

# МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSIS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.313, УДК 621.314

DOI 10.20535/1813-5420.4.2022.273435

О.М. Галіновський, канд. техн. наук, доцент. ORCID 0000-0002-2097-4545

М.О. Реуцький, канд. техн. наук, доцент. ORCID 0000-0003-1870-2222

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

О.О. Ленська. ORCID 0000-0002-7114-4840

Держане агентство з енергоефективності та енергозбереження України

директор Департаменту розвитку відновлюваної енергетики

## ДІОДНІ ЗБУДНИКИ БЕЗЩІТКОВОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

*Метою роботи є порівняльний аналіз параметрів діодного збудника безщіткового синхронного генератора середньої потужності від числа пар полюсів допоміжної електричної машини, розробка рекомендацій по вибору числа пар полюсів допоміжної електричної машини та конструкції збудника.*

*Проводиться попередній електромагнітний розрахунок допоміжної електричної машини з урахуванням початкового значення відносної величини результуючої електрорушійної сили, допустимих значень індукцій на всіх ділянках магнітопроводу в режимі форсування, визначаються довжина магнітопроводу і опори обмотки ротора. За наслідками розрахунку моделі випрямляча в квазісталому режимі роботи уточнюється відносна величина результуючої електрорушійної сили допоміжної електричної машини. Узгоджуються параметри допоміжної електричної машини, випрямляча, уточнюється довжина збудника в цілому. При збільшенні числа пар полюсів допоміжної електричної машини: зменшуються втрати в обмотках, маса міді і сталі; збільшуються втрати в сталі, індуктивний опір обмотки ротора; знижується якість вихідної напруги збудника. Рекомендуються застосування допоміжної електричної машини, яка забезпечує найбільший коефіцієнт корисної дії збудника, найменшу потужність автоматичного регулятора збудження, найменшу загальну довжину збудника.*

**Ключові слова:** діодний, збудник, безщітковий, синхронний, генератор, методика розрахунку.

**Вступ.** На даний час синхронні генератори середньої потужності в основному випускаються в безщітковому виконанні. Безщіткова синхронні генератори (БСГ) широко застосовуються у вітроенергетиці, гідроенергетиці, в дизельенергетических і інших установках.

Збудником БСГ називається пристрій, що призначений для живлення постійним струмом обмотки збудження синхронного генератора (СГ) і представляє випрямляч в комплексі з допоміжною електричною машиною (ДЕМ). Найчастіше застосовується ДЕМ синхронного типу [1].

У БСГ середньої потужності для зменшення довжини лобових частин приймають число пар полюсів ДЕМ [1]  $p_v = (2 \div 8) p$ , де  $p$  - число пар полюсів СГ. З метою поліпшення масогабаритних показників і спрощення конструкції БСГ збудник вбудовують в корпус СГ. Оптимальним для вентилів є їх розміщення на окремому колесі. Але при такій компоновці отримуємо значну довжину збудника. Зменшити довжину збудника можна при розміщенні вентилів на роторі збудника.

До збудників крім вимог, що пред'являються до систем збудження БСГ в цілому (простота, надійність та інші), пред'являються дві основні вимоги: швидкодія регулювання і висока якість форми вихідної напруги [1]. У діодних збудниках необхідна швидкість форсування збудження СГ досягається за рахунок підвищення стельової напруги збудження ДЕМ. Коефіцієнт форсування напруги збудження СГ  $k_F = 1.8 \div 2,75$  і більше. При форсовці максимальне значення струму збудження СГ обмежується за рахунок насичення магнітної ланки ДЕМ.

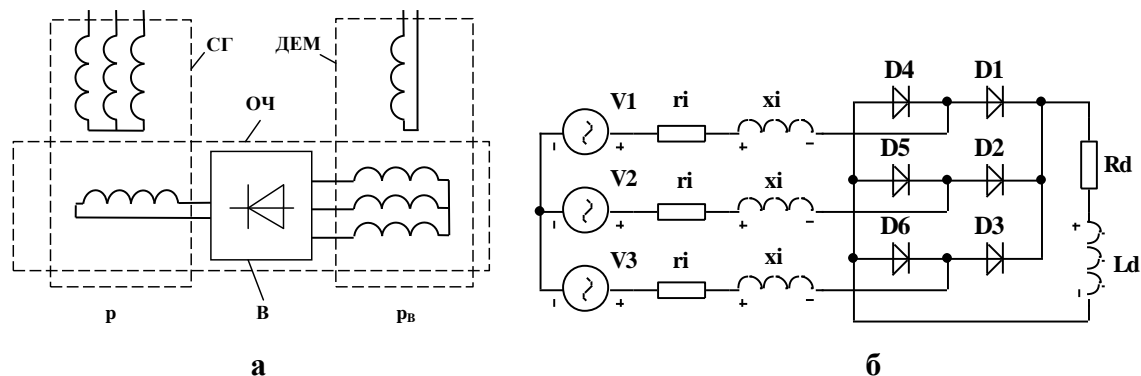
На базі БСМ розробляються безщіткові асинхронізовані машини (БАСМ). Методики розрахунків електромашинно-вентильних перетворювачів БАСМ розробляються на базі методик розрахунків

збудників БСМ [5]. Тому вдосконалення методик розрахунків діодних і тиристорних збудників БСМ є вельми актуальним. У роботі [6] зіставлені параметри збудників БСГ середньої потужності при застосуванні діодних і тиристорних випрямлячів з мостовими схемами перетворення. Параметри збудників з однаковим числом пар полюсів ДЕМ узгоджені за результатами розрахунків основних співвідношень моделей їх випрямлячів в системі Micro-Cap. При розробці збудників автономних БСГ особлива увага приділяється питанням поліпшення їх техніко-економічних показників. Важливими питаннями є зменшення габаритних розмірів, поліпшення якості форми вихідної напруги збудника.

**Мета роботи:** порівняльний аналіз параметрів діодного збудника безщіткового синхронного генератора середньої потужності від числа пар полюсів допоміжної електричної машини (ДЕМ) синхронного типу, розробка рекомендацій по вибору числа пар полюсів ДЕМ і конструкції збудника.

**1. Параметри і розрахункові співвідношення трифазного мостового випрямляча.**

На рис. 1 показані принципова електрична схема збудника (а) і електрична схема трифазного мостового випрямляча (б). Прийняті позначення: ОЧ – обертова частина, В – випрямляч; V1, V2, V3 – джерела ЕРС;  $r_i$ ,  $x_i$  – активні і індуктивні опори джерела живлення;  $R_d$ ,  $L_d$  – активний опір і індуктивність навантаження випрямляча.



**а** **б**  
Рисунок 1 – Принципова електрична схема збудника (а) та електрична схема випрямляча в системі Micro-Cap (б)

У роботах [4, 5] при порівняльному аналізі багатофазних випрямлячів всі характеристики будуються в системі відносних одиниць навантаження (в.о.н.) трифазного мостового випрямляча, в якому базовими величинами прийняті напруга холостого ходу і струм короткого замикання випрямляча:

$$U_{d0} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \cdot E_i; I_{dk} = \frac{\sqrt{2}E_i}{z_i},$$

де  $E_i$ ,  $z_i$  – діюче значення ЕРС і повний опір джерела живлення.

У табл. 1 приведений алгоритм розрахунку параметрів і основних співвідношень моделі  $m_i$ -фазного випрямляча в системі Micro-Cap. Позначення у формулах:  $m_i$ ,  $e_{ij}$ ,  $i_{ij}$  – число фаз, миттєві значення ЕРС і струму  $j$ -ї фази джерела живлення;  $u_{Dj}$ ,  $i_{Dj}$  – напруга і струм  $j$ -го вентиля;  $R_f$  – активний опір захисної ланки вентиля;  $i_{fj}$  – струм через  $j$ -у захисну ланку;  $e'_{ij}$  – ЕРС  $j$ -ї фази додаткового джерела живлення;  $E_{IZ}$ ,  $I_{1IZ}$ ,  $I_{IZ}$  – відносні величини діючих значень ЕРС, струму першої гармоніки і повного струму джерела живлення. Фазні ЕРС додаткового джерела живлення зміщені на  $90^\circ$  по відношенню до фазних ЕРС основного джерела живлення.

Розрахунки випрямляча проводяться при відомих параметрах джерела живлення, вентилів і захисних ланок вентилів в квазістаціонарному або перехідному режимі роботи.

Розрахунок випрямляча в перехідному режимі роботи проводиться при  $R_d = 0$  і заданій величині  $L_d$ . Записуємо результати розрахунків випрямляча в перехідному режимі від холостого ходу до короткого замикання. Далі в середовищі Mathcad визначаємо шукані величини на періоді частоти ЕРС джерела живлення відповідно до формул табл. 1.

За наслідками розрахунків моделі трифазного мостового випрямляча [6] на рис. 2 побудовані залежності  $E_{IZ}$ ;  $I_{IZ}$ ;  $I_{1IZ}$ ;  $E_{IZ} = f(M_z)$  при різних значеннях відносної величини активного опору джерела живлення  $k_r = r_i / x_i$ .

Відносна величина повного опору трифазного мостового випрямляча для БСГ різних потужностей змінюється в межах:  $M_z = 0.08 \div 0.26$  [6]. При цьому:  $E_{IZ} = 0.47 \div 0.63$ ;  $I_{1IZ} = 0.774 \div 0.762$ ;  $I_{IZ} = 0.789 \div 0.769$ .

Середні значення вищенаведених величин:  $E_{IZS} = 0.55$ ;  $I_{1IZS} = 0.768$ ;  $I_{IZS} = 0.779$ .

Найбільші відхилення від середніх значень:  $\Delta E_{IZ} = 17\%$ ;  $\Delta I_{1IZ} = 0.91\%$ ;  $\Delta I_{IZ} = 1.5\%$ .

Середні значення відносних величин ЕРС і струмів джерела живлення використовуються при попередньому електромагнітному розрахунку ДЕМ збудників.

У роботі [6] відмічена важлива властивість випрямлячів: m-фазні випрямлячі з однаковою схемою перетворення і однаковими величинами  $M_z$  і  $k_r$  подібні, вони мають практично однакові розрахункові співвідношення  $E_{iz}$ ,  $I_{i1z}$ ,  $I_{iz}$  незалежно від потужності, амплітуди і частоти ЕРС джерела живлення.

Таблиця 1 – Алгоритм розрахунку діодного випрямляча

№ п.п.	Величина	Позначення		Формула
		Аналітичне	Micro-Cap	
1	Струм навантаження випрямляча	$I_d$	Id	$\frac{1}{T} \int_0^T i_d dt$
2	Напруга навантаження випрямляча	$U_d$	Ud	$\frac{1}{T} \int_0^T u_d dt$
3	Активна потужність по 1-ій гармоніці джерела живлення	$P_{i1}$	Pi1	$\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{mi} e_{ij} \cdot i_{ij} \right) dt$
4	Реактивна потужність по 1-ій гармоніці джерела живлення	$Q_{i1}$	Qi1	$\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{mi} e'_{ij} \cdot i_{ij} \right) dt$
5	Діюче значення повного струму джерела живлення	$I_i$	Ii	$\frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{\frac{1}{m_i} \sum i_{ii}^2} dt$
6	Втрати на вентилях	$p_D$	pD	$\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{nD} u_{Dj} \cdot i_{Dj} \right) dt$
7	Втрати на захисних ланкаї вентилів	$p_{Rf}$	pRf	$\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{nD} i_{Fj}^2 R_F \right) dt$
8	Коефіцієнт вищих гармонік напруги навантаження	$k_{iu}$	kiu	$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{u_d}{U_d} \right)^2 dt} - 1$
9	Коефіцієнт спотворення напруга навантаження	$k_{su}$	ksu	$\sqrt{1 + k_{iu}^2}$
10	Втрати в джерелі живлення	$p_i$	pi	$m \cdot I_i^2 R_f$
11	Повна потужність по 1-ій гармоніці джерела живлення	$S_{i1}$	Si1	$\sqrt{P_{i1}^2 + Q_{i1}^2}$
12	Коефіцієнт потужності по 1-ій гармоніці джерела живлення	$\cos\varphi_1$	cosf1	$P_{i1}/S_{i1}$
13	Діюче значення 1-ої гармоніки струму джерела живлення	$I_{i1}$	Ii1	$S_{i1}/(m_i \cdot E_i)$
14	Коефіцієнт спотворення струму джерела живлення	$\lambda$	kis	$I_{i1}/I_i$
15	Потужність навантаження випрямляча	$P_d$	Pd	$U_d \cdot I_d$
16	ККД випрямляча	$\eta$	KPD	$P_d/P_{i1}$
17	Коефіцієнт збільшення потужності джерела живлення	$k_s$	ks	$1/(\cos\varphi_1 \cdot \lambda \cdot \eta)$
18	Опір навантаження випрямляча	$R_d$	Rd	$U_d/I_d$
19	Відносна величина ЕРС	$E_{iz}$	Eiz	$E_i/U_d$
20	Відносна величина струму 1-ої гармоніки джерела живлення	$I_{i1z}$	Ii1z	$I_{i1}/I_d$
21	Відносна величина повного струму джерела живлення	$I_{iz}$	Iiz	$I_{i1z}/\lambda$
22	Відносна величина повного опору джерела живлення	$M_z$	Mz	$z_i/R_d$

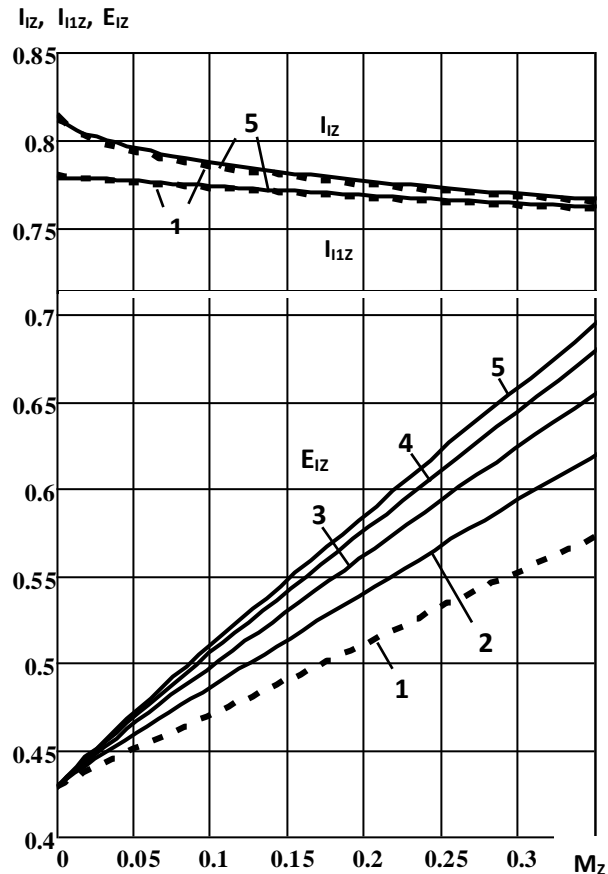


Рисунок 2 – Залежності  $E_{IZ}$ ;  $I_{1IZ}$ ;  $I_{IZ} = f(M_z)$  при: 1)  $k_f=0$ ; 2)  $k_f=0,25$ ; 3)  $k_f=0,5$ ; 4)  $k_f=0,75$ ; 5)  $k_f=1$

## 2. Вхідні дані і послідовність розрахунку збудників.

Розрахунок збудників проводиться при відомих конструкціях СГ і ДЕМ, відомих параметрах збудження СГ в номінальних і форсировочних режимах роботи.

На рис. 3 показані конструкції діодних збудників БСГ середньої потужності. У збудниках застосовуються ДЕМ неявнополюсного виконання. На рис. 3,а збудник розміщений в корпусі СГ, вентиля розміщені на окремому колесі. Позначення на рисунку: 1 – випрямляч; 2, 3 – статор і ротор ДЕМ. На рис. 3,б вентиля розміщені на роторі збудника.

Розрахунки проводяться при допущеннях: ЕРС повітряного зазору ДЕМ  $E_\delta$  синусоїдальна; ЕРС джерела живлення випрямляча  $E_i = E_\delta$ ; активний і індуктивний опори джерела живлення випрямляча рівні активному і індуктивному опорам обмотки якоря ДЕМ. Параметри ДЕМ узгоджуються з результатами розрахунків основних співвідношень моделей випрямлячів в системі Місто-Сар.

Проведемо розрахунок збудників БСГ потужністю 250 кВт (БСГ-250). Номінальні параметри СГ:  $P_{IN} = 250$  кВт;  $U_{IN} = 400$  В;  $\cos\phi_{IN} = 0.85$ ;  $f_1 = 50$  Гц. Параметри збудження:  $U_{IN} = 54$  В;  $I_{IN} = 54$  А;  $R_{FN} = 1$  Ом. Число пар полюсів СГ  $p = 2$ . Коефіцієнт форсировки напруги збудження СГ  $k_F = 2$ .

Числа пар полюсів ДЕМ  $p_B = 2; 4; 8$ . Частота ЕРС якорної обмотки ДЕМ

$$f_{2B} = p_B \cdot f_1 / p. \quad (1)$$

Діаметр розточки статора ДЕМ  $D = 293$  мм, повітряний зазор  $\delta = 1.2$  мм, діаметр ротора  $D_2 = 290.6$  мм (рис. 3,в). У ДЕМ з різними величинами  $p_B$  ротори мають однакове число зубців, однакове зубцеве ділення  $t_{Z2}$ , однакову найменшу ширину зубця  $b_{Z2min}$ , однакове число витків на фазу  $w_2$ .

При розрахунку ДЕМ коефіцієнт форсировки ЕРС приймається рівним коефіцієнту форсировки напруги збудження СГ. Розрахунок ДЕМ з різними числами пар полюсів проводимо при однакових величинах індукцій на всіх ділянках магнітопроводу у форсировочному режимі.

На рис. 4 показана структурна схема розрахунку діодного збудника БСГ.

Каталожні і довідкові дані: криві намагнічування сталі; коефіцієнти заповнення пакетів сталі статора і ротора ( $k_{c1}$  і  $k_{c2}$ ); допустимі значення індукцій на ділянках магнітопроводу ДЕМ ( $B_{Z1max}$ ,  $B_{Z2max}$ ,  $B_{a1F}$ ,  $B_{a2F}$ ); питомі опори провідників і інші величини.

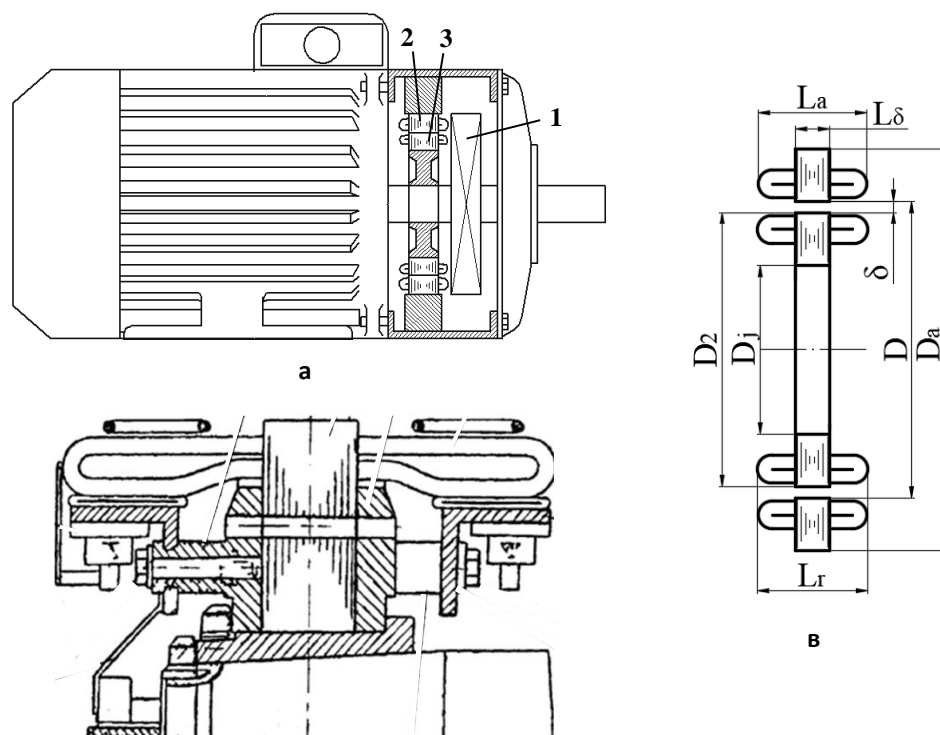


Рисунок 3 – Конструкція діодного збудника безщіткового синхронного генератора

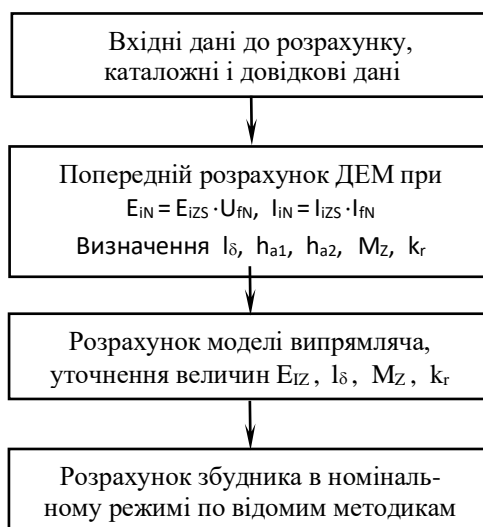


Рисунок 4 – Структурна схема розрахунку діодного збудника БСГ

Каталожні і довідкові дані: криві намагнічування сталі; коефіцієнти заповнення пакетів сталі статора і ротора ( $k_{c1}$  і  $k_{c2}$ ); допустимі значення індукцій на ділянках магнітопроводу ДЕМ ( $B_{Z1max}$ ,  $B_{Z2max}$ ,  $B_{a1F}$ ,  $B_{a2F}$ ); питомі опори провідників і інші величини.

Виконуємо попередній електромагнітний розрахунок ДЕМ при номінальних величинах результуючої ЕРС і струмів ротора:

$$E_{iN} = E_{iZS} \cdot U_{fN}; I_{i1N} = I_{iZS} \cdot I_{fN}; I_{iN} = I_{iZS} \cdot I_{fN}. \quad (2)$$

Величина  $I_{iN}$  визначає перетин проводу роторної обмотки СГ.

У режимі форсировки по величині результуючої ЕРС

$$E_{iF} = k_F \cdot E_{iN} \quad (3)$$

і допустимим значенням індукцій на ділянках магнітопроводу визначаємо індукцію і потік повітряного зазору, довжину магнітопроводу і висоти ярем статора і ротора.

Індукція повітряного зазору в режимі форсування

$$B_{\delta F} = B_{z2\max} \cdot \frac{b_{z2\min} \cdot k_{c2}}{t_{z2}} \quad (4)$$

Потік повітряного зазору в режимі форсування

$$\Phi_{\delta F} = \frac{E_{iF}}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_{2B} \cdot w_2 \cdot k_{w2}}, \quad (5)$$

де обмоточний коефіцієнт  $k_{w2}$  змінюється із зміною величини  $p_b$ .

Довжина магнітопроводу

$$l_{\delta} = \frac{p_b \cdot \Phi_{\delta F}}{D \cdot B_{\delta F}} \cdot 10^6 \quad (6)$$

Висота ярма статора

$$h_{a1} = \frac{\Phi_{\delta F} \cdot 10^6}{2 \cdot B_{a1F} \cdot l_{\delta} \cdot k_{c1}} \quad (7)$$

Висота ярма ротора

$$h_{a2} = \frac{\Phi_{\delta F} \cdot 10^6}{2 \cdot B_{a2F} \cdot l_{\delta} \cdot k_{c1}} \quad (8)$$

Визначаємо зовнішній діаметр магнітопроводу  $D_a$ , внутрішній діаметр сердечника ротора  $D_j$ , довжину статора  $l_a$  і довжину ротора  $l_r$  (рис. 3,в), опори обмоток ротора і статора, величини  $M_z$  і  $k_r$ .

Геометрія листів сталі, перетин провідників, обмоточні коефіцієнти, які розраховані на етапі попереднього електромагнітного розрахунку ДЕМ, при подальших розрахунках залишаються незмінними.

Попередній електромагнітний розрахунок ДЕМ виконується при середньому значенні відносної величини результуючої ЕРС ДЕМ (відносної величини ЕРС джерела живлення випрямляча)  $E_{iZ}$ . Як видно з рис. 2, величина  $E_{iZ}$  істотно залежить від розрахункових величин  $M_z$  і  $k_r$ . Відповідно до (2) ÷ (6) при незмінних величинах індукцій на ділянках магнітопроводу від величини  $E_{iZ}$  залежить довжина магнітопроводу  $l_{\delta}$ .

Величина  $E_{iZ}$  уточнюється при розрахунку основних співвідношень моделі випрямляча в квазісталому режимі роботи.

### 3. Узгодження параметрів допоміжного генератора і випрямляча

Модель випрямляча побудована в системі Micro-Cap на діодах MR2510D.

Номинальні параметри навантаження моделі випрямляча:  $U_{dN} = 56$  В;  $I_{dN} = 8$  А;  $R_d = 7$  Ом.

Параметри джерела живлення:

$$z_i = M_z \cdot R_d; \quad r_i = k_r \cdot R_d; \quad x_i = \sqrt{z_i^2 - r_i^2},$$

де величини  $M_z$  і  $k_r$  підставляються з результатів електромагнітного розрахунку ДЕМ.

Розраховуємо моделі випрямляча в квазісталом режимі роботи. На рис. 5 показані результати розрахунку моделі випрямляча для збудника на базі ДЕМ з числом пар полюсів  $p_b = 2$ ,  $f_i = 50$  Гц. Показані вхідні і розраховані величини випрямляча.

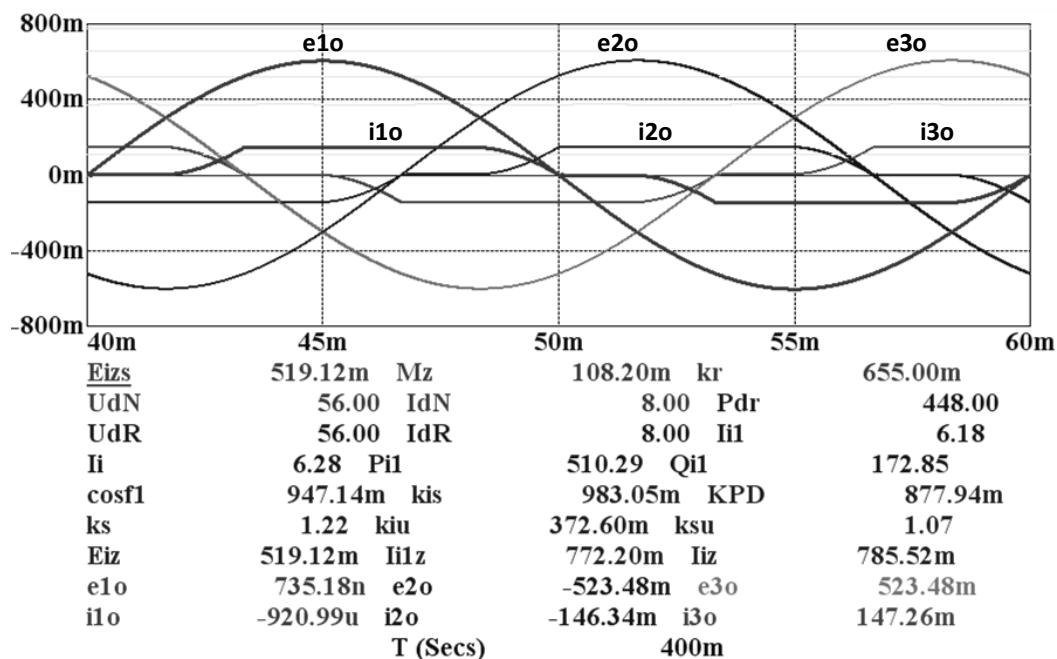


Рисунок 5 – Результат розрахунку моделі випрямлячів при числі пар полюсів ДЕМ  $p_B = 2$

Вхідні величини:  $E_{iz} = 0.5191$ ,  $M_z = 0.16$ ,  $kr = 0.217$  – уточнені відносних величини ЕРС повного і активного опорів джерела живлення;  $U_{dN} = 56$ ,  $I_{dN} = 8$  – напруга (В) і струм (А) навантаження моделі випрямляча в номінальному режимі роботи.

Розраховані величини:  $P_{dr}$ ,  $U_{dr}$ ,  $I_{dr}$  – потужність (Вт), напруга (В) і струм (А) навантаження;  $I_{i1}$ ,  $I_i$  – діючі значення струмів 1-ої гармоніки і повного струму джерела живлення (А);  $P_{i1}$ ,  $Q_{i1}$  – активна (Вт) і реактивна (ВАр) потужності джерела живлення;  $\cos\phi_1$  – коефіцієнт потужності по 1-ій гармоніці джерела живлення;  $k_{is}$  – коефіцієнт спотворення струму джерела живлення; KPD – коефіцієнт корисної дії випрямляча;  $k_s$  – коефіцієнт збільшення потужності джерела живлення;  $k_{iu}$ ,  $k_{su}$  – коефіцієнт вищих гармонік і коефіцієнт спотворення напруги навантаження;  $E_{iz}$ ,  $I_{i1z}$ ,  $I_{iz}$  – відносні величини ЕРС і струмів джерела

живлення;  $e_{1o}$ ,  $e_{2o}$ ,  $e_{3o}$ ,  $i_{1o}$ ,  $i_{2o}$ ,  $i_{3o}$  – миттєві значення ЕРС і струмів джерела живлення в системі відносних одиниць навантаження (в.о.н.) випрямляча.

В процесі узгодження параметрів роторної обмотки ДЕМ і моделі випрямляча уточнюються відносні величини ЕРС, струмів, повного і активного опорів джерела живлення ( $E_{iz}$ ,  $I_{i1z}$ ,  $I_{iz}$ ,  $M_z$  і  $k_r$ ), довжина пакету магнітопроводу, довжина ротора, активний і індуктивний опори роторної обмотки.

Остаточний розрахунок збудника проводимо по методиках [3, 6].

Всі розрахунки виконані при використанні програм Mathcad і Micro-Cap.

#### 4. Порівняльний аналіз збудників з різними числами пар полюсів ДЕМ.

У табл. 2 приведені результати розрахунків параметрів діодних збудників БСГ-250 з числами пар полюсів ДЕМ  $p_B = 2; 4; 8$ .

При збільшенні  $p_B$  зменшуються вильоти лобових частин обмоток, що приводить до зменшення втрат в обмотках, зменшення загальної маси міді. Зменшення висот ярем статора і ротора ДЕМ приводить до істотного зменшення загальної маси сталі. Проте при цьому збільшується частота ЕРС роторної обмотки ДЕМ, що приводить до істотного збільшення втрат в сталі ротора, збільшенню індуктивного опору обмотки, збільшенню відносної величини повного опорів  $M_z$ . Тому при збільшенні  $p_B$  знижується якість форми кривої вихідної напруги збудника (збільшується коефіцієнт спотворення напруги  $k_{su}$ ).

Як слідує з табл. 2, при збільшенні числа пар полюсів ДЕМ від  $p_B = 2$  до  $p_B = 8$  зменшуються довжина ДЕМ в 1.5 рази, маса сталі в 2.5 рази, маса міді в 2.1 рази. Проте при збільшенні  $p_B$  збільшуються втрати в сталі в 2.25 рази, коефіцієнт спотворення напруги навантаження збільшується від  $k_{su} = 1.06$  до  $k_{su} = 1.08$ .

У збуднику БСГ-250 доцільне застосувати ДЕМ з числом пар полюсів  $p_B = 4$ . У такому збуднику найбільший ККД ( $\eta_f = 0.8274$ ), найменша потужність збудження ДЕМ ( $P_{FB} = 205$  Вт), а значить, – найменша потужність автоматичного регулятора збудження. Порівняно великий внутрішній діаметр сердечника і довжина ротора ДЕМ принципово дозволяють розмістити діоди випрямляча під лобовими частинами

обмотки ротора (рис. 2,б). При цьому істотно зменшується загальна довжина збудника. Довжина збудника рівна довжині ротора ДЕМ ( $l_r = 200$  мм).

Таблиця. 2 – Параметри діодних збудників з різними числами пар полюсів ДЕМ

№ п.п.	Величина	Позначення	Одиниці виміру	Число пар полюсів ДЕМ		
				$p_B = 2$	$p_B = 4$	$p_B = 8$
Розрахункові розміри і маса ДЕМ						
1	Довжина магнітопровода	$l_\delta$	мм	65.4	63.9	61
2	Зовнішній діаметр магнітопровода	$D_a$	мм	417.1	386.6	368.7
3	Внутрішній діаметр сердечика ротора	$D_j$	мм	145.3	195	219.9
4	Довжина ротора	$l_r$	мм	261.4	198.3	170.8
5	Довжина статора	$l_a$	мм	265	196	137
6	Загальна маса сталі	$m_c$	кг	44.5	28	18.2
7	Загальна маса міді	$m_m$	кг	42	28.4	20
Напруга, потужності і струми збудника						
8	Результуюча ЕРС ДЕМ	$E_{\delta N}$	В	28.04	27.63	28.27
9	Струм ротора ДЕМ	$I_{i1}$	А	41.71	41.66	41.48
10	Активна потужність ДЕМ	$P_{i1}$	Вт	3321.9	3221.7	3178.5
11	Розрахункова потужність ДЕМ	$S_2$	ВА	3557.5	3499.2	3557.5
12	Втрати в сталі ДЕМ	$p_{ст}$	Вт	59.6	83	136.3
13	Потужність збудження ДЕМ	$P_{fB}$	Вт	218	205.1	256.7
14	Напруга статора ДЕМ	$U_{iBN}$	В	89	70.6	63.91
15	Струм статора ДЕМ	$I_{iBN}$	А	2.45	2.91	4.02
Розрахункові коефіцієнти						
16	Активний опір джерела живлення	$k_r$	в.о.	0.655	0.389	0.222
17	Повний опір джерела живлення	$M_Z$	в.о.	0.1082	0.1132	0.154
18	ЕРС джерела живлення	$E_{iZ}$	в.о.	0.5192	0.5116	0.5235
19	Повний струм джерела живлення	$I_{iZ}$	в.о.	0.7856	0.7836	0.7778
20	1-а гармоніка струму джерела живлення	$I_{i1Z}$	в.о.	0.7723	0.7712	0.7681
21	Коефіцієнт вищих гармонік напруги навантаження	$k_{iu}$	-	0.3643	0.3768	0.406
22	Коефіцієнт спотворення напруга навантаження	$k_{su}$	-	1.06	1.07	1.08
23	Коефіцієнт спотворення струму	$k_{is}$	-	0.983	0.9842	0.9875
24	Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi_1$	-	0.9469	0.9333	0.9038
25	ККД випрямляча	$\eta$	-	0.8778	0.9051	0.9174
26	ККД збудника	$\eta_f$	-	0.8068	0.8274	0.8131
27	Коефіцієнт збільшення розрахунковій потужності ДЕМ	$k_S$	-	1.22	1.2	1.22

#### Висновки

1. При збільшенні числа пар полюсів ДЕМ зменшуються втрати в обмотках, загальна маса міді і сталі. При цьому збільшуються втрати в сталі, індуктивне опори обмотки ротора, знижується якість форми кривої вихідної напруги збудника.

2. У БСГ-250 рекомендується застосувати ДЕМ з числом  $p_B = 4$ . У збуднику найбільший ККД, найменша потужність збудження. Принципово можливе зменшення загальної довжини збудника при розміщенні діодів під лобовими частинами обмотки ротора.



**Список використаної літератури**

1. Глебов И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. – Ленинград: Наука, 1988. – 322 с.
2. ГОСТ 21558-2000 / Межгосударственный стандарт. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов // Общие технические условия, – 2003–07–01
3. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник. для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с. .
4. Галіновський О.М. Параметри і характеристики напівпровідникових випрямлячів вентильних генераторів // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 88. – с. 47–55.
5. Галіновський О.М., Ленська О.О., Мельник М.П. Безпосередні перетворювачі частоти з штучною і природною комутацією в безконтактних асинхронізованих машинах // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 5. – С. 23-30.
6. Галіновський О.М., Дубчак Є.М., Ленська О.О. Порівняльний аналіз діодних і тиристорних збудників безщіткових синхронних машин // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Проблеми удосконалення електричних машин та апаратів. – Х.: НТУ «ХПІ», – 2019. – №2. – с. 41-45.

**O. Galinovskyi**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-2097-4545

**M. Reytskiy**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-1870-2222

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

**O. Lenska** **ORCID** 0000-0002-7114-4840

**State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine,  
Director of the Renewable Energy Development Department**

**DIODE EXCITERS OF A BRUSHLESS MEDIUM POWER SYNCHRONOUS GENERATOR**

*The aim of the work is a comparative analysis of the parameters of the diode exciter of a brushless synchronous generator of medium power on the number of pole pairs of an auxiliary electric machine, the development of recommendations for choosing the number of pole pairs of an auxiliary electric machine and the design of the exciter.*

*An improvement of the automated method of electromagnetic calculation of the exciter of a brushless synchronous machine has been carried out. The diode exciters of a brushless synchronous generator with a power of 250 kW with the number of pole pairs  $p = 2$  based on a three-phase bridge rectifier and an auxiliary electric machine of a synchronous type with different numbers of pole pairs are compared. At the first stage, a preliminary electromagnetic calculation of the auxiliary electric machine is performed, taking into account the initial value of the relative magnitude of the resulting electromotive force, the allowable values of inductions in all sections of the magnetic circuit in in forced mode, the length of the magnetic circuit and the rotor winding support are determined. According to the results of the calculation of the rectifier model in the quasi-steel mode of operation, the relative value of the resulting electromotive force of the auxiliary electric machine is specified.*

*At the first stage, a preliminary electromagnetic calculation of the auxiliary electric machine is performed, taking into account the initial value of the relative magnitude of the resulting electromotive force, the allowable values of inductions in all sections of the magnetic circuit in in forced mode, the length of the magnetic circuit and the rotor winding support are determined. According to the results of the calculation of the rectifier model in the quasi-steel mode of operation, the relative value of the resulting electromotive force of the auxiliary electric machine is specified  $p_B = 4$ .*

**Key words:** diode, exciter, brushless, synchronous, generator, calculation method.

**References**

1. Glebov I. A. Scientific bases of systems designing of excitation of powerful synchronous machines – Leningrad: Science. – 1988. – 322 p. [Rus]
2. GOST 21558-2000 / Interstate standard: Excitation system for turbogenerators, hydrogenerators and synchronous compensators // General specifications. – Date of introduction 2003–07–01.
3. Planning of electric machines: textbook for the institutes of higher / pod red. I.P. Kopylova. – 4-e izd., perer. i dop. – М.: Izdatelstvo Jurajt, 2011. – 767 p
4. Galinovskyi O. Parameters and characteristics of semi-conductor rectifiers of valve generators // Mountain electromechanics and automatics: scientific and technical collection. – 2012.– release 88 – pp. 48-54.
5. Galynovskiy O., Lenska O., Melnik N. Direct frequency converter with artificial and natural commutation for brushless asynchronous machines // Electrical Engineering and Electromechanics. – 2015. – № 5. – pp. 23-30.
6. Galynovskiy O., Dubchak Y., Lenska O. Comparative analysis of diode and thyristor exciters of brushless synchronous machines // Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. – Kharkiv. NTU «KhPI». – 2019. – №2. – pp. 41-45.

Надійшла 5.11.2022

Received 5.11.2022