

СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ СЕРЕДНЬОЇ І ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

Д. В. Вершинин¹, В. А. Войтенко², Є. О. Смотров¹¹ТОВ «Одеське СКБ спеціальних верстатів»²Державний університет «Одеська політехніка»

Анотація. Розглянуто функціональну схему енергозберігаючого стенду для проведення випробувань генераторів середньої і великої потужності з поверненням енергії, до складу якого входить два електричних генератора однакової потужності, один з яких використовується в якості додаткового гонного двигуна, а другий в якості генератора, який досліджується. Проведено синтез системи регулювання кутової швидкості вала генератора, розглянуто математичну модель енергозберігаючого стенду, яка підтвердила високі енергетичні, статичні і динамічні характеристики енергозберігаючого стенду.

Ключові слова: генератор, гонний двигун, система, регулювання, струм, потужність, енергія, ефективність.

Вступ

Випробування електричних машин є важливим і ефективним засобом їх вивчення і подальшого вдосконалення. Тому електричні генератори великої потужності після виготовлення мають пройти промислові випробування, які проводять на спеціальних стендах. Метою промислових випробувань електричних генераторів є перевірка їх працездатності і оцінка відповідності їх технічних характеристик і параметрів технічному завданню. Види промислових випробувань електричних машин регламентуються державними стандартами. Кожен вид випробувань проводиться за затвердженими програмами [1, 2].

Зазвичай при випробуваннях генераторів в якості привідних двигунів використовують або двигуни внутрішнього згоряння, або електричні двигуни [3]. Найбільш часто в якості привідних двигунів використовують двигуни постійного струму або асинхронні двигуни з короткозамкненою обмоткою ротора. Асинхронні двигуни відрізняються низькою вартістю і високою надійністю. Двигуни постійного струму, як правило, застосовують в тому випадку, якщо необхідно регулювати частоту обертання валів електричних генераторів у великому діапазоні. Номінальні параметри приводного двигуна повинні відповідати програмі випробувань, параметрам досліджуваного генератора, а також функціональній схемі стенда.

Для проведення випробувань електричних генераторів споживається енергія, яка витрачається на приведення в рух досліджуваного генератора. При проведенні випробувань генератор

генерує електричну енергію, яка поглинається навантажувальним пристроєм, генерується в електричну мережу або використовується для приведення в рух досліджуваного генератора. Тому стенди для проведення випробувань електричних генераторів ділять на стенди з безповоротним поглинанням енергії і на стенди з поверненням енергії [1, 2]. При проведенні випробувань з безповоротним поглинанням енергії вся електрична енергія, яка генерується генератором, поглинається навантажувальними пристроями. Найбільш простим навантажувальним пристроєм для електричних генераторів є навантажувальний резистор з регульованим або нерегульованим опором [3]. Для генераторів змінного струму також застосовують індуктивні дроселі або реактори з регульованим індуктивним опором.

При проведенні випробувань генераторів на стендах з поверненням енергії споживана при випробуваннях енергія за вирахуванням втрат повертається в джерело електричної енергії (наприклад, в електричну мережу) або відразу використовується для приведення в рух досліджуваного генератора [4]. Для проведення випробувань генераторів з поверненням енергії потрібно більш складне обладнання в порівнянні з випробуваннями генераторів з безповоротним поглинанням енергії. З іншого боку, стенди з поверненням електричної енергії споживають менше енергії і тому є більш економічними.

Повернення електричної енергії дозволяє вирішити ряд завдань, головними з яких є завдання зменшення втрат енергії на проведення випробувань генераторів, а також зменшення впливу стенду на навколишнє середовище завдяки відсутності навантажувальних пристроїв, що нагріваються. Окрім того, використання електричних двигунів замість двигунів внутрішнього

згоряння для приводу в рух електричних генераторів призводить до зменшення кількості вихлопних газів [8, 12].

Схеми навантажувальних стендів з поверненням енергії відрізняються великим різноманіттям [9]. Різновидом схем навантажувальних стендів з поверненням енергії є схеми взаємного навантаження двох, близьких за потужністю електричних машин, в яких одна машина, працює в режимі двигуна, перетворює електричну енергію в механічну енергію і видає її другий електричній машині, яка працює в режимі генератора. Друга електрична машина (генератор), в свою чергу, перетворює механічну енергію, яку отримує від першої електричної машини, яка працює в режимі двигуна, в електричну енергію і передає її до першої електричної машини, яка працює в режимі двигуна. У цьому випадку від джерела енергії ззовні споживається тільки енергія, яка витрачається на покриття втрат енергії в обох електричних машинах [10, 11].

Метою роботи є перевірка працездатності стенду з взаємним навантаженням електричних машин, визначення параметрів регульованого електроприводу, призначеного для регулювання і стабілізації швидкості вала досліджуваного генератора, а також аналіз енергетичної ефективності розробленого стенду в порівнянні зі стендом, в якому відбувається безповоротне поглинання енергії.

Стенд для проведення випробувань генератора великої потужності з безповоротним поглинанням енергії

На рис.1 показана функціональна схема стенду, який є основним технічним рішенням для проведення випробувань генераторів великої потужності. У цій схемі в якості гонного двигуна генератора використовується дизельний двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) зі своєю системою керування. Як навантаження генератора використовуються баластні резистори. Система керування ДВЗ має підтримувати постійне задане значення кутової швидкості обертання вала ДВЗ і вала генератора. Навантаження генератора регулюється зміною опору баластних резисторів. У цій схемі потужність ДВЗ і потужність баластних резисторів повинна бути не менше потужності випробуваного генератора. Вся енергія палива, яку споживає ДВЗ, перетворюється в теплову енергію, яка за допомогою генератора і баластних резисторів розсіюється в навколишнє середовище.

До переваг цього технічного рішення можна віднести простоту і те, що єдиним джерелом енергії є енергія палива для ДВЗ. Цей стенд не пот-

ребує джерела електричної енергії великої потужності.

До недоліків цього технічного рішення можна віднести: низьку енергетичну ефективність, оскільки внутрішня енергія палива перетворюється за допомогою ДВЗ, електричного генератора і баластних резисторів в теплову енергію, яка в кращому випадку використовується для підігріву води, а в більшості випадків – для підігріву навколишнього повітря і таким чином збільшує теплове забруднення навколишнього середовища. Крім того, вихлопні гази ДВЗ забруднюють навколишнє середовище і таким чином, сприяють загостренню екологічних проблем.

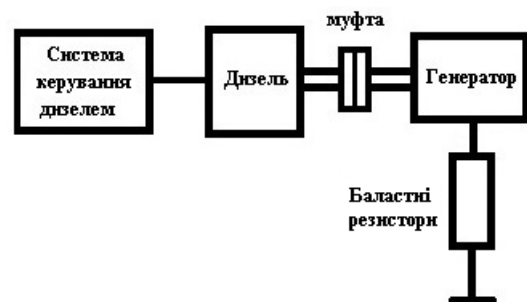


Рис.1. Функціональна схема стенду для проведення випробувань генератора великої потужності з безповоротним поглинанням енергії.

Потужність механічної енергії, яку треба підводити до генератора, який досліджується, може бути визначена за формулою:

$$P_{\text{МЕХ}} = \frac{P_{\text{ЕЛГЕН}}}{\eta_{\text{ГЕН}}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{ЕЛГЕН}}$ – потужність електричної енергії, яку генерує досліджуваний генератор;

$\eta_{\text{ГЕН}}$ – коефіцієнт корисної дії (ККД) генератора, який залежить від режиму його роботи.

Енергозберігаючий стенд для проведення випробувань генератора великої потужності з поверненням енергії

На рис.2 показана функціональна схема стенду, призначеного для проведення випробувань генератора постійного струму великої потужності, яку реалізовано за схемою взаємного навантаження двох майже однакових або однакових за потужністю електричних машин. У цій функціональній схемі використовуються один двигун постійного струму М1, потужність якого повинна бути близькою до потужності досліджуваного генератора. Крім двигуна М1 використовуються регульований електропривод постійного струму, до складу якого входить двигун М2, потужність якого може бути значно меншою за потужність досліджуваного генератора. Двигун М1 викорис-

товується в якості навантаження генератора, який досліджується, і спільно з двигуном М2 використовується в якості приводного двигуна генератора. Більша частина механічної енергії, яка подається до валу генератора, має надходити від двигуна М1, який і отримує електричну енергію

від досліджуваного генератора. Регульований електропривод постійного струму, до складу якого входить двигун М2, має використовуватись лише для стабілізації швидкості обертання валу генератора на потрібному рівні (рис.2).

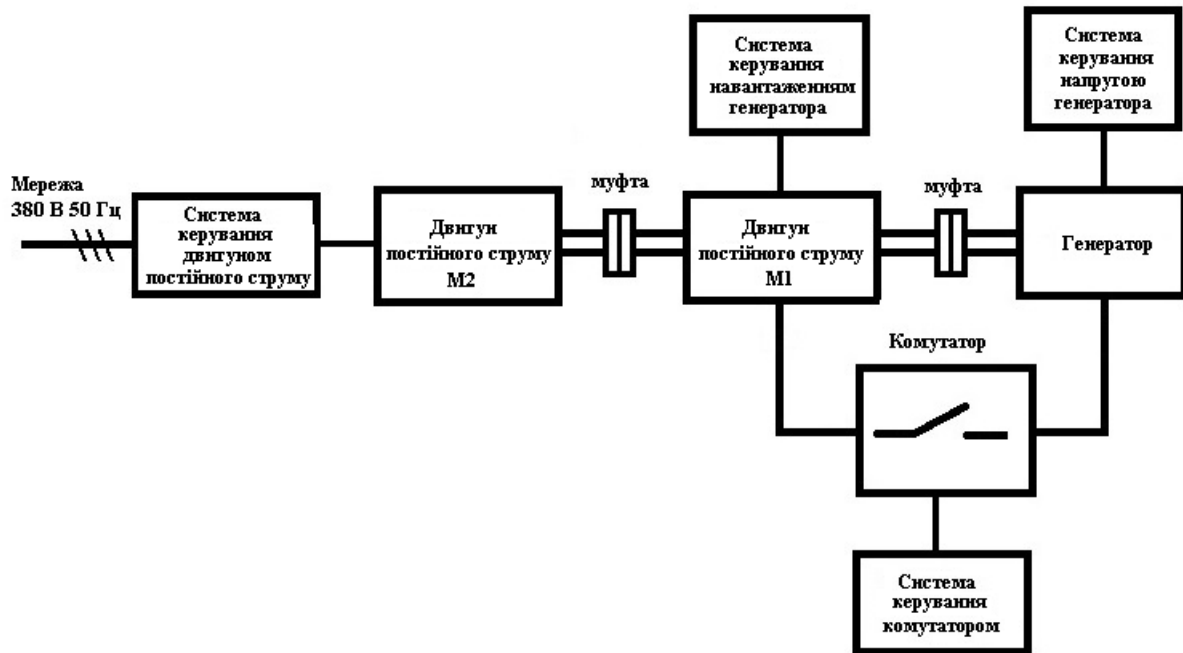


Рис. 2. Функціональна схема стенду, призначеного для проведення випробувань генератора постійного струму великої потужності, з поверненням енергії, яка реалізована за схемою взаємного навантаження двох, порівняних за потужністю електричних машин.

До очікуваних переваг технічного рішення, яке показано на рис.2, можна віднести:

- високу енергетичну ефективність, оскільки з мережі споживається лише електрична енергія, яка використовується на покриття втрат енергії в стенді;

- стенд отримує енергію тільки від джерела електричної енергії;

- це технічне рішення не потребує палива для ДВЗ, і, отже, не отруює навколишнє середовище вихлопними газами;

- немає баластних резисторів і, отже, немає теплової енергії, яку розсіюють баластні резистори, що зменшує теплове забруднення навколишнього середовища.

До недоліків функціональної схеми стенда, яку показано на рис.2, можна віднести відносну складність.

Розглянемо роботу стенда, функціональна схема якого показана на рис.2. При розімкнутих контактах комутатора за допомогою двигуна М2 відбувається пуск (розгін) стенду до заданої швидкості. Задана швидкість підтримується за допомогою системи керування двигуном постійного струму М2. Після цього за допомогою системи управління напругою генератора здійсню-

ється регулювання струму в обмотці збудження генератора і таким чином встановлюється потрібне значення ЕРС, яка індукуюється в якірній обмотці генератора при заданій швидкості обертання його вала :

$$E_{\Gamma} = k_{E\Gamma} \Phi_{\Gamma} \omega, \quad (2)$$

де $k_{E\Gamma}$ – конструктивний коефіцієнт якірної обмотки генератора; Φ_{Γ} – магнітний потік збудження генератора; ω – кутова швидкість обертання валу генератора і валу двигуна М1.

Потім за допомогою системи управління навантаженням генератора регулюється струм в обмотці збудження двигуна М1 і встановлюється напруга на клеммах двигуна М1, що дорівнює напрузі на клеммах досліджуваного генератора, при цьому різниця потенціалів (напруга) на розімкнутих контактах комутатора має бути близькою до нуля. Після цього необхідно включити комутатор і з'єднати якірну обмотку двигуна і якірну обмотку генератора. Якщо попереднє регулювання напруги на клеммах двигуна М1 було проведено вірно, то струм, що протікає в якірній обмотці двигуна М1 і в якірній обмотці генератора, повинен бути мінімальним. В ідеальному випадку струм, що протікає в якірних обмотках

двигуна М1 і генератора, має дорівнювати нулю. При потребі до складу комутатора можна ввести резистори, які при включенні комутатора будуть обмежувати значення струму в якірному ланцюзі двигуна М1 і генератора, а потім ці резистори можна зашунтувати. При нульовому значенні якірного струму електромагнітний момент, що розвиває двигун М1, дорівнює нулю, і електромагнітний момент навантаження, який створює генератор, теж дорівнює нулю. Момент, що розвиває двигун М2, дорівнює механічному моменту, який відповідає втратам механічної енергії в стенді, а також втратам електромагнітної енергії в двигуні М1 і в досліджуваному генераторі:

$$M_{M2} = M_{ВТРАТ} \cdot \quad (3)$$

Далі за допомогою системи управління навантаженням генератора необхідно зменшити струм збудження двигуна М1. При цьому зменшується магнітний потік збудження двигуна (Φ_{M1}) і, як наслідок, зменшується значення ЕРС (E_{M1}), яку магнітний потік індукуює в якірній обмотці двигуна М1:

$$E_{M1} = k_{EM1} \Phi_{M1} \omega, \quad (4)$$

де k_{EM1} – конструктивний коефіцієнт якірної обмотки двигуна М1.

Під дією різниці значень ЕРС двигуна (E_{M1}) і ЕРС генератора ($E_{Г}$) в загальному якірному ланцюзі двигуна М1 і генератора починає протікати струм, стале значення якого визначається формулою:

$$I_{M1-Г} = \frac{E_{Г} - E_{M1}}{R_{ЯГ} + R_{ЯM1}}; \quad (5)$$

$$I_{M1-Г} = \frac{k_{EG} \Phi_{Г} - k_{EM1} \Phi_{M1}}{R_{ЯГ} + R_{ЯM1}} \omega, \quad (6)$$

де $R_{ЯM1}$ и $R_{ЯГ}$ – відповідно опір якірної обмотки двигуна М1 і опір якірної обмотки генератора.

При цьому струмі двигун М1 буде розвивати рушійний електромагнітний момент:

$$M_{M1} = k_{EM1} \Phi_{M1} I_{M1-Г}. \quad (7)$$

Підставимо в (7) замість $I_{M1-Г}$ праву частину рівняння (6). В результаті отримаємо:

$$M_{M1} = k_{EM1} \Phi_{M1} \frac{k_{EG} \Phi_{Г} - k_{EM1} \Phi_{M1}}{R_{ЯГ} + R_{ЯM1}} \omega. \quad (8)$$

При цьому ж струмі генератор буде розвивати гальмівний електромагнітний момент:

$$M_{Г} = k_{EG} \Phi_{Г} I_{M1-Г}; \quad (9)$$

$$M_{Г} = k_{EG} \Phi_{Г} \frac{k_{EG} \Phi_{Г} - k_{EM1} \Phi_{M1}}{R_{ЯГ} + R_{ЯM1}} \omega. \quad (10)$$

Для сталого режиму роботи стенду значення моментів, які розвивають генератор і двигуни М1 і М2 будуть задовольняти умові:

$$M_{M2} + M_{M1} = M_{ВТРАТ} + M_{Г}. \quad (11)$$

З (11) випливає, що для підтримування заданого значення швидкості двигун М2 повинен розвивати момент, який має дорівнювати механічному моменту, що відповідає втратам механічної та електромагнітної енергії в стенді плюс момент, який дорівнює різниці моментів, які розвивають двигун М1 і генератор:

$$M_{M2} = M_{ВТРАТ} + M_{Г} - M_{M1}. \quad (12)$$

Підставимо в рівняння (12) замість M_{M1} і $M_{Г}$ праві частини рівнянь (10) і (8). Після перетворень отримаємо:

$$M_{M2} = M_{ВТРАТ} + \frac{(k_{EG} \Phi_{Г} - k_{EM1} \Phi_{M1})^2}{R_{ЯГ} + R_{ЯM1}} \omega. \quad (13)$$

Підставимо в рівняння (12) замість M_{M1} і $M_{Г}$ праві частини рівнянь (9) і (7). Після перетворень отримаємо:

$$M_{M2} = M_{ВТРАТ} + (k_{EG} \Phi_{Г} - k_{EM1} \Phi_{M1}) I_{M1-Г}. \quad (14)$$

На підставі рівняння (6) можна записати:

$$(k_{EG} \Phi_{Г} - k_{EM1} \Phi_{M1}) = \frac{I_{M1-Г} (R_{ЯГ} + R_{ЯM1})}{\omega}. \quad (15)$$

Підставимо в рівняння (14) праву частину рівняння (15). В результаті отримаємо:

$$M_{M2} = M_{ВТРАТ} + \frac{I_{M1-Г}^2 (R_{ЯГ} + R_{ЯM1})}{\omega}. \quad (16)$$

З рівняння (16) випливає, що механічний момент, який має розвивати двигун М2, дорівнює механічному моменту, який відповідає втратам механічної енергії в стенді, втратам електромагнітної енергії в двигуні М1 і в генераторі, а також втратам енергії на активному опорі якірних обмоток двигуна М1 і генератора, що відповідає закону збереження енергії. З огляду на те, що вал двигуна М2 обертається із заданою швидкістю (ω) можна визначити механічну потужність, яку повинен розвивати двигун М2:

$$P_{M2} = \omega M_{M2}. \quad (17)$$

Після підстановки в (17) замість M_{M2} правої частини рівняння (16) отримаємо:

$$P_{M2} = \omega M_{ВТРАТ} + I_{M1-Г}^2 (R_{ЯГ} + R_{ЯM1}). \quad (18)$$

Рівняння (18) дозволяє визначити механічну потужність двигуна М2.

Як приклад розглянемо стенд, на якому необхідно провести дослідження можливості експлуатації двигуна постійного струму типу 2ПФ315ЛГ потужністю 220 кВт в якості генератора постійного струму. Також необхідно визначити механічну потужність двигуна М2, і провести синтез параметрів системи регулювання швидкості двигуна постійного струму М2.

Параметри двигуна постійного струму типу 2ПФ315ЛГ: $P_{M1-Г.Н}=220$ кВт, $U_{M1-Г.ЯН}=220$ В; $n_{M1-Г.Н}=1500$ об/мин; $\eta_{M1-Г.Н}=91\%$; $R_{M1-Г.Я}=0,003$ Ом; $R_{M1-Г.ДП}=0,0017$ Ом; $R_{M1-Г.ОВ}=21$ Ом; $U_{M1-Г.ОВ}=220$ В; $J_{M1-Г}=4,44$ кгм²; $m_{M1-Г}=1195$ кг; $L_{ОВ}=30,74$ Гн. Значення опору обмоток двигуна зазначено для температури + 15°C [5, 6].

Крім цього двигун 2ПФ315ЛГ допускає 2-кратне перенавантаження якірної обмотки за струмом протягом 60 секунд і 3-кратне перенавантаження протягом 10 секунд. У двигуні використовується ізоляція класу «В» (гранична температура дорівнює 130°C) [6]. З урахуванням нагріву двигуна М1 і генератора до граничної температури 130°C були визначені параметри двигуна 2ПФ315ЛГ в нагрітому стані, які будемо використовувати при синтезі системи управління і які наведено в таблиці 1.

Таблиця 1
Параметри двигуна 2ПФ315ЛГ
при температурі 130 °С

Параметр	Позначення	Числове значення
Опір обмотки збудження	$R_{M1-ОВ.Т^{\circ}}$	30,66 Ом
Номінальне значення струму збудження	$I_{M1-Г.ОВ.Н}$	7,175 А
Номінальне значення якірного струму	$I_{M1-Г.Н}$	1091,73 А
Опір якірної обмотки	$R_{M1-Г.СЯ.Т^{\circ}}$	0,00686 Ом
Номінальне значення кутової швидкості обертання вала двигуна	$\omega_{M1-Г.Н}$	157,1 рад/с
Номінальне значення коефіцієнта двигуна по ЕРС	$C_{Е.М1.Н}$	1,353 Вс
Номінальне значення механічного моменту	$M_{M1-Г.Н}$	1400,38 Нм
Номінальне значення електромагнітного моменту	$M_{ЭМ1-Г.Н}$	1477,11 Нм
Індуктивність якірного кола	$L_{M1-Г.СЯ}$	$1,6 \times 10^{-4}$ Гн
Електромагнітна стала часу якорного кола	$T_{M1-Г.СЯ}$	$23,32 \times 10^{-3}$ с
Електромагнітна стала часу обмотки збудження	$T_{M1-Г.ОВ}$	$467,62 \times 10^{-3}$ с

Визначаємо момент, який відповідає втратам механічної енергії в стенді і втратам електромагнітної енергії в двигуні М1 і в досліджуваному генераторі при їх роботі в номінальному режимі з врахуванням того, що в даному випадку вони є однаковими:

$$\begin{aligned} \Delta M_{M1.Н} &= M_{ЭМ1-Г.Н} - M_{M1-Г.Н}; \\ \Delta M_{M1.Н} &= 76,73 \text{ Нм}; \\ M_{ВТРАТ.Н} &= 2 \Delta M_{M1.Н}; \\ M_{ВТРАТ.Н} &= 153,46 \text{ Нм}. \end{aligned}$$

Визначаємо механічну потужність, яку повинен розвивати двигун М2 при роботі стенду в номінальному режимі за формулою (18):

$$P_{M2.Н} = \omega M_{ВТРАТ.Н} + I_{M1-Г.Н}^2 (R_{ЯГ} + R_{ЯМ1}).$$

Після підстановки отримаємо:

$$P_{M2.Н} = 40461,083 \text{ Вт}.$$

Вибираємо двигун 2ПН225ЛГ з номінальною потужністю 45 кВт і з номінальною швидкістю, яка дорівнює номінальній швидкості підслідного генератора, тобто 157,1 рад/с.

Параметри двигуна постійного струму типу 2ПН225ЛГ: $P_{M2.Н}=45$ кВт, $U_{M2.ЯН}=220$ В; $n_{M2.Н}=1500$ об/мин; $\eta_{M2.Н}=87,5\%$; $R_{M2.Я}=0,0237$ Ом; $R_{M2.ДП}=0,0125$ Ом; $R_{M2.ОВ}=38,6$ Ом; $U_{M2.ОВ}=220$ В; $J_{M2}=0,616$ кгм²; $m_{M2}=422$ кг; $L_{ОВ}=30,74$ Гн. Значення опору обмоток двигуна зазначено для 15°C. Клас ізоляції - В.

Двигун постійного струму типу 2ПН225ЛГ допускає 2-кратне перенавантаження якірної обмотки за струмом протягом 60 секунд і 3-кратне перенавантаження за струмом протягом 10 секунд. У двигуні 2ПН225ЛГУХЛ4 також використовується ізоляція класу «В» (гранична температура – 130°C) [6].

З урахуванням граничної температури нагріву двигуна 2ПН225ЛГ (до 130°C) були визначені параметри двигуна, які наведені в таблиці 2 і використовуються при синтезі системи регулювання швидкості двигуна М2.

Таблиця 2
Параметри двигуна 2ПН225ЛГ в нагрітому стані до температури 130 °С

Параметр	Позначення	Числове значення
Опір обмотки збудження	$R_{M2-ОВ.Т^{\circ}}$	56,356 Ом
Номінальне значення струму збудження	$I_{M2-ОВ.Н}$	3,904 А
Номінальне значення якірного струму	$I_{M2.Я.Н}$	229,862 А
Опір якірної обмотки	$R_{M2-СЯ.Т^{\circ}}$	0,05285 Ом

Продовження Таблиці 2

Номинальне значення кутової швидкості обертання вала двигуна	$\omega_{M2.H}$	157,1 рад/с
Номинальне значення коефіцієнта двигуна по ЕРС	$C_{E.M2.H}$	1,323 Вс
Номинальне значення механічного моменту	$M_{M2.H}$	286,442 Нм
Номинальне значення електромагнітного моменту	$M_{EM2.H}$	304,120 Нм
Індуктивність якірного кола	$L_{M2.СЯ}$	$0,762 \times 10^{-3}$ Гн
Електромагнітна стала часу якірного кола	$T_{M2.СЯ}$	$14,409 \times 10^{-3}$ с
Електромагнітна стала часу обмотки збудження	$T_{M2.OB}$	$144,092 \times 10^{-3}$ с

Визначаємо момент, який відповідає втратам енергії в двигуні М2 при його роботі в номінальному режимі:

$$\Delta M_{M2.H} = M_{EM2.H} - M_{M2.H}.$$

Після підстановки отримаємо:

$$\Delta M_{M2.H} = 304,120 - 286,442 = 17,678 \text{ Нм}.$$

Синтез параметрів регуляторів системи регулювання швидкості

На рис. 3 показана розрахункова структурна схема системи регулювання швидкості двигуна М2, з релейним регулятором струму і з пропорційно-інтегруючим регулятором швидкості.

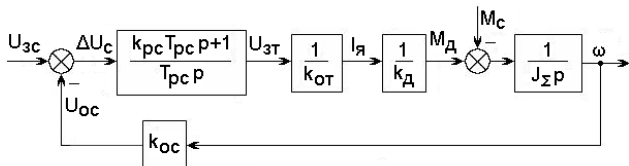


Рис. 3. Розрахункова структурна схема системи регулювання швидкості двигуна М2.

Для синтезу параметрів регуляторів системи регулювання швидкості двигуна М2 використовувався метод стандартних поліномів. Результати синтезу наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати синтезу параметрів регуляторів системи регулювання швидкості двигуна М2

Параметр	Позначення	Числове значення
Максимальне значення якірного струму	$I_{M2.Y.MAX}$	$2 \times 229,862 \text{ А}$
Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом якіря	$k_{M2.OT}$	$21,752 \times 10^{-3} \text{ В/А}$

Продовження Таблиці 3

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю	$k_{M2.OC}$	$63,654 \times 10^{-3} \text{ Вс}$
Сумарний момент інерції електропривода	J_{Σ}	$9,496 \text{ кгм}^2$
Середньогометричний корінь характеристичного полінома системи регулювання швидкості	Ω_0	$5,0 \text{ рад/с}$
Коефіцієнт підсилення пропорційної складової вихідного сигналу ПІ-РС	k_{PC}	$24,528 \text{ Вс}$
Постійна часу інтегральної складової вихідного сигналу ПІ-РС	T_{PC}	$16,308 \times 10^{-3} \text{ с}$

На рис. 4 показані результати моделювання процесу запуску стенду, призначеного для проведення випробувань генератора постійного струму великої потужності з поверненням енергії. Моделювання виконувалося в середовищі Matlab-Simulink [7]. Графік 1 відповідає зміні струму в обмотці збудження досліджуваного генератора. Графік 2 відповідає зміні струму в обмотці збудження двигуна М1. Графік 3 відповідає зміні ЕРС, яка індукується в якірній обмотці генератора. Графік 4 відповідає зміні кутової швидкості обертання загального вала генератора, двигуна М1 і двигуна М2. Графік 5 відповідає зміні моменту навантаження, який створює генератор на валу двигунів М1 і М2. Графік 6 відповідає зміні моменту, який розвиває двигун М1. Графік 7 відповідає зміні моменту, який розвиває двигун М2.

На початку процесу пуску стенду двигун М2 розвиває великий пусковий момент (608 Нм), який в 2 рази перевищує номінальне значення електромагнітного моменту (304 Нм), оскільки максимальне значення струму, що протікає в якірній обмотці двигуна М2, є обмеженим контуром регулювання якірного струму на рівні $2I_{M2.Y.H}$. Оскільки на цьому інтервалі часу якірна обмотка двигуна М1 не є підключеною до якірної обмотки генератора, то струм $I_{M1-Y.H} = 0$. Тому випробуваний генератор не створює моменту навантаження на валу двигуна М1 і на валу двигуна М2. З цієї ж причини двигун М1 так само не розвиває рушійний момент (графіки 5 і 6). Розгін стенду здійснює двигун М2, який розвиває не тільки динамічний момент, але і момент $M_{ВТРАТ}$, який дорівнює механічному моменту, що відповідає втратам механічної енергії в стенді і втратам електромагнітної енергії в двигуні М1 і в генераторі, а також момент, який відповідає втратам енергії в двигуні М2 ($\Delta M_{M2.H}$).

Після закінчення процесу розгону стенду на інтервалі часу приблизно від 5 секунд до 10 секунд $M_{M2} = M_{ВТРАТ} + \Delta M_{M2.H} = 171,14$ Нм.

На початку процесу пуску струм в обмотці збудження двигуна М1 і в обмотці збудження генератора монотонно збільшується від 0А до номінального значення (7,175А) на протязі 1,822 секунди при похибці (-2%) від сталого значення струму (7,175А).

Розгін генератора триває приблизно 5 секунд. При цьому його кутова швидкість збільшується від нуля до заданого значення 157,1 рад/с з невеликим перерегулюванням (1,85%), а ЕРС, яка індукується в якірній обмотці випробуваного генератора, збільшується від 0В до 212,71 В також з невеликим перерегулюванням (1,85%).

Після того як закінчився процес пуску на інтервалі часу від 5 до 10 секунд включається комутатор. Оскільки при моделюванні розглядається випадок, при якому значення ЕРС, які індукуються в якірних обмотках двигуна М1 і генератора є однаковими, то стрибок якірного струму на цьому інтервалі часу є відсутнім.

У момент часу 10 секунд значення струму збудження двигуна М1 починає зменшуватися від номінального значення (7,175 А) до значення 6,05 А. Цей перехідний процес триває 1,04 секунди (графік 2). При цьому значення ЕРС, яка ін-

дукується в якірній обмотці двигуна М1 зменшується і стає менше ЕРС генератора. Під дією різниці цих ЕРС в якірній обмотці починає протікати струм 1074А (що є близьким до номінального значення якірного струму генератора - 1091,73А). При цьому струмі генератор створює момент навантаження 1454,35Нм на загальному валу двигунів М1 і М2. При цьому ж струмі двигун М1 розвиває рушійний момент 1353,59Нм (графік 6). Двигун М2 розвиває рушійний момент 272,1Нм (графік 7), що дорівнює різниці моменту навантаження, який створює генератор, і рушійного моменту, який розвиває двигун М1, плюс момент $M_{ВТРАТ}$, який дорівнює механічному моменту, що відповідає втратам механічної енергії в стенді і втратам електромагнітної енергії в двигуні М1 і в генераторі, а також момент, який відповідає втратам енергії в двигуні М2 ($\Delta M_{M2.H}$).

У процесі збільшення електричного навантаження генератора, а також в процесі збільшення механічного навантаження двигунів М1 і М2 швидкість вала генератора короткочасно зменшується до 156,77 рад/с, або на 0,21%. Аналогічно зменшується ЕРС генератора. Приблизно через 3 секунди кутова швидкість вала генератора і ЕРС генератора відновлюються до колишнього заданого значення.

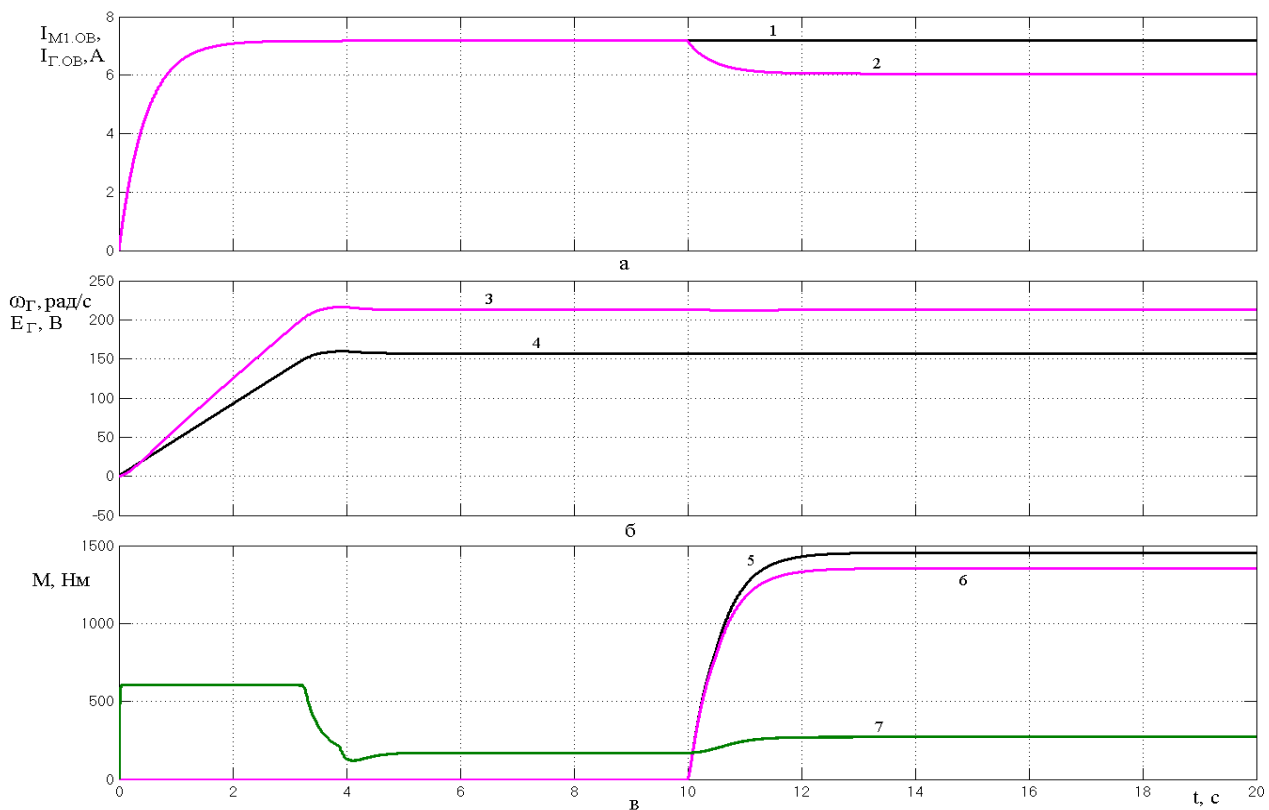


Рис. 4. Результати моделювання роботи стенду для проведення випробувань генератора постійного струму великої потужності з поверненням енергії.

Висновки

На підставі наведеного синтезу параметрів навантажувального стенду з взаємним навантаженням електричних машин, визначення параметрів привідного двигуна М2 і аналізу енергетичної ефективності розробленого стенду в порівнянні зі стендом з безповоротним поглинанням енергії можна зробити наступні висновки:

1. З виразу (1) випливає, що при використанні стенду для проведення випробувань генератора з безповоротним поглинанням енергії до генератора потужністю 220 кВт з ККД 91% треба подавати механічну енергію, потужність якої повинна дорівнювати 241,76 кВт.

При використанні стенду для проведення випробувань генератора з поверненням енергії до генератора потужністю 220 кВт з ККД 91% від привідного двигуна М2 треба подавати механічну енергію, потужність якої повинна дорівнювати 42,75 кВт.

Таким чином, використання стенду для проведення випробувань генератора з поверненням енергії дозволяє майже в 5,7 разів зменшити потужність механічної енергії, яка повинна бути подана до генератора потужністю 220 кВт з ККД 91%.

2. Оскільки на стенді з поверненням енергії (рис.2) можуть використовуватись дві електричні машини великої, але однакової потужності, причому не має значення, яка з них буде працювати в режимі двигуна, а яка - в режимі генератора, то можна встановити два генератора однакової потужності і провести дослідження будь-якого з них. При цьому другий генератор буде використовуватися як додатковий привідний двигун М1. Для цього потрібно підключити обмотку збудження одного з генераторів до системи управління напругою генератора, а обмотку збудження іншого генератора - до системи управління навантаженням генератора (рис.2). Таким чином, немає потреби мати на стенді постійно установленний додатковий привідний двигун великої потужності (двигун М1), який може не відповідати параметрам досліджуваного генератора. Можна проводити дослідження генераторів парами, що дозволить зменшити обсяг додаткової роботи по монтажу і демонтажу досліджуваних генераторів, і, отже, може істотно підвищити продуктивність стенду.

3. Застосування відносно малопотужної системи регулювання швидкості гонного двигуна М2, дозволило отримати високу стабільність регулювання кутової швидкості обертання валу досліджуваного генератора і високу стабільність регулювання ЕРС генератора.

Список використаної літератури

1. Стрижков, И. Г. Лабораторный практикум по электрическим машинам. Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений по специальности «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства». [Текст] / И. Г. Стрижков, Е. Н. Чеснюк // Краснодар: КубГАУ, 2006.- 296 с.

2. Кацман, М. М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу. [Текст] / М. М. Кацман, // М.: Высшая школа, 2001.

3. Маров, Д. Ю. Лабораторный комплекс для исследования режимов работы ветро-дизельной энергетической установки [Текст]/ Д. Ю. Маров // Современные техника и технологии(СТТ-2012): сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: Изд-во ТПУ, 2012, т.1, с.71–72.

4. Герман-Галкин, С. Г. Электрические машины. Лабораторные работы на ПК [Текст]/ С. Г. Герман-Галкин, Г. А. Кардонов // С.-Петербург, Корона принт, 2003.

5. Копылов, И. П. Электрические машины: Учеб. Для вузов. [Текст] / И. П. Копылов, // М.: Высш. Шк.; 2002.

6. Копылов, И. П. Справочник по электрическим машинам. В 2 томах. [Текст] / Под ред. И. П. Копылов и Б. К. Клокова. // М.: Энергоатомиздат, т.1, 1988; т.2, 1989.

7. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB-SimPowerSystem-Simulink. [Текст] / И. В. Черных. – СПб.: ПИТЕР, 2008. – 288 с.

8. Koczara W. Variable-Adjustable Speed Electricity Generation as Emerging Technology of Power Systems and Application to RES // Ecologic Vehicles and Renewable Energies International Conference EVER, Monaco, 26-29 March, 2009 [Electronic Resource]. – Режим доступа: <http://cmrt.centrale-marseille.fr/cpi/ever09/documents/papers/ps/EVER09-paper-plenary1.pdf>

9. Kurka O., Leuchter J. New Generation of Mobile Electrical Power Sources [Text] // The International Conference on Electrical Machines (ICEM 2000), Helsinki: ICEM Press, 2000, vol. III, pp. 1366–1369.

10. Leuchter J., Bauer P. Efficiency Investigation of Electrical Generator Converter Set [Text] // IEEEJ Transaction on Industry Applications, November 2007, Vol. 127, No. 10, pp. 1064–1069.

11. Leuchter J., Bauer P., Kurka O. Configuration for Mobile Electrical Power Source [Text] // The International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality

(PCIM EUROPE 2004), Nuremberg: PCIM Press, 2004, vol. 1, pp. 916–919.

12. Leuchter J., Rerucha V., Krupka Z., Bauer P. Dynamic Behavior of Mobile Generator Set with Variable Speed and Diesel Engine [Text] // The 38th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC 2007), Orlando : PESC Press, 2007, pp. 2287–2293.

References

1. Strizhkov, I. G., Chesnyuk, E. N. (2006), Laboratory workshop on electrical machines. Textbook. manual for stud. higher. study. institutions specializing in "Electrification and automation of agriculture." [Laboratornyy praktikum po elektricheskim mashinam. Ucheb. posobiye dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy po spetsi-al'nosti «Elektrifikatsiya i avtomatizatsiya sel'skogo khozyaystva»] - Krasnodar: KubGAU, - 296 p..

2. Katsman, M. M. (2001), Guide to laboratory work on electrical machines and electric drive [Rukovodstvo k laboratornym rabotam po elektricheskim mashinam i elektroprivodu], M. Higher school.

3. Marov, D. Yu. (2012), Laboratory complex for studying the operating modes of a wind-diesel power plant [Laboratornyy kompleks dlya issledovaniya rezhimov raboty vetro-dizel'noy energeticheskoy ustanovki]// Modern equipment and technologies (CTT-2012): collection of works of the XVIII International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists. Tomsk: TPU Publishing House, v. 1, p. 71–72.

4. German-Galkin, S. G., Kardonov, G. A. (2003), Electric cars. Laboratory work on PC [Elektricheskiye mashiny. Laboratornyye raboty na PK].-St. Petersburg, Corona print.

5. Kopylov, I. P. (2002), Electric machines: Textbook. For universities [Elektricheskiye mashiny: Ucheb. Dlya vuzov]. - M.: Higher. Shk. ;

6. Kopylov, I. P. (1988–1989), Handbook of

electrical machines. In 2 volumes. [Spravochnik po elektricheskim mashinam. V 2 tomakh] / Ed. I. P. Kopylova and B. K. Klokovala.-M.: Energoatomizdat, vol. 1, 1988; vol. 2, 1989.

7. Chernykh, I. V. (2008), Modeling of electrical devices in MATLAB-SimPowerSystem-Simulink [Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB-SimPowerSystem-Simulink], PITER, SPb, p. 288.

8. Koczara, W. (2009) Variable-Adjustable SpeedElectricity Generation as Emerging Technology of Power Systems and Application to RES // Ecologic Vehicles and Renewable Energies International Conference EVER, Monaco, 26–29 March, 2009 [Электронный ресурс] . – Режим доступа: <http://cmrt.centrale-marseille.fr/cpi/ever09/documents/papers/ps/EVER09-paper-plenary1.pdf>

9. Kurka, O., Leuchter, J. (2000) New Generation of Mobile Electrical Power Sources // The International Conference on Electrical Machines (ICEM 2000), Helsinki: ICEM Press, vol. III, pp. 1366–1369.

10. Leuchter, J., Bauer, P. (2007) Efficiency Investigation of Electrical GeneratorConverter Set // IEEJ Transaction on Industry Applications, November, Vol. 127, No. 10, pp. 1064–1069.

11. Leuchter, J., Bauer, P., Kurka, O. (2004) Configuration for Mobile Electrical Power Source // The International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM EUROPE 2004), Nuremberg: PCIM Press, vol. 1, pp. 916–919.

12. Leuchter, J., Rerucha, V., Krupka, Z., Bauer, P. (2007) Dynamic Behavior of Mobile Generator Set with Variable Speed and Diesel Engine // The 38th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC 2007), Orlando : PESC Press, , pp. 2287–2293.

STAND FOR RESEARCH GENERATORS OF MEDIUM AND HIGH POWER

D. V. Vershinin¹, V. A. Voitenko², E. A. Smotrov¹

¹OOO "Odessa SKB of special machines"

² Odessa Polytechnic State University

Abstract. The aim of the work is to synthesize the parameters of an energy-saving load stand with a mutual load of electrical machines. A functional diagram of a stand for testing high-power generators with irrecoverable energy absorption and with energy return and its reuse is considered. A comparative assessment of the power of mechanical energy, which must be supplied to the generator shaft at its nominal load, has been carried out. The energy-saving load stand includes two electric generators of the same power, one of which is used as an additional racing engine, and the second as an investigated generator and an adjustable electric drive designed to drive the investigated generator. The synthesis of parameters of an adjustable electric drive, which includes a subordinate armature current control loop with a relay current controller and an external speed control loop with a proportional-integrating speed controller, has been

carried out. As an example, the design of the developed energy-saving stand for electric machines with a capacity of 220 kW is considered. Modeling of the operation of an energy-saving load stand with mutual load of electrical machines in the Matlab-Simulink environment has been carried out. The analysis of the energy efficiency of the developed stand was carried out in comparison with the stand with irreversible energy absorption, which confirmed the high energy, static and dynamic characteristics of the developed stand with the mutual load of electrical machines. In particular, it was found that the use of an energy-saving stand for testing a 220 kW generator with an efficiency of 91% makes it possible to almost 6 times reduce the power of mechanical energy that must be supplied to the generator shaft at the stand with irreversible energy absorption.

Key words: generator, racing motor, regulation, current, power, energy, efficiency.

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ СРЕДНЕЙ И БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Д. В. Вершинин¹, В. А. Войтенко², Е. А. Смотров¹

¹ООО «Одесское СКБ специальных станков»

² Государственный университет «Одесская политехника»

Аннотация. Рассмотрена функциональная схема энергосберегающего стенда для проведения испытаний и исследований генераторов средней и большой мощности с возвратом энергии и с повторным ее использованием для обеспечения нужной скорости вращения вала генератора, который проходит испытания или исследования. В состав стенда входит два электрических генератора одинаковой мощности, один из которых используется как дополнительный гонный двигатель, а другой генератор используется как тот, что проходит испытания или исследования. Приведен пример проектирования энергосберегающего стенда, который подтвердил высокие энергетические, статические и динамические характеристики энергосберегающего стенда.

Ключевые слова: генератор, гонный двигатель, система регулирования, ток, мощность, энергия, эффективность.

Получено 13.04.2021.



Вершинин Дмитро Веніамінович, Одеське Спеціальне Конструкторське Бюро Спеціальних Верстатів, інженер-дослідник. Просп. Гагарина, 25, Одеса, Україна, E-mail: ukrniisip@gmail.com, тел. +38-050-652-41-13.

Dmitro Vershinin, Odessa Special Design Bureau of Special Machine Tools, research engineer. Prosp. Gagarina, 25, Odessa, Ukraine, E-mail: ukrniisip@gmail.com, tel. + 38-050-652-41-13.

ORCID ID: 0000-0002-3395-4199



Войтенко Володимир Андрійович, Державний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханічної інженерії. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: elektrik.wa.@gmail.com, тел. +38-048-705-84-67.

Volodimir Voytenko, Odessa Polytechnic State University, Ph.D, Associate Professor of the department of electromechanical systems with computer control. Shevchenko ave, 1, Odessa, Ukraine. E-mail: elektrik.WA.@gmail.com, tel. +38-048-705-84-67.

ORCID ID: 0000-0002-2525-6913.



Смотров Євген Олександрович, Одеське Спеціальне Конструкторське Бюро Спеціальних Верстатів, канд. техн. наук, завідуючий сектором. Просп. Гагарина, 25, Одеса, Україна, E-mail: ukrniisip@gmail.com, тел. +38-067-486-44-18.

Eugen Smotrov, Odessa Special Design Bureau of Special Machine Tools, Ph.D, head. Prosp. Gagarina, 25, Odessa, Ukraine, E-mail: ukrniisip@gmail.com, tel. + 38-067-486-44-18.

ORCID ID: 0000-0002-7456-6029