

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК 621.314.26

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226185

© Поднебенна С.К.¹, Бурлака В.В.², Корольов І.С.³**РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ
ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗКОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

У статті розглянуті переваги безколекторних двигунів постійного струму (БДПС). У порівнянні зі звичайними двигунами постійного струму коефіцієнт корисної дії БДПС може сягати 93-95%. Це обумовлює їх використання у системах електротранспорту: електромобілях, електровелосипедах та ін. Запропоновано включити вивчення БДПС до освітнього процесу, для чого пропонується розробка та створення лабораторного стенду для дослідження механічних та регулювальних характеристик БДПС. У статті розглянутий принцип роботи безколекторних двигунів постійного струму, методи керування інвертором напруги. Розроблено три варіанти лабораторного стенду для досліджень безколекторних двигунів постійного струму. Стенд містить два двигуни БДПС зі збудженням від постійних магнітів типу CG48V 1000W 50, ротори яких з'єднані між собою. Один з двигунів – випробуваний, другий виконує роль електромагнітного гальма. Вали двигунів з'єднані між собою. Така кінематика дозволяє вимірювати момент, який створюється досліджуванним двигуном. Живлення двигунів здійснюється від незалежних регульованих джерел живлення змінного струму – контролерів, які з'єднані по шині постійного струму напругою 48 В, яка утворена акумуляторною батареєю АКБ, живлення якої здійснюється від зарядного пристрою, який живиться від однофазної мережі 220 В 50 Гц. Для вимірювання швидкості обертання використовується цифровий частотомір (тахометр). Розроблена методика проведення досліджень – зняття механічних та регулювальних характеристик БДПС з наступним їх аналізом. Використання розробленого стенду дозволить впровадити сучасне обладнання в освітній процес та забезпечити підвищення якості освіти.

Ключові слова: безколекторний двигун постійного струму, інвертор напруги, лабораторний стенд.

S.K. Podnebenna, V.V. Burlaka, I.S. Korolov. Development of a laboratory bench for determining the characteristics of a brushless dc motor. The article discusses the advantages of brushless direct current motors (BLDC). Compared with conventional DC motors, the efficiency of the BLDC motor can reach 93-95%. This determines their use in electric transport systems: electric vehicles, electric bicycles, etc. It is proposed to include the study of BLDC in the educational process, for which it is proposed to develop and create a laboratory bench for the study of mechanical and control characteristics of BLDC. The article discusses the principle of operation of brushless DC motors, methods of controlling a voltage inverter driving such a motor. Three versions of a laboratory bench for researching

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-0878-1492, podsvet@gmail.com

² д-р техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-8507-4070, vladimirvburlaka@gmail.com

³ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, whiteandblackmrl@gmail.com

brushless DC motors have been developed. The bench contains two BLDC motors with excitation from permanent magnets of the CG48V 1000W 50 type, the shafts of which are interconnected. One of the motors is a test subject, the other acts as an electromagnetic brake. The motor shafts are rigidly fixed to each other. This kinematics allows us to measure the torque developed by the motor under study. The motors are powered from independent regulated AC power supplies – controllers, which are connected to a common 48 V DC bus supported by the lithium battery. The battery is charged from the dedicated charger, which is powered from a single-phase 220 V 50 Hz grid. A digital frequency meter (tachometer) is used to measure the rotational speed. A research methodology has been developed for the investigation of the mechanical and control characteristics of BLDC with their subsequent analysis. The use of the developed bench will allow to introduce modern equipment into the educational process and ensure an improvement in the quality of education.

Keywords: brushless DC motor, voltage source inverter, laboratory bench.

Постановка проблеми. Розробка та впровадження нового сучасного обладнання в навчальний процес є невід'ємною частиною розвитку освітніх програм та спеціалізацій, забезпечення якості навчального процесу. Серед сучасного обладнання у напрямку систем керованого електроприводу поширення набули безколекторні двигуни постійного струму (БДПС) [1, 2]. До перспективного напрямку використання БДПС відноситься їх застосування у системах автономного електротранспорту: електросамокатів, електромобілів тощо. Практичне визначення характеристик таких двигунів є корисним з точки зору проектування таких систем та аналізу їх роботи. У цьому світлі розробка лабораторного стенду для визначення характеристик безколекторного двигуна постійного струму є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням принципів роботи безколекторних двигунів постійного струму присвячено багато сучасних публікацій [1, 2]. Широкому використанню БДПС сприяють його особливості: у порівнянні зі звичайними двигунами БДПС мають такі переваги, як великий ККД, висока швидкодія, можливість зміни частоти обертання, відсутність щіток, малі шуми як у звуковому, так і високочастотному діапазонах, надійність, здатність протистояти перевантаженням по моменту, відмінне співвідношення габаритів і потужності. Безколекторний двигун відрізняється великим ККД. Він може досягати 93-95%. Висока надійність механічної частини безколекторного двигуна (БД) пояснюється тим, що в ньому використовуються шарикопідшипники і відсутні щітки.

Мета статті – розробка лабораторного стенду для визначення характеристик безколекторного двигуна постійного струму.

Виклад основного матеріалу. БДПС складається з ротора з постійними магнітами і статора з обмотками. Розрізняють два типи двигунів: *inrunner*, у яких магніти ротора знаходяться всередині статора з обмотками, і *outrunner*, у яких магніти розташовані зовні і обертаються навколо нерухомого статора з обмотками. Найбільш поширені датчики положення – ті, що працюють на основі ефекту Холла. Датчики реагують на магнітне поле, їх розташовують, як правило, на статорі таким чином, щоб на них впливали магніти ротора. Кут між датчиками повинен бути 120 градусів [1-2].

Для обертання двигуна БДПС обмотки статора повинні отримувати напругу в певному порядку. Важливо розуміти положення ротора, щоб знати, яка обмотка буде під напругою після послідовності подачі живлення. Положення ротора розраховується за допомогою датчиків на основі ефекту Холла, вбудованих у статор на некерованому кінці двигуна. На кожні 60 електричних градусів обертання один із датчиків Холла змінює стан. Щоб закінчити електричний цикл, потрібно шість кроків. У синхронному режимі, з кожними 60 електричними градусами, перемикання фазного струму має бути оновлене. Однак один електричний цикл може не відповідати повному механічному оберту ротора. Кількість електричних циклів, що повторюються для завершення механічного обертання, визначається парами полюсів ротора. Для кожної пари полюсів ротора завершується один електричний цикл.

Для керування БДПС використовується трифазний мостовий інвертор. Є шість ключів, і ці ключі слід перемикаати залежно від входів датчика Холла. Для вмикання та вимикання перемикачів використовуються методи широтно-імпульсної модуляції (рис. 1).

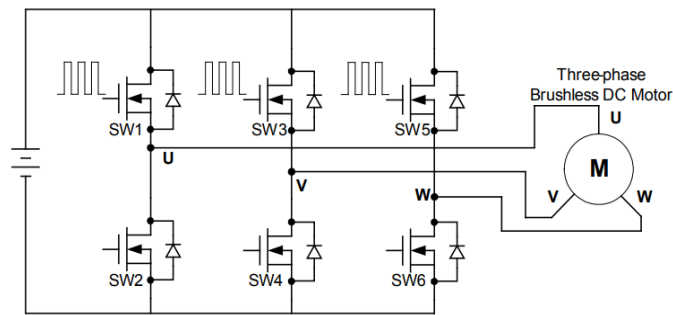


Рис. 1 – Підключення БДПС [1]

Замикаючи ключ SW1, подаємо «+» на фазу А, а замикаючи SW6, подаємо «-» на фазу С. Таким чином, струм потече від «+» батареї через фази А і С. Для забезпечення зворотного напрямку відкриваємо SW5 і SW2. У цьому випадку струм потече від «+» батареї через фази С і А в зворотному напрямку. При роботі двигуна одночасно повинен бути відкритий тільки один верхній і один нижній ключ. При зміні стану потрібно відразу вимкнути пару ключів, витримати час, необхідний для закриття ключів, і тільки після цього включити іншу пару ключів [1, 2].

На рис. 2 показана послідовність комутації трифазної схеми драйвера двигуна BLDC для обертання проти годинникової стрілки. Три датчика Холла – «а», «b» і «с» – встановлені на статорі з інтервалом 120°, в той час як трифазні обмотки утворюють зірку. Для кожного кроку одна клемма двигуна працює з високим рівнем, інша клемма двигуна працює з низьким рівнем, а третій вивід залишається плаваючим.

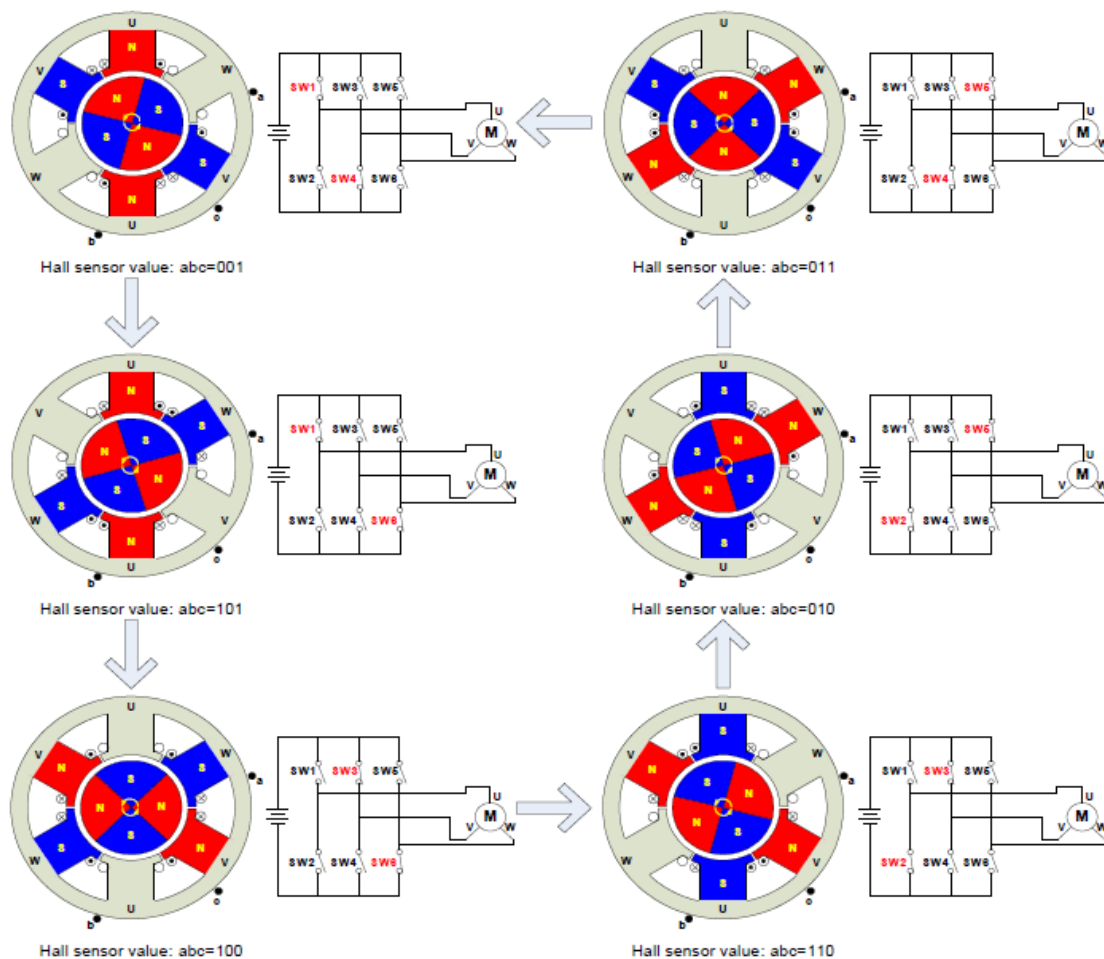


Рис. 2 – Схема включення ключів безколекторного двигуна [1]

Лабораторна установка для дослідження двигунів постійного струму містить два однакових безколекторних двигуна постійного струму зі збудженням від постійних магнітів типу CG48V 1000W 50, ротори яких з'єднані між собою (рис. 3). Один з двигунів – випробуваний, другий виконує роль електромагнітного гальма. Він закріплений за вісь ротора. Така кінематика дозволяє вимірювати момент, який долається досліджуваным двигуном. Живлення двигунів здійснюється від незалежних регульованих джерел живлення постійного струму – контролерів K1, K2, які з'єднані по шині постійного струму напругою 48 В, яка створена акумуляторною батареєю АКБ, живлення якої здійснюється від зарядного пристрою, який живиться від однофазної мережі 220 В 50 Гц. Для вимірювання швидкості обертання використовується цифровий частотомір, шкала якого проградуїрована в одиницях швидкості (тахометр).

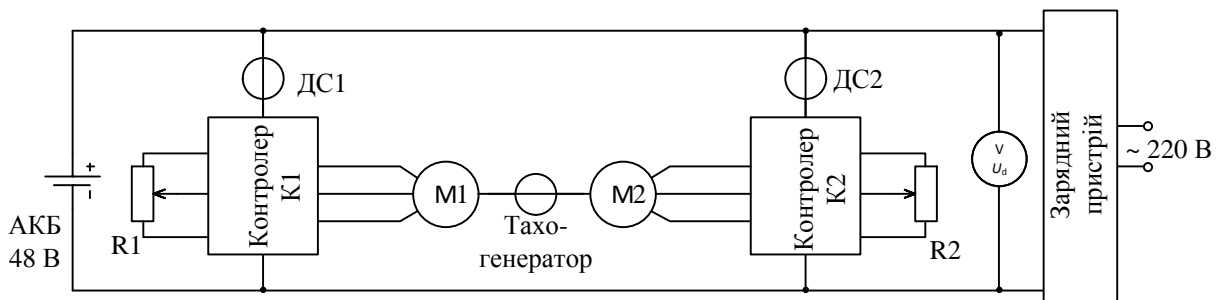


Рис. 3 – Схема лабораторного стану

Використане обладнання: безколекторні двигуни M1, M2 типу CG48V 1000W 50; контролери K1, K2 Вольта 48-60V1000W; акумуляторні батареї 48V 12.5 А-год; зарядний пристрій 48 V 10 А; універсальний цифровий блок приладів; амперметри, вольтметри електромагнітної системи – для вимірювання діючих значень струмів та напруг; потенціометри, змінні опори.

Можливі наступні варіанти навантаження двигуна, який виконує роль електромагнітного гальма (рис. 4, 5). Тут він працює в генераторному режимі і навантажений на опори R2.

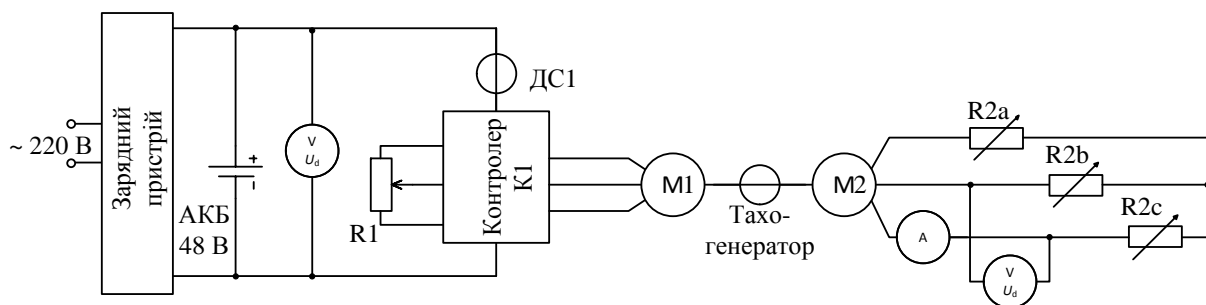


Рис. 4 – Схема лабораторного стану (модифікація 2)

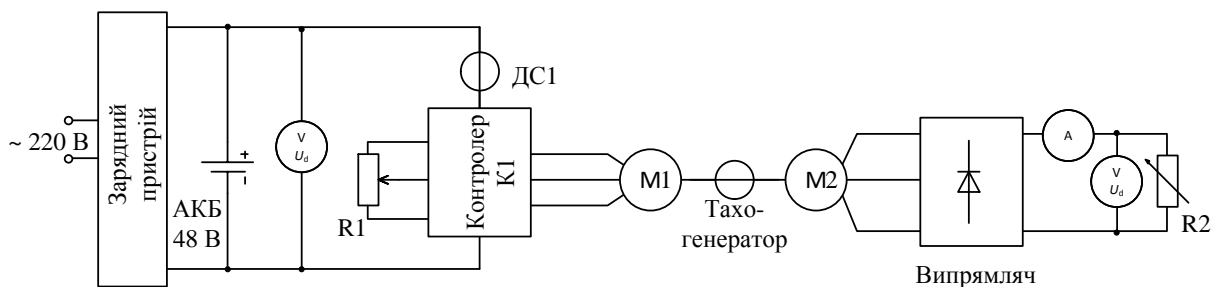


Рис. 5 – Схема лабораторного стану (модифікація 3)

Для стенду № 1 (рис. 3) розроблений порядок виконання лабораторної роботи (з використанням [3, 4]).

1. Ознайомитися з конструкціями та характеристиками двигунів, наявними в лабораторії. Ознайомитися з конструкцією стенду та схемою (рис. 3).

2. Зняти сімейство механічних характеристик двигуна. Характеристики доцільно починаючи знімати із точки холостого ходу (обмотка двигуна-гальма знеструмлена).

Зміна навантаження на двигун здійснюється шляхом зміни струму керування у двигуні-гальмі. При цьому полярності напруг повинні бути підібрані таким чином, щоб двигуни оберталися в протилежні сторони. Для кожної точки характеристики необхідно робити вимірювання споживаного випробовуваним двигуном струму.

3. Зняти сімейство регульовальних характеристик двигуна для трьох значень моменту на валу. Сталість моменту при цьому необхідно підтримувати шляхом зміни струму у двигуні-гальмі.

4. Скласти звіт. У звіті повинні бути представлені електричні схеми проведення дослідів, необхідні таблиці, графіки експериментальних механічних і регульовальних характеристик, розрахункові графіки залежностей споживаної і корисної потужності двигуна як функції швидкості обертання, висновки по роботі.

Висновки

Проведений аналіз безколекторних двигунів постійного струму, розроблений та створений лабораторний стенд для дослідження механічних та регульовальних характеристик безколекторного двигуна постійного струму (БДПС).

Розроблений стенд дозволяє проводити аналіз механічних та регульовальних характеристик БДПС.

Перелік використаних джерел:

1. AN047 Brushless DC motor fundamentals Application Note. – 2014. – 19 p. – Mode of access: https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf.
2. Speed Torque characteristics of Brushless DC motor in either direction on load using ARM controller / M.V. Ramesh, J. Amarnath, S. Kamakshaiah, B. Jawaharlal, Gorantla S. Rao // *Journal of Energy Technologies and Policy*. – 2011. – Vol. 2, no.1. – Pp. 37-48.
3. Степанковський Ю.В. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Перетворюючі пристрої» («Електричні мікромашини») / Ю.В. Степанковський. – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – 74 с.
4. Степанковский Ю.В. Преобразующие устройства приборов. Т. 1. Электродвигатели (силовые микромашины) / Ю.В. Степанковский. – К. : Корнійчук, 2002. – 207 с.

References:

1. AN047 Brushless DC motor fundamentals Application Note. 2014. – 19 p Available at: https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf (accessed 15 August 2020).
2. Ramesh M.V., Amarnath J., Kamakshaiah S., Jawaharlal B., Rao Gorantla S. Speed Torque characteristics of Brushless DC motor in either direction on load using ARM controller. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 37-48.
3. Stepankovs'kii Yu.V. *Metodichni vkazivki do laboratornikh robot z distsiplini «Peretvoriuiuchi pristroi» («Elektrichni mikromashini»)* [Methodical instructions for laboratory work in the discipline «Transforming devices» («Electric micromachines»)]. Kiev, NTUU «KPI» Publ., 2013. 74 p. (Ukr.)
4. Stepankovs'kii Yu.V. *Preobrazuiushchie ustroistva priborov. Tom 1. Elektrodvigateli (silovye mikromashiny)* [Instrument converting devices. Vol. 1. Electric motors (power micromachines)]. Kiev, Korniiuchuk Publ., 2002. 207 p. (Rus.)

Рецензент: С.В. Гулаков
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.10.2020