

СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ВЕРТОЛЬОТІВ

Приведені порівняльні електромагнітні розрахунки стартер-генератора серійного виконання і стартер-генератора з неявнополюсним статором. Показані магнітні поля стартер-генератора з неявнополюсним статором при пуску і в генераторному номінальному режимі. Методика електромагнітних розрахунків перевірена і підтверджена на експериментально досліджених машинах з неявнополюсним статором інших типів.

Приведены сравнительные электромагнитные расчеты стартер-генератора серийного исполнения и стартер-генератора с неявнополюсным статором. Показаны магнитные поля стартер-генератора с неявнополюсным статором при пуске и в генераторном номинальном режиме. Методика электромагнитных расчетов проверена и подтверждена на экспериментально исследованных машинах с неявнополюсным статором других типов.

ВСТУП

Машина постійного струму продовжують випускати щорічно мільйонними серіями. Двигуни стартерів всіх легкових та вантажних автомобілів, автобусів, машин сільськогосподарського призначення – двигуни постійного струму. Двигуни постійного струму на транспорті з точки зору експлуатаційних витрат більш вигідні порівняно з асинхронним приводом.

Однак великою проблемою в явнополюсних машинах постійного струму є реакція якоря. Реакція якоря створює нерівномірне магнітне поле в повітряному зазорі, що погіршує потенціальну криву на колекторі і зменшує основний магнітний потік. Для зменшення негативного впливу реакції якоря збільшують повітряний зазор, а це призводить до збільшення витрати міді основних полюсів. Для нейтралізації негативного впливу реакції якоря на комутацію в машинах встановлюють додаткові полюси. МРС додаткових полюсів перевершує зустрічно направлену МРС якоря і тому міді додаткових полюсів витрачається стільки ж, скільки і міді якірної обмотки. В машинах великої потужності в полюсних наконечниках розміщують компенсаційну обмотку, що конструктивно ускладнює машину і здорожує її виготовлення. Велика кількість міді основних і додаткових полюсів призводить до збільшення втрат електричної енергії і до зменшення коефіцієнту корисної дії.

Найбільш ефективним способом усунення всіх наведених вище недоліків є принципово нова конструкція машин постійного струму з неявнополюсним статором та з компенсаційною обмоткою на статорі, яка займає половину пазів статора і розміщена несиметрично [1-6].

Несиметрична компенсаційна обмотка разом з обмоткою якоря створюють рівномірно розподілений вздовж кола якоря основний магнітний потік. Рівномірність основного магнітного потоку виключає можливість появи кругового вогню по колектору. МРС несиметричної компенсаційної обмотки повністю компенсує МРС якірної обмотки, а несиметричне розміщення компенсаційної обмотки змушує магнітний потік реакції якоря брати участь у створенні основного магнітного потоку. Необхідність в МРС додаткових полюсів на порядок зменшується.

Значно менший повітряний зазор в машинах з неявнополюсним статором сприяє збільшенню основного магнітного потоку.

Машина постійного струму з новою системою електромагнітного збудження мають більш високий ККД та значно кращі масогабаритні показники, що особливо актуально для електричних машин, призначених для літальних апаратів.

СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР СЕРІЙНОГО ВИКОНАННЯ

Стартерний режим:

- напруга живлення – $U_{ст.} = E_0 = 28$ В (E_0 – ЕРС акумулятора);

- навантажувальний момент – $M_n = 14,7$ Нм;

- частота обертання – $n = 3900$ об/хв.;

- споживаний струм – $I_a = 310$ А.

Генераторний режим:

- напруга – $U_{ген.} = 28,5$ В;

- струм, що віддається – $I_a = 100$ А;

- потужність (при напрузі 30 В) – $P_2 = 3$ кВт;

- частота обертання – $n = 6250 \dots 11250$ об/хв.;

- режим – тривалий;

- максимально допустимий струм при частоті обертання $n = 7700$ об/хв. –

- на протязі 1 год. – 150 А;

- на протязі 1 хв. – 200 А.

Особливості конструкції. Довжина магнітопроводу якоря $l_8 = 59$ мм, довжина магнітопроводу основних і додаткових полюсів – 58 мм, число полюсів $2p = 4$.

Зовнішній діаметр корпусу $D_{1к} = 152,5$ мм, внутрішній діаметр корпусу $D_{2к} = 135$ мм. Внутрішній діаметр основних полюсів $D = 95$ мм.

В полюсових наконечниках основних полюсів наявні пази, в яких розміщена компенсаційна обмотка. Провід – $5,6 \times 3$ мм, число витків на полюс компенсаційної обмотки $w_k = 3$, додаткових полюсів – $w_d = 2$.

Обмотка незалежного збудження, яка розміщена на основних полюсах, виконана проводом $d = 0,95$ мм, число витків на полюс $w_n = 87$. Зазор між основними полюсами і якорем $\delta = 0,5$ мм.

Число пазів якоря $z_a = 41$, число колекторних пластин $k = 41$. Обмотка якоря хвильова, число паралельних гілок $2a = 2$, крок по пазах $y = 1-11$, по колектору – $y_k = 1-21$. Розмір голого проводу $1,25 \times 4,75$ мм, витків в секції $w_c = 1$, число провідників в пазу $u_n = 2$, число витків обмотки якоря $w_a = 41$, число активних провідників обмотки якоря $N_a = 82$.

Розміщення в полюсових наконечниках основних полюсів компенсаційної обмотки в трикіловатній машині є безпрецедентним рішенням. Така конструкція викликана тим, що стартер-генератор для вертольотів, який в стартерному режимі живиться від акумулятора, а в генераторному режимі заряджає електричною енергією акумулятор та інші споживачі електричної енергії, повинен автоматично, без вмикання-вимикання відповідних контактів, переходити з одного режиму в інший. Ця вимога спонукає до відмови від послідовної обмотки збудження, яка в стартерному режимі найбільш ефективна, але неприйнятна в

генераторному режимі. Відомо, що в явнополюсних машинах постійного струму для зменшення негативного впливу реакції якоря збільшують повітряний зазор між якорем і основними полюсами, тим самим зменшуючи основний магнітний потік. В стартер-генераторі серійного виконання для того, щоб не збільшувати повітряний зазор, в полюсових наконечниках розміщують компенсаційну обмотку, яка зменшує негативний вплив реакції якоря, але надзвичайно ускладнює виготовлення статора.

Електромагнітний розрахунок для порівняльного аналізу.

Опір обмотки якоря:

$$R_{a,75^\circ} = \frac{l_b \cdot w_a}{47 \cdot (2a)^2 \cdot S_{м.а.}} = \frac{0,3 \cdot 41}{47 \cdot 2^2 \cdot 1,25 \cdot 4,75} = 0,011 \text{ Ом,}$$

де l_b – довжина витка секції.

Опір компенсаційної обмотки:

$$R_{к,75^\circ} = \frac{l_k \cdot w_k \cdot 2p}{47 \cdot S_{м.к.}} = \frac{0,272 \cdot 3 \cdot 4}{47 \cdot 16,8} = 0,004134 \text{ Ом.}$$

Опір додаткової обмотки:

$$R_{д,75^\circ} = \frac{l_d \cdot w_d \cdot 2p}{47 \cdot S_{м.д.}} = \frac{0,158 \cdot 2 \cdot 4}{47 \cdot 16,8} = 0,0016 \text{ Ом.}$$

Сумарний опір міді:

$$\sum R_{м,75^\circ} = R_{a,75^\circ} + R_{к,75^\circ} + R_{д,75^\circ} = 0,016734 \text{ Ом.}$$

Опір щіткового контакту і щіток $R_{щ} = 0,003$ Ом.

В стартерному режимі компенсаційна обмотка і обмотка додаткових полюсів не вмикаються. Тому при пуску опір стартер-генератора:

$$R_{пуск.} = R_{a,75^\circ} + R_{щ} = 0,011 + 0,003 = 0,014 \text{ Ом.}$$

Напруга на джерелі живлення в системі запуску при $I_n = 1166$ А:

$$U_n = I_a \cdot (R_{a,75^\circ} + R_{щ}) = 1166 \cdot (0,011 + 0,003) = 16,3 \text{ В.}$$

Опір обмотки незалежного збудження:

$$R_{зб,75^\circ} = \frac{l_b \cdot w_n \cdot 2p}{47 \cdot S_m} = \frac{0,258 \cdot 87 \cdot 4}{47 \cdot 0,71} = 2,69 \text{ Ом.}$$

Струм збудження при пуску в стартерному режимі:

$$I_{зб.} = \frac{U_n}{R_{зб,75^\circ}} = \frac{16,3}{2,69} = 6,06 \text{ А.}$$

Індукція в повітряному зазорі при пуску:

$$B_\delta = \frac{I_{зб.} \cdot w_n}{0,8 \cdot k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta} = \frac{6,06 \cdot 87 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 1,7 \cdot 1,41 \cdot 0,5} = 0,55 \text{ Тл.}$$

Магнітний потік при пуску:

$$\Phi = B_\delta \cdot \frac{D \cdot l_\delta}{p} = 0,55 \cdot \frac{9,5 \cdot 5,8 \cdot 10^{-4}}{2} = 0,151525 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

Електромагнітний момент при пуску:

$$M = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{N_a}{a} \cdot I_a \cdot \Phi = \frac{2}{2\pi} \cdot \frac{82}{1} \cdot 1166 \cdot 0,151525 \cdot 10^{-2} = 46,14 \text{ Нм.}$$

Для визначення падіння напруги в акумуляторі, який живить стартер, потрібно визначити його внутрішній опір R_0 . Використовуючи номінальні дані:

$$R_0 = \frac{E_0 - U_n}{I_n} = \frac{28 - 16,3}{1166} = 0,01 \text{ Ом.}$$

Напруга на акумуляторі при струмі $I_a = 310$ А:

$$U = E_0 - I_a R_0 = 28 - 310 \cdot 0,01 = 24,9 \text{ В.}$$

Струм збудження при струмі якоря $I_a = 310$ А:

$$I_{зб.} = \frac{U}{R_{зб,75^\circ}} = \frac{24,9}{2,69} = 9,2565 \text{ А.}$$

Магнітний потік в стартерному режимі, $n = 3900$ об/хв., $I_a = 310$ А:

$$\Phi = \frac{U - I_a \cdot (R_{a,75^\circ} + R_{щ})}{p \cdot N_a \cdot n} \cdot 60a = \frac{24,9 - 310 \cdot 0,014}{2 \cdot 82 \cdot 3900} \cdot 60 = 0,19287 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

Електромагнітний момент:

$$M = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{N_a}{a} \cdot I_a \cdot \Phi = \frac{2}{2\pi} \cdot \frac{82}{1} \cdot 310 \cdot 0,19287 \cdot 10^{-2} = 15,61 \text{ Нм.}$$

Момент холостого ходу:

$$M_0 = M - M_n = 15,61 - 14,7 = 0,91 \text{ Нм.}$$

Індукція в повітряному зазорі:

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{Dl_\delta} = \frac{2 \cdot 0,19287 \cdot 10^{-2}}{9,5 \cdot 5,8 \cdot 10^{-4}} = 0,7 \text{ Тл.}$$

Тепер є всі необхідні експериментальні дані для визначення коефіцієнту магнітного насичення в стартерному режимі при струмі в якорі $I_a = 310$ А і струмі збудження $I_{зб.} = 9,2565$ А:

$$k_\mu = \frac{I_{зб.} \cdot w_n}{0,8 B_\delta k_\delta \delta} = \frac{9,2565 \cdot 87 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 0,7 \cdot 1,7 \cdot 0,5} = 1,6918.$$

Такий великий коефіцієнт магнітного насичення в стартерному режимі пояснюється розмагнічуючою дією поперечної реакції якоря. Через відсутність струму в компенсаційній обмотці магнітне поле в повітряному зазорі нерівномірне, набігаючи краї полюсових наконечників дуже сильно насичуються.

Магнітний потік у генераторному режимі, $n = 6250$ об/хв., $I_a = 100$ А, $U_{ген.} = 28,5$ В:

$$\Phi = \frac{U + I_a \cdot (\sum R_{м,75^\circ} + R_{щ})}{p \cdot N_a \cdot n} \cdot 60a = \frac{28,5 + 100 \cdot 0,019734}{2 \cdot 82 \cdot 6250} \cdot 60 = 0,1785 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

Індукція в повітряному зазорі:

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{Dl_\delta \cdot 10^{-4}} = \frac{2 \cdot 0,1785 \cdot 10^{-2}}{9,5 \cdot 5,8 \cdot 10^{-4}} = 0,6479 \text{ Тл.}$$

Струм збудження, необхідний для створення $B_\delta = 0,6479$ Тл:

$$I_{зб.} = \frac{0,8 \cdot B_\delta \cdot k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta}{w_n} = \frac{0,8 \cdot 0,6479 \cdot 1,7 \cdot 1,35 \cdot 0,5}{87} \cdot 10^3 = 6,83646 \text{ А.}$$

Втрати в обмотці збудження:

$$P_{м.зб.} = I_{зб.}^2 \cdot R_{зб,75^\circ} = 6,83646^2 \cdot 2,69 = 126 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати в обмотках в номінальному генераторному режимі при струмі якоря $I_a = 100$ А:

$$\sum P_{м,75^\circ} = I_a^2 (\sum R_{м,75^\circ} + R_{щ}) + P_{м.зб.} = 100^2 \cdot 0,019734 + 126 = 197 + 126 = 323 \text{ Вт.}$$

Вага міді якірної обмотки:

$$m_a = 8,9 \cdot l_b \cdot w_a \cdot S_{м.а.} = 8,9 \cdot 0,3 \cdot 41 \cdot 1,25 \cdot 4,75 = 650 \text{ г.}$$

Вага міді компенсаційної обмотки:

$$m_k = 8,9 \cdot l_k \cdot w_k \cdot 2p \cdot S_{м.к.} \cdot 10^{-2} = 8,9 \cdot 0,272 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 16,8 = 490 \text{ г.}$$

Вага міді додаткових полюсів:

$$m_{\text{д}} = 8,9 \cdot l_{\text{д}} \cdot w_{\text{д}} \cdot 2p \cdot S_{\text{м.д.}} = 8,9 \cdot 0,158 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 16,8 = 190 \text{ г.}$$

Вага міді обмотки збудження:

$$m_{\text{зб.}} = 8,9 \cdot 0,258 \cdot 87 \cdot 4 \cdot 0,71 = 570 \text{ г.}$$

Сумарна вага мідного проводу: $G_{\text{м}}=1900 \text{ г.}$

СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР З НЕЯВНОПОЛЮСНИМ СТАТОРОМ

Конструкція та принцип дії. Довжина магнітопроводу статора і якоря $l_{\delta}=50 \text{ мм.}$ Діаметр якоря $D_{\text{а}}=94 \text{ мм,}$ внутрішній діаметр статора $D_{\text{і}}=95 \text{ мм,}$ зовнішній діаметр статора $D_{\text{ст.}}=140,5 \text{ мм,}$ число полюсів $2p=4.$

Розміри пазів якоря такі ж, як в серійній машині.

Число пазів якоря $z_{\text{а}}=33;$ число колекторних пластин $k=33.$ Обмотка якоря хвильова, число паралельних гілок $2a=2;$ крок по пазам $y=1-9,$ крок по колектору $y_{\text{к}}=1-17.$ Розмір голого проводу $1,25 \times 4,75 \text{ мм,}$ витків в секції $w_{\text{с}}=1,$ число провідників в пазу $u_{\text{п}}=2,$ число витків обмотки якоря $w_{\text{а}}=33,$ число активних провідників обмотки якоря $N_{\text{а}}=66.$

Зменшення числа пазів якоря порівняно з серійною конструкцією дозволяє при незмінній МРС збудження збільшити основний потік в 1,18 рази.

Поперечний розріз статора з прямокутними відкритими пазами показаний на рис. 1. Статор набирають в пакет із пластин товщиною 0,5 такого ж заліза, із якого виготовляють основні полюси серійних машин.

Пази показані на рис. 2, 3. У зубців, що знаходяться поряд з додатковими полюсами, ширина їх у нижній частині $b_z=3^{0,1} \text{ мм}$ (всього 8 зубців), у всій решті зубців ширина їх $b_z=3,95^{0,05} \text{ мм}$ ($z_1=24$ зубців).

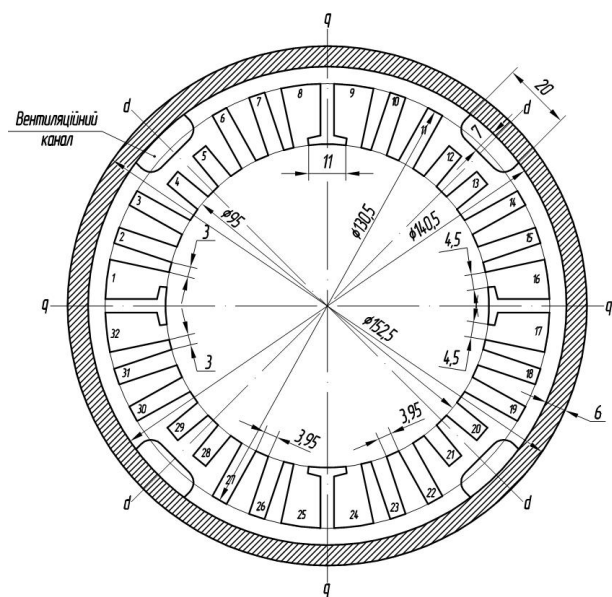


Рис. 1. Поперечний розріз статора з прямокутними відкритими пазами

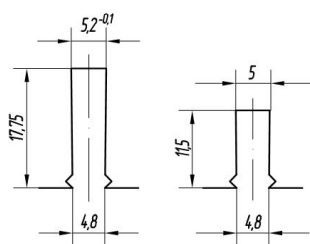


Рис. 2. Пази статора

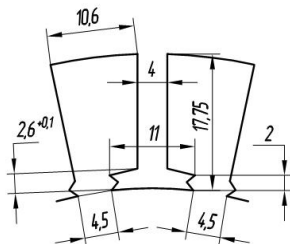


Рис. 3. Додатковий полюс

Зубці статора по поперечних осях, число яких дорівнює числу полюсів, мають зубцеві наконечники шириною $b_{\text{н}}$, яка приблизно в 2 рази більша ширини зубцевих наконечників b_z статора в зоні максимального потоку (рис. 7, 9), на цих зубцях розміщують обмотку додаткових полюсів, яка ввімкнена послідовно як зі стартерної обмоткою, так і з генераторною обмоткою.

На рис. 4 показана обмотка додаткових полюсів. Обмотка виконана чотирма паралельними гілками, число витків котушки $w_{\text{д}}=3,$ діаметр проводу $d=2 \text{ мм.}$ Зображений напрям струму в генераторному режимі. На схемі показані величини струмів в міжкотушкових з'єднаннях. Оскільки комутаційні процеси не піддаються точним розрахункам, остаточне число витків $w_{\text{д}}=3$ визначається після експериментальних досліджень.

В пази, приблизно в дві третини, симетрично відносно поздовжніх осей укладають $2p$ -полюсну обмотку незалежного збудження.

На рис. 5 показана обмотка незалежного збудження. Число витків котушки $w_{\text{н}}=25,$ діаметр проводу $d=0,9 \text{ мм.}$

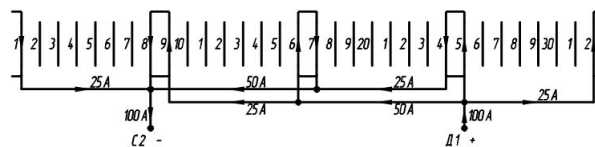


Рис. 4. Обмотка додаткових полюсів

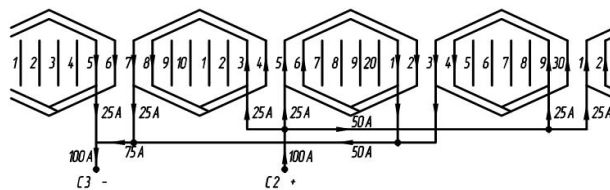


Рис. 5. Обмотка незалежного збудження

На половині кожного полюсного ділення між поздовжньою і поперечною осями (осі визначаються положенням щіток на колекторі) укладають стартерну $2p$ -полюсну обмотку послідовного збудження для стартерного режиму роботи.

Обмотка стартера показана на рис. 6. Обмотка виконана двома паралельними гілками, число витків котушки $w_{\text{ст.}}=4,$ діаметр проводу $d=2,12 \text{ мм.}$ Нумерація пазів відповідає реальному розміщенню котушок обмотки в пазах статора, показаному на рис. 1.

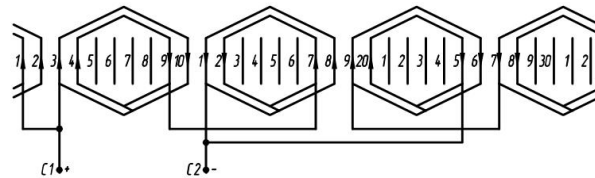


Рис. 6. Обмотка стартера

На рис. 7 для стартерного режиму показані напрями струмів і величини їх МРС в пазах якоря, в пазах статора показані струми і величини МРС в стартерній обмотці, в обмотці збудження і в обмотці додаткових полюсів. Плюсві щітки повинні лежати на вісі $d,$ що проходить через середину зубця між 12-м і 13-м пазами. Стрілка n показує напрям обертання зі сторони колектора. На рис. 8 показане магнітне поле стартерного режиму в мить пуску.

На інших половинах полюсних ділень виконують $2p$ -полюсну генераторну обмотку послідовного збудження для генераторного режиму роботи.

На рис. 9 зображена обмотка генератора. Обмотка виконана чотирма паралельними гілками, число витків котушки $w_r=8$, діаметр проводу $d=1,9$ мм. На схемі показані струми в міжкотушкових з'єднаннях в номінальному режимі роботи.

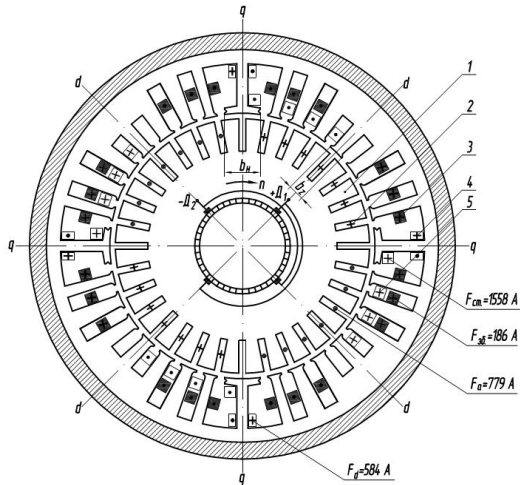


Рис. 7. Напрями струмів і величини їх МРС в пазах якоря, в пазах статора, струми і величини МРС в стартерній обмотці, в обмотці збудження і в обмотці додаткових полюсів для стартерного режиму

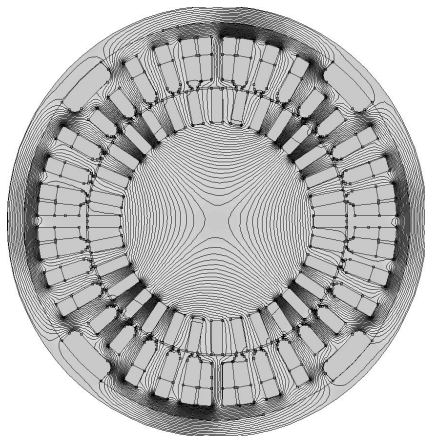


Рис. 8. Магнітне поле стартерного режиму в мить пуску

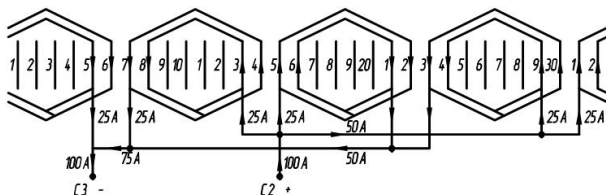


Рис. 9. Обмотка генератора

На рис. 10 для генераторного режиму показані напрями струмів і величини їх МРС в пазах якоря і в пазах статора в генераторній обмотці, а також в обмотках збудження і додаткових полюсів. На рис. 11 показане магнітне поле в генераторному номінальному режимі роботи.

На рис. 12 показана принципова електрична схема. При замиканні контакту S_1 подається живлення від акумулятора на стартер-генератор. Вмикається

обмотка незалежного збудження 3, а також через діод 6 стартерна обмотка 5 та послідовно з'єднані з нею обмотка додаткових полюсів 4 і обмотка якоря 2. Стартерна обмотка створює МРС $F_{старт}$, якірна обмотка – МРС $F_{як}$. Разом вони створюють МРС $F_{0д}$, направлену по поздовжній осі. Виникає основний магнітний потік $\Phi_{0д}$, який діє в тому ж напрямі, що і потік обмотки незалежного збудження. Разом ці потоки у взаємодії зі струмом якоря створюють обертаючий електромагнітний момент, стартер-генератор розганяє двигун внутрішнього згорання (ДВЗ).

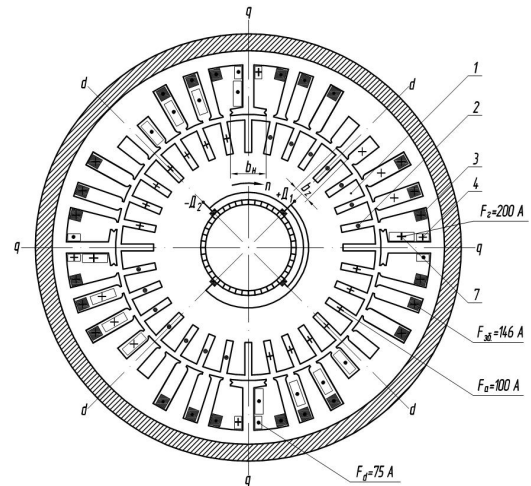


Рис. 10. Напрями струмів і величини їх МРС в пазах якоря, в пазах статора, струми і величини МРС в стартерній обмотці, в обмотці збудження і в обмотці додаткових полюсів для генераторного режиму



Рис. 11. Магнітне поле в генераторному номінальному режимі роботи

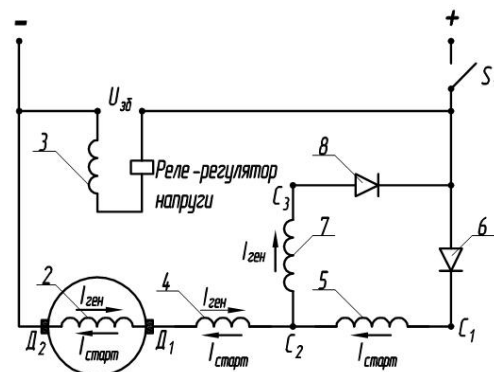


Рис. 12. Принципова електрична схема

З початком роботи ДВЗ швидкість обертання якоря стартер-генератора збільшується за рахунок ДВЗ і пропорційно зростає ЕРС. Як тільки ЕРС якоря перевищує напругу акумулятора, струм в стартерній обмотці зникає, струм в якірній обмотці змінює свій знак і починає протікати через генераторну обмотку. Генераторна обмотка разом із якірною обмоткою створюють магнітний потік Φ_{0d} того ж напрямку, що і в стартерному режимі. Електромагнітний момент стає гальмівним і стартер-генератор переходить в генераторний режим, заряджаючи акумулятор і забезпечуючи електроенергією всі необхідні споживачі. Вихідна напруга стартер-генератора підтримується постійною на всьому діапазоні зміни швидкості обертання ДВЗ і зміни навантаження завдяки реле-регулятору в колі обмотки незалежного збудження.

В стартер-генераторі поперечна реакція якоря повністю компенсується стартерною обмоткою в стартерному режимі роботи, а в генераторному режимі – генераторною обмоткою. Більше того, магнітний потік якоря приймає участь у створенні основного магнітного потоку.

Електромагнітний розрахунок. Порівняльний аналіз. Опір обмотки якоря:

$$R_{a.75^\circ} = \frac{l_B \cdot w_a}{47 \cdot (2a)^2 \cdot S_{м.а.}} = \frac{0,282 \cdot 33}{47 \cdot 2^2 \cdot 1,25 \cdot 4,75} = 0,008337 \text{ Ом.}$$

Опір стартерної обмотки:

$$R_{ст.75^\circ} = \frac{l_B \cdot n_{ст} \cdot w_{ст.}}{47 \cdot (2a)^2 \cdot S_{м.ст.}} = \frac{0,29 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4}{47 \cdot 2^2 \cdot 3,53} = 0,01398 \text{ Ом.}$$

Опір генераторної обмотки:

$$R_{ген.75^\circ} = \frac{l_B \cdot n_{г.} \cdot w_{г.} \cdot 2p}{47 \cdot (2a)^2 \cdot S_{м.г.}} = \frac{0,29 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 4}{47 \cdot 4^2 \cdot 2,83} = 0,00872 \text{ Ом,}$$

де $n_{ст.}$, $n_{г.}$ – число котушок в котушкової групі.

Опір додаткових полюсів:

$$R_{дод.75^\circ} = \frac{l_B \cdot w_{д.} \cdot 2p}{47 \cdot (2a)^2 \cdot S_{м.дод.}} = \frac{0,12 \cdot 3 \cdot 4}{47 \cdot 4^2 \cdot 3,14} = 0,00061 \text{ Ом.}$$

Опір обмотки збудження:

$$R_{зб.75^\circ} = \frac{l_B \cdot n_k \cdot w_H \cdot 2p}{47 \cdot S_{м.зб.}} = \frac{0,27 \cdot 3 \cdot 25 \cdot 4}{47 \cdot 0,636} = 2,71 \text{ Ом,}$$

де n_k – число котушок в котушкової групі.

Сумарний опір міді в стартерному режимі:

$$\sum R_{м.75^\circ} = R_{a.75^\circ} + R_{ст.75^\circ} + R_{дод.75^\circ} = 2,2927 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Сумарний опір електричного кола машини в стартерному режимі:

$$\sum R_{м.75^\circ} + R_{щ} = 2,2927 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2} = 2,5927 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Пусковий струм стартер-генератора з неявнополюсним статором

$$I_n = \frac{E_0}{R_0 + \sum R_{м.75^\circ} + R_{щ}} = \frac{28}{1 \cdot 10^{-2} + 2,5927 \cdot 10^{-2}} = 779 \text{ А.}$$

МРС збудження від стартерної обмотки і обмотки якоря

$$F_d = F_{aq} = \frac{N_a I_n}{8a \cdot p} \cdot 0,637 = \frac{66 \cdot 779}{8 \cdot 1 \cdot 2} \cdot 0,637 = 2050 \text{ А.}$$

Напруга на акумуляторі при пуску

$$U_n = I_n \cdot (\sum R_{м.75^\circ} + R_{щ}) = 779 \cdot 2,5927 \cdot 10^{-2} = 20,197 \text{ В.}$$

Струм збудження при пуску

$$I_{зб.м} = \frac{U_n}{R_{зб.75^\circ}} = \frac{20,197}{2,71} = 7,4528 \text{ А.}$$

МРС збудження від обмотки незалежного збудження

$$F_{зб.} = I_{зб.} \cdot w_{зб.} = I_{зб.} \cdot n_k \cdot w_H = 7,4528 \cdot 3 \cdot 25 = 559 \text{ А.}$$

Сумарна МРС збудження при пуску

$$\sum F_{зб.} = F_d + F_{зб.} = 2050 + 559 = 2609 \text{ А.}$$

Індукція в повітряному зазорі в мить пуску:

$$B_\delta = \frac{\sum F_{зб.} \cdot 10^{-3}}{0,8 k_\delta k_\mu \cdot \delta} = \frac{2609 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 1,334 \cdot 3,88 \cdot 0,5} = 1,26 \text{ Тл.}$$

де k_δ – коефіцієнт повітряного зазору, $k_\delta=1,334$; k_μ – коефіцієнт насичення магнітної системи при пуску, $k_\mu=3,88$.

Магнітний потік в мить пуску:

$$\Phi = B_\delta \cdot \frac{D \cdot l_\delta}{p} = 1,26 \cdot \frac{9,5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{2} = 0,29925 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

Електромагнітний момент при пуску:

$$M = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{N_a}{a} \cdot I_a \cdot \Phi = \frac{2}{2\pi} \cdot \frac{66}{1} \cdot 779 \cdot 0,29925 \cdot 10^{-2} = 49 \text{ Нм.}$$

Сумарний опір електричного кола машини в генераторному режимі:

$$\sum R_{ген.75^\circ} = R_{a.75^\circ} + R_{ген.75^\circ} + R_{дод.75^\circ} + R_{щ} = 0,0020667 \text{ Ом.}$$

Магнітний потік у генераторному режимі $n=6250$ об/хв., $I_a=100$ А, $U=28,5$ В:

$$\Phi = \frac{U + I_a \cdot \sum R_{ген.75^\circ}}{p \cdot N_a \cdot n} \cdot 60a = \frac{28,5 + 100 \cdot 0,0020667}{2 \cdot 66 \cdot 6250} \cdot 60 = 0,2223 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

Індукція в повітряному зазорі:

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{Dl_\delta \cdot 10^{-4}} = \frac{2 \cdot 0,2223 \cdot 10^{-2}}{9,5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 0,936 \text{ Тл.}$$

МРС, потрібна для створення індукції $B_\delta=0,936$ Тл:

$$\sum F = F_d + F_{зб.} = B_\delta \cdot 0,8 \cdot k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta \cdot 10^3 = 0,936 \cdot 0,8 \cdot 1,334 \cdot 1,4 \cdot 0,5 \cdot 10^3 = 699 \text{ А.}$$

МРС F_d , яку створюють генераторна і якірна обмотки:

$$F_d = \frac{N_a I_a}{8a \cdot p} \cdot 0,637 = \frac{66 \cdot 100}{8 \cdot 1 \cdot 2} \cdot 0,637 = 261 \text{ А.}$$

МРС, створювана обмоткою збудження:

$$F_{зб.} = \sum F - F_d = 699 - 261 = 438 \text{ А.}$$

Струм збудження:

$$I_{зб.} = \frac{F_{зб.}}{3 \cdot w_H} = \frac{438}{3 \cdot 23} = 5,84 \text{ А.}$$

Із збільшенням обертів струм збудження зменшується. Із збільшенням навантаження струм збудження також зменшується за рахунок зростання МРС F_d . В серійній машині струм збудження із збільшенням навантаження зростає.

Магнітний потік у генераторному режимі $n=6250$ об/хв., $I_a=200$ А, $U_{ген.}=28,5$ В:

$$\Phi = \frac{28,5 + 200 \cdot 0,0020667}{2 \cdot 66 \cdot 6250} \cdot 60 = 0,2373 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

Індукція:

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{Dl_\delta \cdot 10^{-4}} = \frac{2 \cdot 0,2373 \cdot 10^{-2}}{9,5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 0,9993 \text{ Тл.}$$

МРС, потрібна для створення індукції $B_{\delta}=0,9993$ Тл:

$$\sum F = B_{\delta} \cdot 0,8 \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu} \cdot \delta \cdot 10^3 = \\ = 0,9993 \cdot 0,8 \cdot 1,334 \cdot 1,43 \cdot 0,5 \cdot 10^3 = 762,5 \text{ А.}$$

МРС F_d , яку створюють генераторна і якірна обмотки:

$$F_d = \frac{N_a I_a}{8a \cdot p} \cdot 0,637 = \frac{66 \cdot 200}{8 \cdot 1 \cdot 2} \cdot 0,637 = 522 \text{ А.}$$

МРС, створювана обмоткою збудження:

$$F_{зб.} = \sum F - F_d = 762,5 - 522 = 240,5 \text{ А.}$$

Струм збудження:

$$I_{зб.} = \frac{F_{зб.}}{3 \cdot w_k} = \frac{240,5}{3 \cdot 25} = 3,2 \text{ А.}$$

Сумарні втрати в обмотках неявнополюсного стартер-генератора в номінальному генераторному режимі:

$$\sum P_{м.75^\circ} = P_{м.зб.} + I_a^2 \times \\ \times (R_{а.75^\circ} + R_{ген.75^\circ} + R_{дод.75^\circ} + R_{щ}) = \\ = 5,84^2 \cdot 2,71 + 100^2 (0,008337 + 0,00872 + 0,00061 + 0,003) = \\ = 92,4 + 206,7 = 299 \text{ Вт.}$$

Вага міді обмотки якоря:

$$m_a = 8,9 I_B \cdot w_a \cdot S_{м.а.} = 8,9 \cdot 0,282 \cdot 33 \cdot 1,25 \cdot 4,75 = 492 \text{ г.}$$

Вага міді стартерної обмотки:

$$m_{ст.} = 8,9 I_B \cdot n_{ст.} \cdot w_{ст.} \cdot 2p \cdot S_{м.ст.} = 8,9 \cdot 0,29 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3,53 = 291,5 \text{ г.}$$

Вага міді додаткових полюсів:

$$m_{дод.} = 8,9 I_B \cdot w_d \cdot 2p \cdot S_{м.дод.} = 8,9 \cdot 0,12 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3,14 = 40 \text{ г.}$$

Вага міді генераторної обмотки:

$$m_{ген.} = 8,9 I_B \cdot n_g \cdot w_g \cdot 2p \cdot S_{м.г.} = 8,9 \cdot 0,29 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 4 \cdot 2,83 = 467,5 \text{ г.}$$

Вага міді обмотки збудження:

$$m_{зб.} = 8,9 I_B \cdot n_k \cdot w_n \cdot 2p \cdot S_{м.зб.} = 8,9 \cdot 0,27 \cdot 3 \cdot 25 \cdot 4 \cdot 0,636 = 458,5 \text{ г.}$$

Сумарна вага мідного проводу: $G_m=1749,5$ г.

ВИСНОВКИ

В стартер-генераторі з неявнополюсною конструкцією статора кидок струму при запуску зменшується з 1166 А до 779 А (на 33 %), електрична потужність, споживана від акумулятора в мить пуску, зменшується на 3273 Вт (17 %), втрати в обмотках в номінальному генераторному режимі зменшуються на 7,43 %, із збільшенням навантаження ця різниця зростає за рахунок зменшення втрат в обмотці збудження.

Довжина магнітопроводу зменшується на 14 %, загальна вага мідного проводу – на 8 %, вага мідного проводу на обмотку додаткових полюсів зменшується в 5 разів порівняно з явнополюсною конструкцією.

Ще одна важлива перевага – спрощення виготовлення статорних обмоток завдяки відсутності компенсаційної обмотки в полюсових наконечниках.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Луцик В.Д. Електричні машини постійного струму з новою системою електромагнітного збудження / В.Д. Луцик // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 39-41.

2. Луцик В.Д. Стартер-генератор постійного струму з неявнополюсним статором для тепловозів / В.Д. Луцик, А.Ю. Варванський // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 6. – С. 21-24.

3. Пат. 89824 Україна, МПК⁹ Електричний двигун стартера з електромагнітним збудженням / В.Д. Луцик (Україна); заявник та патентовласник В.Д. Луцик (Україна). – №а200713870; заявл. 11.12.2007; опубл. 10.03.2010. Бюл. № 5. – 2 с.

4. Луцик В.Д. Електричний двигун постійного струму з неявнополюсним статором для стартерів легкових автомобілів / В.Д. Луцик // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Севастополь: СевНТУ, – 2010. – С. 22-25.

5. Vyacheslav D. Lushchik DC electrical machines with non-salient pole stator and asymmetrical compensating winding / V.D. Lushchik // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. – Saarbrücken: Germany. – 2012 j. – 92 p.

6. Луцик В.Д. Двигун стартера вантажного автомобіля з неявнополюсним статором / В.Д. Луцик, А.Ю. Варванський // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 5. – С. 27-31.

Bibliography (transliterated): 1. Lushchik V.D. Elektrichni mashini postijnogo strumu z novoyu sistemoyu elektromagnitnogo zbudzhennya / V.D. Lushchik // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2008. - № 2. - S. 39-41. 2. Lushchik V.D. Starter-generator postijnogo strumu z neyavnopolyusnim statorom dlya teplovoziv / V.D. Lushchik, A.Yu. Varvanskij // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2009. - № 6. - S. 21-24. 3. Pat. 89824 Ukraina, MPK⁹ Elektrichnij dvigun startera z elektromagnitnim zbudzhenniam / V.D. Lushchik (Ukraina); zayavnik ta patentovlasnik V.D. Lushchik (Ukraina). - №а200713870; zayavl. 11.12.2007; opubl. 10.03.2010. Byul. № 5. - 2 s. 4. Lushchik V.D. Elektrichnij dvigun postijnogo strumu z neyavnopolyusnim statorom dlya starterv legkovih avtomobiliv / V.D. Lushchik // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. - Sevastopol: SevNTU, - 2010. - S. 22-25. 5. Vyacheslav D. Lushchik DC electrical machines with non-salient pole stator and asymmetrical compensating winding / V.D. Lushchik // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. - Saarbrücken: Germany. - 2012 j. - 92 p. 6. Lushchik V.D. Dvigun startera vantazhnogo avtomobilya z neyavnopolyusnim statorom / V.D. Lushchik, A.Yu. Varvanskij // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2012. - № 5. - S. 27-31.

Надійшла 24.05.2013

Луцик В'ячеслав Данилович, д.т.н., проф.

Донбаський державний технічний університет
кафедра електричних машин та апаратів,
94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16,
тел.: (099) 7654495, e-mail: v.d.lushchik@yandex.ua

Варванський Артем Юрійович

ПАТ "Електромашина"
61016, Харків, вул. Муранова, 106
тел. (050) 2303649, e-mail: art_v_u@rambler.ru

Lushchik V.D., Varvansky A.Y.

A starter-generator for helicopters.

Comparative electromagnetic calculations of a commercial starter-generator and a nonsalient-pole-stator starter-generator are made. The nonsalient-pole-stator starter-generator magnetic fields are shown in start-up and generator rated conditions. The electromagnetic calculation technique is verified and confirmed with experimentally investigated nonsalient-pole-stator machines of other types.

Key words – starter motor magnetic circuits, nonsalient-pole stator, asymmetrical compensation winding, comparative analysis.