МЛАД ФОРУМ
Механика Транспорт Комуникации
Научно списание http://www.mtc-aj.com
ISSN 2367-6558 (print)
ISSN 2367-6612 (online)
том 15, брой 1, 2026 г.
статия № 2803

СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА ПОСТОЯННОТОКОВО БЕЗЧЕТКОВО ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМОБИЛИ

Николай Велев, Петко Костадинов
nikivelev7@mail.bg, petko__kostadinov@abv.bg

ВТУ „Тодор Каблешков”
София, 1574, ул. „Гео Милев“ № 158
БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: *Постояннотоков, BLDC, безчетков, безколекторен, двигател, електрическо превозно средство, регенеративно спиране, системи за управление.*

Резюме: *В настоящия доклад са разгледани системите за управление на постояннотокови безчеткови двигатели (BLDC), които са ключови за съвременните електромобили поради своята висока ефективност, надеждност и компактност. За разлика от традиционните колекторни двигатели, при BLDC комутацията се извършва по електронен път чрез силови транзисторни ключове, което елиминира износването на четките и намалява нуждите от поддръжка.*

Засегната е основната структура на управлението включваща силов преобразувател (инвертор), управляващ блок (микроконтролер) и сензорна система за обратна връзка (обикновено Хол-сензори или безсензорни алгоритми). Описани основни методи за управление. Широчинно-импулсна модулация (ШИМ), чрез която се постига регулиране с минимални загуби на средната стойност на напрежението, чрез промяна на коефициента на запълване на импулсите. Описано векторното управление (FOC) - подход, позволяващ независимо управление на магнитния поток и въртящия момент. При този начин на управление се постига ниски пулсации на генерирания въртящ момент и по-висока енергийна ефективност, и динамика на автомобила.

Отделено е внимание на регенеративното спиране - процес, при който двигателят преминава в генераторен режим. Кинетичната енергия се преобразува в електрическа и се връща в батерията, което увеличава пробега и намалява износването на спирачките.

УВОД

Историята на безчетковите двигатели датира от деветнадесети век. По това време американският изобретател Никола Тесла изобретява асинхронния двигател през 1887 г. Въпреки че някои наричат асинхронния двигател „един от предшествениците на безчетковия двигател“, технологичните ограничения на времето правят развитието на двигателя относително бавен процес. Едва в средата на 19 век с изобретяването и прилагането на транзистора настъпва пробив в този вид електрозадвижвания [3].

КОМПОНЕНТИ И РЕЖИМИ НА РАБОТА НА БЕЗКОЛЕКТОРНИТЕ ПОСТОЯННОТОКОВИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ

Основния компонент на този тип електрозадвижвания е безколекторния (безчетков) електродвигател, но той не може да работи без електронния модул за управление.

- *Безколекторен електродвигател BLDC*

В днешно време безчетковият DC двигател се използва широко в областта на електроинструментите, домакинските уреди и индустриалната автоматизация поради висока си ефективност, минимална поддръжка и дълъг живот. На Фигура 1 се виждат конструкциите на постояннотоков четков електродвигател и BLDC.

Фиг. 1. Общ вид на четков електродвигател (в ляво) и BLDC (в дясно).

Постояннотоковите колекторни електродвигатели използват графитни четки и колектор с медни пластини, за да реализират предаването на електрическа енергия към роторните намотки. Тези части се износват по време на употреба, което увеличава работата по поддръжката и времето на престой. При безчетковите електродвигатели, отсъстват графитните четки и колектора, като комутацията на захранващото напрежение към намотките се извършва от електронни ключове. Това напълно елиминира проблемите с износването контактния апарат и подобрява експлоатационния живот и надеждността на двигателя.

Безчетковите електродвигатели могат да постигнат висока мощност при ниски скорости и могат директно да задвижват големи товари без редуктор, като по този начин се намалява сложността и размера на механичното оборудване. Те са малки и леки, но имат много висока мощност, което им дава предимство при преносими и компактни устройства. Високата стойност на стартовия въртящ момент и ниския стартов ток ги правят подходящи за задвижване на механизми, които изискват често стартиране и спиране.

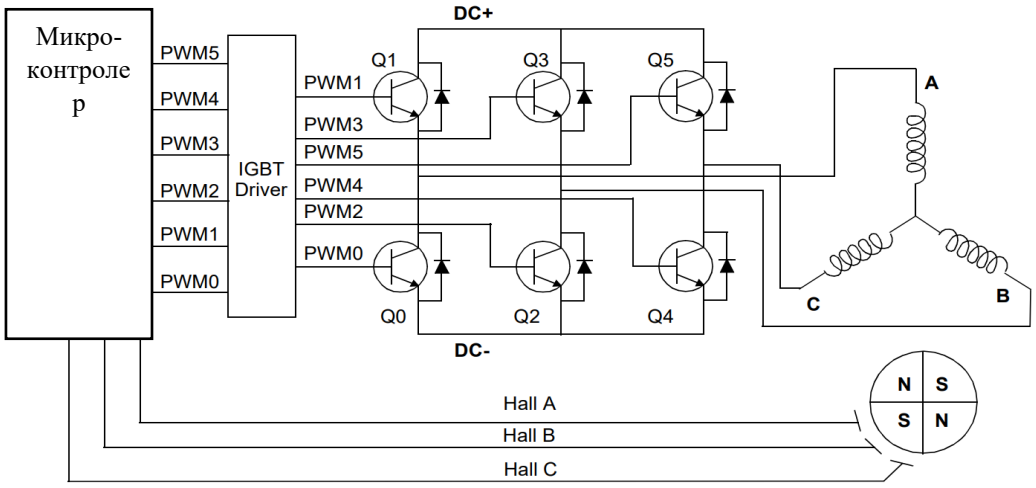
- Безчетковите двигатели са високоефективни, тъй като нямат графитни четки и загуби при възбуждане. Поради това разхода на електроенергия е с около 20% по-нисък от четковите електродвигатели.
- При безчетковите електродвигатели напълно се елиминира искрението породено от контакта на графитните четки с колектора, което ги прави много подходящи за задвижване на механизми намиращи се силно запалима или взривоопасна среда.

- *Електронен модул за управление на BLDC.*

Системата за управление на безчетково постояннотоково (BLDC) електрозадвижване в електромобил представлява сложна съвкупност от хардуерни и софтуерни елементи, които осигуряват ефективно преобразуване и управление на електрическата енергия с цел задвижване на превозното средство. Основните

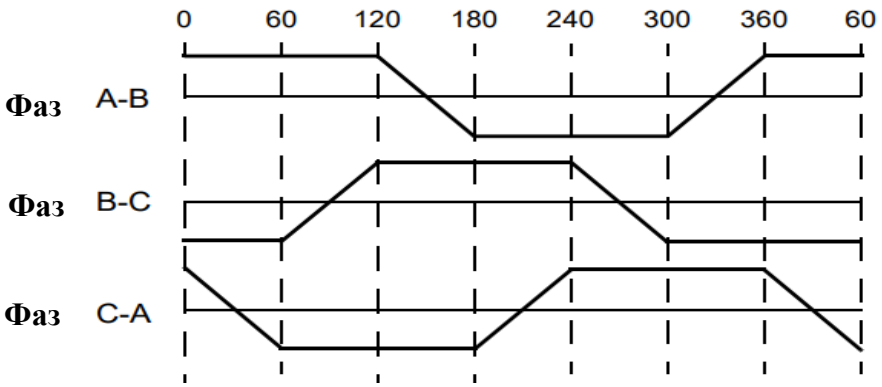
компоненти на тази система включват, силова електроника, управляващ блок и елементи за обратна връзка.

Силовият преобразувател, получава захранване от тяговата акумулаторна батерия, която осигурява постояннотоково (DC) напрежение. Тя е основният енергиен източник на електромобила и определя неговия пробег и мощностни характеристики. Силовия преобразувател Фиг. 2, чрез мощните си транзисторни ключове Q1÷Q6 преобразува постоянното напрежение от батерията в променливи електрически сигнали, които се подават към намотките на статора [4, 5]. Чрез подходящо управление на ключовете (транзисторите), се създава въртящо се магнитно поле, необходимо за работата на двигателя.



Фиг. 2. Блокова схема на BLDC електрозадвижване

Управляващият блок, обикновено реализиран с помощта на микроконтролер, изпълнява ролята на централен елемент в системата. Той обработва входни данни от различни сензори и генерира управляващи сигнали, които се подават към драйверното стъпало за усилване, след което постъпват в силовия преобразувател. На базата на алгоритми за управление, този блок определя последователността и продължителността на включване на силовите ключове, като по този начин се регулират скоростта и въртящият момент на двигателя. На Фиг.3 е показано управление с трапецовидно напрежение към намотките.



Фиг. 3. Напрежения подавани към намотките на статора спрямо ъгъла на завъртане на ротора

Съществена част от системата са сензорите, които осигуряват информация за състоянието на електрозадвижването. Най-често се използват сензори за положение на ротора (например Хол-сензори - Hall A ÷ Hall C), а в някои случаи се добавят датчици за ток и напрежение. В някои съвременни системи се прилага и безсензорно управление, при което позицията на ротора се определя индиректно чрез анализ на индуцираното напрежение в незахранената намотка на двигателя.

Не на последно място, системата включва механизми за обратна връзка, които позволяват реализирането на затворен контур на управление. Чрез непрекъснато сравнение между зададените и измерените параметри се осигурява висока точност, стабилност и ефективност на електрозадвижването.

Напрежението подавано към намотките се регулира чрез широчинно-импулсна модулация (ШИМ). Широчинно-импулсната модулация представлява основен метод за управление на безчеткови постояннотокови (BLDC) двигатели, широко използван в системите за електрозадвижване на електромобили. Чрез този метод се постига ефективно регулиране на подаваното към двигателя напрежение и съответно на неговата скорост и въртящ момент.

Принципът на ШИМ се основава на генерирането на импулсни сигнали с постоянна честота, при които се изменя съотношението между времето на включено и изключено състояние, известно като коефициент на запълване. Чрез промяна на този коефициент се контролира средната стойност на напрежението, подавано към намотките на двигателя. Например, при по-висок коефициент на запълване се подава по-голямо средно напрежение, което води до увеличаване на скоростта на въртене.

Едно от основните предимства на ШИМ управлението е неговата висока ефективност, тъй като силовите елементи работят основно в режим на насищане или изключване, при което загубите на мощност са минимални. Освен това методът позволява прецизен и плавен контрол на електродвигателя, което е особено важно при приложения като електромобилите, където се изисква добра динамика и енергийна ефективност.

- *Основни методи за управление:*
  - Трапецовидно напрежение към намотките

При този начин на управление Фиг. 3, се подава напрежение само на два фазови проводника на електродвигателя, а третият е изключен, като изхода на силовия преобразувател за този фазов проводник е в режим на високо вътрешно съпротивление. При този начин на управление не се използват пълните възможности на електродвигателя, но начинът е прост и се постига с малка изчислителна мощност на микроконтролера.

  - Векторно управление.

Векторното управление, известно още като Field Oriented Control (FOC), представлява съвременен и високоефективен метод за управление на безчеткови постояннотокови двигатели, широко прилаган в електрозадвижванията на електромобили [1, 2]. При този метод, подаваното напрежение към трите фазови проводника на електродвигателя се променя по синусоидален закон. Основната цел на този метод е да осигури независимо управление на въртящия момент и магнитния поток в двигателя, което води до значително подобряване на динамичните и енергийни характеристики на системата.

Реализацията на FOC изисква използването на сложни математически преобразувания, както и наличието на точна информация за положението на ротора. Тази информация може да бъде получена чрез сензори (например енкодери или Хол-сензори) или чрез безсензорни алгоритми, базирани на оценка на електрическите параметри на двигателя.

- *Възможности за регенеративно спиране с BLDC.*

Регенеративното спиране е съществен елемент от управлението на безчеткови постояннотокови (BLDC) електродвигатели в електромобилите, който позволява възстановяване на част от енергията по време на забавяне на движението. Комбинацията между BLDC двигатели и регенеративно спиране осигурява висока енергийна ефективност и подобрена експлоатационна икономичност на превозното средство. BLDC двигателите са особено подходящи за реализиране на регенеративно спиране поради своята конструкция и възможността за прецизно електронно управление. При нормален режим на работа електродвигателят преобразува електрическата енергия от батерията в механична. При преминаване към режим на спиране управляващата система изменя комутацията на токовете в намотките, в резултат на което двигателят започва да функционира като генератор. В генераторен режим кинетичната енергия на движещото се превозно средство се преобразува в електрическа енергия. Това става чрез въртене на ротора под действието на инерцията на автомобила, което индуцира електродвижещо напрежение в статорните намотки. Генерираната енергия се насочва чрез силовия инвертор обратно към акумулаторната батерия.

Системата за управление играе ключова роля при реализирането на регенеративното спиране в BLDC задвижвания. Чрез използване на методи като широчинно-импулсна модулация (ШИМ) и векторно управление (FOC) се регулира величината на спирачния момент и количеството възстановена енергия. Управляващият алгоритъм трябва да осигури плавен преход между двигателен и генераторен режим, както и стабилност на системата при различни режими на натоварване. [2, 3, 5].

Особено важно е съгласуването между регенеративното и механичното спиране. При по-ниски скорости или при необходимост от интензивно спиране, електрическото спиране не е достатъчно ефективно и се комбинира с традиционните фрикционни спирачки. Този комбиниран подход гарантира безопасност и оптимално спирачно действие.

Ефективността на регенеративното спиране при BLDC системи зависи от редица фактори, като скоростта на движение, параметрите на двигателя, характеристиките на батерията и използвания алгоритъм за управление. Ограничения могат да възникнат при напълно заредена батерия, когато възможността за приемане на допълнителна енергия е намалена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение, широчинно-импулсната модулация в съчетание с векторно управление е ключово в енергийно-ефективното управлението на BLDC електрозадвижвания, осигуряващ ефективен, надежден и гъвкав начин за регулиране на основните работни параметри на двигателя.

Използването на регенеративно спиране при BLDC електрозадвижванията представлява ефективно и технологично напреднало решение, което играе ключова роля в развитието на съвременните електромобили. Чрез него се постига увеличен пробег на електромобила, по-висока енергийна ефективност и намалено износване на механичните спирачни системи. Освен това се подобрява общата динамика и управляемост на превозното средство.

ЛИТЕРАТУРА:
[1] Методи за управление на BLDC, сп. Инженеринг ревю. - https://www.engineering-review.bg/bg/metodi-za-upravlenie-na-bldc-elektrodvigateli/2/2982/
[2] Huaomotors.com.-https://bg.huahaomotors.com/info/what-is-a-bldc-motor-90442086.html
[3] https://bg.wikipedia.org/wiki/Безколекторен_постояннотоков_двигател 22.04.2026 г.
[4] Секулов Л., М. Златков, М. Томчева. Изследване и анализ на управлението на трифазен безчетков постояннотоков двигател (BLDC). VIII Научна Конференция „ЕФ 2016“, Созопол, 2016 г. Годишник на Технически Университет - София, том 67, книга 1, стр. 449÷458, 2017 г., ISSN 1311-0829, http://proceedings.tu-sofia.bg/volumes/Proceedings_volume_67_book_1_2017.pdf
[5] https://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf 09.05.2026 г.

CONTROL SYSTEMS FOR BRUSHLESS DC MOTOR DRIVES IN ELECTRIC VEHICLES

Николай Велев, Petko Kostadinov
nikivelev7@mail.bg, petko__kostadinov@abv.bg

“Todor Kableshkov” University of Transport
Sofia, 1574, str. "Geo Milev" 158
BULGARIA

Key words: *Direct current, BLDC, brushless, brushless DC, motor, electric vehicle, regenerative braking, control systems*

Abstract: *This report examines the control systems for brushless DC (BLDC) motors, which are critical components in modern electric vehicles due to their high efficiency, reliability, and compact design. Unlike traditional brushed motors, commutation in BLDC motors is performed electronically via power transistor switches, thereby eliminating brush wear and reducing maintenance requirements.*

The core control architecture is addressed, comprising a power converter (inverter), a control unit (microcontroller), and a sensor-based feedback system (typically Hall-effect sensors or sensorless algorithms). The primary control methodologies are described, including Pulse-Width Modulation (PWM), which achieves voltage regulation with minimal losses by varying the duty cycle. Field-Oriented Control (FOC) is also outlined as an advanced approach that allows independent regulation of magnetic flux and torque. This control method achieves low torque ripple, higher energy efficiency, and improved vehicle dynamics.

Furthermore, attention is dedicated to regenerative braking - a process in which the motor transitions into generator mode. During this phase, kinetic energy is converted into electrical energy and fed back into the battery, effectively extending the driving range and reducing mechanical brake wear.