

## СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З НЕЯВНОПОЛЮСНИМ СТАТОРОМ ДЛЯ ТЕПЛОВОЗІВ

*Розглянутий стартер-генератор постійного струму з неявнополюсним статором для тепловозів, його конструктивні та електромагнітні особливості і відмінності в порівнянні з серійним стартер-генератором.*

*Рассмотрен стартер-генератор постоянного тока с неявнополюсным статором для тепловозов, его конструктивные и электромагнитные особенности и отличия в сравнении с серийным стартер-генератором.*

В свій час були виготовлені і дослідженні декілька двигунів постійного струму різної потужності, в яких якір залишався без змін, а статор виконувався неявнополюсним (використовувалось статорне залізо асинхронних машин) з несиметрично розміщеною на половині полюсних ділень між поздовжньою і поперечною віссю обмоткою послідовного збудження, яка вмикалась так, щоб статорна обмотка разом із якірною обмоткою створювали основний магнітний потік. Незважаючи на те, що використовувались якорі серійних машин, що не є оптимальним рішенням, ці неявнополюсні двигуни показали вражаючі переваги перед своїми серійними аналогами [1, 2, 3].

В зв'язку з неможливістю збільшити потужність стартер-генератора 5ПСГ для тепловозів з 62кВт до 70кВт в тих же габаритах, як того вимагає замовник, керівництво ВАТ "Електромашин", м. Харків, в 2008 р. прийняло рішення виготовити експериментальний стартер-генератор з неявнополюсним статором. На сьогодні такий стартер-генератор виготовлений і досліджується.

Для розуміння відмінностей експериментального стартер-генератора від серійного наведемо деякі дані серійного стартер-генератора.

Серійний стартер-генератор має довжину сталі якоря, основних і додаткових полюсів  $l_{\delta} = 205$  мм, діаметр якоря  $D_a = 294$  мм, діаметр корпусу 580 мм, зазор під основними полюсами  $\delta = 2$  мм, під додатковими полюсами  $\delta = (7+2)$  мм. Число полюсів і паралельних віток якоря  $2p = 2a = 4$ . На основних полюсах розміщена обмотка послідовного збудження для стартерного режиму вагою 12кГ і обмотка незалежного збудження – 45 кГ. Обмотка додаткових полюсів має вагу 37 кГ, всього на статорі 94 кГ міді. Число пазів якоря  $Z_a = 46$ , число колекторних пластин  $k = 138$ , секції одновиткові, число активних провідників  $N_a = 276$ .

При пусковому струмі, який повинен бути не більшим ніж  $I_a = 2100$ А, стартер-генератор створює пусковий момент  $M_n = 2000$  Нм.

Магнітний потік при цьому

$$\Phi = \frac{M \cdot \alpha \cdot 2\pi}{N_a p I_a} = \frac{2000 \cdot 2 \cdot 2\pi}{276 \cdot 2 \cdot 2100} = 2,167 \cdot 10^{-2} \text{ Вб},$$

Індукція в повітряному зазорі

$$B_{\delta} = \frac{\Phi \cdot p \cdot 10^4}{D_a \cdot l_{\delta}} = \frac{2,167 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^4}{29,4 \cdot 20,5} = 0,719 \text{ Тл}.$$

В експериментальному стартер-генераторі довжина заліза залишилась незмінною, діаметр якоря збільшився до 332,4мм, число пазів якоря  $Z_a = 48$ , число колекторних пластин  $k = 144$ , секції одновиткові, число активних провідників  $N_a = 288$ . Число полюсів і паралельних віток  $2p = 2a = 6$ , повітряний зазор  $\delta = 1,3$  мм. Залізо статора – з асинхронного двигуна ВА05П280L4, внутрішній діаметр  $D_i = 340$  мм, зовнішній діаметр  $D_3 = 520$  мм.

На рис. 1 показана принципова електрична схема.

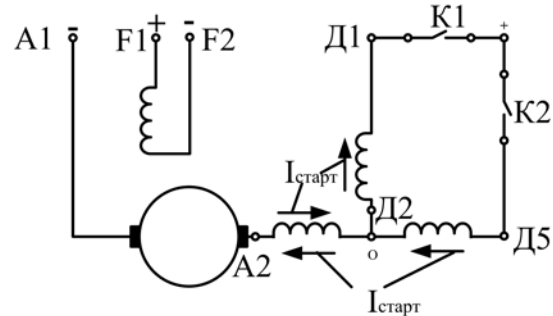


Рис. 1. Принципова електрична схема стартер-генератора

При замиканні контакту К2 стартер-генератор працює в стартерному (двигуновому) режимі. Струм протікає по обмотці статора Д5-0, яка має активних провідників  $N'_{ст} = 30$  (двополюсна частина схеми показана на рис. 2), а також по обмотці статора 0-А2

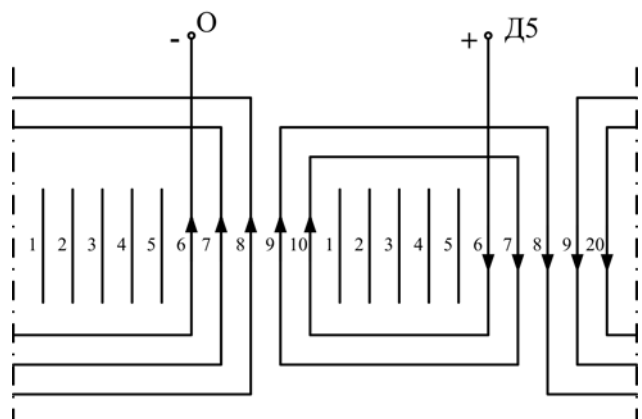


Рис. 2. Стартерна обмотка

(рис. 3, обмотка зображена жирними лініями, напрям струму в стартерному режимі показаний стрілками в нижній частині пазів). Обмотка 0-A2 має активних провідників  $N_{ст}'' = 18$ .

При розмиканні контакту К2 і замиканні К1 стартер-генератор переходить в генераторний режим роботи. Напрямок струму змінюється в якірній обмотці і в статорній обмотці 0-A2 (на рис. 3 напрям струму в генераторному режимі показаний стрілками у верхній частині пазів), а також протікає по статорній обмотці Д2-Д1 (рис. 3). Обмотка Д2-Д1 має активних провідників  $N_{ст} = 30$ .

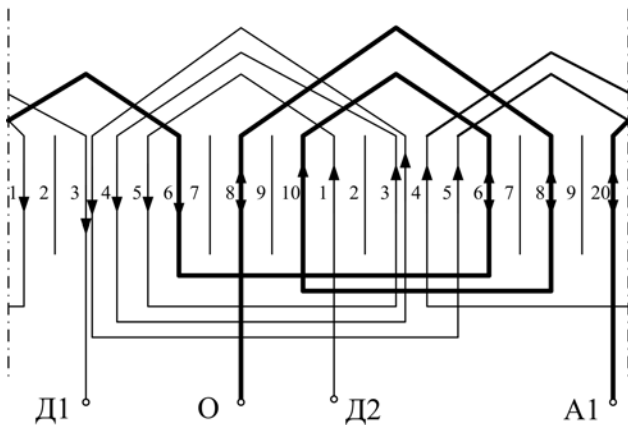


Рис. 3. Генераторна обмотка

Для підтримування незмінною напруги на якірних генераторних виводах А1-Д1 при зміні навантаження чи швидкості обертання якоря служить обмотка незалежного збудження F1-F2 (рис. 4), яка, щоб використовувати серійний реле-регулятор напруги, повинна мати такий же опір збудження  $R_{зб.}$ , як і в серійній машині.

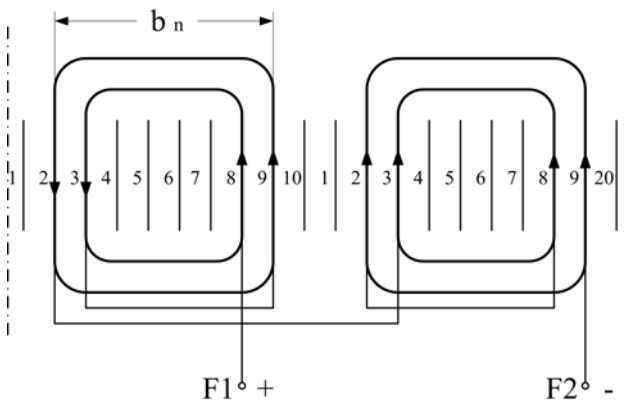


Рис. 4. Обмотка незалежного збудження

В стартерному режимі роботи основний магнітний потік, який направлений на поздовжній вісі  $d$ , створюється спільною дією МРС обмотки якоря і МРС стартерної статорної обмотки, яка складається із двох обмоток: обмотки Д5-0 та обмотки 0-A2.

Максимальне значення МРС якірної обмотки  $F_{aq\max}$ :

$$F_{aq\max} = A \cdot \frac{\tau}{2} = \frac{N_a \cdot I_a}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot D} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot 2} = \frac{N_a \cdot I_a}{2a \cdot 2p \cdot 2} \quad (1)$$

Обмотковий коефіцієнт якірної обмотки, оскільки вона рівномірно розподілена по всьому полюсному діленню, вираховується як відношення діаметра до половини довжини кола:

$$K_{об.а} = \frac{2 \cdot R}{\pi \cdot R} = 0,636 \quad (2)$$

Діюче значення МРС якірної обмотки:

$$F_{aq} = F_{aq\max} \cdot K_{об.а} = \frac{N_a \cdot I_a}{2a \cdot 2p \cdot 2} \cdot 0,636 = \frac{288 \cdot I_a}{6 \cdot 6 \cdot 2} \cdot 0,636 = 2,544 \cdot I_a \quad (3)$$

Максимальне значення МРС стартерної обмотки –  $F_{ст.макс}$ :

$$F_{ст.макс} = \frac{N_{ст} \cdot I_a}{2p \cdot 2} \quad (4)$$

Обмотковий коефіцієнт стартерної обмотки, яка займає тільки половину полюсного ділення, вираховується як відношення хорди чверті кола до четвертини довжини кола:

$$K_{об.ст} = \frac{2 \cdot R}{\sin 45^\circ \cdot \pi \cdot R} = 0,9 \quad (5)$$

Діюче значення МРС стартерної обмотки:

$$F_{ст} = F_{ст.макс} \cdot K_{об.ст} = \frac{N_{ст} \cdot I_a}{2p \cdot 2} \cdot K_{об.ст} = \frac{(N_{ст}' + N_{ст}'') \cdot I_a}{2p \cdot 2} \times \times K_{об.ст} = \frac{(30 + 18) \cdot I_a}{6 \cdot 2} \cdot 0,9 = 3,6 \cdot I_a \quad (6)$$

Вектори МРС якірної  $F_{aq}$  і стартерної обмоток  $F_{ст}$  утворюють між собою кут  $135^\circ$ . Сума цих векторів дає нам результуючу МРС поздовжньої дії (по вісі  $d$ )  $F_{рез.} = F_d$ , яка й утворює основний магнітний потік  $\Phi_0$ .

$$F_{рез.} = F_d = F_{aq} + F_{ст} \cdot \sin 45^\circ = 3,6 \cdot I_a \cdot 0,707 = 2,544 \cdot I_a \quad (7)$$

На рис. 5 на 20-и зубцях статора (подвійне полюсне ділення,  $20 = \frac{Z_1}{p} = \frac{60}{3}$ ) показані напрями струму  $I_a$  стартерної обмотки і обмотки 0-A2 в стартерному режимі.

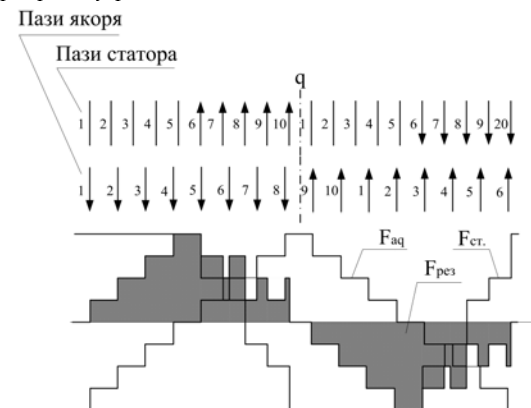


Рис. 5. Стартерний режим

Пази, в яких знаходяться 2 активних провідники, позначені жирними лініями. На 16-и зубцях якоря ( $16 = \frac{Z_a}{p} = \frac{48}{3}$ ), які знаходяться під зубцями статора, указані напрями струму якірної обмотки. Так як в кожному пази якоря лежить  $U_{\Pi}=6$  активних провідників, по яким протікає струм  $i_a = \frac{I_a}{2a} = \frac{I_a}{6}$ , то в кожному пази якоря маємо:

$$F_{n.a} = U_{\Pi} \cdot i_a = 6 \cdot \frac{I_a}{6} = I_a$$

На рис. 5 у відповідності з напрямками струмів і кількістю активних провідників в пазах побудовані МРС якірної обмотки  $F_{aq}$ , МРС стартерної обмотки  $F_{ст}$  і результуюча МРС  $F_{рез} = F_d$ , яка є геометричною сумою магніторушійних сил  $F_{aq}$  і  $F_{ст}$ .

В мить пуску, при  $n=0$ , згідно з ТЗ, струм стартер-генератора не повинен перевищувати пусковий струм серійного стартер-генератора, тобто  $I_a \leq 2100A$ .

Використовуючи (7):

$$F_d = 2,544 \cdot 2100 = 5342A$$

Індукція в повітряному зазорі під час пуску:

$$B_{\delta} = \frac{F_d \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu} \cdot \delta_{\text{мм}}} = \frac{5342 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 1,7 \cdot 2,6 \cdot 1,3} = 1,162 \text{Тл},$$

де  $k_{\delta}$  – коефіцієнт повітряного зазору,  $k_{\delta}=1,7$ ;

$k_{\mu}$  – коефіцієнт, що враховує збільшення опору магнітопроводу,  $k_{\mu}=2,6$ .

Магнітний потік в мить пуску:

$$\Phi = B_{\delta} \cdot \frac{D_a \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-4}}{p} = 1,162 \cdot \frac{33,24 \cdot 20,5 \cdot 10^{-4}}{3} = 2,64 \cdot 10^{-2} \text{Вб}$$

Електромагнітний момент при пуску:

$$M = \frac{N}{a} \cdot \frac{p}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I_a = \frac{288}{3} \cdot \frac{3}{2\pi} \cdot 2,64 \cdot 10^{-2} \cdot 2100 = 2542 \text{Н} \cdot \text{м}$$

Експериментальні дослідження підтверджують ці дані, пусковий момент збільшився порівняно з серійною машиною на 27%.

В генераторному режимі роботи працюють статорні обмотки А2-0 і Д2-Д1 (рис. 1). Обмотка А2-0 виконує роль компенсаційної обмотки, обмотка Д2-Д1 працює частково теж як компенсаційна обмотка, а також і як генераторна обмотка, роль якої полягає у створенні основного магнітного потоку. Призначення компенсаційної обмотки – обмежити появу надмірного основного магнітного потоку і тим самим зменшити величину ЕРС обмотки якоря при високій частоті обертання якоря.

На кожному подвійному полюсному діленні обмоток А2-0 і Д2-Д1 є 12 активних провідників для компенсації якірної МРС – це симетрично розміщені провідники по всьому полюсному діленні в пазах 1-10, 3-8, 5-6, і на іншому полюсному діленні в пазах 11-20, 13-18, 15-16 (рис. 6). Провідники, що залишаються в пазах 3-4 і 13-14 (всього 4 провідників) створюють МРС  $F_{ген.}$ , яка по відношенню з некомпенсованою МРС якоря  $F_{aq}$

знаходиться під кутом  $\alpha=144^\circ$  (рис. 6).

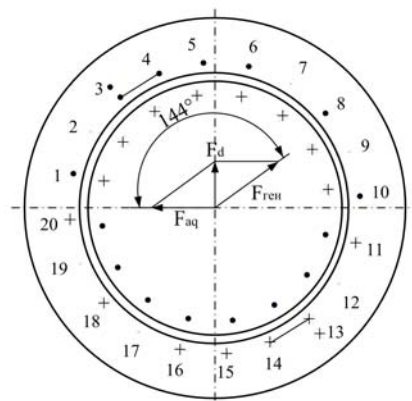


Рис. 6. Активні провідники в пазах статора і якоря

Тому, аналогічно (6):

$$F_{ген} = F_{ген\max} \cdot K_{об.ген.} = \frac{N_{ген.} \cdot I_a}{2p \cdot 2} \cdot K_{об.ген.} = \frac{4 \cdot p \cdot I_a}{2p \cdot 2} \cdot 0,9 = 0,9 \cdot I_a$$

При номінальному генераторному струмі якоря  $I_a=682A$ , аналогічно (7):

$$F_{рез} = F_d = F_{ген} \cdot \sin(180^\circ - 144^\circ) = 0,9 \cdot I_a \cdot 0,59 = 0,531 \cdot I_a = 337A$$

На рис. 7 на 20-и зубцях статора показані напрями струму  $I_a$  (пази, в яких знаходяться 2 активних провідники, позначені жирними лініями), який створює МРС  $F_{aq}$ , на 16-и зубцях якоря показані напрями струму якірної обмотки, який створює МРС  $F_{aq}$ , і показана результуюча МРС  $F_{рез} = F_d$ .

Індукція в повітряному зазорі:

$$B_{\delta} = \frac{F_d \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu} \cdot \delta_{\text{мм}}} = \frac{337 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 1,7 \cdot 1,1 \cdot 1,3} = 0,173 \text{Тл}$$

Тут  $k_{\mu}=1,1$ .

Магнітний потік:

$$\Phi = B_{\delta} \cdot \frac{D_a \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-4}}{p} = 0,173 \cdot \frac{33,24 \cdot 20,5 \cdot 10^{-4}}{3} = 0,388 \cdot 10^{-2} \text{Вб}$$

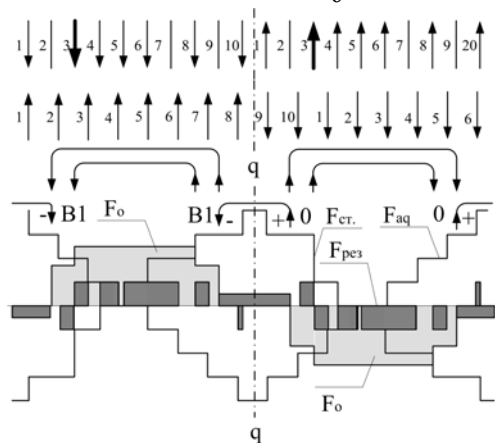


Рис. 7. Генераторний режим

ЕРС  $E_a$  в обмотці якоря при максимальній швидкості обертання стартер-генератора:

$$E_a = \frac{p \cdot n}{60} \cdot \frac{N}{a} \cdot \Phi = \frac{3 \cdot 3300}{60} \cdot \frac{288}{3} \cdot 0,388 \cdot 10^{-2} = 62,3 \text{ В.}$$

Підтримування напруги генератора ( $U=110\text{В}$ ) незмінною при будь-якому навантаженні і при зміні швидкості від  $n=1050$  об/хв. до  $3300$  об/хв. забезпечує обмотка незалежного збудження з допомогою реле-регулятора напруги.

Обмотка незалежного збудження (рис. 4) виконана із 2р концентричних котушкових груп, по дві котушки в групі. Великі котушки кроком  $y_1=7$  мають число витків  $w_{k1}=90$ , малі котушки кроком  $y_2=5$  виконані числом витків  $w_{k2}=50$ . Така обмотка має обмотковий коефіцієнт  $k_{об}=0,9$  і створює МРС  $F_0$ , показану на рис. 7. Навантаження на обмотку незалежного збудження значно менше в модернізованому стартер-генераторі порівняно з серійним завдяки меншому повітряному зазору, а також завдяки тому, що частина основного магнітного потоку створюється спільною дією МРС обмотки якоря і генераторної статорної обмотки.

В електричній схемі стартер-генератора передбачені одновиткові котушки обмотки додаткових полюсів 0-В1, які створюють МРС  $F_{дод}$ . (рис. 7), необхідна величина якої експериментально досліджується.

Загальна вага мідного проводу в статорі –  $33$  кг, тобто майже в три рази менша, ніж в серійній машині.

Потужність в експериментальній машині збільшується до  $70$  кВт за рахунок збільшення кількості комплектів щіток в півтора рази, а також завдяки зменшенню електричних втрат в обмотках. Так, для порівняння, втрати в обмотці якоря і додаткових полюсів в серійній машині при струмі  $I_a = 564\text{А}$ ,  $p_M = 4333\text{Вт}$ , а в експериментальній втрати в обмотці якоря і обмотці А2-0 і Д2-Д1  $p_M = 3774\text{Вт}$ , тобто на  $13\%$  менші.

В експериментальному стартер-генераторі відсутній негативний вплив реакції якоря, який в серійних машинах спотворює магнітний потік в повітряному зазорі і діє розмагнічуючим способом. Відпадає необхідність в додаткових полюсах. Величину повітряного зазору приймають мінімально можливою, виходячи з механічних умов надійності обертання якоря.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лущик В.Д. Двигатели постоянного тока с неявнополюсным статором // Электротехника. – 1992. – № 8 – 9. – с. 14-17.
2. Лущик В.Д. Суміщені електричні машини та апарати. К.: Техніка, 1993.-203 с. Мова рос.
3. Лущик В.Д. Електричні машини постійного струму з новою системою електромагнітного збудження // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №2. – с. 39-41.

Поступила 20.08.2009

Лущик В'ячеслав Данилович, д. т. н., професор  
Донбаський державний технічний університет,  
кафедра "Електричні машини і апарати"  
Україна, 94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16  
тел. 80964387409, e-mail:info@dmmi.edu.ua

Варванський Артем Юрійович  
ВАТ "Електромашина", СКБ  
Україна, 61016, Харків, вул. Муранова, 106

V.D. Luschik, A.Yu. Varvansky

### **A diesel locomotive DC starter-generator with an implicit-pole stator**

A diesel locomotive DC starter-generator with an implicit-pole stator is considered, its design and electromagnetic characteristics and distinctions compared with a production starter-generator.

**Key words – diesel locomotive, DC starter-generator, implicit-pole stator, design and electromagnetic characteristics**