

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗКОНТАКТНИХ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ ТАХОГЕНЕРАТОРІВ

**К.П. Акинін\***, докт. техн. наук, **В.Г. Кіреєв\*\***, канд. техн. наук, **І.С. Петухов\*\*\***, докт. техн. наук, **А.А. Філоменко\*\*\*\***, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [kvg2016@ukr.net](mailto:kvg2016@ukr.net)

*Статтю присвячено дослідженню характеристик та режимів роботи безконтактного магнітоелектричного тахогенератора, що реалізуються на основі традиційної радіальної електричної машини з безпазовим статором та з постійними магнітами на роторі. Досліджено варіанти формування вихідного сигналу постійного струму за допомогою діодного і транзисторного випрямлячів. Отримано залежності середньої величини вихідного сигналу напруги, крутизни вихідного сигналу, коефіцієнта відхилення характеристики від її заданого значення та коефіцієнта пульсацій сигналу залежно від швидкості обертання валу ротора. Досліджено вплив ємності фільтруючого конденсатора на величину розмаху пульсацій вихідного сигналу. Бібл. 13, рис. 9, таблиця.*

**Ключові слова:** тахогенератор постійного струму, електрична безконтактна машина з постійними магнітами, випрямляч.

Невід'ємною складовою багатьох автоматичних електромеханічних систем зі зворотними зв'язками є пристрої вимірювання кутової швидкості виконавчого двигуна [1-4]. Такі датчики вимірювання кутової швидкості можуть бути дуже різні за принципом дії. Одним із відомих підтипів таких пристроїв є електричні тахогенератори, на виході яких формується ізолюваний аналоговий сигнал напруги, пропорційний швидкості обертання валу двигуна.

Традиційно вже протягом багатьох десятиліть тахогенератори виконуються з механічними щітками [5]. Такі пристрої знаходять застосування й у наш час [6, 7]. Недоліком таких тахогенераторів є наявність механічних комутаторів, що обмежує ресурс їхньої роботи, спричиняє падіння напруги та пульсації на обертовому механічному контакті. Для часткового усунення зазначених недоліків пластини комутаторів виготовляють зі сплаву, що містить 95% срібла [7].

Унаслідок існуючих історичних тенденцій вдосконалення електричних машин і очевидних переваг безконтактних конструкцій відбувається процес заміни тахогенераторів з механічними щітками на їхні безконтактні аналоги [8-10]. Природно, функції обертових механічних контактів повинні реалізовуватися за допомогою електронних схем.

Безконтактні магнітоелектричні тахогенератори (БМТ) з'явилися одночасно з початком розвитку напряму безконтактних магнітоелектричних двигунів. БМТ є пристрій, в якому багатофазна змінна напруга статорних обмоток перетворюється в постійний сигнал напруги за допомогою напівпровідникового випрямляча.

**Метою статті** є дослідження характеристик та режимів роботи БМТ, які реалізуються на основі традиційної радіальної безконтактної електричної машини з безпазовим статором і з постійними магнітами на роторі. Водночас питання побудови активних зон генераторів у статті не розглядаються, це було зроблено авторами раніше в попередніх дослідженнях [11, 12] стосовно різних типів магнітоелектричних машин. Головна увага в цій статті приділяється питанням формування первинного сигналу на виході випрямляча, але тут не розглядаються проблеми побудови систем зміни полярності сигналу напруги залежно від напрямку обертання.

**Основний матеріал і результати дослідження.** У цій статті розглядається БМТ, який за параметрами має відповідати електричному тахогенератору ТПП-1 із механічними щітками [5]. Цей тахогенератор має такі основні параметри: номінальна швидкість – 7000 об/хв;



максимальна швидкість – 9000 об/хв; крутизна вихідного сигналу напруги – 5-6 В на тисячу обертів за хвилину; пульсації вихідної напруги – не більше 0,5 В, зовнішній діаметр – 32 мм.

Для перетворення системи трифазної змінної напруги статора БМТ у постійну напругу розглянемо два варіанти напівпровідникових схем. У першому випадку використовуємо найпростішу схему пасивного випрямляча, реалізованого на діодах Шотки (рис. 1). У другому випадку використовуємо активний випрямляч на основі керованих ключів із двосторонньою провідністю, наприклад MOSFET (рис. 2).

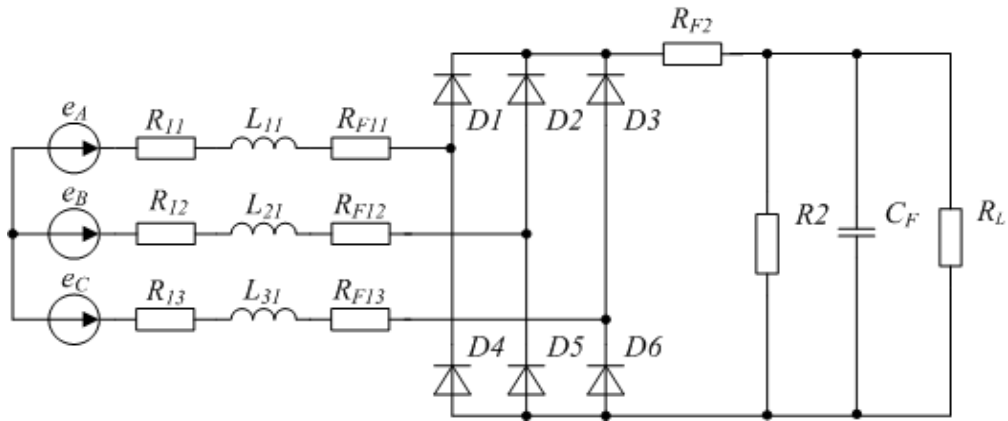


Рис. 1. БМТ з пасивним випрямлячем на основі діодів Шотки

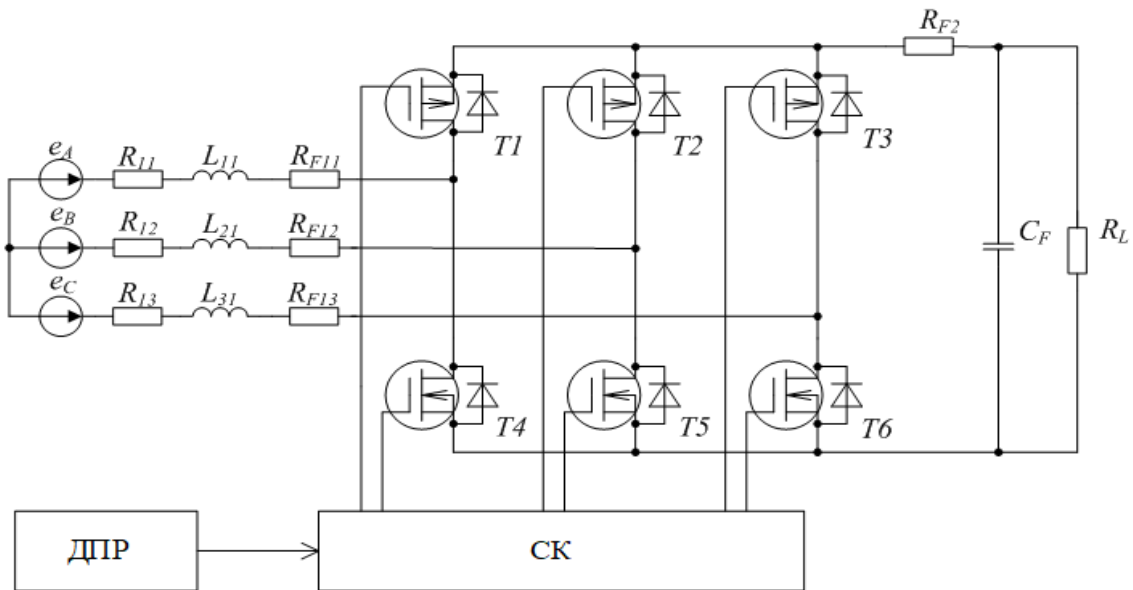


Рис. 2. БМТ з активним випрямлячем на основі MOSFET

Первинними сигналами на вході схеми випрямлення є три статорні ЕРС

$$e_A = k_m \omega \sin \omega t; \quad e_B = k_m \omega \sin(\omega t + 2\pi/3); \quad e_C = k_m \omega \sin(\omega t - 2\pi/3),$$

де  $k_m$  і  $\omega$  – постійний коефіцієнт електричної машини і кутова швидкість обертання ротора генератора;  $t$  – час. Тахогенератор характеризується такими параметрами:  $k_m = 0,03575 \text{ В с}$ ,  $L_{11} = L_{12} = L_{13} = 8,19 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ ,  $R_{11} = R_{12} = R_{13} = 27,3 \text{ Ом}$ .

На рис. 1, 2 представлені позначення: D1-D6 – діодний випрямляч; T1-T6 – транзисторний випрямляч;  $R_L$  – опір навантаження тахогенератора, причому його номінальне значення дорівнює 3 кОм; ДПР – датчик положення ротора; СК – система керування транзисторною схемою випрямлення.  $R_2$  – опір, що враховує споживання системи керування вихідним інвертором напруги (на рис. 2 його не показано).  $R_{F11}$ ,  $R_{F12}$ ,  $R_{F13}$ ,  $R_{F2}$ ,  $C_F$  – елементи RC-

фільтрів, причому  $R_{F11}=R_{F12}=R_{F13}=R_{F1}$ . Для згладжування пульсацій вихідної напруги розглянемо два варіанти реалізації  $RC$ -фільтра, коли один із параметрів  $R_{F1}$  або  $R_{F2}$  дорівнює нулю.

У цій статті першочергову увагу приділено властивостям схеми випрямлення змінних статорних ЕРС і формуванню постійного сигналу напруги, пропорційного значенню швидкості обертання. Тому на рис. 1 і 2 не показані схеми вихідних інверторів вихідних сигналів напруги випрямлячів, причому полярність вихідної напруги такого інвертора залежить від напрямку обертання валу тахогенератора. Такі інвертори можуть бути реалізовані різними способами, наприклад, на основі біполярних транзисторів або на основі MOSFET. Очевидно, що інвертор на основі MOSFET внаслідок малості падіння напруги на опорах таких транзисторів практично не вплине на величину вихідного сигналу. Водночас інвертор на основі малопотужних біполярних транзисторів внесе деяку похибку в результат вимірювання вихідного сигналу напруги, але не більш ніж десяті частки вольт. Характеристики для схеми з діодним випрямлячем та інвертором на біполярних транзисторах будуть наведені наприкінці результатів досліджень.

Нарешті ще однією особливістю побудови БМТ може бути вимога використання ЕРС статора генератора для живлення системи управління вихідним інвертором напруги. Для реалізації транзисторного трифазного випрямляча, що працює в широкому діапазоні швидкостей тахогенератора від нульових значень, потрібне забезпечення зовнішнього додаткового живлення.

Для оцінки режимів роботи БМТ використовуватимемо такі показники:  $U_o$  – середня напруга на виході випрямляча;  $k$  – крутизна вихідного сигналу напруги, величина якого визначається за формулою  $k_i = 1000 \frac{U_{oi}}{n_i}$ , де  $n$  – швидкість тахогенератора в обертах за хвилину;  $i$  – індекс, який показує, що крутизна визначається при довільному значенні швидкості;  $k_D$  – коефіцієнт відхилення характеристики БМТ від її значення при швидкості 7000 об/хв, ця величина визначається для кожного довільного вимірювання як  $k_D = \frac{k_{7000} - k_i}{k_{7000}} 100$ ;  $\Delta U$  – розмах пульсацій вихідного сигналу  $U_o$ ;  $k_p$  – коефіцієнт пульсацій у відсотках, визначається як  $K_p = \frac{\Delta U_i}{2U_{oi}} \cdot 100$ ;  $I$  – діюче значення змінного струму у фазній обмотці статора.

У цій статті розглянемо такі варіанти схем випрямлення змінних ЕРС статора для експериментальних досліджень:

1. схема з діодним випрямлячем без вихідного інвертора при  $R_{F1}=0$  і  $R_{F2}=130 \text{ Ом}$ ;
2. схема з діодним випрямлячем без вихідного інвертора при  $R_{F1}=68 \text{ Ом}$  і  $R_{F2}=0$ ;
3. схема з транзисторним випрямлячем без вихідного інвертора при  $R_{F1}=0$  і  $R_{F2}=130 \text{ Ом}$ ;
4. схема з транзисторним випрямлячем без вихідного інвертора при  $R_{F1}=68 \text{ Ом}$  і  $R_{F2}=0$ .

Для схем  $RC$ -фільтрів вибрано опори зі стандартного ряду значень.

На рис. 3-6 показані графіки експериментальних залежностей напруги  $U_o(n)$  на виході випрямляча, крутизни  $k(n)$  вихідного сигналу напруги, коефіцієнта  $k_D(n)$  відхилення характеристики і коефіцієнта пульсацій  $k_p(n)$  в діапазоні зміни швидкості обертання до 9000 об/хв. У таблиці наведені максимальні діючі значення  $I$  струму статора, максимальні величини розмаху пульсацій  $\Delta U$  вихідного сигналу напруги в усьому частотному діапазоні та значення крутизни  $k$  вихідного сигналу при  $n=7000 \text{ об/хв}$  для чотирьох розглянутих варіантів схем, де  $N$  – номер схеми.

$N$	$I, A$	$\Delta U, B$	$k_{7000}, B/1000 \text{ об/хв}$
1	0,0325	0,44	5,14
2	0,0327	0,45	5,257
3	0,0171	0,47	5,73
4	0,0175	0,48	5,83

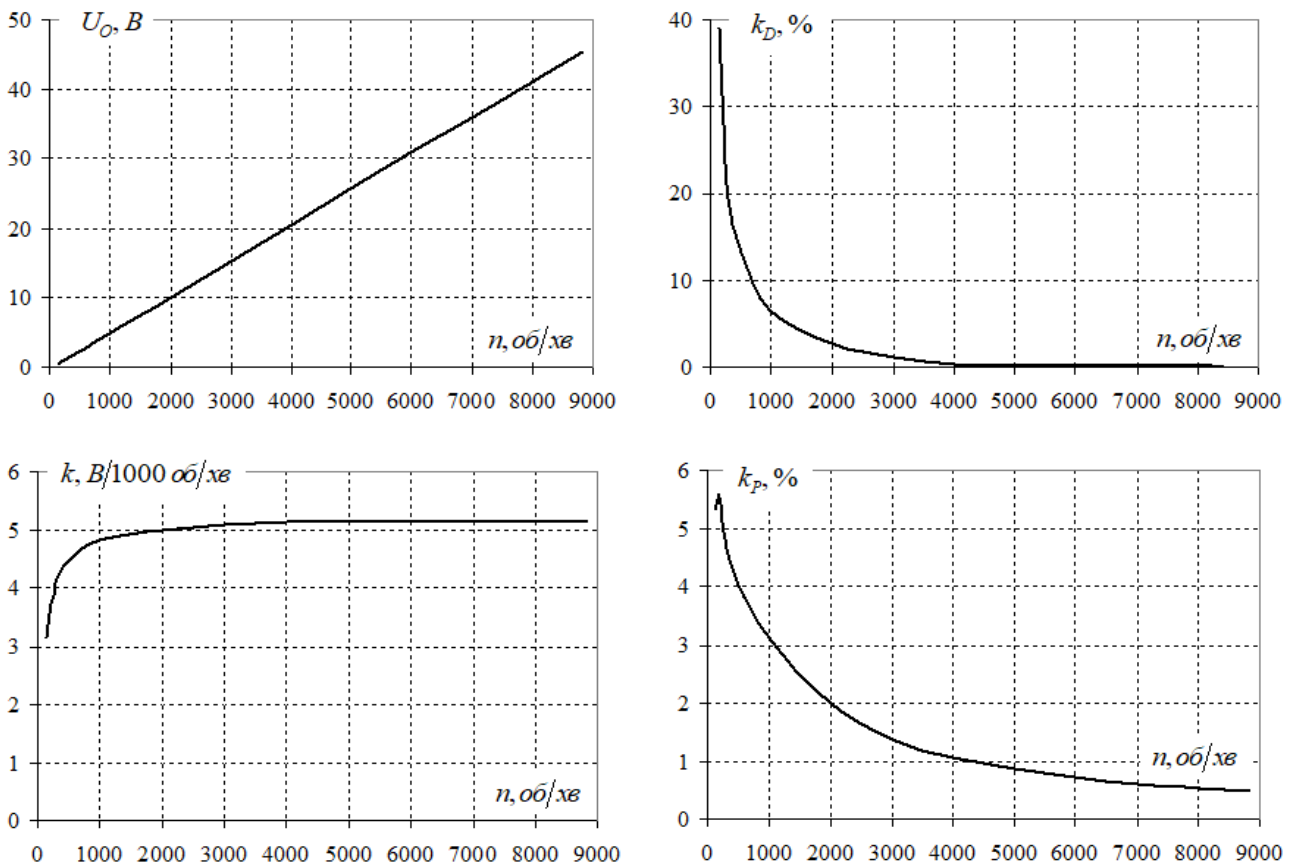


Рис. 3. Експериментальні залежності БМТ з першим варіантом схеми

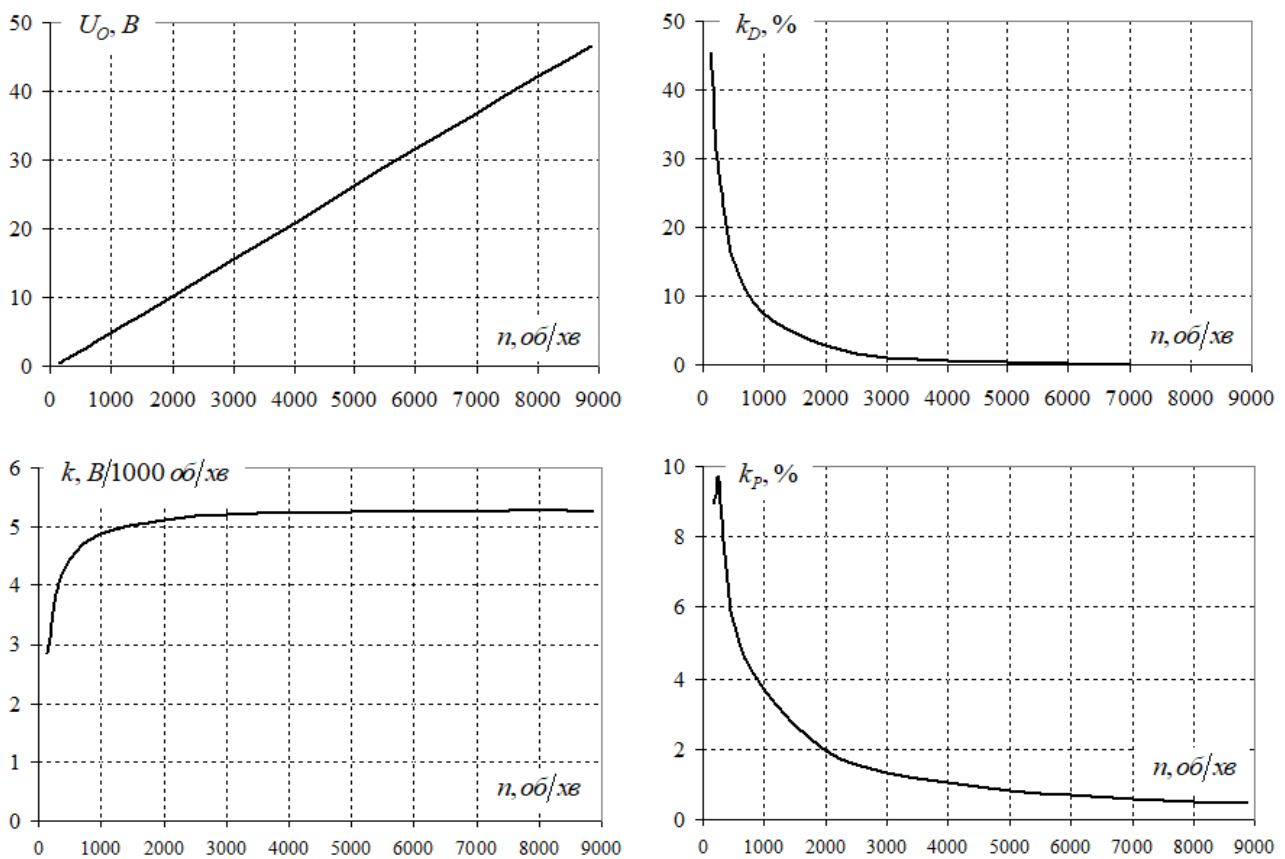


Рис. 4. Експериментальні залежності БМТ з другим варіантом схеми

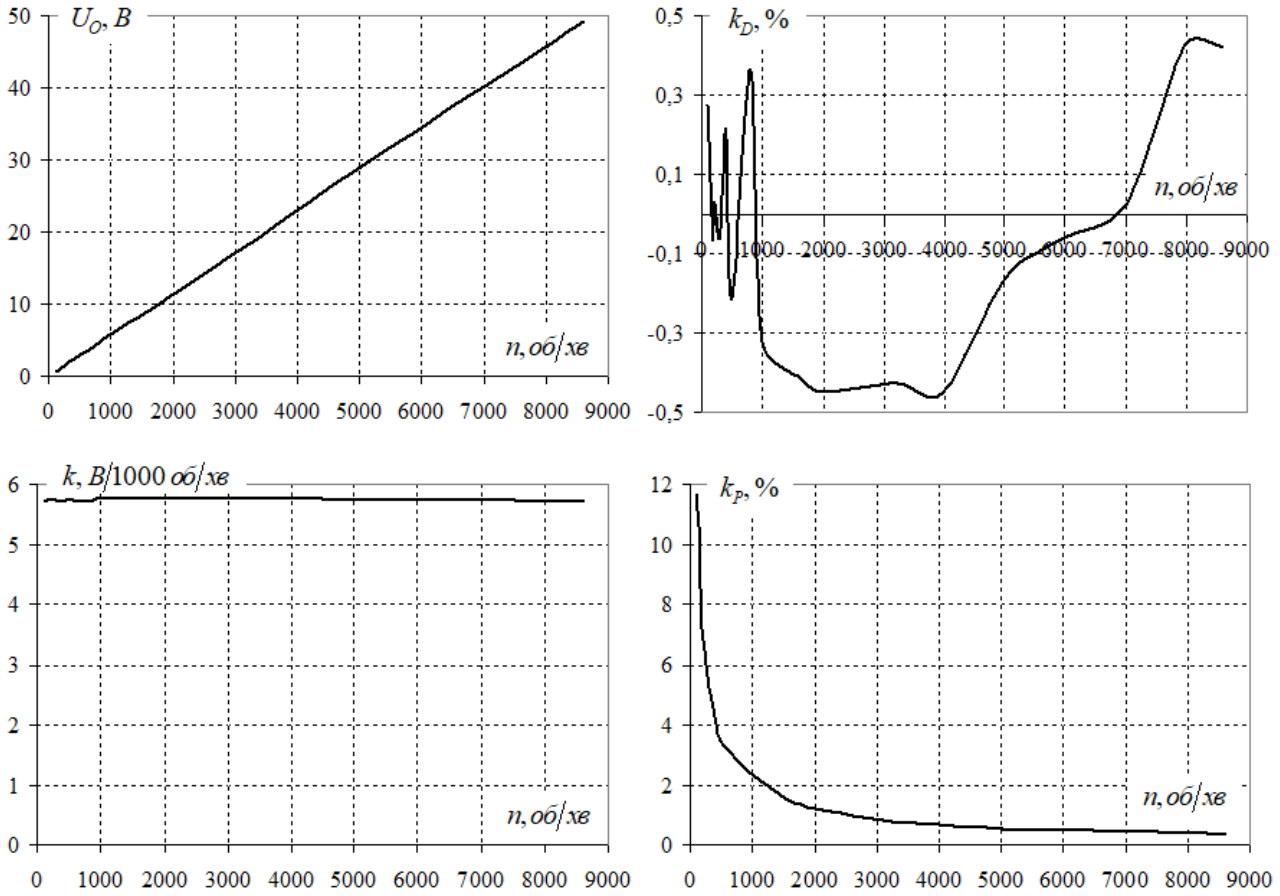


Рис. 5. Експериментальні залежності БМТ з третім варіантом схеми

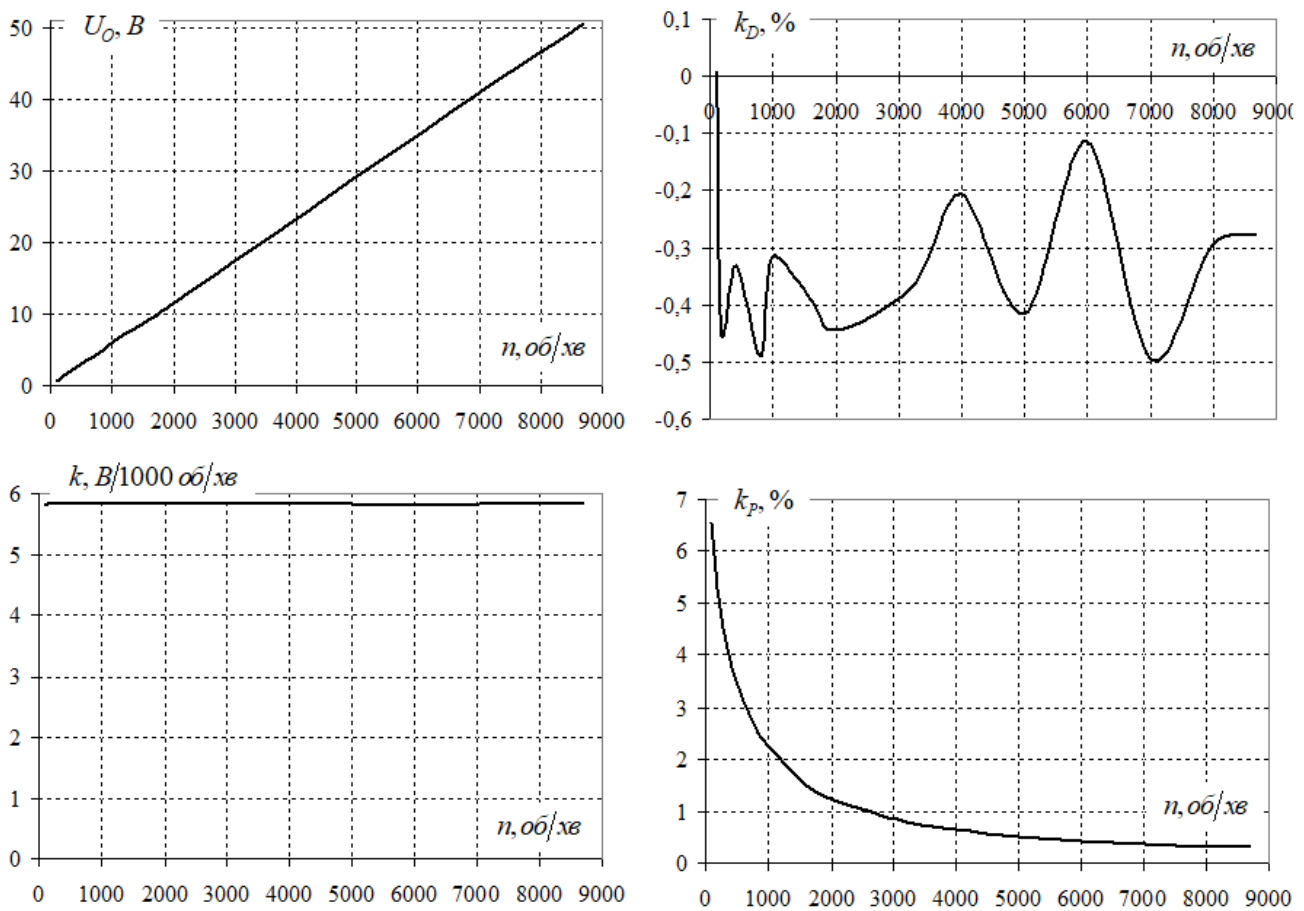


Рис. 6. Експериментальні залежності БМТ з четвертим варіантом схеми

На рис. 7, 8 показані графіки експериментальних залежностей напруги  $U_o(n)$  на виході випрямляча та коефіцієнта  $k_D(n)$  відхилення характеристики схем з діодними випрямлячами (варіанти 1 і 2), але з підключеними на виході інверторами, побудованими на основі малопотужних біполярних транзисторів.

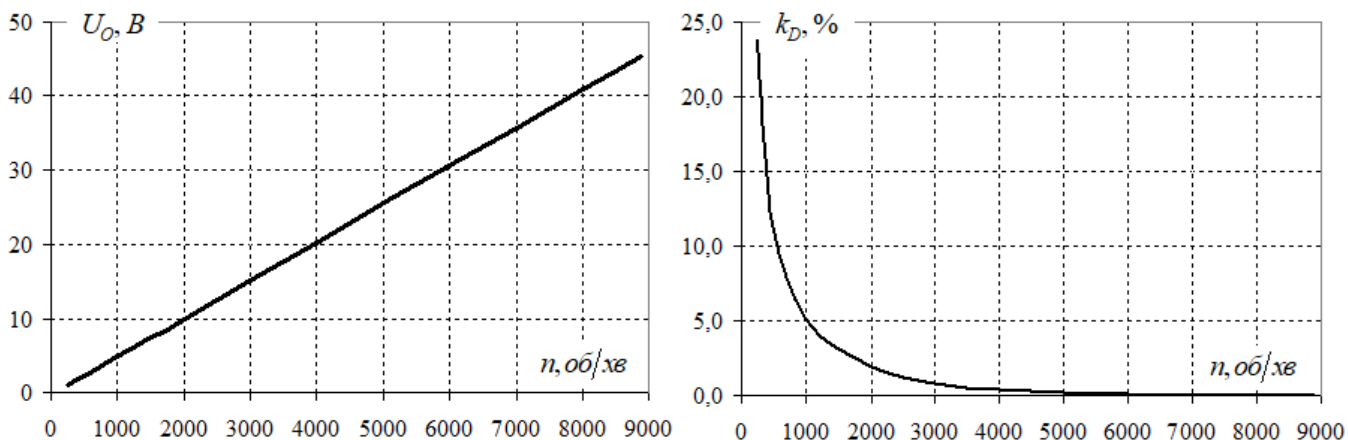


Рис. 7. Експериментальні залежності БМТ з першим варіантом схеми та вихідним транзисторним інвертором

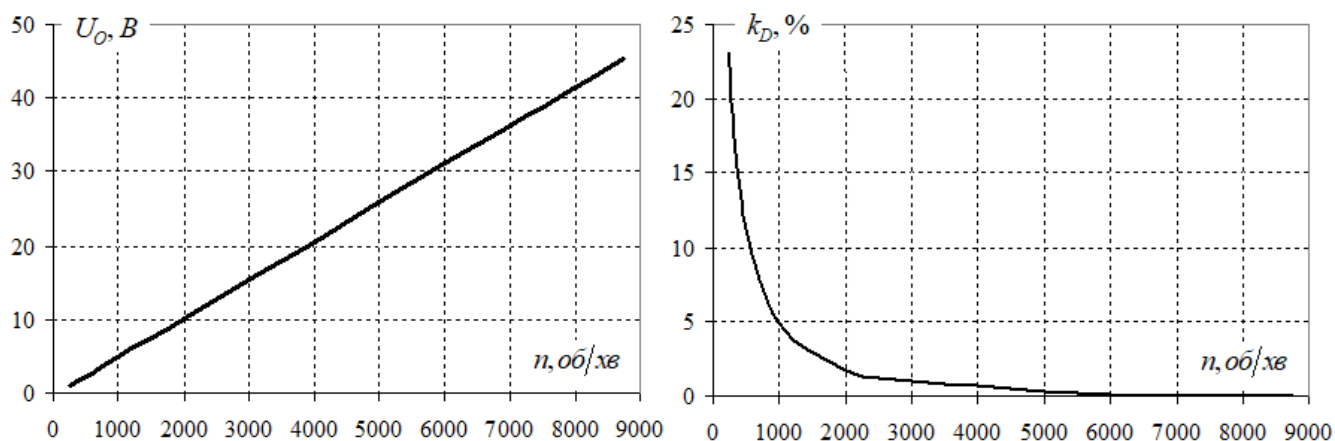


Рис. 8. Експериментальні залежності БМТ з другим варіантом схеми та вихідним транзисторним інвертором

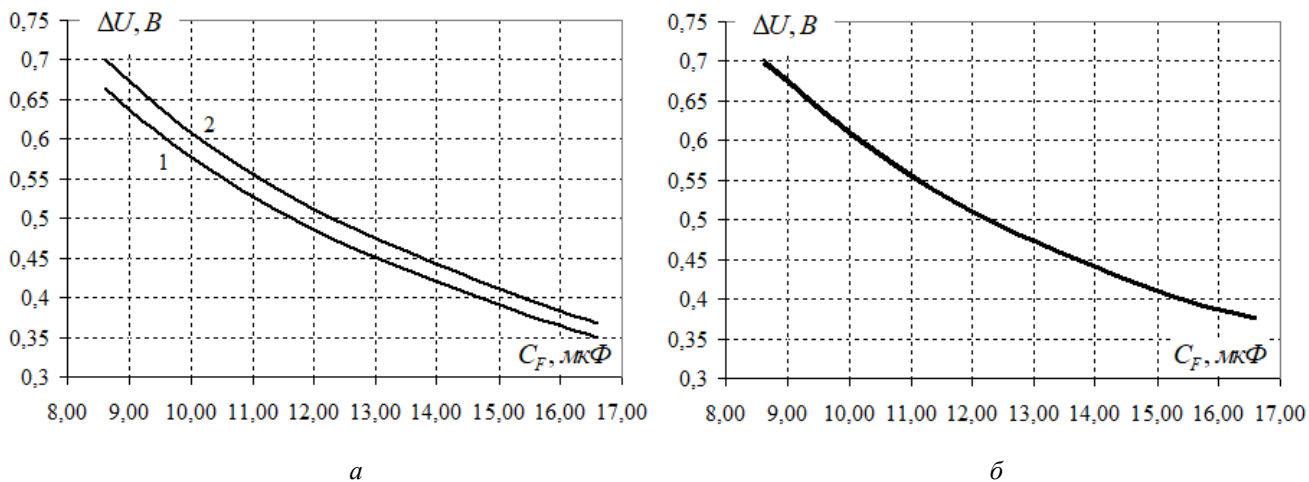


Рис. 9. Залежності розмаху  $\Delta U$  пульсацій вихідного сигналу напруги від величини ємності фільтруючого конденсатора  $C_F$



На рис. 9 показані залежності розмаху  $\Delta U$  пульсацій вихідного сигналу напруги від величини ємності фільтруючого конденсатора  $C_F$ . На рис. 9 а показані залежності для схем 1 і 2, позначені відповідно тими самими цифрами, а на рис. 9 б – характеристики схем 3 і 4, які виявилися дуже близькими за значеннями, що пояснюється тим, що MOSFET мають двосторонню провідність.

**Висновки.** Діодний випрямляч є найпростішим варіантом випрямлення змінних ЕРС статора, оскільки при цьому не потрібно використання датчика положення ротора. Однак вихідна характеристика такого БМТ має зміщення через падіння напруги на діодах. Крім того, внаслідок того, що діодний випрямляч характеризується односторонньою провідністю, стала часу фільтра має різні значення при збільшенні та зменшенні кутової швидкості.

На відміну від діодів, MOSFET мають відносно мале падіння напруги і характеризуються двосторонньою провідністю струму, тому стала часу БМТ незмінна при збільшенні або зменшенні кутової швидкості. При цьому схема БМТ на основі MOSFET складніша за перший варіант випрямляча, оскільки для комутації транзисторів необхідні сигнали датчика положення ротора. У схемі з транзисторним випрямлячем можливе формування вихідної характеристики в усьому діапазоні зміни швидкості обертання ротора тахогенератора, що дозволяє використовувати такий тахогенератор в слідкуючих системах відпрацювання кута повороту.

При живленні системи управління інвертором вихідного сигналу тахогенератора від фазних ЕРС статора виявляється неможливим формування такого сигналу при малих значеннях швидкостей внаслідок недостатнього рівня напруги. При реалізації інвертора на біполярних транзисторах у схемі з діодним випрямлячем неможливо отримати вихідний сигнал напруги в діапазоні дуже малих швидкостей обертання менше 200 об/хв (рис. 7, 8). А це обмежує сферу використання таких БМТ у системах зі зворотними зв'язками.

Щодо властивостей  $RC$ -фільтрів на основі  $R_{F11}$ ,  $R_{F12}$ ,  $R_{F13}$ ,  $R_{F2}$  та  $C_F$  або  $R_{F2}$  та  $C_F$ , то для схеми з транзисторним випрямлячем ці два фільтри є рівноцінними (рис. 9 б) внаслідок двосторонньої провідності, а для схеми з діодним випрямлячем вони мають дещо різні характеристики внаслідок нелінійності діодів (рис. 9 а).

У подальшому передбачається дослідження впливу форми ЕРС статора на розмах пульсацій вихідного сигналу напруги. Крім того, передбачається дослідження можливостей побудови БМТ аксіальної конструкції.

*Фінансується за держбюджетною темою «Розробити наукові засади та принципи побудови керованих н-степеневих магнітоелектричних систем з екстремальними характеристиками» (шифр «Екстремум»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 29.06.2021 р. (Протокол №8). Державний реєстраційний номер роботи 0122U001808. КПКВК 6541030.*

1. Kumar, Ashish; Saraf, Harsh; Kumar, Ravi. Hardware design of closed loop four quadrant dc motor drive with regenerative braking. *2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*. IEEE, 2018. Pp. 287–292. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399080>
2. Худяев А.А., Литвиненко Д.Г. Сравнительная оценка качества итерационных трехканальных следящих электроприводов с типовой настройкой. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"*. Темат. вып. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Харьков : НТУ "ХПИ", 2010. № 28. С. 186–191.
3. Ye Zhengmao; Mohamadian Habib P. Comparisons of Two Feedback Servo Systems for Control Engineering Education: A Case Study on Student Performance of Speed Control Systems. *ASEE Gulf-Southwest Annual Conference*. The University of New Mexico: 2008.
4. Top A., Çakmak O., & Gökbülüt M. Tachogenerator DC motor speed control with PID and fuzzy logic. *Journal of Engineering and Technology*. 2017. No 1(1). Pp. 24–31.
5. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т.2. М.: Энергоатомиздат, 1989. 688 с.
6. Sekine, Hideomi, et al. A compensation method of ripple voltage on DC tachogenerator. *Electrical engineering in Japan*, 1992. 112.2. Pp. 124–131.
7. Електронний ресурс. URL: <https://www.electromate.com/>
8. Corbett A. E. An axial airgap brushless DC tachogenerator. *IEE Colloquium on Instrumentation of Rotating Electrical Machines*. IET, 1991. Pp. 3/1–3/3.
9. Бродовский В.Н., Каржавов Б.Н., Рыбкин Ю.П. Бесколлекторные тахогенераторы постоянного тока. Под ред. В.Н. Бродовского. Москва: Энергоиздат, 1982.

10. Лебедев Н.И., Гандшу В.М., Беляева С.А., Явдошак Я.И. Исследование бесконтактных тахогенераторов для электроприводов станков и роботов. Бесколлекторные электродвигатели с полупроводниковыми устройствами. Ленинград: ВНИИЭлектромаш, 1985. С. 102–115.
11. Kireyev V.G., Akinin K.P. Features of the development of slotless brushless magnetolectric torque motors. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2022. Вип. 63. С. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.031>
12. Петухов І.С., Кіреєв В.Г., Акінін К.П., Лавріненко В.А. Зниження пульсацій обертового моменту безпозового моментного двигуна з постійними магнітами шляхом використання двошарової обмотки. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 4. С. 57–62.
13. Подольцев О.Д., Павлов В.Б., Западничук О.П. Аналіз ефективності передачі електричної енергії в системі бездротової зарядки акумуляторної батареї електромобіля. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 63–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.04.063>.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF BRUSHLESS MAGNETOELECTRIC TACHOGENERATORS

**K.P. Akinin, V.G. Kireyev, I.S. Petukhov, A.A. Filomenko**

Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine,  
Beresteiskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

*The paper is devoted to the study of the characteristics and operating modes of a brushless magneto-electric tachogenerator, which is implemented on the basis of a traditional radial electric machine with a slotless stator and permanent magnets on the rotor. Options for generating an DC output signal using diode and transistor rectifiers have been studied. The dependences of the average value of the output signal, the slope of the output signal, the coefficient of deviation of the characteristic from the specified value and the pulsation coefficient were obtained depending on the rotation speed of the rotor shaft. The influence of the capacitance of the filter capacitor on the magnitude of the output signal ripple amplitude has been studied. Ref. 13, fig. 9, table.*

**Key words:** DC tachometer generator, electric brushless machine with permanent magnets, rectifier.

1. Kumar, Ashish; Saraf, Harsh; Kumar, Ravi. Hardware design of closed loop four quadrant dc motor drive with regenerative braking. *2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*. IEEE, 2018. Pp. 287–292. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399080>
2. Khudyaev A.A., Litvinenko D.G. Comparative assessment of the quality of iterative three-channel servo electric drives with standard settings. *Bulletin of the National tech. University KhPI. Problems of automated electric drive. Theory and practice*. Kharkov: NTU KhPI, 2010. No. 28. Pp. 186–191. (Rus)
3. Ye Zhengmao; Mohamadian Habib P. Comparisons of Two Feedback Servo Systems for Control Engineering Education: A Case Study on Student Performance of Speed Control Systems. *ASEE Gulf-Southwest Annual Conference*. The University of New Mexico: 2008.
4. Top A., Çakmak O., & Gökbülüt M. Tachogenerator DC motor speed control with PID and fuzzy logic. *Journal of Engineering and Technology*. 2017. No 1(1). Pp. 24–31.
5. Handbook of Electrical Machines: 2 vols. T.2. Under general ed. I.P. Kopylova, B.K. Klokova. M.: Energoatomizdat, 1989. 688 p. (Rus)
6. Sekine, Hideomi, et al. A compensation method of ripple voltage on DC tachogenerator. *Electrical engineering in Japan*, 1992. 112.2. Pp. 124–131.
7. Web resource. URL: <https://www.electromate.com/>
8. Corbett A. E. An axial airgap brushless DC tachogenerator. *IEE Colloquium on Instrumentation of Rotating Electrical Machines*. IET, 1991. Pp. 3/1–3/3.
9. Brodovsky V.N., Karzhavov B.N., Rybkin Yu.P. Brushless DC tachogenerators. Moscow: Energoizdat, 1982. (Rus)
10. Lebedev N.I., Gandshu V.M., Belyaeva S.A., Yavdoshak Ya.I. Research of contactless tachogenerators for electric drives of machine tools and robots. Brushless electric motors with semiconductor devices. Ленинград: ВНИИЭлектромаш, 1985. Pp. 102–115. (Rus)
11. Kireyev V.G., Akinin K.P. Features of the development of slotless brushless magnetolectric torque motors. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. Issue 63. Pp.31–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.031>
12. Petukhov I.S., Kireyev V.G., Akinin K.P., Lavrinenko V.A. Reducing the pulsation of the over-torque torque of a slotless torque motor with permanent magnets and a double-ball winding. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2024. No. 4. Pp. 57–62. (Ukr)
13. Podoltsev O.D., Pavlov V.B., Zapadnichuk O.P. Analysis of the efficiency of electrical energy transmission in the drone-free charging system of an electric vehicle battery. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. Issue 4. Pp. 63–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.04.063> (Ukr)

Надійшла: 23.07.2024

Прийнята: 09.08.2024

Submitted: 23.07.2024

Accepted: 09.08.2024