

# ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ РУХОМ МОБІЛЬНОГО РОБОТА З ВИКОРИСТАННЯМ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

К.т.н. С. П. Новоселов, к.т.н. В. І. Роменський, С. П. Циганок, Харківський національний університет радіоелектроніки

*Враховуючи те, що на даний момент часу проведено велика кількість досліджень та розробок в галузі управління мобільними роботами, універсальні підходи до синтезу систем автоматичного управління мобільних платформ з використанням двигунів постійного струму розроблені недостатньо.*

*Таким чином, оптимізація методу керування рухом мобільного робота з використанням двигунів постійного струму актуальна для виробництва та потребує удосконалення.*

*Учитывая, что на данный момент времени проведено большое количество исследований и разработок в области управления мобильными роботами, универсальные подходы к синтезу систем автоматического управления мобильных платформ с использованием двигателей постоянного тока разработаны недостаточно.*

*Таким образом, оптимизация метода управления движением мобильного робота с использованием двигателей постоянного тока актуальна для производства и требует усовершенствования.*

*Given that a great deal of research and development in the field of mobile robot management has been carried out at this point in time, universal approaches to the synthesis of automated control systems for mobile platforms using DC motors are underdeveloped.*

*Thus, the optimization of the motion control method of a mobile robot using DC motors is relevant for production and needs improvement.*

**Ключові слова:** двигун постійного струму, динаміки робота, мобільні роботи, роботизовані системи, схема управління.

## Вступ

Створення нових наземних мобільних роботів (МР) та їх керування є перспективним напрямком сучасної робототехніки. В даний час промислові роботи щільно закріпилися в галузях машинобудування, приладобудування та інших галузях, де необхідна точність складання і висока продуктивність праці. Мобільні роботи знаходять все більш широке застосування для виконання різних завдань в умовах, коли присутність людини в зоні їх роботи або неможливо з міркувань безпеки, або ж небажано через обмеження продуктивності обслуговується технологічного обладнання.

До складу подібних роботів зазвичай входять маніпулятори для виконання технологічних операцій, транспортна система, що призначена для точного переміщення МР за рахунок системи навігації робота та самої системи керування виконавчими вузлами.

Особливості складу робототехнічних пристроїв обумовлені в першу чергу різноманіттям видів дій і траєкторій рухів.

Механічно, робот нагадує систему з великою кількістю приводів, а в таких системах простежується динамічна взаємодія, яка не дозволяє розглядати систему робота як сукупність безлічі маленьких (рівних за значимістю) автономних систем.

Побудова систем управління мобільними роботами використанням двигунів постійного струму є актуальною проблемою сьогодення.

## Аналіз конструкції двигунів постійного струму

Електродвигун постійного струму (ДПС) – електрична машина постійного струму, що перетворює електричну енергію постійного струму в механічну енергію [1]. Цей двигун можна ще назвати синхронною машиною постійного струму з самосинхронізацією.

Двигун, показаний на рис. 1, складається з:

– одного електромагніту на статорі (двополюсного статора) з явно вираженими полюсами і з однією обмоткою

– ротора з трьома зубцями і, відповідно, з трьома обмотками (обмотки ротора при такій конструкції можуть бути включені зіркою (у такій малопотужній машині умови комутації допускають таке з'єднання) або трикутником)

– колекторного вузла з трьома пластинами (ламельями) та двох щіток.

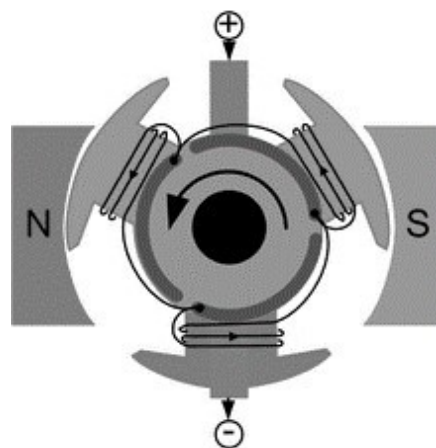


Рис. 1. Принцип роботи колекторного двополюсного двигуна постійного струму з трьома зубцями на роторі [2]

ДПС є оборотними електричними машинами тому в певних умовах здатні працювати як генератори постійного струму.

Принцип роботи електродвигуна постійного струму має два описи:

- рухлива рамка (два стержні із замкнутими кінцями) із струмом в магнітному полі статора;
- взаємодія магнітних полів статора і ротора.

Рамка із струмом, в однорідному магнітному полі полюсів статора з індукцією  $B$ , на два стержні рамки завдовжки  $L$ , і із струмом  $I$ , діє сила Ампера  $F$ , постійної величини, рівні:

$$F = B \cdot S \cdot L \quad (1)$$

і спрямовані в протилежні сторони.

Ці сили прикладаються до плечей  $p$ , рівним :

$$p - r \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2)$$

де  $r$  – радіус рамки;

і створюють крутний момент  $M_k$  рівний:

$$M_k = F \cdot p = B \cdot I \cdot L \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3)$$

Для двох стержнів рамки, сумарний крутний момент рівний:

$$M_k s = 2 \cdot M_k = 2 \cdot B \cdot I \cdot L \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4)$$

ДПС класифікують по виду магнітної системи статора :

- з постійними магнітами (ДПМ)
- з електромагнітами:
- з незалежним включенням обмоток (незалежне збудження);
- з послідовним включенням обмоток (послідовне збудження);
- з паралельним включенням обмоток (паралельне збудження);
- зі змішаним включенням обмоток (змішане збудження) :

- з переважанням послідовної обмотки;
- з переважанням паралельної обмотки.

Вид підключення обмоток статора істотно впливає на тягові і електричні характеристики електродвигуна.

Двигуни з одним колектором і  $2n$  обмотками, де  $n$  – число пар полюсів ротора, із з'єднанням обмоток ротора в кільце мають велику, короткозамкнуту щітками, частину обмотки ротора, рівну :

$$k \cdot \alpha / (2 \cdot \pi) \quad (5)$$

де  $k$  – число щіток,

$\alpha$  – кутова ширина однієї щітки (рад).

Двигуни з двома колекторами і двома обмотками синусної і косинусної з магнітним полем полюсів статора мають малу неробочу частину під кривою крутного моменту рівну:

$$8 \cdot 2 \cdot Bm \cdot I \cdot L \cdot r \cdot \int_0^{\delta/2} (\sin(\omega \cdot t^2)) d(\omega \cdot t), \quad (6)$$

де  $\delta = \beta - \alpha$ ;

$\beta$  – кутова ширина проміжку між пластинами колектора (ламельями).

Цей тип двигунів подібний до двофазного безколекторного.

Двигуни з чотирма колекторами і двома обмотками, синусної і косинусної, мають спеціальну конструкцію колектора з чотирма колекторами (один колектор на одну щітку), яка дозволяє майже до нуля зменшити неробочу частину крутного моменту (неробоча частина крутного моменту в цьому двигуні залежить від точності виготовлення деталей) і зробити

використовувати частину крутного моменту незалежною від кутової ширини щітки.

При цьому кутова ширина однієї пластини колектора дорівнює:

$$\gamma = \pi - \alpha \quad (7)$$

де  $\alpha$  – кутова ширина однієї щітки.

Електронним аналогом щітково-колекторного вузла є інвертор з датчиком положення ротора (вентильний електродвигун).

Ротор є постійним магнітом, а обмотки статора перемикаються електронними схемами – інверторами.

Безколекторний двигун постійного струму з випрямлячем (мостом) може замінити універсальний колекторний двигун (УКД).

До інших двигунів постійного струму віднесемо наступні види:

– уніполярний електродвигун (уніполярний генератор);

– універсальний колекторний двигун.

Універсальний колекторний двигун працює і на постійному струмі, і на змінному.

### Особливості управління мобільними роботами з двигунами постійного струму

Основні формули, використовувані при управлінні ДПС [3] мають наступний вигляд.

Швидкість двигуна :

$$w = \frac{U - IR}{C \cdot \phi} \quad (8)$$

де  $U$  – напруга, що підводиться до обмотки;

$I$  – струм обмотки;

$R$  – опір ланцюга;

$C$  – конструктивна постійна;

$\phi$  – потік, що створюється обмоткою збудження.

Крутний момент розвивається двигуном з незалежним (паралельним) збудженням, пропорційний струму в обмотці якоря (для двигунів послідовного збудження – момент приблизно пропорційний квадрату струму, оскільки потік пропорційний майже струму):

$$M = C_m \cdot \phi \cdot I \quad (9)$$

Електрорушійна сила (ЕРС) в обмотках пропорційна кутовій частоті обертання ротора  $\omega$  при постійному потоці збудження  $\Phi$ :

$$E = k_e \cdot \omega \quad (10)$$

де  $k_e$  – коефіцієнт ЕРС двигуна,

$\omega$  – кутова швидкість обертання ротора.

Загальні способи управління ДПС :

- зміна напруги, що підводиться до обмотки якоря;
- введення додаткового опору в ланцюг якоря;
- зміна потоку (регулювання збудження).

Управління двигуном постійного струму в САУ має на увазі або зміну швидкості обертання пропорційно деякому сигналу управління, або підтримку цієї швидкості незмінної при дії зовнішніх дестабілізуючих чинників [4].

Використовуються 4 основні методи управління, що реалізують перерахування вище принципи:

- реостатно-контакторне управління;
- управління по системі «генератор-двигун» (Г-Д);
- управління по системі «Керований випрямляч – Д» (УВ-Д);
- імпульсне управління.

Зазвичай у реостатно-контактному управлінні використовуються 3 схеми:

- при регулюванні швидкості  $n$  від 0 до  $n_{ном}$  в ланцюг якоря включають реостат (якірне управління);
- при необхідності отримати  $n > n_{ном}$  реостат включають в ланцюг ОБ (поліусне управління);
- для регулювання швидкості  $n < n_{ном}$  і  $n > n_{ном}$  реостати включають як в ланцюг якоря, так і в ланцюг ОБ.

Перераховані схеми застосовуються при ручному управлінні.

Для автоматичного управління використовують ступінчасте перемикання  $R_{pa}$  і  $R_{pb}$  за допомогою контакторів (рис. 2).

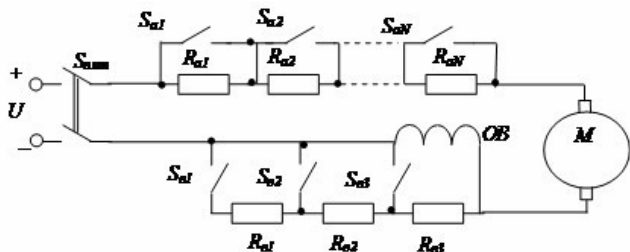


Рис. 2. Реостатно-контактне управління

Якщо потрібно точне і плавне регулювання швидкості, число комутованих резисторів і елементів комутації має бути великим, через що збільшуються габарити системи, вартість і знижується надійність.

При регулюванні частоти обертання проводиться регулюванням  $R_b$  ( $U$  змінюється від 0 до  $n$ ) за схемою на рис. 3. Для отримання швидкості двигуна більше  $n$  – зміною  $R_{вд}$  (зменшення струму ОБ двигуна зменшує його основний потік  $\Phi$ , що і призводить до збільшення швидкості  $n$ ).

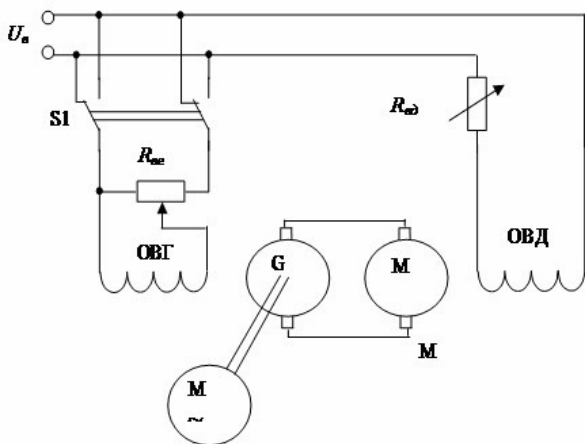


Рис. 3. Управління за системою генератор-двигун

Перемикач S1 призначений для реверсу двигуна (зміни напрямку обертання його ротора).

Оскільки управління Д здійснюється шляхом регулювання порівняно малих струмів збудження Г і Д, воно легко адаптується до завдань САУ.

Недолік такої схеми – великі габарити системи, маса, низький ККД, оскільки тут є триразове перетворення енергії (електричною в механічну і назад, і на кожному етапі є втрати енергії).

Система «Керований випрямляч – двигун» схожа на попередню, але замість електромашинного джерела регульованої напруги, що складається з, наприклад, трифазного, двигуна змінного струму і  $\Gamma=T$ , використовується керований, наприклад, теж трифазний електронний випрямляч (рис. 4) тиристора.

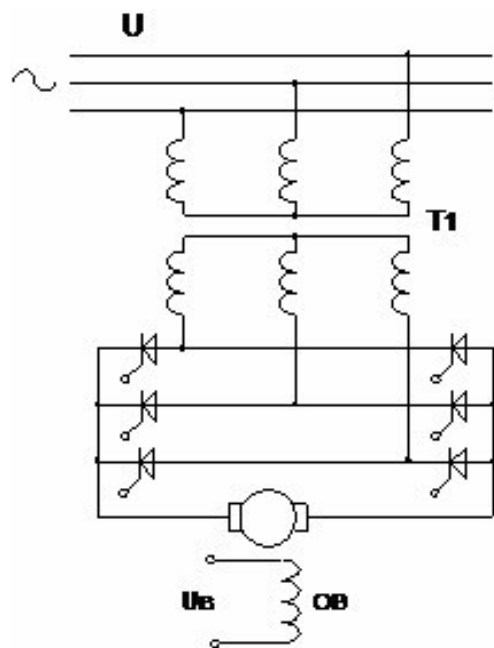


Рис. 4. Управління по системі «Керований випрямляч – двигун»

Сигнали управління формуються окремим блоком управління і забезпечують необхідний кут відкриття тиристорів, пропорційний сигналу управління  $U_y$ .

Переваги такої системи – високий ККД, малі габарити і маса.

Недоліком в порівнянні з попередньою схемою є погіршення умов комутації Д із-за пульсацій його струму якоря, особливо при живленні від однофазної мережі.

При імпульсному управлінні на двигун за допомогою імпульсного переривника подаються імпульси напруги, модульовані (ШІМ, ВІМ) відповідно до керувальної напруги (рис. 5).

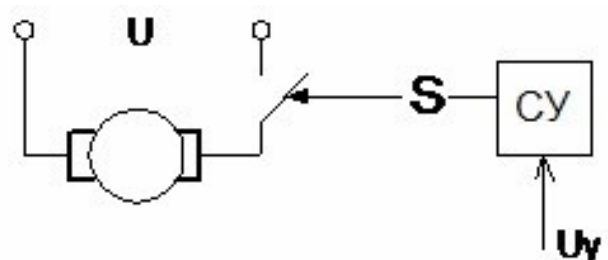


Рис. 5. Імпульсне управління

Таким чином, зміна швидкості обертання якоря досягається не за рахунок зміни напруги управління, а шляхом зміни часу, впродовж якого до двигуна підводиться номінальна напруга. Очевидно, що робота двигуна складається з періодів розгону і гальмування (рис.6), що чергуються.

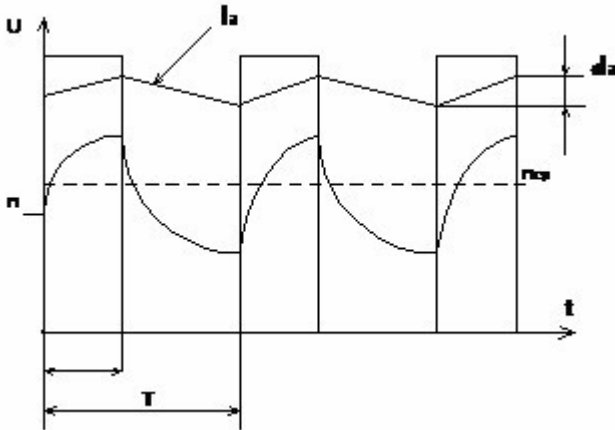


Рис. 6. Робота двигуна складається з періодів розгону і гальмування, що чергуються

Якщо ці періоди малі в порівнянні з повним часом розгону і зупинки якоря, то швидкість  $n$  не встигає до кінця кожного періоду досягати значень  $n_{ном}$ , що встановилися, при розгоні або  $n = 0$  при гальмуванні, і встановлюється деяка середня швидкість  $n_{сп}$ , величина якої визначається відносною тривалістю включення.

Таким чином для системи автоматизованого управління необхідно обирати схему управління, призначення якої – перетворення постійного струму або такого сигналу, що змінює послідовність імпульсів, які управляють системою з відносною тривалістю включення та заданою функцією величини цього сигналу. Як елементи комутації використовуються силові напівпровідникові прилади – польові і біполярні транзистори, тиристори.

### Висновки

Використання двигунів постійного струму відмінне рішення для підвищення динаміки робота, за рахунок того що зворотній зв'язок може бути досить просто реалізовано з використанням інкрементальних енкодерів.

Доступна цінова категорія подібного типу двигунів, робить їх привабливими для використання в широкому спектрі мобільних пристроїв.

До переваг використання таких двигунів можна віднести: лінійність залежності моменту від струму (за винятком режиму переривчастих струмів при ШІМ і малої електромагнітної постійної); доступність; високий ККД; простота схем управління; високий пусковий момент.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Електродвигуни постійного струму [Електронний ресурс] / Режим доступу : [www/fairway.com.ua/ua/elektrovdigateli/elektrovdigateli-postoyannogo-toka](http://www.fairway.com.ua/ua/elektrovdigateli/elektrovdigateli-postoyannogo-toka) (дата звернення 20.10.2019) – Назва з екрану.
2. Що таке колекторний двигун постійного струму і як він працює [Електронний ресурс] / Режим доступу : [www/samelectryk.in.ua/](http://www.samelectryk.in.ua/) (дата звернення 20.10.2019) – Назва з екрану.
3. Підхід до вирішення задачі компромісно-оптимального вибору маршруту руху об'єктів конфліктному середовищу / С.А. Шворов, А.М. Берназ О.І. [та ін.] // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2008. – № 19. – С. 63–71.
4. Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach / Barraquand Jerome and Latombe Jean-Claude // International Journal of Robotic Research - IJRR – Vol. 10. – P. 628–649. – 1991. <https://doi.org/10.1177/027836499101000604>
5. A quadtreebased pathplanning algorithm for a mobile robot / Noborio Hiroshi, Naniwa Tomohide and Arimoto Suguru // Journal of Robotic Systems – Vol. 7. – P. 219–291. – 1990. <https://doi.org/10.1002/rob.4620070404>
6. Sampling-Based Robot Motion Planning: A Review / M. Elbanhawi and M. Simic // IEEE Access – Vol. 2. – P. 56–77. – 2014. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2014.2302442>
7. Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach / Barraquand, J. and Latombe, J.C. // The International Journal of Robotics Research – Vol. 10(6). – P. 628–649. – 1991. <https://doi.org/10.1177/027836499101000604>
8. Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning / LaValle, S. M. // 1998. <https://doi.org/10.1.1.35.1853>
9. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів /Л. Я. Белікова, В. П. Шевченко. – О.: Наука і техніка, 2012.– 480 с
10. Загірняк М.В., Невзлін Б.І. Електричні машини: підручник. – 2-ге вид., переробл. і доповн. К.: Знання, 2009. – 399 с
11. Электротехника и электроника в простом и доступном изложении [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://electricalschool.info/main/electroshemy/1993metodyupravleniya-dvigatelpostoyannogotokavsau.html> – (дата звернення 20.10.2019) – Назва з екрану.