

УДК 621.313

**ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ****Семенцов А. М., Антоненко А. І., Гладчук О. З.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Мета.** *Перевірити працездатність нового стенду та його можливості при дослідженні машин постійного струму.*

**Методика.** *Фізичний експеримент в поєднанні з співвідношеннями теорії електричних машин.*

**Результати.** *У статті приведені основні схемні та конструктивні рішення, прийняті при розробці стенду для дослідження характеристик машин постійного струму із збудженням постійними магнітами. Експериментальна перевірка стенду підтвердила його працездатність. Дослідження характеристик машин постійного струму стенду показали, що розрахунки характеристик різними варіантами збігаються. Найбільша розбіжність не перевищує 5%.*

**Наукова новизна.** *Використання енергетичного підходу для виділення постійних витрат окремо для двигуна і генератора.*

**Практична значимість.** *Використання при підготовці студентів ВНЗ по спеціальності 141.*

**Ключові слова:** *лабораторний стенд, постійний магніт, машина, постійний струм, магнітний потік*

Для вивчення дисципліни «Електричні машини» можна використати стенди, які пропонує сучасний ринок навчального устаткування.[1-3]. Особливістю таких стендів є їх висока вартість та значні енергозатрати при використанні. Витрати енергії при експериментальному вивченні характеристик машин постійного струму можна зменшити застосовуючи для стенду машини малої потужності із збудженням постійними магнітами.

**Постановка завдання**

Враховуючи умови використання стенду та його функціональне призначення необхідно:

- сформулювати основні електромагнітні співвідношення в машинах постійного струму із збудженням постійними магнітами для їх експериментальної перевірки на стенді;
- розробити принципову схему та конструкцію стенду;
- підібрати комплектуючі та виготовити стенд;
- провести експериментальне дослідження характеристик машин стенду

### Результати досліджень

Основними параметрами машини постійного струму, які визначають його характеристики і необхідно врахувати при проектуванні стенду, є:

- напруга живлення  $U_{\partial}$  та  $U_2$  двигуна і генератора, відповідно,  $B$ ;
- активні опори обмоток якоря  $r_{\partial}$  та  $r_2$  двигуна і генератора, відповідно,  $Om$ ;
- спад напруги на переході щітка-колектор  $\Delta U_k$ ,  $B$ ;
- машинний коефіцієнт магнітного потоку  $k_e \Phi_{\partial}$  та  $k_e \Phi_2$  двигуна і генератора, відповідно,  $B^* c = H^* m / A = Bb = \kappa z m^2 / (c^2 A)$ .

Напруга  $U$  на затискачах обмотки якоря в усталеному режимі визначається електрорушійною силою  $E$ , спадом напруги на активному опорі  $r_a$  обмотки якоря та спадом напруги  $\Delta U_k$  на переході щітка-колектор [4]:

$$U = E \pm I_a r_a \pm \Delta U_k, \quad (1)$$

де  $I_a$  – струм в обмотці якоря;

верхні знаки – відносяться до рушійного, а нижні – до генераторного режиму роботи.

Електрорушійна сила  $E$  визначається магнітним потоком  $\Phi$  в зазорі машини, який збуджується в нашому випадку постійними магнітами, і кутовою швидкістю  $\omega$  обертання якоря:

$$E = k_e \Phi \cdot \omega \quad (2)$$

Таким чином, для дослідження характеристик машин постійного струму стенд повинен забезпечити можливість регулювання напруги живлення, можливість регулювання навантаження в генераторному режимі, вимірювання напруги, струму і частоти обертання машин. Ці вимоги можна забезпечити скориставшись запропонованою принциповою схемою рис. 1.

На принциповій електричній схемі стенду показано:

Д – двигун постійного струму типу PIVT 6-25/3A з вмонтованим тахогенератором ТГ виробництва фірми Дунато Sliven (Болгарія);

Г – двигун постійного струму типу PIK 6-25/3 виробництва фірми Дунато Sliven (Болгарія) – використовується в режимі генератора.

Т – показчик тахометра типу 38006712001 з діапазоном вимірювання 0 ... 3000 об/хв.;

Б Ж 1 – блок живлення типу S-400-36 для живлення електродвигуна;

Б Ж 2 – блок живлення вимірювальних приладів;

Ш І М – широтно-імпульсний регулятор напруги типу DC10-60V 20A PWM ННО RC з частотою модуляції 25 кГц;

Р – давач-регулятор вихідної напруги стенду;

V, A – цифрові показчики напруги і струму DC 100 В 50А Dual LED ;  
L1 ... L5 – лампи розжарювання для регулювання навантаження генератора;  
S1 ... S5 – вимикачі ламп навантаження типу АС 125 В 6А;  
S6 – загальний вимикач стенду

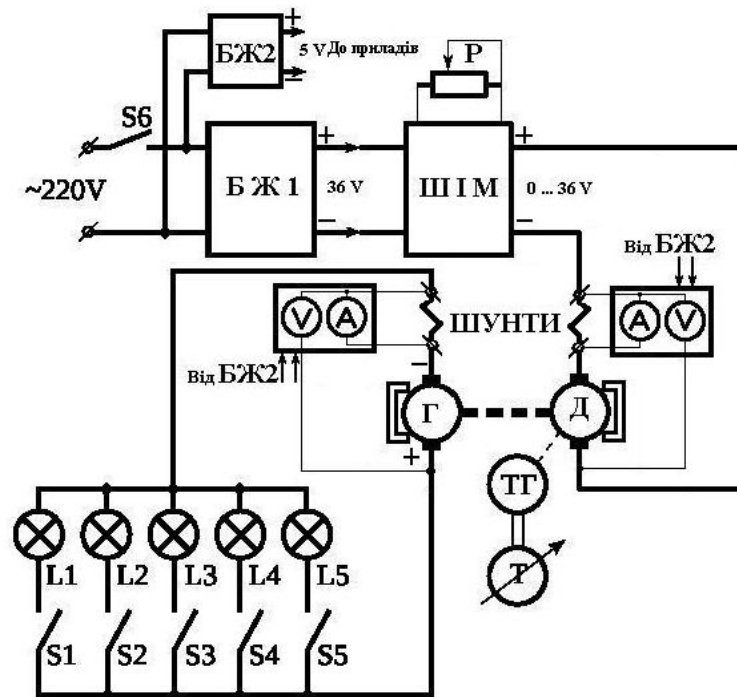


Рис. 1. Принципова електрична схема стенду

Загальний вигляд стенду показано на рис. 2. Корпус стенду виготовлений із листової фанери. На ньому закріплені: 1 – патрони для лампи розжарювання; 2 – вимикач живлення стенду; 3 – цифровий показчик напруги і струму двигуна; 4 – показчик частоти обертання машин; 5 – тахогенератор; 6 – двигун; 7 – вимикачі ламп розжарювання; 8 – регулятор напруги живлення двигуна; 9 – захисний кожух; 10 – електричний шнур живлення стенду; 11 – генератор; 12 – цифровий показчик напруги і струму генератора.

Стенд дозволяє визначити активні опори обмотки якоря і падіння напруги на щітках машин стенду. Для цього треба зняти вольт-амперну характеристику кола обмотки якоря  $U = f(I)$  при загальмованих машинах. Вважаючи спад напруги на переході щітка-колектор незалежним від струму, слід побудувати лінійний графік залежності  $U = f(I)$  до перетину з віссю ординат. Відрізок від нуля до точки перетину з віссю ординат дасть значення спаду напруги на переході щітка-колектор (рис. 3).



Рис. 2. Загальний вигляд стану для дослідження характеристик машин постійного струму із збудженням постійними магнітами

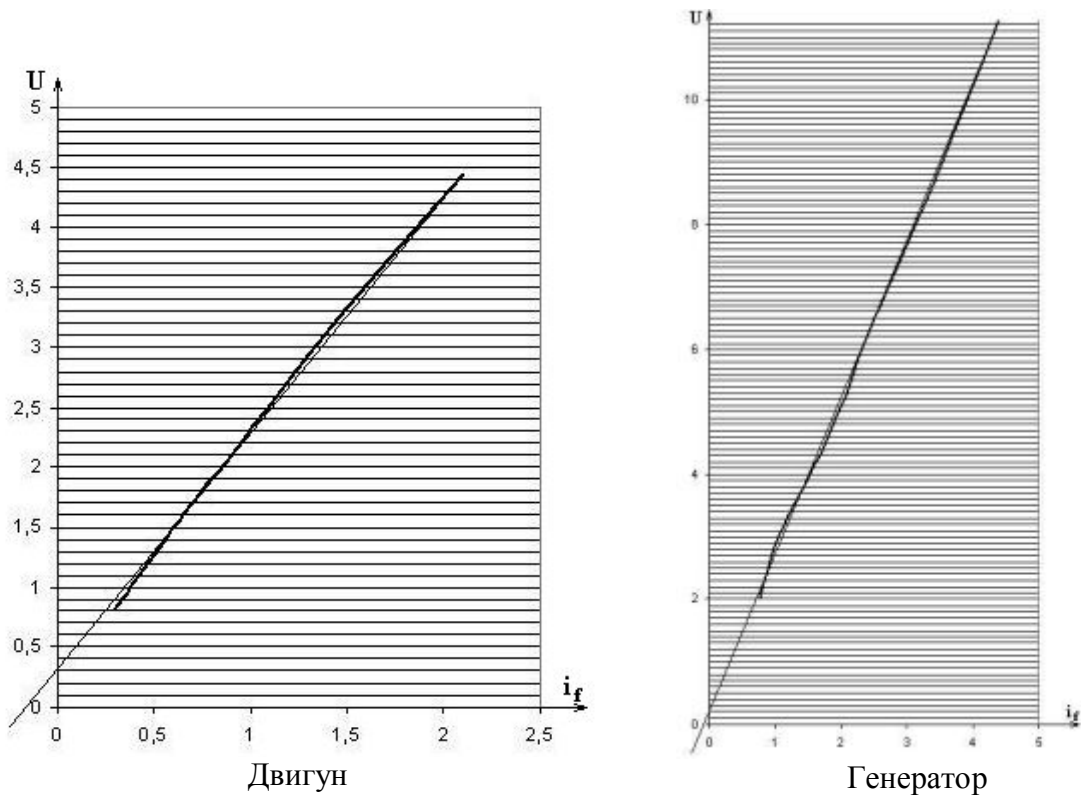


Рис. 3. Визначення спаду напруги на переході щітка-колектор

Для двигуна спад напруги на переході щітка колектор становить 0,3 В, а для генератора – 0,2 В.

Тоді активний опір обмотки якоря  $r_a$ , наприклад двигуна, можна розрахувати по формулі:

$$r_{a\partial} = \frac{\sum_1^m \frac{U_{i\partial} - \Delta U_{k\partial}}{I_{i\partial}}}{m}; \quad (3)$$

а генератора

$$r_{a2} = \frac{\sum_1^m \frac{U_{i2} - \Delta U_{k2}}{I_{i2}}}{m}; \quad (4)$$

Результати розрахунку приведені в табл. 1. Для визначення опору двигуна напруга живлення подавалась із блоку живлення стенду, а для генератора – подавалась від стороннього джерела регульованої напруги постійного струму при вимкненому стенді. Для вимірювання напруги і струму використовувались: для двигуна – прилади стенду, а для генератора – лабораторні прилади.

Таблиця 1

**Результати розрахунку активного опору обмоток якоря**

$U_{\partial}$	$I_{\partial}$	$r_{a\partial}$	$\Delta r_{a\partial} \%$	$U_2$	$I_2$	$r_{a2}$	$\Delta r_{a2} \%$
0,8	0,3	1,666667	-13,1944	2	0,75	2,4	-4
0,96	0,36	1,833333	-4,51389	3	1,05	2,666667	6,666667
1,4	0,56	1,964286	2,306548	4,5	1,75	2,457143	-1,71429
1,7	0,7	2	4,166667	5,5	2,15	2,465116	-1,39535
2,1	0,9	2	4,166667	6,1	2,35	2,510638	0,425532
3,25	1,46	2,020548	5,236872	8,8	3,45	2,492754	-0,28986
4,45	2,1	1,97619	2,926587	11,3	4,4	2,522727	0,909091
Середнє значення		1,923003	--	Середнє значення		2,502149	--
Округлене		1,92	--	Округлене		2,5	--

Як видно з приведених даних відхилення від округленого середнього значення лежать близько 5% для двигуна і 2% для генератора. Найбільше відхилення спостерігається при найменшому струмі. Це можна пояснити не лінійністю опору контактного переходу щітка-колектор.

Важливим параметром машин постійного струму, який не залежить від режиму роботи і значною мірою визначає характеристики машин є коефіцієнт магнітного потоку  $k_e \Phi$  – коефіцієнт пропорційності електрорушійної сили обмотки якоря кутовій швидкості  $\omega = \pi \cdot n / 30$ . Для визначення коефіцієнта магнітного потоку скористаємось рівнянням рівноваги напруги в режимі двигуна:

$$E_i = U_i - I_i r_{ad} - \Delta U_{\omega\delta}; \quad (5)$$

Дослід проводимо при відсутності навантаження генератора поступово змінюючи швидкість обертання валу двигуна від 0 до 3000 об/хв., при цьому фіксуємо покази напруги, струму, швидкості обертання валу двигуна. Фіксуємо 5-10 значень. Для генератора заміряємо електрорушійну силу в режимі холостого ходу і частоту обертання. По результатах вимірювання розраховуємо  $k_e\Phi$ .

$$K_e\Phi_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{E_{i0} \cdot 30}{\pi \cdot n}}{m}; \quad (6)$$

Результати вимірювання і розрахунку заносимо до табл. 2; Як видно з приведених даних коефіцієнт магнітного потоку залежить від навантаження машини. При збільшенні частоти обертання від 400 об/хв. до 3000 об/хв. і струму холостого ходу двигуна від 0,45 А до 0,67 А коефіцієнт магнітного потоку зменшується на 27%. Це можна пояснити впливом вихрових струмів в магнітному осерді якоря і струму в комутованій секції на величину магнітного потоку.

Таблиця 2

Результати визначення коефіцієнта магнітного потоку

Ud	Id	n	E	keФд	Eг	n	keФг
5,44	0,45	400	4,75	0,11	4,21	500	0,08
9,8	0,51	800	9	0,11	7	800	0,08
12,2	0,53	1000	11,36	0,11	8,81	1000	0,08
16,5	0,56	1500	15,6	0,1	11	1250	0,08
19	0,6	1800	18,01	0,1	12,7	1500	0,08
20,7	0,62	2000	19,66	0,09	14,6	1750	0,08
23	0,64	2300	21,91	0,09	16,5	2000	0,08
24,4	0,65	2500	23,29	0,09	18,1	2250	0,08
27,8	0,67	3000	26,64	0,08	20	2500	0,08

Сумарні постійні втрати  $\sum P_{const}$  (на тертя і перемагнічування осердя якоря) в машинах стенду знайдемо із дослідів при відсутності навантаження генератора

$$\sum P_{const} = U_{\delta} I_{\delta} - \sum P_{var\delta} \quad (7)$$

де  $\sum P_{var\delta}$  – сумарні змінні електричні втрати в двигуні (в міді обмотки якоря і на переході щітка-колектор).

Сумарні постійні втрати окремо в двигуні і генераторі можна виразити через змінні втрати машинної пари при навантаженні генератора, близькому до номінального:

$$\sum P_{const\delta} = \sum P_{const} P_{var\delta} / (P_{var\epsilon} + P_{var\delta}) \quad (8)$$

$$\sum P_{const} = \sum P_{const} P_{var} / (P_{var} + P_{var\partial}) \quad (9)$$

Дослідження механічних характеристик машин постійного струму стенду показали, що розрахунки електромагнітного моменту через визначені експериментально втрати і через машинний коефіцієнт магнітного потоку збігаються. Найбільше відхилення в розрахунках моменту двигуна не перевищує 5%.

### **Висновки**

Проведені випробування підтверджують працездатність стенду Він дозволяє виконувати наступні лабораторні роботи:

1. Визначення активного опору обмотки якоря і спаду напруги на переході щітка-колектор машин постійного струму із збудженням постійними магнітами.
2. Визначення коефіцієнту магнітного потоку та його залежності від струму обмотки якоря та частоти обертання.
3. Визначення постійних (не залежних від навантаження) втрат в машинах постійного струму.
4. Визначення робочих характеристик машин постійного струму із збудженням постійними магнітами в генераторному і рушійному режимах.
5. Визначення механічної та електромеханічної характеристики двигуна, зовнішньої характеристики генератора.

### **Список використаних джерел**

1. Учебный лабораторный стенд «Электрические машины и электропривод» [Электронный ресурс]: Сибирский государственный университет путей сообщения. – Электрон. дан. (1 файл) // Режим доступа: <http://www.stu.ru/education/index.php?page=835>. Назва з екрана.
2. Цыфаркин В. И., Горбунов М. Г. Учебно-лабораторный стенд для исследования характеристик электрических машин постоянного и переменного тока [Электронный ресурс]: Міжнарод. наук. журн. «Молодой ученый». – Электрон. дан. (1 файл) – 2011. – №2. Т.2. – С. 134-136. ISSN:2072-0297. – Режим доступа: <http://moluch.ru/archive/25/2740/>. – Назва з екрана
3. Основы электрических машин и электропривода с универсальной машиной переменного тока. Исполнение стендовое ручное. ОЭМиЭП2-СР. – [Электронный ресурс] / ООО НПП «Учтех-Профи». Электрон. дан. (1 файл) – Режим доступа: [http://www.uralstend.ru/shop/red/elektricheskie\\_mashiny\\_i\\_elektroprivod/osnovy\\_ele](http://www.uralstend.ru/shop/red/elektricheskie_mashiny_i_elektroprivod/osnovy_ele)

[ktricheskikh mashin i elektroprivoda s universalnoj mashinoy peremennogo toka is polnenie standovoe ruchnoe oemier2-sr/](#). – Назва з екрана

4. Електричні машини: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К. : Знання, 2009. – 399 с.

### References

1. Uchebnyi laboratornyi stand «Elektrycheskiye mashyny u elektroprivod» [Elektronnyi resurs]: Sybyskiy gosudarstvennyy unyversytet putei soobshcheniya. – Elektron. dan. (1 fail) // Rezhym dostupu: <http://www.stu.ru/education/index.php?page=835>. Nazva z ekrana.
2. Tsyfarkyn V. Y., Horbunov M. H. Uchebno-laboratornyi stand dlia yssledovaniya kharakterystyk elektrycheskykh mashyn postoiannoho y peremennoho toka [Elektronnyi resurs]: Mizhnarod. nauk. zhurn. «Molodoi uchenyi». – Elektron. dan. (1 fail) — 2011. — №2. T.2. — S. 134-136. ISSN:2072-0297. – Rezhym dostupu: <http://moluch.ru/archive/25/2740/>. – Nazva z ekrana.
3. Osnovy elektrycheskykh mashyn u elektroprivoda s unyversalnoi mashinoy peremennoho toka. Yspolnenye standovoe ruchnoe. OЭМуЭР2-SR. – [Elektronnyi resurs] / ООО NPP «Uchtekh- Profy». Elektron. dan. (1 fail) – Rezhym dostupu: [http://www.uralstend.ru/shop/red/elektricheskie\\_mashiny\\_i\\_elektroprivod/osnovy\\_elektricheskikh\\_mashin\\_i\\_elektroprivoda\\_s\\_universalnoj\\_mashinoy\\_peremennogo\\_toka\\_is\\_polnenie\\_standovoe\\_ruchnoe\\_oemier2-sr/](http://www.uralstend.ru/shop/red/elektricheskie_mashiny_i_elektroprivod/osnovy_elektricheskikh_mashin_i_elektroprivoda_s_universalnoj_mashinoy_peremennogo_toka_is_polnenie_standovoe_ruchnoe_oemier2-sr/). – Nazva z ekrana
4. Elektrychni mashyny: pidruch. [dlia stud. vyshch. navch. zakl.] / M. V. Zahirniak, B. I. Nevzlin. — 2-he vyd., pererobl. i dopovn. – K. : Znannia, 2009. – 399 s.

**Лабораторный стенд для исследования характеристик машин постоянного тока**

**Семенцов А. М., Антоненко А. И., Гладчук А. З.**

*Киевский национальный университет технологий и дизайна*

**Цель.** Проверить работоспособность нового стенда и его возможности при исследовании машин постоянного тока.

**Методика.** Физический эксперимент в совокупности с основами теории электрических машин.

**Результаты.** В статье приведены основные схемные и конструктивные решения, принятые при разработке стенда для исследования характеристик машин постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Экспериментальная проверка стенда подтвердила его работоспособность. Исследования характеристик



машин постоянного тока стенда показали, что расчеты характеристик разными вариантами совпадают. Наибольшее расхождение не превышает 5%.

**Научная новизна.** Использование энергетического подхода для выделения постоянных потерь отдельно для двигателя и генератора.

**Практическая значимость.** Использование при подготовке студентов ВУЗов по специальности 141.

**Ключевые слова:** лабораторный стенд, постоянный магнит, машина, постоянный ток, магнитный поток

### **Laboratory test bench for researching of characteristics permanent magnet dc machines**

**Sementsov A. M., Antonenko A. I., Gladchuk A. Z.**

*Kiev National University of Technology and Design*

**Purpose.** Check the operation of the new laboratory test bench and its possibilities in the study of DC machines.

**Methodology.** The physical experiment in the aggregate of the relations of the theory of electrical machines.

**Findings.** The article shows the main circuit and constructive decisions taken in the design of the laboratory test bench for the study of the characteristics of DC machines with permanent magnet excitation. Experimental verification of the test bench confirmed its efficiency. Studies on the characteristics of the test bench DC machines have shown that different embodiments calculations characteristics coincide. The biggest difference does not exceed 5%.

**Originality.** The using of energy approach to highlight the constant losses separately for the engine and generator.

**Practical value.** The using in the training of university students majoring 141.

**Keywords:** laboratory bench, permanent magnet, DC machine