

## ДВИГУН СТАРТЕРА ВАНТАЖНОГО АВТОМОБІЛЯ З НЕЯВНОПОЛЮСНИМ СТАТОРОМ

*Приведений порівняльний аналіз двох типів магнітопроводів двигунів стартерів вантажних автомобілів: магнітопроводів з явно вираженими полюсами серійного виробництва та магнітопроводів з неявнополюсним статором і несиметричною компенсаційною обмоткою. Показано, що двигуни стартерів з новою системою електромагнітного збудження мають набагато кращі показники по всім параметрам.*

*Приведен сравнительный анализ двух типов магнитопроводов двигателей стартеров грузовых автомобилей: магнитопроводов с явно выраженными полюсами серийного производства и магнитопроводов с неявнополюсным статором и несимметричной компенсационной обмоткой. Показано, что двигатели стартеров с новой системой электромагнитного возбуждения имеют намного лучшие показатели по всем параметрам.*

**Вступ.** На теперішній час виготовлено і досліджено декілька двигунів постійного струму, у яких статор неявнополюсний з несиметрично розміщеною на половинках полюсних поділів між поздовжньою і поперечною віссю обмоткою послідовного збудження, яка вмикається так, щоб статорна обмотка разом із якірною обмоткою створювали основний магнітний потік. В таких двигунах в статорі зменшується до 50% мідного проводу, зростає на 1-3% ККД [1, 2]. Особливо ефективна така система електромагнітного збудження для неререверсивних двигунів послідовного збудження, як от для двигунів тролейбусів, електромобілів, стартерів для легкових і вантажних автомобілів, для мотор-колес самоскидів і великовантажних автомобілів.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Спільно з заводом "Електромаш", м. Херсон, був виготовлений і досліджений експериментальний двигун стартера з неявнополюсним статором, аналогом якого є статор на постійних магнітах для запуску двигунів автомобілів сімейства ВАЗ, Таврія [3, 4]. Двигун з постійними магнітами – це двигун з незалежним нерегульованим збудженням. Під час пуску створюється величезна МРС реакції якоря, яка діє розмагнічуючим способом на основний магнітний потік, створений магнітами. Основний потік зменшується майже в 2 рази, що негативно проявляється на пусковому моменті.

Експериментальний двигун з неявнополюсним статором при практично однаковій витраті мідного проводу розвиває на 23,5% більший пусковий момент, має більшу потужність на 4,5%, більший ККД на 4,6%. Собівартість двигуна зменшується, тому що не потрібні магніти.

**Мета роботи** – дослідити ефективність нового способу електромагнітного збудження в двигунах стартерів вантажних автомобілів.

**Матеріали і результати досліджень.** Для розуміння відмінностей експериментального двигуна стартера від серійного, а також для здійснення порівняльного аналізу наведемо конструктивні та електромагнітні параметри двигуна серійного стартера для запуску дизельних двигунів малої та середньої потужності СТ 370.000 (Україна), а також використаємо експериментально одержані технічні характеристики цього двигуна.

На рис. 1 зображено поперечний переріз магнітопроводу двигуна стартера СТ 370.000 і магнітне поле, яке утворюється в магнітопроводі при номінальному навантаженні.

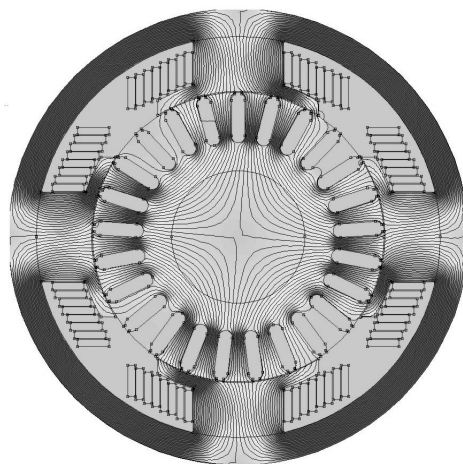


Рис. 1. Поперечний переріз магнітопроводу двигуна стартера СТ 370 і магнітне поле при навантаженні

Зовнішній діаметр корпусу  $D_k = 131$  мм, товщина стінки корпусу –  $b_k = 8$  мм. До внутрішньої поверхні корпусу прикріплені чотири полюси,  $2p=4$ , з котушками послідовного збудження, які ввімкнені послідовно з обмоткою якоря в дві паралельні гілки,  $2a_{зб} = 2$ , число витків котушки  $w_k = 8$  проводом  $2,12 \times 9$  мм.

Якір має зовнішній діаметр  $D_a = 83$  мм, повітряний зазор  $\delta = 0,3$  мм, довжина пакета  $l_\delta = 65$  мм, число пазів якоря  $z_a = 25$ . Число колекторних пластин  $\kappa = 25$ , обмотка хвильова одновиткова,  $w_c = 1$ , число активних провідників якоря  $N_a = \kappa \cdot u_n = 25 \cdot 2 = 50$ , провід  $2,65 \times 5,6$  мм, число паралельних віток якоря  $2a = 2$ .

Опір обмотки збудження:

$$R_{зб.75^\circ} = \frac{l_b \cdot w_k \cdot 2p}{47 \cdot (2a_{зб})^2 \cdot S_{м.зб.}} = \frac{0,272 \cdot 8 \cdot 4}{47 \cdot 2^2 \cdot 2,12 \cdot 9} = 0,2425 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Вага міді обмотки збудження:

$$m_{зб.} = 0,89 \cdot l_b \cdot w_k \cdot 2p \cdot S_{м.зб.} \cdot 10^{-2} = 0,89 \cdot 0,272 \cdot 8 \cdot 4 \cdot 2,12 \cdot 9 \cdot 10^{-2} = 1,478 \text{ кг.}$$

Опір обмотки якоря:

$$R_{a75^\circ} = \frac{l_b \cdot w_c \cdot \kappa}{47 \cdot (2a)^2 \cdot S_{м.а.}} = \frac{0,265 \cdot 1 \cdot 25}{47 \cdot 2^2 \cdot 2,65 \cdot 5,6} = 0,2375 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Вага міді обмотки якоря:

$$m_a = 0,89 \cdot l_b \cdot w_c \cdot k \cdot S_{m.a.} \cdot 10^{-2} =$$

$$= 0,89 \cdot 0,265 \cdot 25 \cdot 2,65 \cdot 5,6 \cdot 10^{-2} = 0,875 \text{ кг.}$$

Загальна вага мідного проводу:  $m_{зб.} + m_a = 2,353 \text{ кг.}$

Із технічних характеристик двигуна стартера (рис. 2), вважаючи, що в мить пуску обмотки нагріваються до  $75^\circ$ , знаходимо опір щіток та щіткового контакту:

$$R_{щ} = \frac{U_{пуск}}{I_{пуск}} - (R_{зб.75^\circ} + R_{a75^\circ}) = \frac{13B}{1650A} - 0,48 \cdot 10^{-2} =$$

$$= 0,31 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

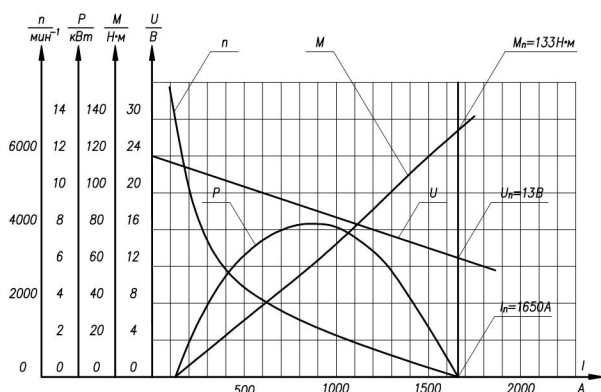


Рис. 2. Технічні характеристики двигуна стартера СТ 370

Максимальна корисна потужності  $P_2 = 8,2 \text{ кВт}$ , яка називається номінальною, виникає при струмі  $I_a = 900 \text{ А}$ . Напруга при цьому струмі  $U = 17,8 \text{ В}$  (рис. 2).

Споживана потужність:

$$P_1 = U I_a = 17,8 \cdot 900 = 16020 \text{ Вт.}$$

Корисна потужність:

$$P_2 = P_1 - (p_{м.зб.} + p_{м.а} + p_{щ}) - (p_{мх} + p_{см.а}) =$$

$$= 16020 - 900^2 \cdot 0,938 \cdot 10^{-2} - 220 = 8200 \text{ Вт.}$$

Втрати механічні і в сталі якоря, за приблизними розрахунками, приймаємо рівними  $220 \text{ Вт}$ . Як бачимо, сумарний опір міді і щіток збільшився. Якщо прийняти  $R_{щ} = \text{const}$ , температура обмоток, яка одержується із опору обмоток, в процесі розгону зростає до  $t = 152,5^\circ \text{С}$ .

Корисний момент на валу:

$$M_2 = 9555 \frac{P_2 [\text{кВт}]}{n [\text{об./хв.}]} = 9555 \frac{8,2}{1250} = 62,681 \text{ Нм.}$$

Момент холостого ходу:

$$M_0 = 9555 \frac{P_{мех.} + P_{см.а}}{n} = 9555 \frac{0,22}{1250} = 1,7 \text{ Нм.}$$

Електромагнітний момент:

$$M = M_2 + M_0 = 64,36 \text{ Нм.}$$

Магнітний потік при номінальній потужності:

$$\Phi = \frac{M \cdot 2\pi \cdot a}{p \cdot N_a \cdot I_a} = \frac{64,36 \cdot 2\pi \cdot 1}{2 \cdot 50 \cdot 900} = 0,449 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

Індукція в повітряному зазорі при номінальній потужності:

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{D_a l_\delta} = \frac{2 \cdot 0,449 \cdot 10^{-2}}{0,083 \cdot 0,065} = 1,6645 \text{ Тл.}$$

Коефіцієнт  $k_\mu$ , який враховує магнітний опір ма-

гнітопроводу, сягає при такій індукції надзвичайно великого значення:

$$k_\mu = \frac{F_{пол.}}{0,8 B_\delta k_\delta \cdot \delta \cdot 10^3} = \frac{3600}{0,8 \cdot 1,6645 \cdot 1,25 \cdot 0,3 \cdot 10^3} = 7,21,$$

де  $F_{пол.}$  – МРС полюса:

$$F_{пол.} = \frac{I_a}{2a_{зб.}} w_k.$$

При пуску  $k_\mu$  ще більше,  $k_\mu = 11,72$ .

Індукція  $B_\delta$  при пуску:

$$B_{\delta_{пуск}} = \frac{M_{пуск} \cdot 2\pi a}{N_a D_a l_\delta \cdot I_{пуск}} = \frac{133 \cdot 2\pi \cdot 1}{50 \cdot 0,083 \cdot 0,065 \cdot 1650} =$$

$$= 1,87657 \text{ Тл.}$$

Швидкість обертання якоря при номінальній потужності:

$$n = \frac{U - I_a (R_{зб.} + R_a + R_{щ})}{\frac{p N_a \cdot \Phi}{60a}} =$$

$$= \frac{17,8 - 900 \cdot 0,938 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 50 \cdot 0,449 \cdot 10^{-2}} \cdot 60 \cdot 1 = 1250,5 \text{ об./хв.}$$

Ця цифра,  $1250 \text{ об./хв.}$ , узгоджується з даними технічних характеристик, що свідчить про належну достовірність проведених розрахунків.

Поперечний розріз магнітопроводу неявнополюсного двигуна приведений на рис. 3.

Зовнішній діаметр корпусу такий же –  $D_k = 131 \text{ мм}$ , товщина стінки корпусу  $b_k$  менша,  $b_k = 6 \text{ мм}$ , оскільки частина магнітного потоку замикається по спинці статора. Довжина пакета статора  $l_\delta = 65 \text{ мм}$ , внутрішній діаметр  $D_{см.} = 89 \text{ мм}$ , зовнішній –  $D = 119 \text{ мм}$ . Статор чотириполюсний,  $2p = 4$ , на половині кожного полюсного ділення виготовлено 6 пазів, всього пазів  $z_1 = 6 \cdot 2p = 6 \cdot 4 = 24$ .

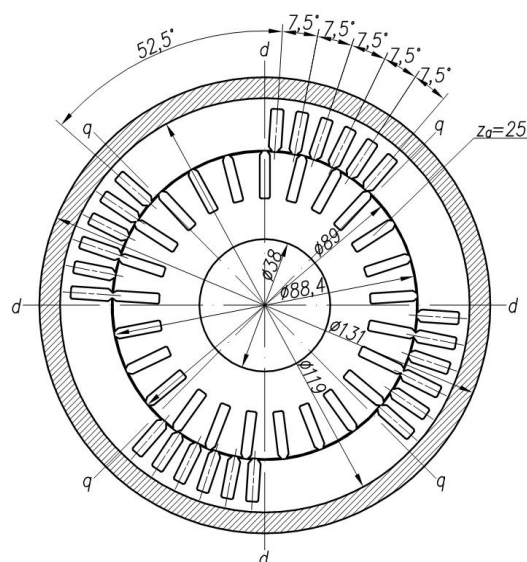


Рис. 3. Поперечний розріз магнітопроводу неявнополюсного двигуна

На рис. 4 показана чотириполюсна компенсаційна обмотка, яка послідовно з'єднана з обмоткою якоря. Паралельні вітки відсутні,  $2a = 1$ .

Обмотка має чотири котушки, по три одновитко-

ві секції в котушці, виконані проводом  $3 \times 9$  мм. Число витків обмотки  $w_k = 2p \cdot n_k = 4 \cdot 3 = 12$ , число активних провідників  $N_k = 2 \cdot w_k = 24$ .

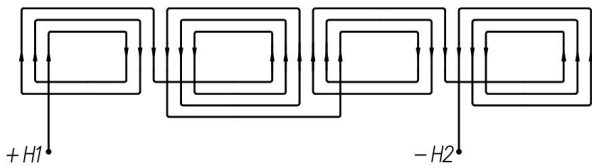


Рис. 4. Компенсаційна обмотка статора

Опір компенсаційної обмотки:

$$R_{k75^\circ} = \frac{l_b \cdot w_k}{47 \cdot S_{м.к.}} = \frac{0,28 \cdot 12}{47 \cdot 3 \cdot 9} = 0,2648 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Вага міді компенсаційної обмотки:

$$m_k = 0,89 \cdot l_b \cdot w_k \cdot S_{м.к.} = 0,89 \cdot 0,28 \cdot 12 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 10^{-2} = 0,807 \text{ кг.}$$

Якір подібний до якоря явнопольової машини, тільки відрізняється більшим діаметром,  $D_a = 88,4$  мм, розмірами паза, який показаний на рис. 5, та мідним проводом, провід  $2,24 \times 5,6$  мм.

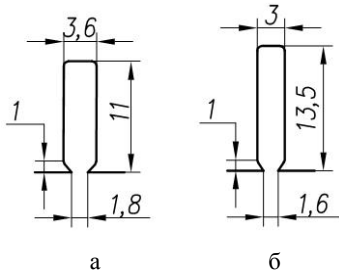


Рис. 5. Паз статора і паз якоря неявнополюсного двигуна

Опір обмотки якоря:

$$R_{a75^\circ} = \frac{l_b \cdot w_c \cdot \kappa}{47 \cdot (2a)^2 \cdot S_{м.а.}} = \frac{0,281 \cdot 25}{47 \cdot 2^2 \cdot 2,24 \cdot 5,6} = 0,298 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Вага міді обмотки якоря:

$$m_a = 0,89 \cdot l_b \cdot w_c \cdot \kappa \cdot S_{м.а.} \cdot 10^{-2} = 0,89 \cdot 0,281 \cdot 25 \cdot 2,24 \cdot 5,6 \cdot 10^{-2} = 0,784 \text{ кг.}$$

Загальна вага мідного проводу:

$$m_k + m_a = 1,591 \text{ кг.}$$

Сумарний опір обмоток і щіток та щіточного контакту при пуску

$$R_{к75^\circ} + R_{a75^\circ} + R_{щ} = (0,2648 + 0,298 + 0,31) \cdot 10^{-2} = 0,8728 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Струм при пуску:

$$I_{пуск} = \frac{U_{пуск}}{\sum R} = \frac{13,56 \text{ В}}{0,8728 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}} = 1554 \text{ А.}$$

Оскільки в неявнополюсному двигуні мінімальна ширина зубців збільшена в 1,36 рази, приблизно у стільки ж збільшується і магнітний потік при максимальних збудженнях, які мають місце при пуску і при номінальній потужності. З огляду на можливі неточності в розрахунках приймаємо збільшення магнітно-

го потоку при пуску в 1,3 рази. Електромагнітний момент пропорційний потоку і струму якоря, тому пусковий момент неявнополюсного двигуна:

$$M_{пуск} = M_{пуск.явн.} \cdot 1,3 \cdot \frac{I_{н.неявн.}}{I_{н.явн.}} = 133 \cdot 1,3 \cdot \frac{1554}{1650} = 162,8 \text{ Нм.}$$

Магнітний потік  $\Phi$  в номінальному режимі в неявнополюсному двигуні збільшується порівняно з явнопольовим в 1,2857 рази з огляду на деяке зменшення збудження. Для створення такого ж по величині електромагнітного моменту, як і в явнопольовому двигуні, неявнополюсний двигун буде споживати струм  $I_a = 700$  А. При цьому споживана потужність:

$$P_1 = UI_a = 19,28 \cdot 700 = 13496 \text{ Вт.}$$

Корисна потужність:

$$P_2 = P_1 - (p_{м.к.} + p_{м.а.} + p_{щ}) - (p_{мх} + p_{см.}) = 13496 - 700^2 \cdot 1,036 \cdot 10^{-2} - 220 = 8200 \text{ Вт.}$$

Температура обмоток статора і якоря зростає до  $t = 147,5$  °С. Щільність струму в компенсаційній обмотці  $j_k = 25,93$  А/мм<sup>2</sup>, в обмотці якоря –  $j_a = 27,9$  А/мм<sup>2</sup>. За рахунок менших втрат в міді обмоток нагрівання обмоток в неявнополюсному двигуні зменшується.

Швидкість обертання якоря при номінальній потужності:

$$n = \frac{U - I_a(R_k + R_a + R_{щ})}{\frac{pN_a}{60a} \cdot \Phi} = \frac{19,28 - 700 \cdot 1,036 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 50 \cdot 0,449 \cdot 1,2857 \cdot 10^{-2}} \cdot 60 \cdot 1 = 1250 \text{ об/хв.}$$

На рис. 6 показаний магнітопровід статора і якоря зі струмами в пазах, а на рис. 7 – магнітне поле, створюване струмами статора і якоря в магнітопроводі.

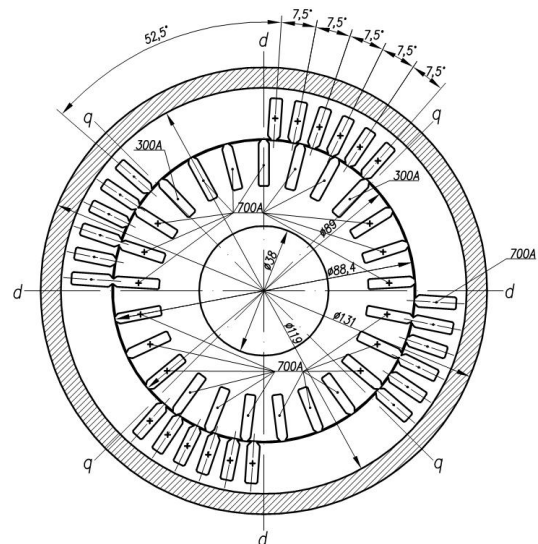


Рис. 6. Магнітопровід статора і якоря зі струмами в пазах

Як можна бачити із порівняння рис. 1 і 7, магнітне поле, створюване при навантаженні в магнітопроводі з неявнополюсним статором – рівномірне, на відміну від магнітопроводу з явновираженими полюсами.

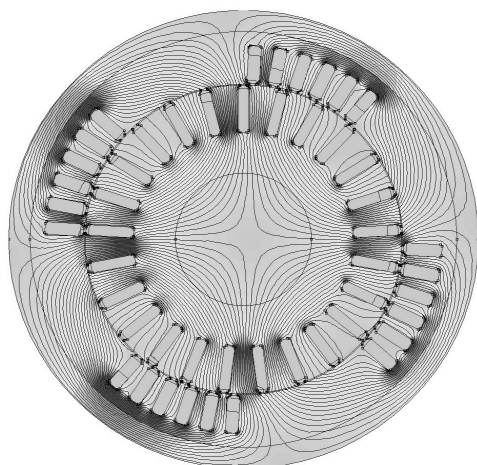


Рис. 7. Магнітне поле, створюване струмами статора і якоря в магнітопроводі

Таблиця 1

Порівняльні технічні дані двох різнотипних двигунів стартера, корисна потужність обох двигунів  $P_2 = 8,2$  кВт,  $n = 1250$  об/хв.,  $U = 24$  В.

Тип двигуна стартера	$\eta$	$U_{\text{пуск}}$	$I_{\text{пуск}}$	$M_{\text{пуск}}$	Вага міді		
					$G_{\text{м.ст}}$	$G_{\text{м.а}}$	$\Sigma G_{\text{м}}$
	%	В	А	Вт	кг	кг	кг
Явнопол.	51,2	13	1650	133	1,5	0,87	2,37
Неявнопол.	60,8	13,6	1554	162,8	0,8	0,79	1,59

Для практичної реалізації неявнополюсного двигуна статора компенсаційну обмотку потрібно виконувати із чотирьох паралельно ввімкнених котушок. Виконання паралельних пазів для котушок, які полегшують технологію виготовлення статорної обмотки, в чотириполюсному варіанті надзвичайно затруднене через великий скос пазів відносно радіальних ліній.

Більш раціонально неявнополюсний двигун стартера виконувати шестиполюсним із паралельно ввімкнених трьох або навіть шести котушок.

**Висновки.** Як видно із таблиці, де приведені порівняльні технічні дані двох різнотипних чотириполюсних двигунів стартера, неявнополюсний двигун переважає явнополюсний по всім параметрам: ККД більший на 18,7%, пусковий момент більший на 22% при меншому на 6% пусковому струмі, вага мідного проводу менша на 32%.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Луцик В.Д. Електричні машини постійного струму з новою системою електромагнітного збудження // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 39-41.
2. Луцик В.Д., Варванський А.Ю. Стартер-генератор постійного струму з неявнополюсним статором для тепловозів // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 6. – С. 21-24.
3. Луцик В.Д. Електричний двигун стартера з електромагнітним збудженням. Патент України № 89824. Опубл. 10.03.2010. Бюл. № 5.
4. Луцик В.Д. Електричний двигун постійного струму з неявнополюсним статором для стартерів легкових автомобілів // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції – Севастополь: СевНТУ, 2010. – С. 22-25.

**Bibliography (transliterated):** 1. Lushchik V.D. Elektrichni mashini postijnogo strumu z novoyu sistemoyu elektromagnitnogo zbudzhennya // Elektrotehnika i elektromehaniка. - 2008. - № 2. - S. 39-41. 2. Lushchik V.D., Varvanskij A.Yu. Starter-generator postijnogo strumu z neyavnopolyusnim statorom dlya teplovoziv // Elektrotehnika i elektromehaniка. - 2009. - № 6. - S. 21-24. 3. Lushchik V.D. Elektrichnij dvigun startera z elektromagnitnim zbudzhenniam. Patent Ukraini № 89824. Opubl. 10.03.2010. Byul. № 5. 4. Lushchik V.D. Elektrichnij dvigun postijnogo strumu z neyavnopolyusnim statorom dlya starteriv legkovich avtomobiliv // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-technicheskoy konferencii - Sevastopol': SevNTU, 2010. - S. 22-25.

Надійшла 29.02.2012

Луцик В'ячеслав Данилович, д.т.н., проф.  
Донбаський державний технічний університет  
кафедра електричних машин та апаратів,  
94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16  
тел.: (06442) 23123, e-mail: info@dgmi.edu.ua

Варванський Артем Юрійович, пров. інженер  
ПАТ "Електромашина"  
61016, Харків, вул. Муранова, 106  
тел. (050) 2303649, e-mail: Art\_v\_u@rambler.ru

Lushchik V.D., Varvansky A.Yu.

### A truck's starter motor with a nonsalient-pole stator.

A comparative analysis of two types of trucks' starter motor magnetic circuits, series-produced salient-pole magnetic circuits and nonsalient-pole stator magnetic circuits with an asymmetrical compensation winding, is presented. It is shown that starter motors with the new electromagnetic excitation system have much better figures over all parameters.

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