і охоплюють його зовнішнім корпусом. Потім фіксують конструкцію за допомогою зв'язуючого матеріалу. Внутрішнє монтажне кільце розточують до повного відкриття зубців.

Крім того, II-подібна конструкція під час виготовлення елементів магнітопровода, шихтованими вздовж осі машини за напрямком ліній магнітної індукції зі смужки електротехнічної сталі за безвідходною технологією (рис. 3.27), забезпечує зменшення рівня пульсацій електромагнітного моменту, за рахунок того, що магнітний потік частково проходить вперек напрямку шихтування. Середнє значення моменту на інтервалі $\pi/2$ електричних радіан практично не змінюється.

До недоліків II-подібної конструкції можна зарахувати її нетехнологічність та низьку ремонтоздатність, зумовлені тим, що окремо виготовлені елементи статора необхідно компонувати в завершену конструкцію статора за допомогою додаткових технологічних елементів та фіксуючих матеріалів.

Цього недоліку позбавлена конструкція статора, яка зображена на рис. 3.28. Назвемо її псевдо-Ц-подібною.

Цій конструкції осердя статора шихтують в аксіальному напрямі з ізованих пластин електротехнічної сталі, потім на зубці накладають каркасні

чи безкаркасні зосереджені котушки обмотки статора, які фіксують за допомогою клинів між паралельними або іншими зубцями. На базі цього статора можна будувати безкорпусні ЕМП; місце для стяжних болтів є між непаралельними зубцями.

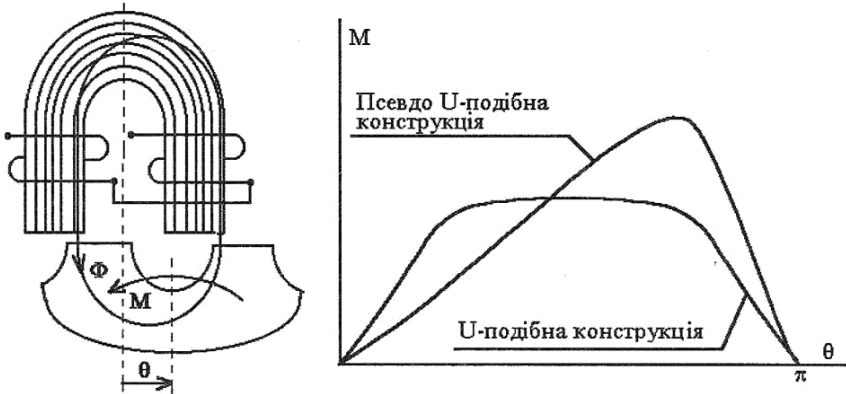


Рис. 3.27. Елемент статора II-подібної конструкції з осовим шихтуванням та залежність електромагнітного моменту від кута взаємного положення ротора і статора

Співвідношення між зубцями статора і ротора тут є таким:

$$Z_R = Z_S - m \quad (3.2)$$

Цю конструкцію доцільно використовувати під час створення вентиляного двигуна достатньо великого діаметра з великою кількістю зубців на роторі, оскільки вона дає змогу значно зменшити порівняно з класичною конструкцією довжину магнітних силових ліній, а отже, і втрати в сталі.

Всі наведені конструктивні схеми ЕМП допускають виконання зубців статора у вигляді гребінок, що може бути корисним під час проектування тихохідних ВД. Очевидно, що конструктивні схеми ЕМП з аксіальним магнітним потоком (рис. 3.25), з безвідходним розкроюванням сталі (рис. 3.23) та з II-подібними елементами (рис. 3.26) допускають модульний принцип побудови статора, що дає можливість на однотипних елементах конструювати широкий набір типорозмірів ВД.

Явнополюсне виконання статора зумовлює застосування зосереджених каркасних чи безкаркасних котушок, що спрощує технологію виготовлення та укладання обмотки, зменшує ймовірність браку при цьому, загалом підвищує надійність електромеханічного перетворювача.

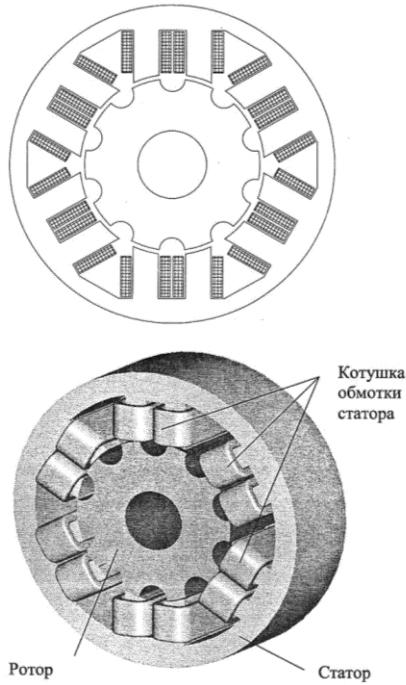


Рис. 3.28. Псевдо II-подібна конструкція ЕМП ВД

3.3. Давачі положення ротора

Давач положення ротора (ДПР) ВД, який є елементом позиційного зворотного зв'язку, слугує для утворення сигналів, які несуть інформацію про відносне положення магнітних осей індуктора або зубців ротора і якірної обмотки або полюсів статора ЕМП. Інформаційними ознаками сигналів ДПР можуть бути амплітуда напруги або струму, полярність (знак) або відносна тривалість імпульсів.

ДПР, інформаційними ознаками сигналів яких є амплітуда або полярність напруги, видають команди тільки на вмикання або вимикання відповідного напівпровідникового ключа при дискретному положенні індуктора щодо якоря. Якщо інформаційною ознакою сигналів ДПР є відносна ширина імпульсів, то він крім відміченої вище функції регулює напругу, яка подається на якірну обмотку, залежно від поточного значення кута між осями індуктора і якоря. Відповідно до вказаних ознак всі ДПР поділяють на дві групи:

- дискретні;
- аналогові.

Давач розміщений в корпусі електромеханічного модуля ВД, але схемно зв'язаний з комутатором. Тому його можна зарахувати і до елементів безпосередньо самої машини і до елементів комутатора. Звідси і двоякий характер вимог, які висувають до ДПР.

Конструктивно він повинен бути простим, технологічним у виготовленні, надійним у роботі. За температурою, вологістю, вібраціями, ударами вимоги до ДПР аналогічні як до електромеханічної частини, у той час як комутатор виготовляється за іншими, менш жорсткими умовами.

Вимоги до електричної частини ДПР диктуються умовами сумісності з комутатором за вхідним і вихідним опорами.

Схема комутатора буде простішою і надійнішою, якщо разом з максимальною віддачею потужності давач формуватиме сигнали заданої форми.

Дискретний ДПР на виході має сигнал у формі прямокутних імпульсів (рис. 3.29, а).

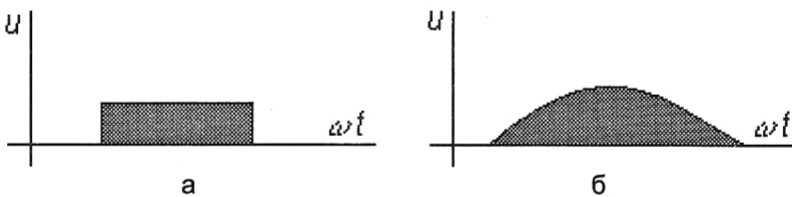


Рис. 3.29. Форми вихідних сигналів ДПР дискретного (а) та аналогового (б) типів

Розробники дискретних ДПР намагаються так сконструювати всі його вузли, щоб сигнал або його обвідна лінія на виході чутливих елементів як можна більше наближались до прямокутної форми, необхідної для забезпечення режиму перемикання напівпровідникових ключів комутатора. За цих умов функції перетворювальних пристроїв (ПП) дискретних ДПР зводяться до підсилення за потужністю або виділення обвідної лінії сигналів чутливих елементів. ПП в цьому випадку являє собою простий функціональний вузол: випростувач, підсилювач-обмежувач або демодулятор.

Аналогові ДПР реалізують за допомогою сигнального і чутливих елементів задану функціональну залежність амплітуди вихідних сигналів від поточного кутового положення ротора (рис. 3.29, б).

Під час розроблення аналогових ДПР за допомогою сигнального і чутливих елементів намагаються з найбільшою точністю реалізувати задану функційну залежність амплітуди вихідних сигналів від поточного кутового положення ротора. До функцій ПП аналогових ДПР входять перетворення аналогових сигналів у імпульси прямокутної форми, відносна тривалість яких пропорційна до амплітуди сигналів на виході чутливих елементів, і підсилення сформованих імпульсів за потужністю. Складніші функціональні залежності, які реалізуються аналоговими ДПР, визначають підвищену їхню конструктивну складність. Тому їх використовують у спеціальних ВД, до яких висувають підвищені вимоги до величини пульсацій моменту.

Вимоги до керування ВД, наприклад, реверс, регулювання частоти обертання, інколи можуть бути простіше здійснені, якщо врахувати їх під час розроблення конструкції і схеми ДПР. Тому під час їхнього розроблення необхідно врахувати призначення і функції всієї машини.

3.3.1. Класифікація ДПР

Давач положення ротора складається з двох основних елементів: один з них - *керувальний (або сигнальний)* - зв'язаний з ротором і з досягненням ним заданого кутового положення входить у взаємодію з інтим елементом - чутливим - зв'язаним зі статором, в якому відбувається перетворення кутового переміщення першого елемента в зміну якогось електричного або магнітного параметра.

Керувальний елемент може передавати інформацію про своє розташування різними видами енергії: променевою енергією світла або радіоактивного випромінювання, енергією магнітного або електричного поля тощо. Тому класифікувати давачі можна, насамперед, за видом використовуваної енергії для передавання керуючої дії й типом джерела енергії:

- © оптичні;
- оптронні;
- магнітоелектричні;
- електромагнітні;
- радіоактивні.

Далі давачі потрібно класифікувати за типом чутливого елемента:

- фотоелементні;

гальваномагнітні;
 ємнісні;
 індуктивні.

Потім класифікацію можна здійснювати за видом вихідного сигналу:

дискретний;
 аналоговий;

за родом струму:

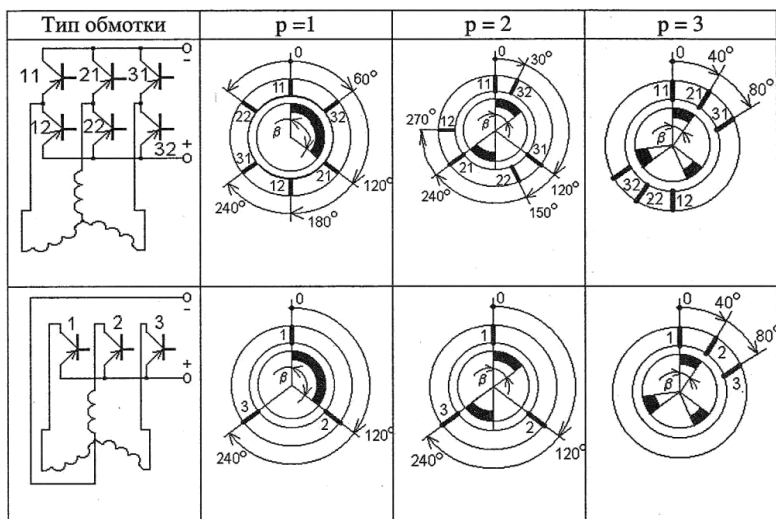
постійного струму;
 змінного струму;

за вимогами до конструктивного виконання (за обмеженнями, наприклад, по аксіальній довжині);

за вимогами до керованості.

Кількість секторів керувального елемента дорівнює кількості пар полюсів індуктора (або кількості зубців пасивного ротора), а кількість чутливих елементів і їхнє кутове розміщення один щодо іншого залежить від типу обмотки якоря.

Як приклад, у таблиці наведено найдоцільніше розміщення чутливих елементів для трисекційних обмоток і з різною кількістю пар полюсів.



Кутовий розмір сигнального сектора керувального елемента в геометричних радіанах для усіх випадків дорівнює

Керувальний елемент умовно показаний у вигляді затемненого сектора центрального кола, ніби зв'язаного з ротором, а чутливі елементи позначені цифрами й розміщені зі зсувом один щодо іншого на кільці, яке зв'язане зі статором ЕМП. Номери чутливих елементів відповідають номерам силових транзисторів комутатора, до яких приєднані ці чутливі елементи.

Найчастіше застосовують індуктивні, гальваномагнітні та фотоелектронні ДПР. Назва давачів визначається назвою чутливих елементів, які в них використовуються.

індуктивних ДПР чутливим елементом (ЧЕ) є мініатюрні дроселі і трансформатори, які підмагнічуються постійними магнітами сигнального елемента, а також ЧЕ машинного типу - мікросини, обертові трансформатори тощо.

Як ЧЕ гальваномагнітних ДПР використовують давачі Холла, магнітодіоди, магніторезистори і магніотранзистори. У фотоелектричних ДПР використовують фотодіоди, фоторезистори, фототранзистори, фоторезистори.

3.3.2. Експлуатаційно-технічні вимоги до ДПР

До експлуатаційно-технічних вимог до ДПР належать:

- У відсутність рухомих електромеханічних контактів;
- У малі габарити і енергоспоживання;
- У висока стійкість до зовнішніх факторів навколишнього середовища (кліматичні фактори, вібро- і ударні навантаження тощо);
- У висока надійність;
- У незалежність параметрів вихідних сигналів від частоти обертання ротора ВД;
- У велика кратність зміни вихідних сигналів ЧЕ при дії на них поля сигнального елемента;
- У велика крутизна фронтів вихідних сигналів;
- У висока точність відтворення заданих функційних залежностей;
- У порівняно великий вихідний струм (десятки і сотні міліампер) і малий внутрішній опір.

Найповніше задовольняють перераховані вимоги індуктивні ДПР з дросельними або трансформаторними ЧЕ, а також з ЧЕ машинного типу, гальваномагнітні ДПР з давачами Холла.

3.3.3. Давачі положення з індуктивними елементами

Давачі положення з чутливими елементами індуктивного типу через простоту виготовлення й малу вартість набули поширеного розповсюдження. До індуктивних елементів цього типу належать:

індуктивні й трансформаторні елементи зі змінним повітряним проміжком:

індуктивні й трансформаторні елементи з насиченням магнітопроводу потоком постійного магніту (дроселі й трансформатори насичення).

чутливих елементів зі змінним повітряним проміжком найкращими є диференційні трансформатори (рис. 3.30). Чутливий елемент виконується з магнітм'якого матеріалу (електротехнічна сталь, ферит) завтовшки 3-5 мм і розміщується в обоймі статора ДПР по її твірній в аксіальному напрямку. Сигнальний елемент - це кільце з такого самого матеріалу з відповідним профілем.

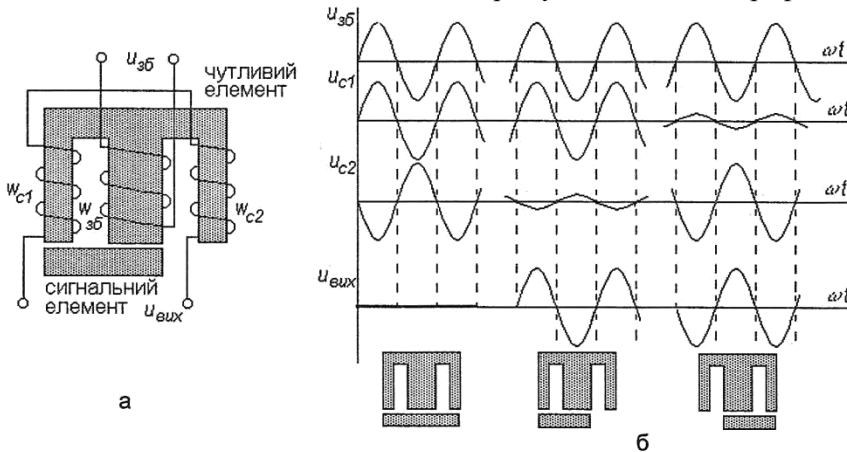


Рис. 3.30. Функціональна схема одного елемента давана положення на базі диференційного трансформатора (а) та діаграма напруг (б)

Індуктивність обмоток дроселів насичення і трансформаторів індуктивних давачів з дросельними або трансформаторними ЧЕ можна змінювати в широких межах підмагнічуванням їх магнітопроводів магнітним полем постійного магніту сигнального елемента (СЕ). Під дією СЕ магнітна проникність матеріалу магнітопроводу і індуктивності ЧЕ змінюватимуться періодично з частотою обертання СЕ.

Одна з можливих схем сполучення *ЧЕ* дросельного типу показана на рис. 3.31, *а*. Обмотка дроселя ДПР і вторинна обмотка трансформатора *Тр* високочастотного генератора сполучені послідовно на вхід випростувального моста *УВ1-УВ4*. Навантаженням моста є вхідний транзистор *УТ* силового ключа комутатора.

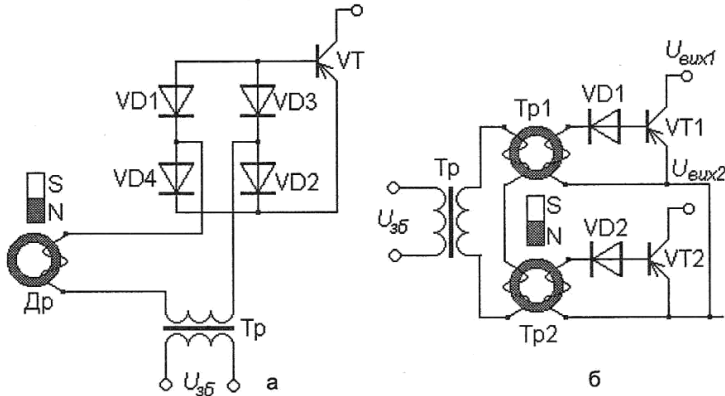


Рис. 3.31. Схеми сполучення чутливих елементів з дроселями (*а*) та з трансформаторами (*б*) насичення

Під час насичення осердя дроселя постійним магнітом ротора давана різко зменшується індуктивний опір дроселя і майже вся напруга живлення давана прикладається через випростувальні діоди до навантаження. У ті моменти, коли осердя не насичене потоком постійного магніту, опір дроселя великий і до навантаження прикладається невелика напруга, яку в схемі комутатора можна повністю компенсувати.

Для зменшення габаритів *ЧЕ* та інших реактивних елементів, які входять у склад ДПР, частоту зміни напруги u_{3B} вибирають досить високою (**10-100 кГц**).

Схема сполучення *ЧЕ* трансформаторного типу зображена на рис. 3.31 *б*. Первинні обмотки трансформаторів *Тр1* і *Тр2* сполучені послідовно з вторинною обмоткою трансформатора генератора живлення ДПР; вихідні обмотки через випростувальні діоди *VD1* і *VD2* сполучені з транзисторами *VT1* і *VT2* ключів комутатора. У тих випадках, коли осердя трансформатора *ЧЕ* не насичене потоком постійного магніту, напруга первинної обмотки трансформується у вторинну й надходить на відповідний ключ. Якщо ж осердя насичене

поток магніту, то порушується електромагнітний зв'язок між первинною і вторинною обмотками і вихідний сигнал буде мінімальний.

Конструктивно ДПР з трансформаторами аналогічний ДПР з дроселями, за винятком ротора, в якому сигнальний сектор постійного магніту має дугу, 71° яка дорівнює P (де D - дуга сигнального сектора дросельного давача). Конструктивна схема ДПР з дроселями насичення зображена на рис 3.32. Обойма давача 1 містить Е-подібні магнітопроводи 2 та дросель насичення 3. Осердя дроселя може бути будь-якої форми, зокрема, можна використати феритові кільця з прямокутною петлею гістерезису серійного виробництва. Обмотка дроселя розміщується на осерді з двох боків так, щоб він безпосередньо міг торкатись Е-подібних магнітопроводів. Застосування останніх дає змогу розмістити осердя дроселя так, як це показано на рисунку, тим самим зменшити діаметр обойми давача й отримати гарантований зазор між обоймою

ротором за допомогою розточування внутрішнього діаметра обойми. При цьому усувається передавання механічних зусиль на осердя й його пошкодження, а отже, і зміна його магнітних властивостей. Дросель можна залити компаундом, що підвищує його надійність.

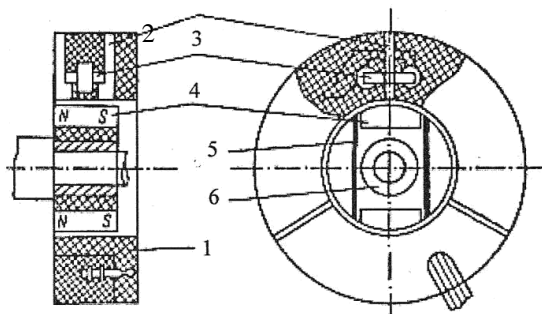


Рис. 3.32. Конструктивна схема ДПР з дроселями насичення

Сигнальний елемент давача виготовляють з немагнітного матеріалу пресуванням або литвом, він містить постійні магніти 4 у вигляді сегментів, екранні пластини 5 і втулку 6. Циліндричну поверхню обробляють після пресування на вал ЕМП ВД. Магнітопровідні пластини 5 екранують потоки розсіяння магнітів СЕ й значно підвищують крутизну наростання й спадання вихідного електричного сигналу.

ДПР дросельного типу з використанням кільцевих феритових осердь діаметром від 3 до 10 мм дають можливість отримати вихідний максимальний струм відповідно від 15 до 400 мА.

Недоліками таких давачів є низька технологічність конструкції, великі габаритні розміри, наявність джерела змінного струму високої частоти.

3.3.4. Давач з елементами Холла

На рис. 3.33 показано конструктивну схему ДПР з давачем ЕРС Холла, який являє собою напівпровідникову (Бі, ваАв) прямокутну пластинку. Давач Холла вміщується в магнітне поле СЕ так, щоб воно пронизувало одну пару протилежних граней пластинки, до інших протилежних граней підводиться постійний струм збудження. Тоді на третій парі граней, розміщених у площині, перпендикулярній чотирьом попереднім граням, з'явиться ЕРС Холла.

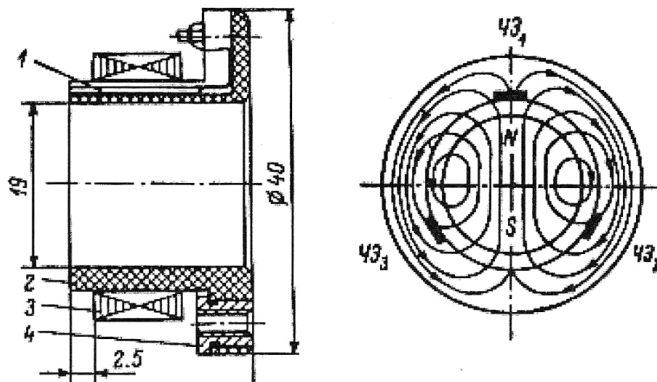


Рис. 3.33. Обойма ДПР з елементами Холла двигуна БД-500-150 (а) та схема розміщення елементів Холла в обоймі (б)

Корпус обойми 2, виконаний із пластмаси, має на циліндричній поверхні по осі розточування заглибини з розміщеними в них елементами Холла 1, які охоплюються кільцевим шихтованим магнітопроводом 3 із листової електро-

технічної сталі. Корпус обойми армований втулками 4 для кріплення його до щита двигуна й клемми для розпаювання вивідних провідників.

Магніт ротора ДПР - це циліндр, який намагнічений по діаметру, так само як і силовий магніт двигуна. Функцію ротора ДПР може виконувати силовий магніт ВД.

Вихідна напруга описаної конструкції ДПР має практично синусоїдну форму з амплітудою 150 мВ на навантаженні 3000 Ом.

Для того, щоб збудити давач Холла низьковольтних ВД (6-30 В) використовують джерело постійної напруги, яке живить ВД електроенергією, тому тут усунута необхідність використання додаткового статичного перетворювача, як у разі індуктивних ДПР. Незважаючи на малі значення і потужність вихідних сигналів і низьку температурну і хімічну стійкість, ДПР з давачем Холла набувають поширеного застосування у ВД приводів медичних установок, електропобутової, комп'ютерної, радіоелектронної техніки.

На рис. 3.34, а, б зображений зовнішній вигляд вентилятора системного блока комп'ютера зі зовнішнім ротором і, в якому використана комбінація чотирьох та восьмиполюсних постійних магнітів 1 та давач положення 2 на елементах Холла.

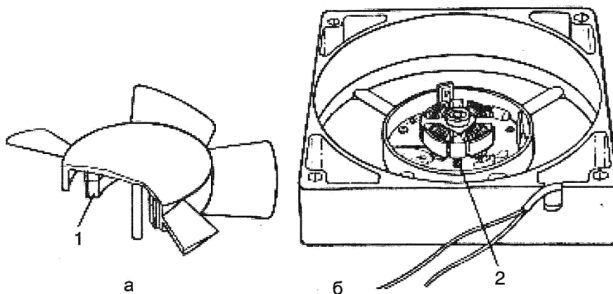


Рис. 3.34. Вентильний двигун комп'ютерного вентилятора з давачами Холла

Сучасні вентильні двигуни для програвачів, які показані на рис. 3.35, а, б, мають такі особливості:

обмотки статора виконують плоскими (рис. 3.35, а);

додатково до основних магнітних полюсів, які необхідні для функціонування двигуна, ротор містить ще додаткові магнітні полюси, які використовують як давачі частоти обертання;

обмотка давача частоти обертання розміщена на друкованій платі.

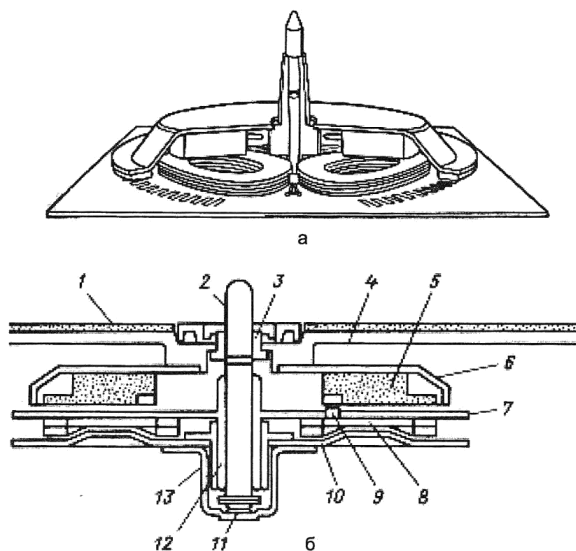
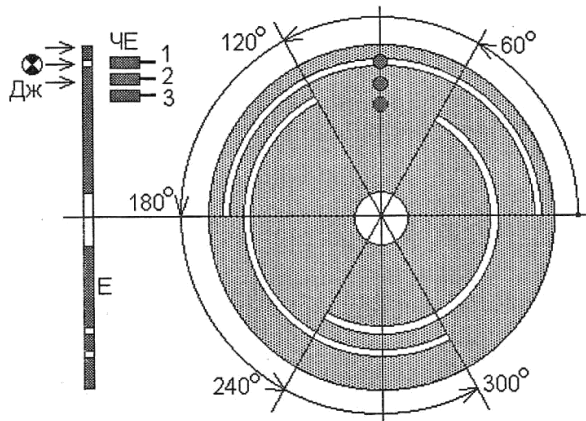


Рис. 3.35. Вентильний двигун для програвача з давачами Холла:

- 1 - гумове покриття; 2 - вал; 3 - супорт обертового стола; 4 - обертовий стіл;
 5 - постійний магніт ротора; 6 - магнітопровід (ярмо) ротора; 7 - друкована плата;
 8 - обмотка; 9 - давач Холла; 10 - магнітопровід статора; 11 - опорний підшипник;
 12 - підшипник; 13 - покриття опорного підшипника



ЛЕКЦІЯ 7

План лекції:

3.3.5. Давач положення з магніторезисторами

3.3.6. Давач положення з магнітодіодами

3.3.7. Давачі положення з фотоелектронними елементами

3.3.8. Давачі положення ротора для ВД з пасивними роторами

3.3.9. Схема формування імпульсів дискретного давача

положення ротора

3.3.5. Давач положення з магніторезисторами

Найперспективнішим матеріалом для виготовлення магніторезисторів є напівпровідникова сполука з особливою структурою антимоніду індію і антимоніду нікелю (ІпБЬ-МіЗЬ). Конструктивно магніторезистор являє собою керамічну або феромагнітну пластинку, на яку нанесена звивиста смужечка із напівпровідника завтовшки 15-25 мкм. Залежно від матеріалу, товщини й ширини смужки опір магніторезистора за відсутності магнітного поля може знаходитись в межах від одного *ома* до декількох *кілоом*.

На практиці такі ДПР поширеного застосування поки що не набули.

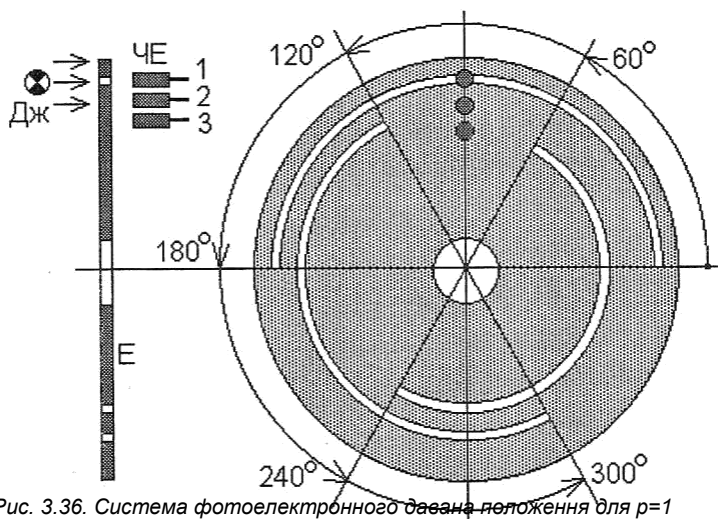
3.3.6. Давач положення з магнітодіодами

Магнітодіоди типу КД301А-КД301Е відрізняються між собою переважно прямим спадком напруги. За струму 1 мА їхня магнітна чутливість не менша за 10 В/Т, а за струму 3 мА - не менше 30 В/Т.

Характеристики магнітодіодів не залежать від напрямку (знака) магнітного поля. Магнітодіоди - це порівняно нові прилади, які вирізняються меншою вартістю порівняно з іншими гальваномагнітними приладами, і тому їхнє застосування в ДПР ВД, напевно, буде поширюватись.

3.3.7. Давачі положення з фотоелектронними елементами

Давач з фотоелектронними елементами (рис. 3.36) складається з чотирьох частин: джерела випромінювання, фотоприймача, модулятора випромінювання та середовища для передавання випромінювання.



Джерелом випромінювання можуть бути лампи розжарювання, газорозрядні лампи, напівпровідникові випромінювачі (світлодіоди), напівпровідникові лазери. Спектральні, частотні, температурні тощо характеристики випромінювачів можуть бути різними, але вони повинні бути аналогічними до

відповідних характеристик фотоприймачів. Як фотоприймачі можна застосовувати фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фотоємності, вентильні фотоелементи тощо.

Модулятор випромінювання зв'язаний з ротором машини і є непрозорим для випромінювання екраном з вирізами або вікнами. Модулятором може також бути відбивач випромінювання, наприклад, дзеркало або фотофільтр.

Для передавання випромінювання від джерела до приймача можна використовувати спеціальні середовища, наприклад, волоконні світловоди, фотолінзи тощо. Середовища ці можуть бути як некерованими, так і керованими.

Зображений на рис. 3.36 давач положення ротора має три фотодіоди, одне джерело випромінювання у вигляді лампи розжарювання та екран з прорізаними шторками, який обертається.

3.3.8. Давачі положення ротора для ВД з пасивними роторами

ВД з пасивним ротором необхідно застосовувати такі типи ДПР, які якнайповніше задовольняють комплекс таких експлуатаційно-технічних вимог:

- відсутність рухомих електромеханічних контактів;
- малі габарити та енергоспоживання;
- висока стійкість до зовнішніх факторів навколишнього середовища (кліматичні фактори, вібро- та ударні навантаження тощо);
- висока надійність;
- незалежність параметрів вихідних сигналів від частоти обертання ВД;
- велика крутизна фронтів вихідних сигналів;
- велика кратність зміни вихідних сигналів чутливих елементів;
- відсутність в конструкції матеріалів, які не застосовують в силовій частині ЕМП.

3.3.8.1. Вентильний двигун з суміщеним давачем положення ротора.

Відомо, що у вентильному двигуні з пасивним ротором електромагнітний момент створюється за рахунок зміни магнітної провідності повітряного проміжку. Це ж фізичне явище використовують і в трансформаторних ДПР, тому можна сумістити енергетичні та інформаційні функції в одному магнітопроводі ЕМП ВД. На рис. 3.37 показана конструктивна схема ВД з суміщеним ДПР.

ВД має зубчастий ротор, статор, який містить m пар (m - парне число) полюсів з кроком зубців, який дорівнює крокові зубців ротора. Суміжні полюси зміщені один щодо іншого на кут, який кратний зубцевій поділіці

ротора. Пари суміжних полюсів рівномірно зміщені по колу на кут $2 - \frac{l}{t} \alpha$ і охоплені спільним ярмом. Котушки обмотки статора розміщені на кожному полюсі. Котушки збудження та сигнальні ДПР розміщені на парах полюсів, які зміщені на кут $2 - \frac{l}{t} \alpha$ і охоплюють два полюси. Котушки обмотки статора і котушки ДПР сполучені, як це показано на рис. 3.38.

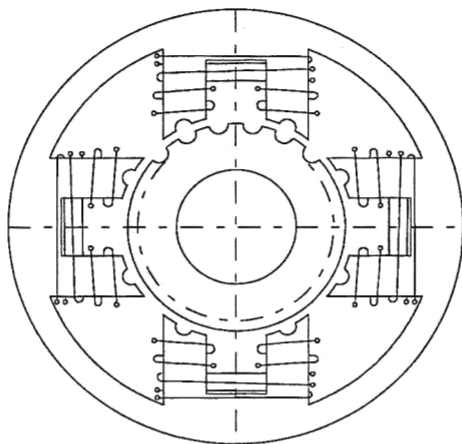


Рис. 3.37. ВД з суміщенням ДПР

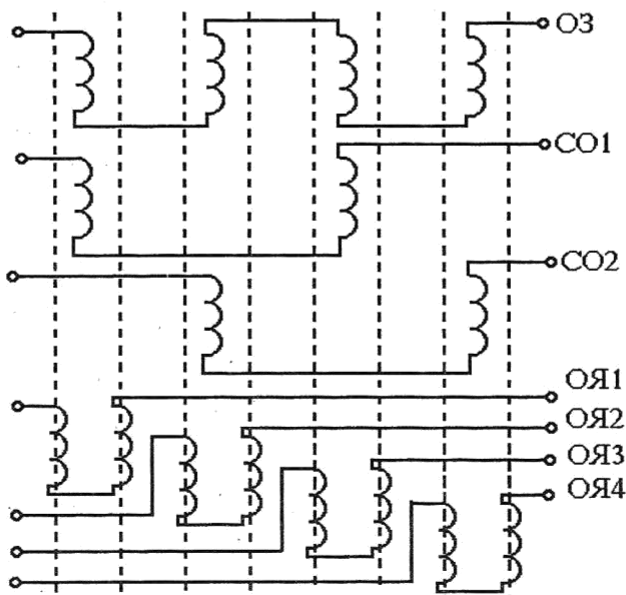


Рис. 3.38. Схема сполучень обмотки якоря та обмоток ДПР

Працює двигуна так. На обмотку збудження (03) ДПР подають змінну напругу високої частоти і магнітні потоки, які при цьому створюються, зчіплюються з котушками сигнальних обмоток $CO1$ і $CO2$, внаслідок чого в них наводяться ЕРС взаємоіндукції, амплітуда яких під час обертання ротора змінюється залежно від зміни провідності повітряного проміжку під полюсами. Оскільки котушки 03 і CO охоплюють два полюси, то індуктивний взаємо- зв'язок інформаційних обмоток з силовими відсутній.

Послідовно-зустрічне з'єднання сигнальних обмоток ДПР, які розміщені на протилежних парах полюсів, забезпечує періодичну зміну амплітуди і фази ЕРС CO щодо напруги збудження під час обертання ротора, при цьому фази ЕРС сигнальних обмоток $CO1$ і $CO2$ змінюються на 71 електричних радіан при повороті ротора на половину зубцевої поділки з зсувом одна щодо іншої на $2 \cdot \pi$ електричних радіан.

Отримана система ЕРС $CO1$ і $CO2$ несе в собі інформацію про кутові положення ротора ВД і слугує для керування електронним комутатором.

3.3.8.2. Вбудований в статор 11-подібного ВД давач положення ротора. Мозаїчна структура І-подібного статора ВД дає змогу вбудувати елементи давана положення ротора в межах його активної аксіальної довжини. На рис. 3.39 показаний фрагмент ЕГ-подібного статора ВД з вбудованими П-подібними осердями з електротехнічної сталі, на яких розміщено по дві обмотки (збудження та сигнальна) давана положення ротора. Як видно з рисунка, основний силовий магнітний потік осердя 1 замикається в площині рисунка, а інформаційний магнітний потік осердя 3 ДПР замикається в площині, перпендикулярній до площини рисунка. Отже, ці два магнітні потоки

взаємно перпендикулярні і не взаємодіють один з одним. Тобто силове поле машини не впливає на магнітне поле ДПР, чим забезпечується його завадостійкість. Єдиним недоліком запропонованої конструкції є те, що тут ротор виконується суцільним з електротехнічної сталі для задовільного проведення магнітного потоку в тангенціальному та аксіальному напрямках, що зумовлює підвищені втрати в ньому на перемагнічення.

Принцип роботи ДПР базується на тому, що обмотки збудження живляться від джерела змінного струму високої частоти, внаслідок чого в сигнальних обмотках індукуються ЕРС взаємоіндукції, значення яких залежать від того, чи перемкнутий П-подібний магнітопровід ДПР зубцем ротора, чи ні. Сигнальні обмотки, які розміщені на П-подібних осердях, зміщених між собою на кут $Z\alpha$ електричних радіан, з'єднані попарно зустрічно, що забезпечує періодичну зміну сумарного значення ЕРС, яка дорівнюватиме нулю під час повороту ротора на кожну половину зубцевої поділки зі зміною фази щодо

несучої частоти на n електричних радіан. Отримана система ЕРС несе в собі інформацію про кутове положення ротора ВД.

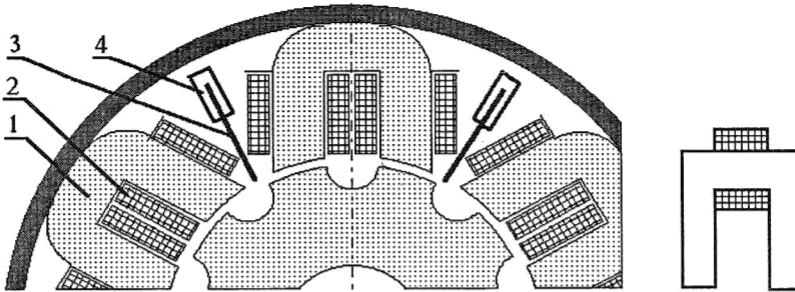


Рис. 3.39. Фрагмент II-подібного статора з вбудованими елементами ДПР та елемент магнітопроводу ДПР з обмоткою

Конструкцію вентильного двигуна з пасивним ротором і з вбудованим давачем положення ротора доцільно застосовувати під час створення низькошвидкісних та моментних ВД, де частоти перемагнічення сталі ротора будуть невисокими, а отже, і втрати в ній незначними.

3.3.8.3. Давач положення ротора редуктосинного типу. У наведених вище конструкціях ВД з вбудованим в межах активної аксіальної довжини давачем положення ротора, сигнальним елементом якого є сам ротор ВД, немає можливості довільно задавати величину сектора сигнального елемента, що не дає змоги вибирати необхідний оптимальний інтервал комутації секції ВД.

На рис. 3.40 показана конструкція ДПР, який можна прилаштувати до вентильного двигуна на його валу в будь-якому необхідному місці і який може мати як власний ротор, так і ротор ЕМП ВД.

Статор давача положення ротора набраний з 3-5 листів виштамповок електротехнічної сталі завтовшки 0,35-0,5 мм. Обмотки збудження ДПР розміщені на широких зубцях, а сигнальні обмотки обабіч широкого зубця на вузьких зубцях. Сигнальні обмотки сполучені між собою попарно зустрічно і утворюють один канал ДПР.

Працює ДПР так. Обмотки збудження, які сполучені між собою так, що утворювані ними магнітні потоки одночасно мають напрямки або до центра, або від центра, живляться від джерела напруги високої частоти. Ці магнітні потоки замикаються через вузькі зубці і індукують в сигнальних обмотках ЕРС. Коли магнітна провідність вузьких зубців, які належать одному каналу ДПР, однакова (рис. 3.41, а), їхні ЕРС однакові за амплітудою і протилежні за фазою, а вихідна напруга каналу дорівнює нулю. Якщо ж магнітна провідність одного з зубців буде більша, наприклад, від провідності зубця, на якому

розміщена сигнальна обмотка COI (рис. 3.41, б), на виході каналу з'явиться напруга, синфазна з ЕРС цієї обмотки. І навпаки, коли магнітна провідність іншого зубця буде більшою (рис. 3.41, в), фаза вихідної напруги каналу збігатиметься з фазою ЕРС обмотки $CO2$. Отже, вихідна напруга каналу ДПР за значеннями амплітуди і фази містить інформацію про положення ротора щодо статора.

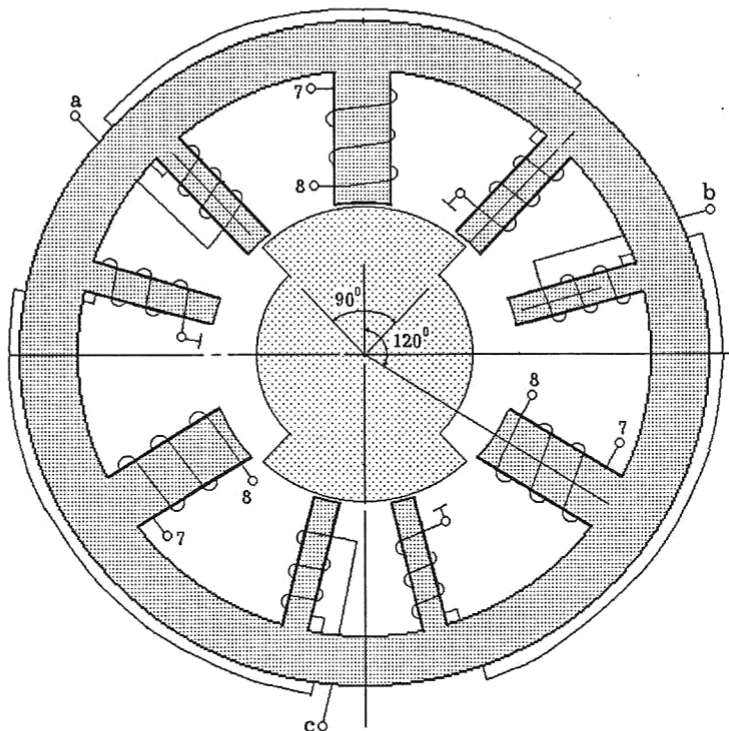


Рис. 3.40. Давач положення ротора редутоксинного типу

Величина амплітуди вихідної напруги пропорційна різниці магнітних провідностей зубців, які належать одному каналу, і тому така конструкція ДПР може слугувати первинним давачем для аналогового ДПР.

Розміри цього ДПР не залежать від розмірів ЕМПВД, його можна розмістити як всередині ЕМП, так і ззовні, наприклад, з зовнішнього боку підшипникового щита.

Малий аксіальний розмір запропонованого ДПР, який не перевищує 5-7 мм, застосування для його виготовлення матеріалів, ідентичних матеріалам силової частини ЕМП, забезпечує йому добру конкурентоспроможність з-поміж інших типів давачів положення ротора.

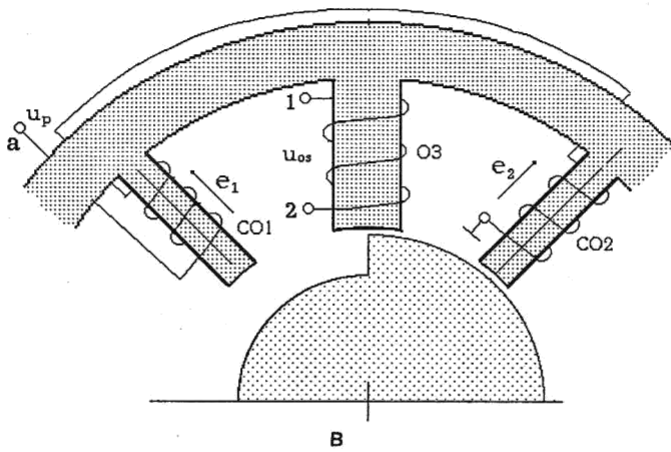
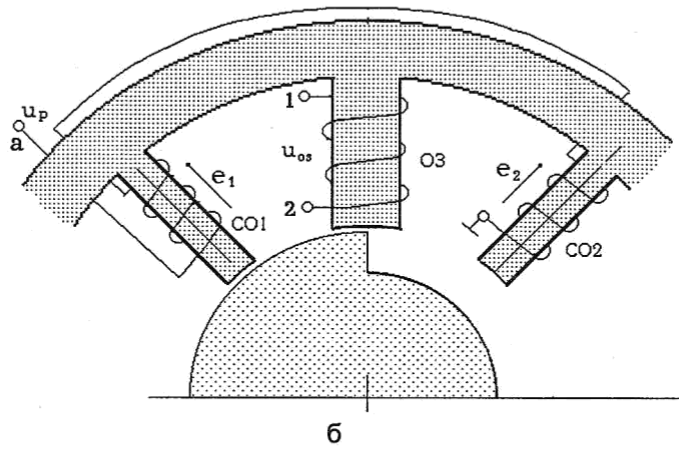
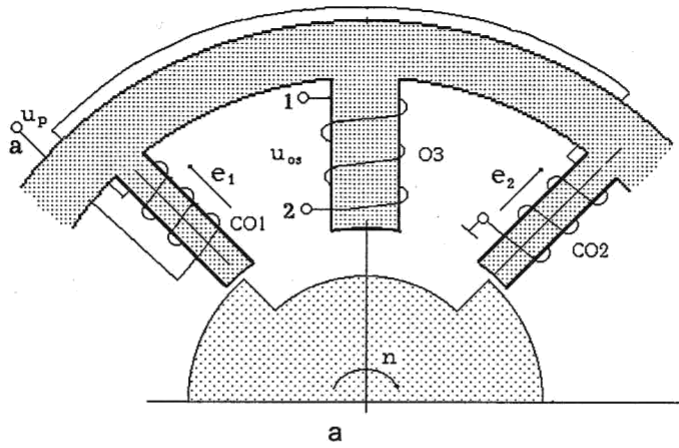


Рис. 3.41. До принципу роботи давача положення ротора редуктосинного типу

3.3.9. Схема формування імпульсів дискретного положення ротора

Як вже було зазначено вище, дискретний ДПР повинен забезпечувати високу крутизну фронтів сигналів, а також велику кратність зміни сигналу.

наведених вище первинних давачах вихідні сигнали модульовані високою частотою, і для утворення задовільного дискретного сигналу необхідно виділити обвідну лінію, потім перетворивши її в сигнал прямокутної форми.

На рис. 3.42 показано схему перетворення сигналів ДПР на базі первинних давачів, принцип дії яких аналогічний принципу дії давачів диференційно-трансформаторного типу.

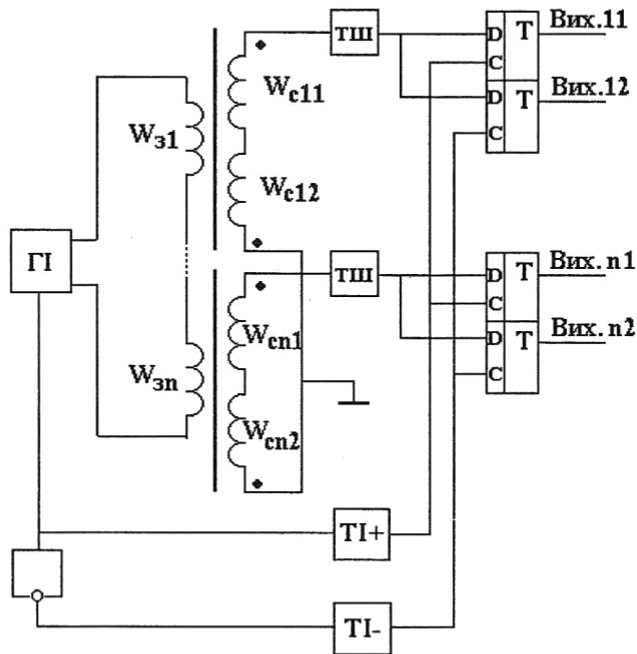


Рис. 3.42. Принципова електрична схема блока формування сигналів ДПР

Основою схеми слугують Б-тригери, або як їх ще називають, тригери-заскочки. Тут використано ту властивість, що їхній стан на виході не змінюється, якщо під час подавання на вхід С вузького імпульсу опитування на вході Б буде такий самий рівень сигналу, як і при попередньому опитуванні.

Роботу схеми пояснимо за допомогою діаграми імпульсів, яка зображена на рис. 3.43.

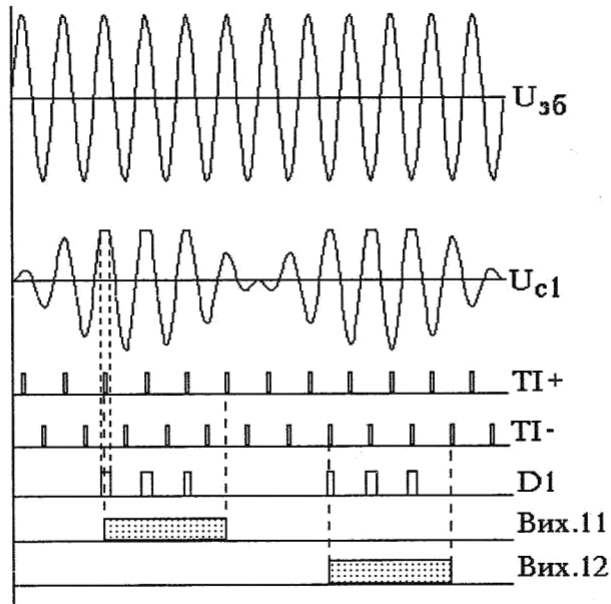


Рис. 3.43. Діаграма імпульсів блока формування сигналів ДПР

Генератор імпульсів $ГІ$ продукує змінну напругу $U_{зб}$, якою живляться обмотки збудження ДПР $U_{з1} - U_{зn}$. Одночасно $ГІ$ запускає формувачі тактових імпульсів $ТІ+$ і $ТІ-$, які формують вузькі імпульси для опитування Б-тригерів; причому один з них синхронізований з напругою однієї полярності, а інший - з другою.

На виході каналу ДПР $\sim U_{11} - U_{12}$ буде напруга $U_{тс1}$, величина і фаза якої залежатиме від положення ротора. Ця напруга подається на тригер Шмідта $777/$, який перетворює її в прямокутні імпульси $Пі$ і подає на вхід Б тригера T . На вхід С тригера T надходять імпульси $77+$, і, якщо з надходженням чергового імпульсу, на вході Б буде сигнал, то на виході $Вих.11$ з'явиться вихідний сигнал, який не змінюватиметься доти, поки з надходженням імпульсу $77+$ на вході Б сигнал буде відсутній. Аналогічно працюють і інші канали ДПР.

Отже, запропонована схема формує систему сигналів для керування електронним комутатором ВД з високою крутизою фронтів та кратністю зміни.

Контрольні запитання

Охарактеризуйте основні вузли структури електронних комутаторів вентильних двигунів.

- Наведіть принципову схему і опишіть роботу мостового транзисторного комутатора.
 - Наведіть принципову схему і опишіть роботу напівмостового транзисторного комутатора.
 - Наведіть принципову схему трифазного транзисторного реверсивного комутатора та принцип його роботи.
 - Наведіть схему і принцип роботи трифазного однопівперіодного комутатора зі стабілітронним приймачем енергії.
6. Наведіть принципову схему і опис роботи однопівперіодного комутатора з диністорами.

Наведіть принципову схему транзисторно-тиристорного мостового комутатора та принцип її роботи.

8. Наведіть схему і опишіть принцип роботи трифазного транзисторного комутатора ВД з послідовним буфером енергії.

Наведіть схему та опишіть принцип роботи транзисторного комутатора з послідовним буфером енергії та спільним колом форсування.

Наведіть схему та опишіть принцип роботи транзисторного комутатора вентильного реактивного двигуна з паралельним буфером енергії.

Наведіть схему та опишіть принцип роботи вентильного двигуна з паралельним буфером і спільним колом форсування.

Наведіть схему та опишіть принцип роботи трифазного комутатора ВД з послідовними буферами енергії в кожній секції.

Дайте порівняльну характеристику схем комутаторів ВРД з буферами енергії.

Які Ви знаєте конструктивні схеми статора вентильних двигунів?

Які недоліки і переваги “класичної” конструкції статора ВД?

Які переваги та недоліки Ц-подібної конструкції статора ВД?

Дайте порівняльну характеристику “класичної” та псевдо-ІІ-подібної конструкції статора ВД.

Які переваги та недоліки електромеханічного перетворювача ВРД з аксіальним магнітним потоком?

Наведіть класифікацію давачів положення ротора ВД.

Дайте характеристику ДПР аналогового та дискретного типів.

На які два основні типи поділяють давачі положення ротора? Дайте визначення кожному з них.

Перечисліть вимоги, які висувають до давачів положення ротора вентильних двигунів постійного струму.

Перечисліть експлуатаційно-технічні вимоги до ДПП.

Що собою являють давачі положення ротора з індуктивними елементами?

Наведіть схему та охарактеризуйте давачі положення ротора індуктивного типу з насиченням магнітопроводу.

Наведіть схему та охарактеризуйте давачі положення ротора на базі індуктивних елементів зі змінним повітряним проміжком.

Опишіть влаштування і принцип роботи давача положення ротора на базі диференційного трансформатора.

Наведіть конструктивну схему фрагмента вбудованого в статор Б-подібного ВД давача положення ротора.

Що являє собою вентильний двигун з суміщеним давачем положення ротора?

Опишіть застосування Б-тригерів для формування сигналів ДПП трансформаторного типу.

Наведіть принципову схему формування імпульсів дискретного давача положення ротора. Опишіть її роботу.

ЛЕКЦІЯ 8 РОЗДІЛ 4

РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ВД

4.1. Давачі частоти обертання

Для керування частотою обертання ВД та стабілізації її на деякому рівні У задану точність необхідно виділити сигнал, що характеризує частоту обертання, і використати його як сигнал зворотного зв'язку в замкненій системі регулювання. Конструктивна й схемна різноманітність двигунів різного призначення припускає різні способи й пристрої для отримання такого сигналу. У той же час можна сформулювати вимоги до цих пристроїв, які називатимемо давачами частоти обертання:

в давачі не повинно бути електромеханічних контактів;

давач повинен живитись постійним або змінним струмом, який уже є в схемі ВД;

основні технологічні процеси виготовлення-давача частоти мають бути однотипні з процесами виробництва двигуна або комутатора; у замкненій системі стабілізації частоти обертання ВД немає необхідності висувати до давачів частоти дуже жорсткі вимоги з нелінійності й асиметрії вихідної характеристики; основними вимогами є вимоги малої додаткової похибки, яка визначається відхиленням зовнішніх умов від нормальних;

не менш важливими є вимоги малого рівня пульсацій вихідної напруги в робочому діапазоні частоти обертання, а також малого значення сталої часу.

великої кількості відомих давачів частоти обертання розглянемо тільки ті, які, на наш погляд, відповідають сформульованим вимогам і забезпечують вирішення поставлених завдань.

4.1.1. Синхронний тахогенератор з випростувачем

Синхронні тахогенератори з постійними магнітами дають можливість здійснювати контроль частоти обертання за двома параметрами: амплітудою та частотою.

Частота вихідної напруги однозначно визначається частотою обертання, той час ж амплітуда залежить від властивостей постійного магніту. Синхронний тахогенератор з напівпровідниковим діодним випростувачем (рис. 4.1) поширено застосовують завдяки простоті й високій надійності, незважаючи на те, що випрямлена вихідна напруга залежить від температурної зміни магнітного потоку постійних магнітів, опору обмотки статора, спадку напруги на діодах випростувача, зміни параметрів згладжувального фільтра тощо. Проте в такій системі є значні можливості підвищення точності. Так, наприклад, тільки забезпечення високої крутизни вихідної характеристики, що досягається досить просто, дає змогу суттєво підвищити точність роботи системи регулювання.

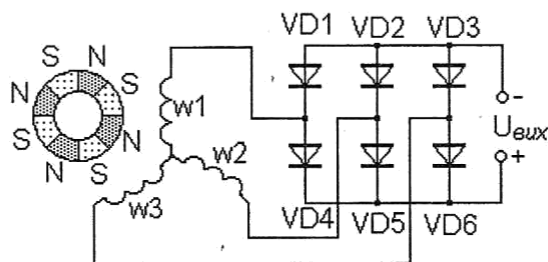


Рис. 4.1. Принципова схема синхронного давача частоти обертання з напівпровідниковим випростувачем

Інший спосіб підвищення точності полягає в компенсації температурних похибок за допомогою терморезисторів.

Як уже відзначалось, одним із головних факторів, які визначають якість роботи системи регулювання, є якість згладжування пульсацій випрямленої напруги давача частоти обертання за малої інерційності згладжувального фільтра. Ця вимога виконується простіше, коли вища частота пульсацій випрямленої напруги. Частоту пульсацій можна підвищити збільшенням кількості фаз та полюсів тахогенератора. Для мостових схем випростування частота пульсацій (в Гц) обчислюється згідно з виразом

$$f = 2 \cdot m \cdot \frac{p \cdot n}{60} \quad (4.1)$$

де m - кількість фаз тахогенератора; p - кількість пар полюсів.

Наприклад, якщо $p = 4$ і $n = 3000$ об/хв, то з трифазною схемою обмотки і шестидіодним випростувачем частота пульсацій дорівнює 1200 Гц. Згладити такі пульсації до необхідного рівня можна за допомогою простого й малоінерційного LC фільтра.

Тахогенератор доцільно виконувати вбудованим в корпус двигуна, а його ротор розміщати на одному валу з ротором двигуна.

Для зменшення впливу навантаження на вихідну характеристику магніт-на система тахогенератора повинна бути ненасиченою, а повітряний проміжок достатньо великим. Магніт тахогенератора необхідно добре стабілізувати для того, щоб зміна потоку магніту, яка зумовлена зовнішніми умовами та старінням, була мінімальною.

Різновидом синхронного тахогенератора є варіант виконання, коли його обмотка розміщується на статорі двигуна в окремих пазах або разом з силовою обмоткою двигуна. Такий варіант називають суміщеним тахогенератором. Конструктивно й технологічно двигун з суміщеним давачем простіший, ніж з окремим тахогенератором. Його можна виконати пласким зі зменшеною довжиною. Суміщений тахогенератор зберігає важливу перевагу - можливість отримання заданої крутизни вихідної характеристики. Недоліком суміщених тахогенераторів є те, що в них присутній сильний індуктивний зв'язок обмоток тахогенератора та двигуна, що зумовлює наведення ЕРС в обмотці тахогенератора під час комутації силової обмотки.

Застосування суміщеного тахогенератора подає добрі результати в двигунах з регулюванням частоти обертання за рахунок плавної зміни напруги живлення й малої зміни моменту навантаження на валу. Наприклад, в двигуні ДЭК-33/45 для електропрогрівачів вищого класу під час обертання з частотою 33 1/3 об/хв точність підтримання середньої швидкості під час програвання платівки від початку до кінця, коли момент навантаження залежить тільки від радіуса розміщення тонарма, становить **0.2 %**.

Під час імпульсного регулювання спостерігається помітний вплив силової обмотки на вихідну напругу суміщеного тахогенератора, особливо під час зміни моменту навантаження, оскільки змінюється величина струму комутації. Проте важлива перевага суміщеного тахогенератора - простота - дає змогу поширено використовувати його там, де вимоги за точністю стабілізації швидкості обертання не надто високі.

двигуні БДС-0.2 для касетних магнітофонів з імпульсним регулюванням та суміщеним тахогенератором точність підтримання середньої частоти обертання під час зміни моменту навантаження на валу від $0.5 M_{ном}$ до $M_{ном}$ становить 1 % на частоті обертання 3000 об/хв та 2 % на частоті обертання 1500 об/хв. Кількість пар полюсів магніту ротора двигуна дорівнює 2, трифазна

обмотка ТГ розміщена на окремих зубцях, випрямлена напруга дорівнює приблизно 10 В на 3000 об/хв. Масове виробництво ВД БДС-0.2 протягом багатьох років показало сталість його параметрів.

4.1.2. Синхронний частотний давач

Для отримання точності стабілізації частоти обертання двигунів вище 0.5-1 % застосовують надійніші методи регулювання, в яких усунуті перетворення частоти в аналоговий сигнал. Вирішують таке завдання способом, який базується на порівнянні фаз змінної напруги задавального генератора стабільної частоти і змінної або імпульсної напруги давача частоти обертання. Це порівняння здійснюється елементом дискретної дії (тригером) без перетворення частоти в аналоговий сигнал.

Як давач для такої системи можна використати однофазний багатополюсний синхронний тахогенератор з чутливим електронним реле, яке спрацьовує під час переходу напруги через "0" (рис. 4.2). Якщо на виході реле використати КС ланцюжок і діод, то матимемо послідовність вузьких імпульсів, частота повторень яких суворо відповідає частоті обертання вала ТГ.

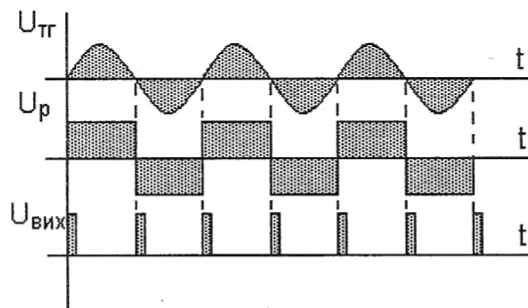


Рис. 4.2. Діаграма напруг синхронного частотного давача

Дослідний взірець такого давача був виготовлений й досліджений з двигуном БДС-10А. Статор ТГ, який набраний з листів електротехнічної сталі, має зовнішній діаметр 46 мм, внутрішній 30 мм, а товщину пакета 8 мм. Кількість зубців статора - 24. На кожному зубці розміщена одна котушка, всі котушки сполучені послідовно. Ротор ТГ - постійний магніт циліндричної форми, посаджений на вал. Діаметр магніту - 29 мм, а товщина на 1 мм більша від товщини пакета статора. Неявновиражені полюси ротора утворюються за

допомогою намагнічувальної оправки, яка набрана з таких самих листів сталі, що і статор давача. Оправка для намагнічування має скіс паза на один зубець для того, щоб під час намагнічування магніту ротора отримати скіс полюсів. Збереження прямого паза на статорі дає змогу застосовувати просте машинне намотування котушок, а скіс полюсів забезпечує отримання гладкої кривої вихідної напруги, що усуває помилкові спрацювання напівпровідникового реле, яке перетворює вихідний сигнал ТГ в послідовність імпульсів.

Та обставина, що кількість полюсів ТГ дорівнює кількості зубців статора,

ЕРС усіх котушок під час обертання ротора додають, забезпечує незалежність періодів вихідної напруги від усіх похибок виготовлення давача й неоднорідності матеріалів.

Перевагою такого давача є те, що амплітуда його напруги пропорційна частоті обертання. Це дає змогу будувати комбіновані системи з каналами грубого й точного регулювання. Під час грубого регулювання сигнал уводиться в аналоговій формі, а під час точного дискретно-фазового регулювання - у вигляді імпульсів. Такі системи мають вищу швидкодію й більшу стійкість.

4.1.3. Давач з перетворенням частоти імпульсів в аналоговий сигнал

Для визначення частоти обертання двигуна можливо використати вихідні сигнали чутливих елементів давача положення ротора, перетворивши їх в імпульси заданої тривалості й вимірюючи їхню частоту тим або іншим приладом.

Перетворення частоти імпульсів давача положення в пропорційну їй напругу є доцільним, коли двигун не може мати спеціального вбудованого давача, частота обертання достатньо висока, а точність її стабілізації не перевищує 5-8 %.

На рис. 4.3 показана принципова схема конденсаторного частотоміра, причому для підсилення й формування імпульсів давача положення використовуються уже наявні в комутаторі елементи.

Імпульси змінної напруги давача положення дросельного типу після випрямлення діодним мостом та згладжування конденсатором подають на вхід чутливого тригера з одним стійким положенням (транзистори $УТ1$, $УТ2$ на рис. 4.3). За допомогою транзистора $УТ3$ вхідний сигнал змінюється за фазою на 180° . У зв'язку з тим, що кут сигнального сектора ДПР дорівнює 180 ел. град, на вихід в точки 1 та 2 надходять дві послідовності зсунутих на 180 ел. град імпульсів зі щілинністю 0.5, які використовують надалі для керування силовими ключами, що комутують обмотку ВД. Одночасно такі самі послідовності імпульсів з колекторів

транзисторів $VT2$ і $VT3$ подаються на бази транзисторів $VT4$ і $VT5$, колекторні кола яких заживлені напругою, стабілізованою параметричним стабілізатором $VB3$.

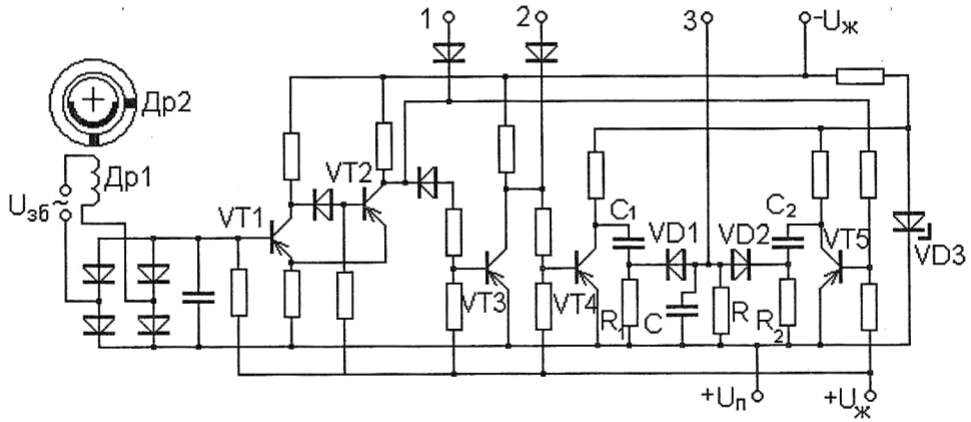


Рис. 4.3. Схема давача з перетворенням частоти обертання в пропорційну напругу

Постійні за амплітудою імпульси з транзисторів $VT4$ і $VT5$ надходять на диференціальні ланцюжки $C1$, III і через діоди $VB1$ і $VB2$ на інтегральну ланку C , D , напруга на якій пропорційна частоті цих імпульсів, а отже, і частоті обертання ВД.

4.1.4. Давач ЕРС обертання двигуна

ВД постійного струму для отримання напруги, яка пропорційна частоті обертання, можна використати ЕРС обертання. Найпростіше це можна здійснити в двигунах з нереверсивним живленням секцій. На рис. 4.4 показана схема силової (енергетичної) частини трисекційного двигуна, де $VT1$, $VT2$ і $VT3$ - силові ключі транзисторного комутатора, які комутують секції обмотки y^i , $m > 2$

y^3 , а діоди $VB1$, $VB2$, $VB3$, резистор III і конденсатор C слугують для отримання напруги, пропорційної частоті обертання.

Під час обертання ПМ ротора в секціях обмотки наводиться знакозмінна ЕРС, форма якої близька до синусоїдної. Кожна секція під'єднується транзистором до джерела живлення в ті моменти, коли ЕРС та напруга живлення спрямовані зустрічно. Наприклад, транзистор $VT1$ буде відкритий на періоді, коли ЕРС секції y^i має знак, показаний на рис. 4.4 без дужок. Від джерела протікає струм, який створює обертовий момент.

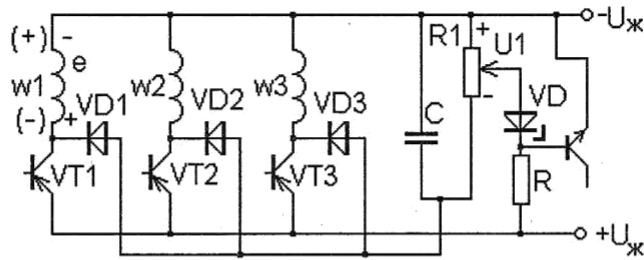


Рис. 4.4. Схема датча ЕРС обертання ВД

Під час зміни знака ЕРС (рис. 4.4, знаки в дужках) через резистор *Ш* та діод ГОІ створюється коло для протікання струму, і на резисторі *Я1* виділяється напруга, пропорційна частоті обертання. Враховуючи, що у двигуні три секції, ЕРС в яких зсунуті на 120 ел. град, і три діоди, то на резисторі *Я1* матимемо випрямлену напругу *Ш* з порівняно невеликими пульсаціями, які згладжуються конденсатором *С*. Зрозуміло, що *Ш* повинен бути достатньо великим для того, щоб струм, який по ньому протікає, не створював відчутного гальмівного моменту.

Головний недолік цієї схеми полягає в тому, що напруга перехідних процесів, яка пов'язана з від'єднанням працюючих секцій, трансформується в непрацюючі. Недоліками також є пульсації вихідної напруги, незручність побудови схем регуляторів через гальванічний зв'язок з джерелом живлення.

Проте ці недоліки не заважають застосовувати цей метод в двигунах малої потужності (менше 1 Вт), а в двигунах з беззубцевою конструкцією його вдасться поширити і на двигуни з більшою потужністю.

4.2. Безконтактне електронне реле швидкості вентильного двигуна

Автоматичне керування електроприводом вимагає різноманітної інформації і серед неї такої, яка характеризує важливий параметр - швидкість обертання електричної машини. Для безпосереднього введення в електричну схему керування швидкість перетворюється в зручну для обробки форму: аналогову або дискретну. Якщо для автоматичного регулювання немає необхідності вводити в схему керування аналогову інформацію про швидкість обертання, а досить тільки фіксувати певний рівень швидкості, то у цьому разі використовують реле швидкості.

Наявність у вентильному двигуні давача положення ротора з високими крутизною та кратністю вихідного сигналу, в якому однозначна інформація про швидкість обертання міститься в частоті або ширині імпульсів, дозволяє використати його як первинний давач частоти обертання. Отже, потреба в додатковому давачі для реле швидкості відпадає.

Літературі описано пристрої, що реєструють появу імпульсів з визначеною ознакою (довжиною, амплітудою тощо). Квазіселектори довжини імпульсів не придатні для поставленої мети, тому що реєструють появу кожного імпульсу, наприклад, довшого за наперед заданий. Реле швидкості ж повинно першим імпульсом, що досягне заданої ширини, перемикатись у певний стан і утримуватись у ньому доти, поки імпульси на вході будуть рівні або більші від заданої ширини (чи рівні або менші).

Структурна схема безконтактного електронного реле швидкості, яка використовує дискретний сигнал ДПП, показана на рис. 4.5, де B - формувач імпульсу опорної (заданої) ширини; $\&$ - схема логічного збігання імпульсів;

B_m - формувач тактового імпульсу; O - одноканальний Б-тригер тішу "защипка".

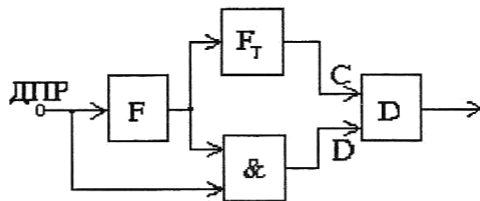


Рис. 4.5. Структурна схема реле швидкості

Принт тип роботи реле базується на тому, що в пристрої логічного збігання порівнюються імпульси заданої (опорної) ширини із вхідними, і результуюча ширина імпульсу подається на вхід Б Б-тригера. На вхід С Б-тригера подається тактовий імпульс від формувача B_T .

Принципова електрична схема безконтактного реле швидкості показана на рис. 4.6.

На вхід схеми подаються імпульси одного каналу ДПП. Одновібратор за допомогою часозадавального кола $C1, Y1$ формує імпульс опорної ширини, що задає собою уставку спрацювання реле і регулюється за допомогою змінного резистора Tii .

На рис. 4.7 показано діаграму імпульсів принципової схеми реле при значенні швидкості обертання двигуна меншому і більшому від значення уставки спрацювання.

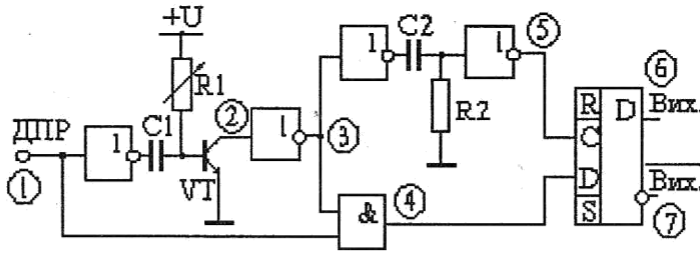


Рис. 4.6. Принципова електрична схема безконтактного електронного реле швидкості

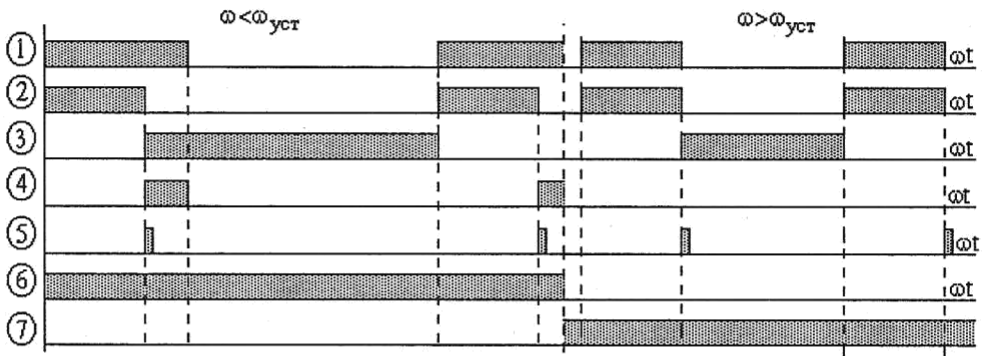


Рис. 4.7. Діаграма імпульсів у контрольних точках

Лабораторні дослідження схеми реле швидкості показали працездатність В в загальнопромислових умовах, зручність в регулюванні уставок спрацювання і надійність у роботі.

4.3. Структурні схеми регулювання частоти обертання ВД

Різноманітність прийомів та способів керування частотою обертання ВД можна звести до двох структурних схем (рис. 4.8, а і б).

На схемі рис. 4.8, а весь потік потужності від джерела живлення проходить через блок керування БК, який є підсилювачем лінійного, релейного або імпульсного типу і який керується сигналом u_k . Потім потік потужності, перетворений відповідно до обраного закону керування, що визначається типом підсилювача БК та характером зворотних зв'язків $B(\omega)$ і $i(\Delta t)$, надходить на комутатор К і розподіляється по секціях ВД згідно з сигналами ДПР за

законом $F(a)$. Зворотний зв'язок за струмом двигуна $F(i)$ обмежується, як правило, випадками струмообмеження під час пуску.

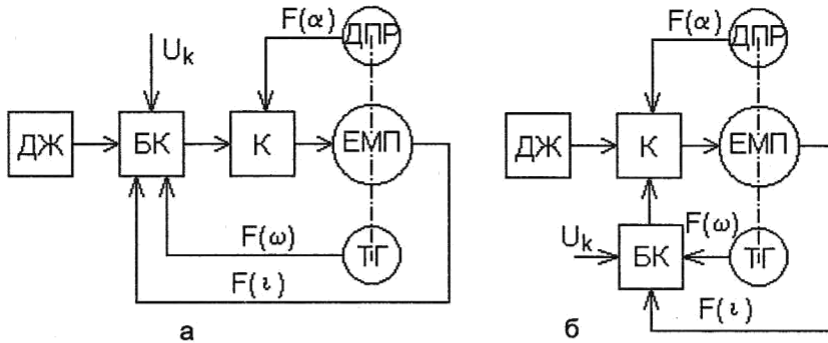


Рис. 4.8. Структурні схеми керування швидкістю ВД

ВД може мати тахометричний вузол ТГ, який продукує сигнал зворотного зв'язку за швидкістю $F(a>)$.

Характерною особливістю структурної схеми рис. 4.8, а є наявність блока керування БК, який має бути розрахованим на повну потужність, що споживається двигуном під час керування.

На схемі рис. 4.8, б потік потужності від джерела живлення ДЖ надходить безпосередньо на комутатор двигуна К. Блок керування БК, який керується напругою U_k , впливає на комутатор за допомогою сигналів малої потужності. Отже, в цьому разі функцію керованого підсилювача виконує власне комутатор двигуна К, а блок керування БК тільки формує керувальну функцію. Встановлена потужність БК в схемі (б) є набагато меншою, ніж в схемі (а), що забезпечує переваги в сенсі габаритів, вартості й простоти всієї схеми.

4.4. Способи керування швидкістю вентильних двигунів

4.4.1. Неперервне керування

Неперервне керування швидкістю двигуна припускає можливість плавної зміни напруги, яка підводиться до обмотки статора. Його можна здійснювати за допомогою регульованого джерела живлення, додаткового блока керування, який регулює рівень напруги за допомогою широтно-імпульсної або частотно-імпульсної модуляції, переводом силових ключів

комутатора в активний режим, а також за допомогою широтно-імпульсної модуляції безпосередньо силовими ключами комутатора.

Механічні характеристики ВД за цього способу керування мають вигляд, зображений на рис. 4.9.

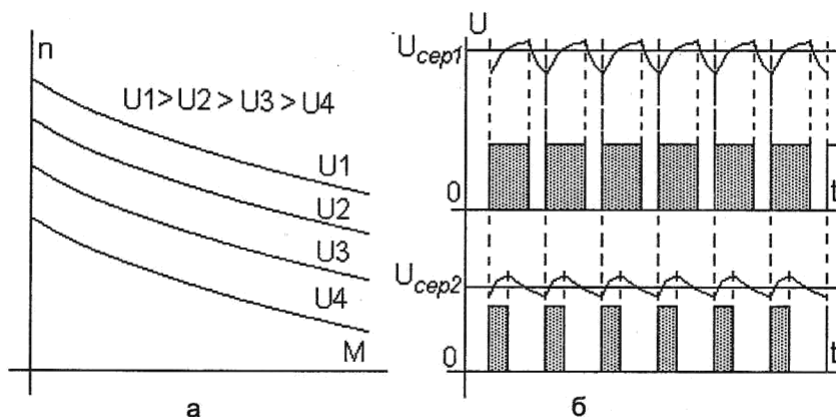


Рис. 4.9. Механічна характеристика (а) та принцип широтно-імпульсного регулювання напруги (б)

Рис. 4.9, б ілюструє принцип регулювання середнього значення напруги зміною ширини імпульсів за сталого їхнього періоду.

4.4.2. Імпульсне керування швидкістю ВД

Імпульсне регулювання можна здійснювати однополярними або двополярними імпульсами.

Однополярне імпульсне регулювання через складнощі, які виникають під час глибокого регулювання з малими значеннями моменту навантаження, характеризується невеликим діапазоном стійкого регулювання (1:15 - 1:20).

Двополярне регулювання імпульсами різної полярності, одна з яких відповідає додатному моменту двигуна, а друга - від'ємному моменту в режимі противімкнення, забезпечує стійку лінійну регульовальну характеристику. Проте цей режим характеризується несприятливими енергетичними показниками, особливо в зоні малих швидкостей, де двигун споживає потужність, наближену до пускової.

4.4.3. Релейний спосіб керування швидкістю ВД

Структурна схема релейного регулювання з лінійним зворотним зв'язком за швидкістю двигуна зображена на рис. 4.10. Напруга керування i^* порівнюється з сигналом зворотного зв'язку $k\omega$, і сигнал різниці $e = I_k - k\omega$ діє на релейний елемент, який вмикає або вимикає двигун залежно від знака e .

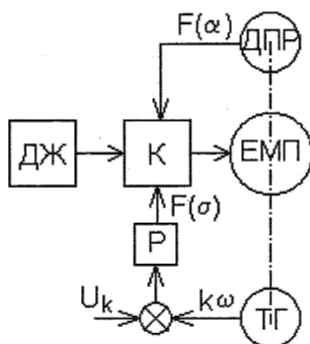


Рис. 4.10. Структурна схема релейного керування

Використання цього способу не завжди вимагає інформації про швидкість двигуна в аналоговому вигляді, і треба мати інформацію тільки про досягнення двигуном заданого рівня частоти обертання. У цьому разі можна застосувати реле частоти обертання, яке було розглянено вище.

Система релейної стабілізації частоти обертання ВД, незважаючи на обмеження можливості за точністю (0.5-1 % без застосування спеціальних заходів і до 0.15 % з підбором елементів й налагоджування), має доволі поширене розповсюдження, завдяки своїй простоті. Що стосується регулювання частоти обертання двигуна за допомогою цього способу, то він дає змогу забезпечити діапазон регулювання 1:50-1:100, а в окремих випадках і 1:200-1:400.

4.4.4. Дискретно-фазове регулювання швидкості ВД

Підвищення вимог до точності підтримання швидкості двигунів, які використовують в приводах високоякісних магнітофонів, апаратів відеозапису та інших пристроїв, призвело до появи способів стабілізації швидкості, які базуються на порівнянні еталонної частоти задавального генератора й частоти зворотного зв'язку, що пропорційна власній частоті обертання вала двигуна. У

такій системі, якщо порівняння здійснюється за допомогою елементів дискретної дії без перетворення в аналогові сигнали, що усуває пов'язані з перетворенням похибки, точність підтримання середнього значення частоти обертання двигуна визначатиметься тільки стабільністю еталонної частоти, яка може бути доволі високою (кварцові генератори).

Принципова схема дискретно-фазового способу регулювання або стабілізації швидкості ВД постійного струму зображена на рис. 4.11, а. Задавальний генератор ЗГ продукує імпульси малої тривалості, які мають період $T_0 = \frac{60}{n} \text{ Г}$. Послідовність імпульсів ЗГ надходить на логічний пристрій ЛП. ВД має датчик зворотного зв'язку ДЗЗ, який видає частоту імпульсів зворотного зв'язку, яка пропорційна швидкості двигуна,

$$f_{\text{ДЗЗ}} = i \cdot \omega = \frac{60}{n} \cdot \frac{2\pi}{T_0} = A, \quad (4.2)$$

де n - кількість обертів за хвилину; i - кількість імпульсів датчика зворотного зв'язку за один оберт.

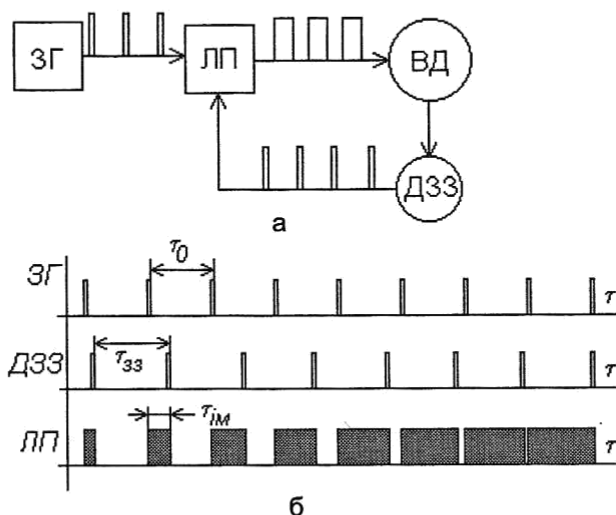


Рис. 4.11. Структурна схема (а) та діаграма імпульсів (б) дискретно-фазового способу стабілізації швидкості ВД

Імпульси зворотного зв'язку також надходять на логічний пристрій ЛП, де порівнюється їхня фаза з фазою імпульсів задавального генератора. У простішому випадку схема ЛП побудована так, що кожний імпульс ЗГ вмикає двигун, а кожний імпульс ДЗЗ вимикає його. Коли настає усталений режим стабілізації швидкості, то забезпечується рівність $\omega = \omega_0 = \frac{60}{n} \cdot f_{\text{ДЗЗ}}$ і на виході -

логічного пристрою утворюється послідовність імпульсів постійної тривалості, які діють на комутатор ВД (на схемі не показаний) так, що протягом імпульсу двигун увімкнений, а протягом паузи - відімкнений (або, залежно від прийнятого закону керування, знаходиться в режимі електричного гальмування). Якщо період імпульсів D_{33} має відхилення від періоду $3T$, тобто швидкість двигуна не дорівнює необхідній стабілізованій швидкості, то послідовність імпульсів вмикання Γ_{in} , зображена на рис. 4.11, б, матиме змінну тривалість, що відповідатиме перехідному процесові стабілізації.

4.4.5. Широтно-фазовий спосіб регулювання частоти обертання ВД

Наявність повністю керованих силових електронних елементів у колі статорних обмоток ВД дає змогу використати їх і для регулювання частоти обертання будь-яким з відомих способів керування. Вибір способу регулювання залежить від конкретних умов роботи приводу і типу електромеханічного перетворювача. Амплітудно-імпульсна модуляція сприятлива для електромеханічного перетворювача, але спричиняє підвищення втрат на силових ключах комутатора. Широтно-імпульсна модуляція зумовлює додаткові втрати від вищих гармонік в електромеханічному перетворювачі і збільшення динамічних втрат на перемикання силових ключів комутатора. Для формування жорстких механічних характеристик при згаданих способах необхідно додатково застосовувати системи авторегулювання.

Відомі дискретно-фазові способи регулювання, які дають можливість здебільшого без додаткових кіл корекції перейти до астатичних структур автоматичних систем стабілізації. Проте такі системи мають суттєвий недолік, який полягає в низькій перевантажувальній здатності і необхідності вирішення питання введення в синхронізм.

На кафедрі “Електричні машини та апарати” Національного університету “Львівська політехніка” запропоновано широтно-фазовий спосіб регулювання частоти обертання ВД, який дозволяє отримувати достатньо жорсткі механічні характеристики без організації додаткової системи авторегулювання. Суть способу полягає в тому, що примусовий інтервал комутації секції ВД формується логічним множенням сигналів ДПП і сигналів формувача регульованої часової затримки. Цим досягається зміна середнього значення напруги, яка підводиться до секції ВД.

Розглянемо принцип широтно-фазового регулювання (ШФР) ВД на прикладі трисекційного ВД з однопівперіодним ЕК, схема якого та діаграма імпульсів зображені на рис. 4.12.

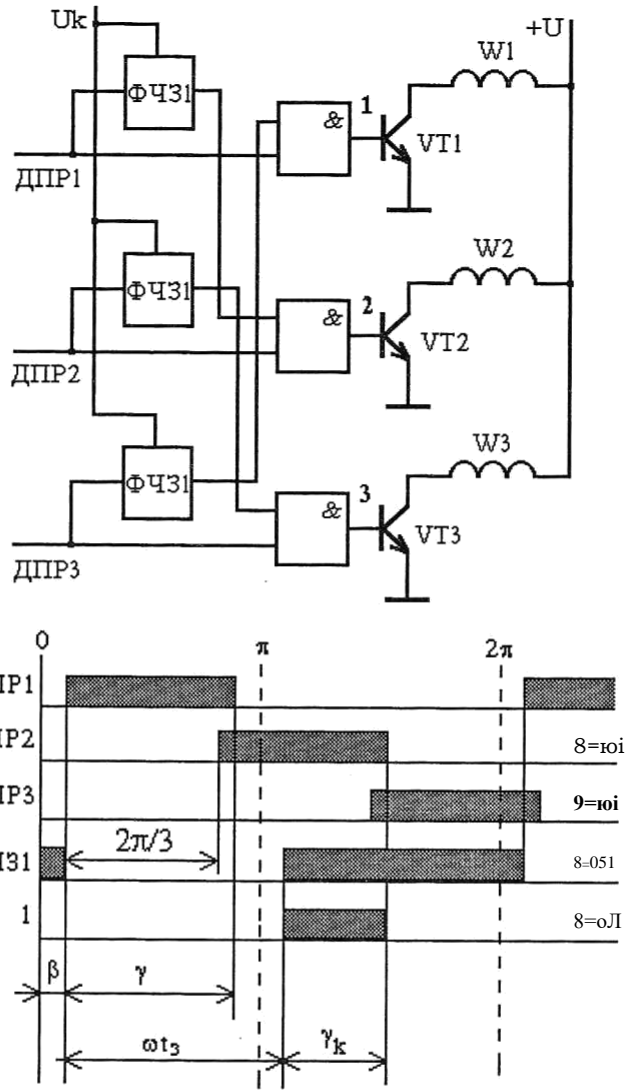


Рис. 4.12. Спрощена схема ВД з широтно-фазовим регулюванням та діаграма імпульсів

Секції ВД $V/I - V/3$ через силові ключі ЕК $VT1 - VT3$ приєднуються до постійної напруги джерела живлення $[/$. Вихідні сигнали ДПР1 - ДПР3 давача положення ротора через схему керування, яка містить формувачі регульованої часової затримки $\Phi ЧЗ1 - \Phi ЧЗ3$ та логічні схеми збігу $\&$, керують силовими ключами ЕК. Величина часової затримки $/3$ визначається рівнем сигналу $I/с$. Імпульси ДПР характеризуються такими величинами: кутовим розміром сигнал-

ного сектора у в електричних радіанах і початковою фазою примусового інтервалу комутації секції Д Вихідні імпульси 1-3 схеми керування визначають примусовий інтервал комутації секції ВД u_k в електричних радіанах.

Середню величину напруги, яка прикладається до секції, і частоту обертання ВД характеризує відносне значення примусового інтервалу комутації секції.

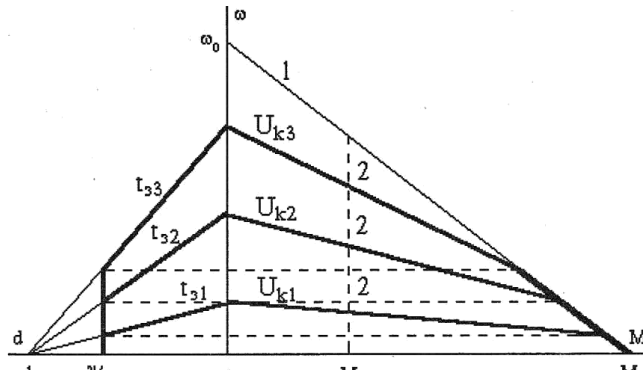
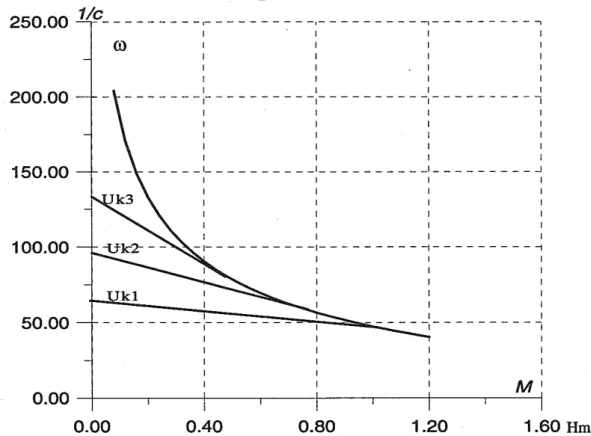


Рис. 4.13. Механічні характеристики ВД та залежність відносного значення інтервалу комутації секції від частоти обертання ротора

Запропонований спосіб в сенсі підвищення жорсткості механічних характеристик особливо ефективний для регулювання ВД з пасивним ротором. На рис. 4.14 показані експериментальні механічні характеристики.



Застосування ШФР ВД дає змогу досить простим способом отримувати регульовальні характеристики за рахунок зміни за величиною і фазою відносного значення примусового інтервалу комутації секції. При цьому існує функціональний зв'язок, який еквівалентний за дією від'ємному зворотному зв'язку за швидкістю, що підвищує жорсткість механічних характеристик.

Контрольні запитання

1. Які вимоги висувають до давачів частоти обертання електромехано-тронних перетворювачів?
2. Які основні типи давачів частоти обертання?
3. Що являє собою синхронний частотний давач?
4. Наведіть принципову електричну схему давача з перетворенням частоти імпульсів в аналоговий сигнал.
5. Що являє собою давач ЕРС обертання двигуна?
6. Подайте структурні схеми керування швидкістю ВД, їхню характеристику.
7. Що таке дискретно-фазове регулювання швидкості ВД?
8. Що являє собою неперервне керування швидкістю обертання двигуна?
9. Що таке імпульсне керування швидкістю двигуна? На які два різновиди поділяють імпульсне керування?
10. Охарактеризуйте широтно-фазовий спосіб регулювання частоти обертання ВД.
11. Опишіть релейний спосіб керування швидкістю вентильного двигуна.
12. Наведіть рівняння та характеристики при широтно-фазовому способі регулювання частоти обертання вентильних двигунів.
13. Наведіть схему синхронного тахогенератора з випростувачем.
14. Охарактеризуйте імпульсне керування швидкістю вентильних двигунів.
15. Яка основна відмінність між релейним і широтно-імпульсним способами керування швидкістю ВД?
16. Наведіть схему безконтактного електронного реле швидкості вентильного двигуна. Де його можна застосовувати?

Конспект лекцій
з дисципліни
“Управління енергоефективними електромеханічними перетворювачами”

для здобувачів другого (магістерського) РВО, денної та заочної форми навчання спец.
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Упорядники:

ХАНДОЛА Юрій Миколайович

ГУЗЕНКО Віталій Вікторович

Формат 60x84 1/16. Гарнітура Times New Roman

Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. арк. 2,5

Наклад 30 пр.

Державний біотехнологічний університет