ВСТУП

Суміщення електромеханічних перетворювачів (ЕМП) з електронними компонентами (ЕК) забезпечує перетворення електричного струму та його параметрів, керування, діагностику, захист тощо на вищому якісному рівні. Функціональне й конструктивне об'єднання енергетичних та інформаційних процесів в одному технічному пристрої приводить до створення модифікацій електричних машин (ЕМ), які відрізняються підвищеними керованістю й швидкодією, прецизійністю та іншими поліпшеними або новими якостями [1].

Можливість створення нових систем повністю ґрунтується на застосуванні силових транзисторів для здійснення всіх процесів у пристроях перетворення електричної енергії. Нові електротехнічні системи створюються на основі комплексу нових пристроїв, які забезпечують усі види перетворення електричної енергії, регулювання, комутацію, захист. Застосування нових систем забезпечує вирішення найважливіших сучасних задач: істотне зменшення матеріалоємності, енергоспоживання, трудомісткості створення систем і пристроїв.

Особливого значення електронізація набуває в малому електромашинобудуванні, що зумовлено зростанням необхідності у виконавчих механізмах та пристроях перетворення інформації для систем автоматики, які мають підвищену надійність та гнучкість керування, здатні широко взаємодіяти з елементами обчислювальної та мікропроцесорної техніки.

Водночас досвід електронізації показує, що просте електричне або конструктивне поєднання ЕМП з ЕК без попередньої оптимізації їхніх параметрів не дає змоги отримати задані вихідні показники за мінімальних вартості, розмірів тощо. Інакше кажучи, включенню до складу ЕМ електронних компонентів повинні передувати розрахунки та отримані за відповідними критеріями проектні оцінки, які скеровані на пошук оптимальних варіантів: за кількістю витків фаз та паралельних гілок якірних обмоток, перетину міді та розмірів осердь ЕМП, за способами отримання інформації про частоту обертання і просторового розташування ротора, за типами напівпровідникових перетворювачів і комутаторів тощо. У багатьох випадках потрібне виконання багатоваріантних розрахунків із використанням адекватних математичних моделей, які описують функціонально об'єднані ЕМП і ЕК.

Вирішення задач оптимальної електронізації ЕМ вимагає розроблення й використання спеціальних теорій і технологій, які ґрунтуються на правильному поєднанні теорій і технологій електромеханіки, електроніки й кібернетики [1–4]. Правильне поєднання означає, що об'єднувати й використовувати різні теорії потрібно не шляхом їхнього формального стикування, а на основі системного підходу з використанням нових критеріїв і методології.

Машини і механізми з електроприводом споживають близько 60 % електроенергії, яка виробляється у всьому світі. Тому навіть незначне скорочення втрат енергії в електроприводі може дати величезну економію в масштабах будь-якої країни. Одним з дієвих заходів скорочення втрат енергії, покращання масо-габаритних та експлуатаційних показників електропривода є перехід від нерегульованого електропривода до регульованого, що гарантує кардинальне підвищення технічного рівня пристроїв та технологічних процесів, значну економію енергетичних ресурсів. Цей напрямок є загальносвітовою тенденцією завдяки прогресові в галузі силової та інформаційної електроніки.

До 80-х років XX століття основним типом електромеханічного перетворювача, який використовували в складі регульованого електропривода, була колекторна електрична машина постійного струму. Пізніше частка систем приводу з колекторними машинами різко зменшилася, що пояснюється низькою надійністю колекторного вузла. За прогнозами спеціалістів, у найближчий час частка електроприводів з колекторними ЕМ постійного струму знизиться до 10 % від загальної кількості приводів. Це свідчить про те, що електроприводи з колекторними ЕМ вичерпали закладені в них можливості. Їм на зміну прийшли частотні електроприводи з асинхронними електродвигунами з короткозамкненими роторами і електроприводи з вентильними двигунами постійного струму, в яких струм комутується в обмотках за допомогою напівпровідникового перетворювача [5, 6].

Вентильні двигуни застосовуються в тих галузях сучасної техносфери, де раніше застосовувались колекторні ЕМ постійного струму. Зокрема:

- верстатобудування, робототехніка, автоматичні лінії, гнучкі виробничі системи, обладнання для технологічних цілей;
- приладобудування та обчислювальна техніка;
- електротранспорт;
- медичне та спортивне обладнання;
- спецтехніка (авіаційна, космічна, військова) тощо.

У сучасних малопотужних регульованих або стабілізованих електроприводах широкого застосування набувають вентильні двигуни різних конструктивних виконань. Статорні обмотки таких машин виготовляють *m*-секційними, розподіленими на поверхні гладкого або зубчастого якоря, а також

зосередженими на зубцях явнополюсного статора, а ротори – з постійними магнітами або пасивні [6–9].

Електромеханічний перетворювач та давач положення ротора об'єднують в один конструктивний вузол, що зумовлює специфічні вимоги до останнього з погляду використовуваних матеріалів та механічної міцності його складових частин.

Вентильний двигун можна трактувати як кроковий двигун, який працює в режимі вільного ходу, тобто його швидкість визначається прикладеною напругою та навантаженням на валу. Для цього імпульси, з яких формується напруга біжучої хвилі, продукуються як функція кута повороту ротора, тобто його положення. Влаштування й роботу схеми керування крокового двигуна у режимі вільного ходу показано на рис. В.1. Для наочності цей двигун зображено з однією парою полюсів на роторі та двома обмотками статора.

Обмотки сполучені з комутатором через струмообмежувальні резистори, напруги з давачів положення ротора надходять на вхід тригерів Шмідта. На рис. В.1, *б* показано всі чотири можливі комбінації знаків струмів в обмотках й відповідні їм положення ротора. Вони розміщуються під кутом 45° до вертикалі, точно навпроти давачів положення. Під час знаходження ротора в околиці давача відбувається перекидання відповідного тригера Шмідта, внаслідок чого в обмотки подається струм, який притягує ротор до наступного за ходом обертання давача.

Напрям обертання визначається перемикачем. У початковому стані, коли по обмотках не протікає струм, ротор буде притягнений полюсом до одного із осердь статора, тобто займе положення під кутом 0 або 90° до вертикалі.

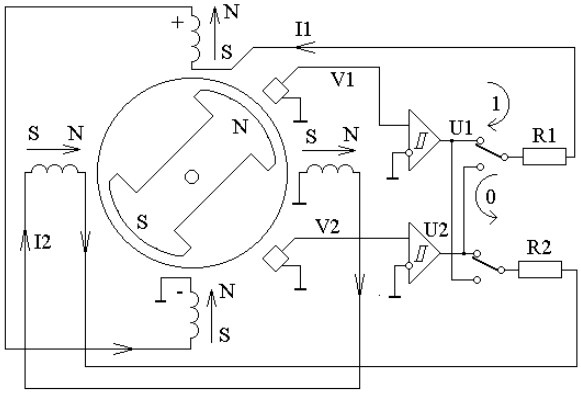
З подачею живлення тригери встановляться в якомусь стані, ротор буде намагатись зайняти відповідне положення. Під час цього він або досягне давача, або пройде біля нього, викликаючи перекидання відповідного тригера, після чого почнеться рівномірне обертання ротора.

Промислове освоєння ВД стало можливим завдяки значним досягненням у галузі створення силових транзисторів, інтегральних мікросхем і мікропроцесорів, а також в галузі виробництва високоенергетичних постійних магнітів. Зменшились габарити силових комутаційних блоків, виросли функціональні можливості систем керування, діагностики і контролю двигунів.

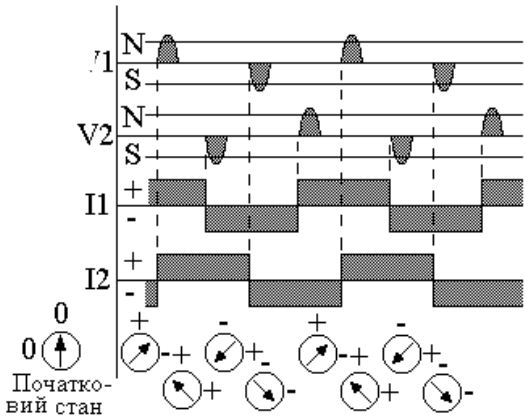
Найпоширеніші ВД малої потужності з транзисторними комутаторами, зі збудженням від постійних магнітів і з давачем положення ротора (ДПР) різноманітного типу.

Щітково-колекторний вузол у цих двигунах (рис. В.2), який ще називають безконтактним, безщітковим або безколекторним, замінено напівпровідниковим комутатором (НК)-інвертором, який керується сигналами $f(a)$ від ДПР.

Електромеханічний перетворювач вентильних двигунів, на відміну від звичайних колекторних двигунів постійного струму, має нерухому обмотку якоря й обертову систему збудження (полюси) [1].



а



б

Рис. В.1. Влаштування та часова діаграма роботи схеми керування вентильного двигуна з постійними магнітами

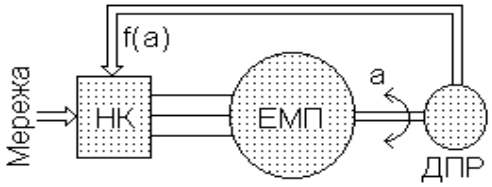


Рис. В.2. Принципова схема вентильного двигуна

По суті, вентильний двигун є синхронною машиною, частота струму в обмотках якого є функцією положення ротора.

Для усвідомлення можливостей, які покладено в основу процесів створення знакопостійного електромагнітного моменту вентильного двигуна при будь-якому положенні його ротора, розглянемо спочатку схему оберненого колекторного двигуна (рис. В.3, *а*).

Тепер побудуємо вентильний аналог колекторного двигуна оберненої конструкції. На рис. В.3, *б* якірна обмотка *1* нерухома і повторює обмотку схеми *а*. Систему колекторних пластин і щіток у безконтактному аналогові замінено системою напівпровідникових ключів (*VT1 – VT4, VT1` – VT4`*), які керуються чутливими елементами *3* (*Д1 – Д4*) залежно від положення ротора. Ключі *VT1 – VT4* і елементи *3* розміщені нерухомо. Чутливі елементи давача положення ротора розміщені на статорі і можуть бути орієнтовані відносно секцій обмотки так само, як орієнтовані колекторні пластини на схемі *а*. Для того, щоб організувати процес комутації секцій безконтактного аналога в тій самій послідовності, що і для колекторного двигуна схеми *а*, ротор вентильного двигуна має два сектори 6, які утворюють керувальний елемент давача положення.

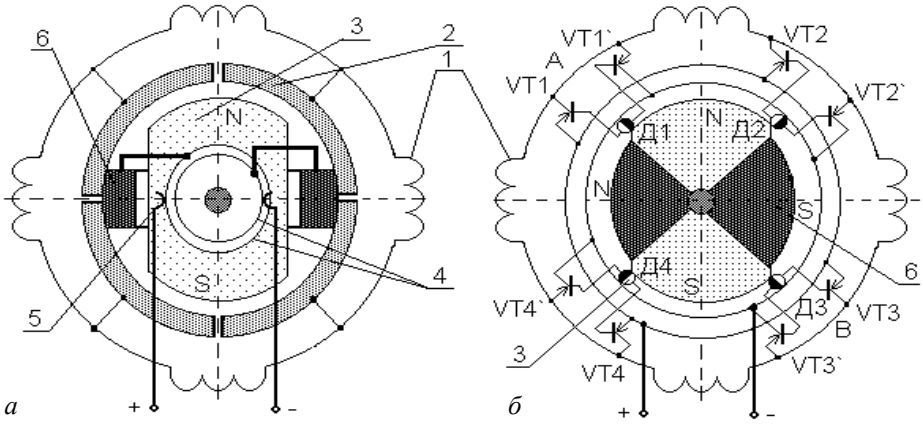


Рис. В.3. Колекторний двигун оберненої конструкції (а) та його безконтактний аналог (б)

Кожен з цих секторів у випадку, який розглядається, має різноіменно-полюсну намагніченість. При цьому кожний з чутливих елементів залежно від полярності сектора *6*, з яким він взаємодіє, видає сигнал того чи іншого знака (за таким принципом працюють, наприклад, давачі Холла). Знак сигналу чутливого елемента визначає спрацювання одного з пари ключів *VT1 – VT1`*, які сполучені з шинами джерела живлення. Зокрема, на рис. В.3, *б* зображено момент, коли сектор *N* взаємодіє з чутливим елементом *Д1*, а сектор *S* – із чутливим елементом *Д3*. У цьому положенні сигнал чутливого елемента *Д1*

відкриває ключ *VT1*, а сигнал чутливого елемента *ДЗ* – ключ *VT3'*. Отже, виводи обмотки *A* і *B* виявляються сполученими через ключі *VT1* і *VT3'* відповідно з позитивною й негативною шинами джерела живлення так само, як і для колекторного двигуна на рис. В.3, *а*.

Очевидно, що ширину колекторної пластини можна звужувати, розширюючи одночасно щітку так, щоб зона перекриття при цьому не змінювалась.

Отже в обох схемах є істотні спільні ознаки:

- однакова схема обмотки;
- однакова орієнтація колекторних пластин і чутливих елементів відносно осей обмоток;
- однакова орієнтація щіток і секторів давача положення відносно нейтралі індуктора;
- однакова послідовність комутацій секцій обмоток.

Така спільність ознак дає змогу стверджувати, що ВД за принципом роботи аналогічний колекторному двигуну.

У ширшому аспекті ця аналогія випливає з наявності позиційного зворотного зв'язку ротора відносно статора, який керує процесом комутації секцій у тому й іншому типах машин.

Призначення позиційного зворотного зв'язку полягає в тому, щоб організувати комутаційний процес так, щоби за будь-якого положення ротора вектор поля індуктора й вектор поля якоря становили кут, близький до прямого. Ця умова є найкращою з погляду забезпечення максимуму електромагнітного моменту, що виникає під час взаємодії полів статора й ротора.

Однак, незважаючи на спільність властивостей, зумовлену принципом роботи, треба пам'ятати про властивості, які є специфічними для ВД і які виділяють їх в окремий клас електричних машин:

- на відміну від процесу переходу щітки з однієї колекторної пластини на іншу процес переключення силових ключів комутатора можна вважати миттєвим. Це явище помітно впливає на процес комутації;
- практично схеми ВД мають мало секцій (2–3), що приводить до необхідності враховувати пульсації ЕРС обертання й електромагнітного моменту на характеристики двигуна;
- схеми обмоток за способом з'єднання секцій обмоток між собою і з комутувальним пристроєм більш різноманітні, ніж для колекторних машин, для яких, як правило, застосовується замкнена обмотка, що складається з однієї або кількох пар паралельних гілок;
- внутрішнє розміщення обертового індуктора в конструкції вентильного двигуна визначає специфіку його розрахунку. Поперечна геометрія машини розраховується ніби зсередини, при цьому спочатку

визначається об’єм магніту (мінімальний за умов розмагнічування в момент пуску), а потім діаметр розточки якоря тощо;

- наявність електронного комутатора у схемі ВД відкриває нові можливості побудови систем керування швидкістю та її регулювання.

Отже, ВД постійного струму являють собою самостійний клас ЕМТП, що вимагають розроблення нових методів теоретичного дослідження, розрахунку й проектування, а також виявлення можливостей використання в системах, що передбачають регулювання швидкості виконавчих механізмів, точного позиціювання тощо.

З іншого боку, вентильний двигун постійного струму є синхронним двигуном, струм у фазах обмотки статора якого змінюється залежно від положення ротора. В напівпровідникових комутаторах двигунів невеликої потужності зазвичай застосовують транзистори.

На рис. В.4 наведено принципову схему вентильного двигуна з трисекційною обмоткою статора, яка сполучається з мережею постійного струму через напівпровідниковий комутатор, який має шість силових транзисторних ключів К1 – К6. Вхід кожного ключа сполучається з виходом відповідного чутливого елемента давача положення ротора.

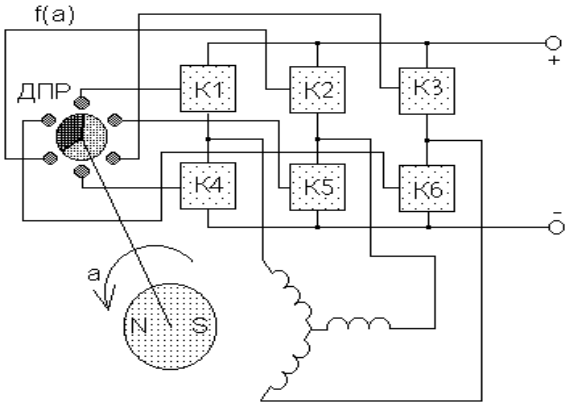


Рис. В.4. Принципова схема вентильного двигуна постійного струму

Для ілюстрації принципу дії вентильного двигуна постійного струму на рис. В.5 наведено спрощену функціональну схему вентильного двигуна.

Світова практика накопичила деякий досвід виробництва й експлуатації двигунів цього типу. Цей досвід підтвердив їхні високі споживчі властивості, а в умовах масового виробництва довів економічну доцільність використання в малопотужних приводах широкого вжитку. Проте, вентильним двигунам з ПМ на обертовій частині машини властиві такі недоліки, як складність конструкції й технології виготовлення, підвищена вартість.

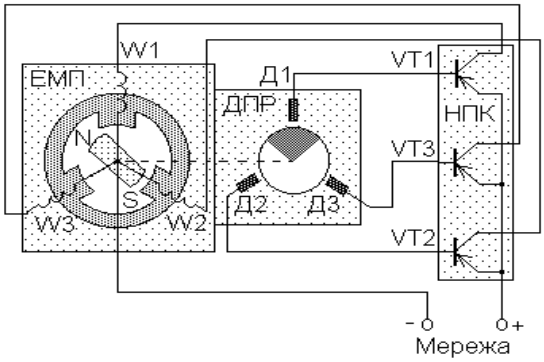


Рис. В.5. Спрощена функціональна схема вентильного двигуна постійного струму

Одним з найпростіших за конструкцією, технологічним і надійним є електромеханічний перетворювач з явнополюсним статором і зосередженими котушками його обмотки, яка через електронний комутатор сполучається з мережею постійного струму та зубчастим пасивним ротором.

Такий ЕМП є простішим, дешевшим і технологічнішим ніж найпростіші з електричних машин – асинхронні, а ВД на його основі за регулювальними властивостями не поступаються колекторним двигунам постійного струму.

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

Застосування пасивного ротора, магнітоізольованих конструкцій статора дає можливість за модульним принципом, на основі однотипних елементів, створювати широку гаму виконавчих двигунів прилаштованого і влаштованого виконання, будувати конструкції електромеханічних перетворювачів у лінійному виконанні, ефективно використовувати їх при створенні принципово нових взірців робототехнічних пристроїв, електроприводів автоматики тощо.

Значна кількість публікацій у зарубіжній періодичній технічній літературі, а також підвищена увага вітчизняних підприємств електротехнічної галузі свідчать про швидко зростаючий рейтинг вентильних реактивних двигунів (ВРД), відомих на Заході як Switched Reluctance Motors (SRM). Технологічність і простота конструкції, дешевизна та стійкість у роботі, задовільні регулювальні характеристики зумовили розширення використання цих електричних машин в електроприводі, де вимагаються високі споживчі показники. Отже, є необхідність розглянути комплекс питань розроблення, теорії, проектування та дослідження вентильних двигунів з пасивним ротором та з буфером енергії з позиції їх застосування в приводах різноманітного призначення..