

Л. І. МАЗУРЕНКО, М. О. ШИХНЕНКО, О. В. ДЖУРА, О. А. БІЛИК

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАРТЕРНОГО РЕЖИМУ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА

За допомогою раніше розробленої математичної моделі проведено дослідження процесів вентильно-індукторного стартер-генератора в стартерному режимі при живленні від акумуляторної батареї. Виконано розрахунки процесів пуску стартер-генератора при зміні моменту інерції, ємності конденсатора вентильного перетворювача, опору акумуляторної батареї та визначено їх вплив на тривалість та енергоефективність пускових процесів при відсутності обмеження фазного струму. Зроблено висновок про необхідність розробки нових принципів формування процесів стартерних режимів вентильно-індукторного стартер-генератора для забезпечення заданих тривалості пуску, фазних струмів та мінімальної спожитої енергії АБ.

Ключові слова: вентильно-індукторний стартер-генератор, стартерний режим, акумуляторна батарея, математична модель.

С помощью ранее разработанной математической модели проведено исследование процессов вентильно-индукторного стартер-генератора в стартерном режиме при питании от аккумуляторной батареи. Выполнены расчеты процессов пуска стартер-генератора при изменении момента инерции, емкости конденсатора вентильного преобразователя, сопротивления аккумуляторной батареи и определено их влияние на продолжительность и энергоэффективность пусковых процессов при отсутствии ограничения фазного тока. Сделан вывод о необходимости разработки новых принципов формирования процессов стартерных режимов вентильно-индукторного стартер-генератора для обеспечения заданных продолжительности пуска, фазных токов и минимальной потребляемой энергии АБ.

Ключевые слова: вентильно-индукторный стартер-генератор, стартерный режим, аккумуляторная батарея, математическая модель.

Using the previously developed mathematical model, the investigation of the switched reluctance starter-generator in starter mode powered by battery was performed. The calculations of a starter-generator starting processes was performed when changing the moment of inertia, the semiconductor converter capacitor capacitance and the battery resistance. Their influence on the duration and the efficiency of starting processes in the absence of the phase current limit was determined. It is concluded that it is necessary to develop new principles of formation the switched reluctance starter-generator starter modes processes to provide a predetermined starting time, phase currents and minimum energy consumption of the battery.

Keywords: switched reluctance starter-generator, starter mode, battery, mathematical model.

Вступ. Вентильно-індукторний стартер-генератор (ВІСтГ) – це електромеханічний комплекс, який складається із індукторної машини (ІМ), напівпровідникового перетворювача і працює паралельно з акумуляторною батареєю (АБ), яка є джерелом енергії скінченної потужності. Важливе значення мають як стартерний, так і генераторний режими ВІСтГ. В стартерному режимі ІМ отримує живлення від перетворювача і розкручує первинний двигун енергоблока або транспортного засобу (турбіну, дизель) до заданої частоти обертання і його переходу на основне робоче паливо.

Дослідження стартерного режиму асинхронного вентильного стартер-генератора при живленні від АБ достатньо широко наведені в технічній літературі [1]. В той же час питання стартерного режиму вентильно-індукторних стартер-генераторів при живленні від АБ практично не розглядалось. Відомі деякі дослідження пуску вентильно-індукторних двигунів від мережі постійного та змінного струму нескінченної потужності [2-4].

Вимоги до ВІСтГ в стартерному режимі залежать від області його використання. Основні з них наступні:

- мінімальні втрати, нагрів та пульсації моменту ІМ;
- мінімальні втрати та стрибки струму в елементах напівпровідникового перетворювача;
- тривалість запуску не повинна перевищувати заданої для запобігання перегріву турбіни (дизеля);
- забезпечення плавності розкрутки турбіни (дизеля) так як різкі удари і поштовхи можуть призвести до її виходу з ладу.

При цьому стартерний режим ВІСтГ може здійснюватися як при обмеженні фазного струму, так і без його обмеження.

Метою статті є дослідження процесів ВІСтГ в стартерному режимі без обмеження фазного струму і впливу на них параметрів.

Дослідження процесів ВІСтГ в стартерному режимі. Дослідження стартерного режиму ВІСтГ проводились методом математичного моделювання. Адекватність розрахунків за математичною моделлю реальним фізичним процесам перевірена в [5, 6]. Розрахунки перехідних процесів виконано для стартер-генератора за наступними номінальними даними: потужність – 3 кВт; напруга постійного струму 28 В; частота обертання – 3000 об/хв. Вентильно-індукторний стартер-генератор виконано за схемою, наведеною в [6].

При формуванні математичної моделі стартерного режиму використані загальноприйняті припущення [5, 6]. Математична модель базується на рівняннях для визначення поточозчеплень фаз ІМ, струмів фаз, залежності індуктивності фази від струму фази і кута повороту ротора відносно фази статора, що дозволяє врахувати нелінійність магнітної системи електричної машини, рівняння для визначення кута повороту ротора відносно фази статора як залишку від ділення

кута повороту ротора θ ($\frac{d\theta}{dt} = \omega$) на кутову відстань

між полюсами ротора $2\pi/Z_R - \theta_{\phi} = \text{mod}(\theta; 2\pi/Z_R)$, де Z_R – кількість полюсів ротора, рівнянь для визначення електромагнітного моменту утвореного однією фазою ІМ, сумарного електромагнітного моменту від дії всіх фаз, рівняння руху та рівняння для визначення струму джерела живлення. Крім вказаних рівнянь математична модель включає системи логічних виразів, що описують вентильний перетворювач (ВП). Отримана ін-

формація про стан напівпровідникових елементів ВП дозволяє визначити фазну напругу в залежності від напруги кола постійного струму, розподіл струмів у вітках перетворювача, зв'язок струму джерела живлення з фазними струмами [6].

Стартерний режим ВІСтГ здійснюється наступним чином: АБ під'єднується до конденсаторів ВП які заряджаються до рівня її напруги. В подальшому система керування забезпечує підключення фазних обмоток ІМ за допомогою ВП до шини постійного струму у відповідності з показами датчика положення ротора.

При аналізі варіантів стартерних режимів ВІСтГ для їх порівняння доцільно використати час пуску, максимальне значення фазного струму та енергію, витрачену АБ, за умови, що ЕРС акумуляторної батареї $E_{AB(ном)}=28$ В, внутрішній опір АБ $R_{AB(ном)}=0,02$ Ом, ємність конденсаторів ВП $C_{ном}=0,8976$ Ф, опір конденсаторів ВП $R_{C(ном)}=1,25 \cdot 10^{-4}$ Ом, момент інерції $J_{C(ном)}=0,1$ кг·м².

При стартерному режимі амплітудні значення фазних струмів індукторної машини залежать від проти-ЕРС, яка визначається рівнем напруги живлення та втратами в обмотках. В початковий момент пуску проти-ЕРС відсутня і струм фази різко зростає, що потребує значних витрат енергії. Це викликає просадку напруги АБ (за номінальних параметрів напруга АБ знижується до 15 В) і, як наслідок, фазні струми знижуються. Електромагнітний момент при пуску досить значний. За номінальних даних ВІСтГ відношення пускових значень струмів та моменту до цих величин при досягненні заданої частоти обертання (1500 об/хв) складає відповідно 3 і 6. По мірі розкручування ротора момент зменшується і частота обертання змінюється відповідно механічній характеристиці, яка характерна для двигуна постійного струму послідовного збудження.

Пуски вентильно-індукторного стартер-генератора при $J_c=var$. Пуски здійснювались за моментів інерції приводу $0,1 \dots 0,7$ кг·м² (рис. 1, 2) Тривалість виходу стартера на частоту 1500 об/хв зростає зі збільшенням моменту інерції агрегату. Спостерігається зміна амплітуди перехідних фазних струмів зі збільшенням моменту інерції (рис. 1).

Величина моменту інерції значно впливає як на енергію, що витрачається АБ (рис. 2, а) при стартерному режимі ВІСтГ, так і споживається безпосередньо електричною машиною (рис. 2, б).

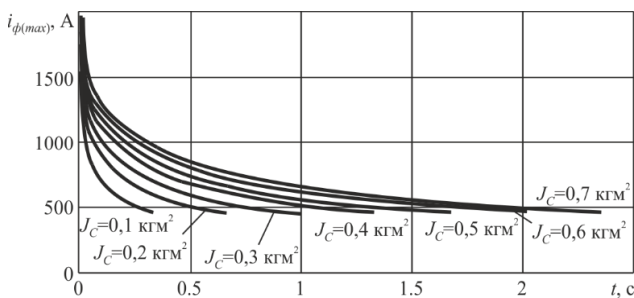


Рис. 1 – Огинаючі максимальних значень фазних струмів при пуску ВІСтГ за різних значень моменту інерції

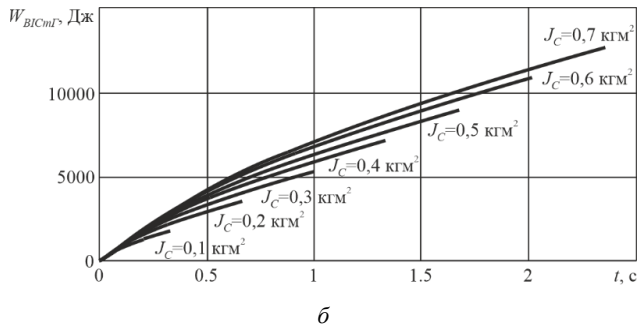
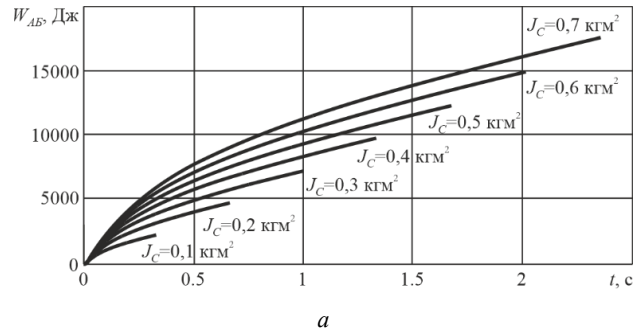


Рис. 2 – Часові залежності енергії при пуску ВІСтГ за різних значень моменту інерції:
а – загальна і б – корисна енергія витрачена АБ

Пуски вентильно-індукторного стартер-генератора при $C=var$. Величина ємності конденсатора ВП визначає ступінь згладжування струму навантаження, а отже вона впливає на величину просадки напруги АБ. Так при збільшенні ємності від 0,01 до 1 Ф величина просадки напруги на початку пуску зменшується. При 0,01 Ф вона становить близько 20 В, а при 1 Ф – 14 В. Огинаючі максимальних значень фазних струмів незначно відрізняються на інтервалі пуску 0...0,15 с (рис. 3). Енергія, що витрачається АБ під час пуску, збільшується зі зменшенням ємності конденсаторів ВП (рис. 4, а). Хоча зі зниженням ємності конденсаторної батареї зростає її опір, споживана ВІМ енергія практично незмінна (рис. 4, б). Тривалість пуску стартера при зміні ємності конденсатора незмінна і становить 0,33 с.

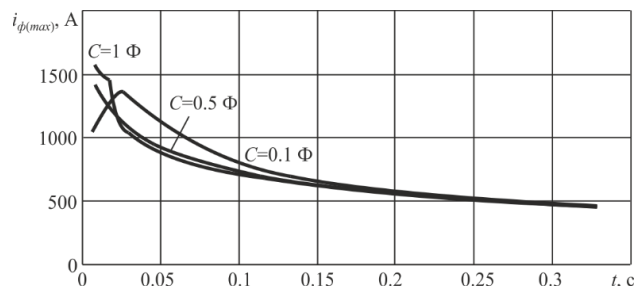


Рис. 3 – Огинаючі максимальних значень фазних струмів при пуску ВІСтГ за різних значень ємності конденсатора

Пуски вентильно-індукторного стартер-генератора при $R_{AB}=var$. При зміні R_{AB} в діапазоні $R_{AB(ном)}/8 \dots 8 \cdot R_{AB(ном)}$ напруга і струм АБ змінюються за залежністю близькою до логарифмічної. При збільшенні R_{AB} зростає падіння напруги на внутрішньому опорі АБ, її струм при цьому зменшується. Це призводить до затягування процесу пуску.

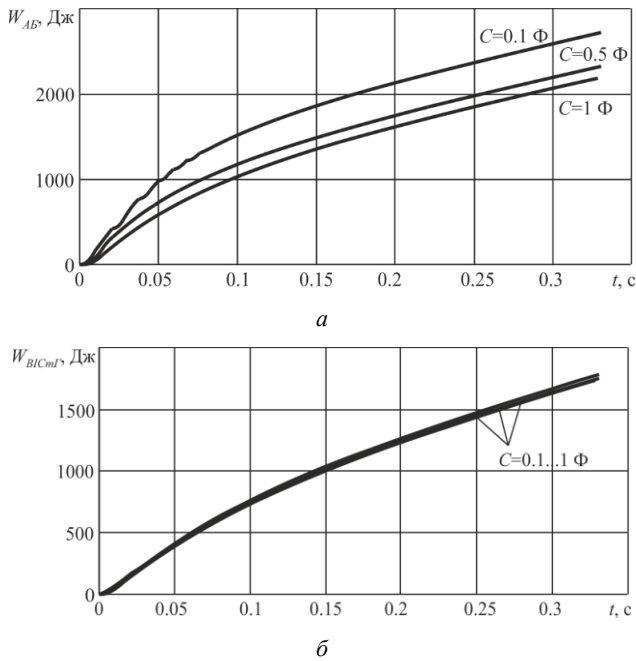


Рис. 4 – Часові залежності енергії при пуску ВІСтГ за різних значень ємності конденсатора: *a* – загальна і *б* – корисна енергія витрачена АБ

Позитивним наслідком збільшення внутрішнього опору АБ є зниження фазних струмів при пуску (рис. 5). Якщо розглядати пуск при будь-якому R_{AB} , то лише перші імпульси фазного струму мають амплітуди близько 1500 А і більше. Зі збільшенням частоти обертання фазні струми значно знижуються. Перші імпульси викликані зменшенням напруги АБ в початковий момент пуску на час, рівний тривалості розряду конденсатора ВП до рівня просадки напруги АБ.

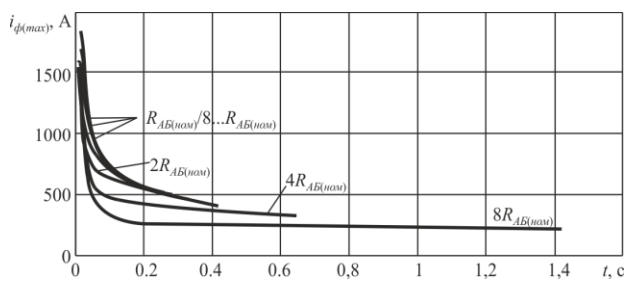


Рис. 5 – Огинаючі максимальних значень фазних струмів при пуску ВІСтГ за зміни опору АБ

Недоліком стартерних режимів ВІСтГ з живленням від АБ з великим R_{AB} є затягування процесу пуску та збільшення енергії, що витрачається при його здійсненні (рис. 6, *a*, *б*).

Узагальнені результати досліджень стартерних режимів за зміни параметрів ВІСтГ в порівнянні з пуском при номінальних параметрах наведені в таблиці 1, де W_{AB} – енергія спожита від АБ; $W_{BICMГ}$ – енергія спожита ВІМ; $W_{вт}$ – енергія втрат; $W_{AB(nom)}=2067$ Дж, $W_{BICMГ(nom)}=1708$ Дж, $W_{вт(nom)}=359$ Дж – значення енергій при номінальних параметрах.

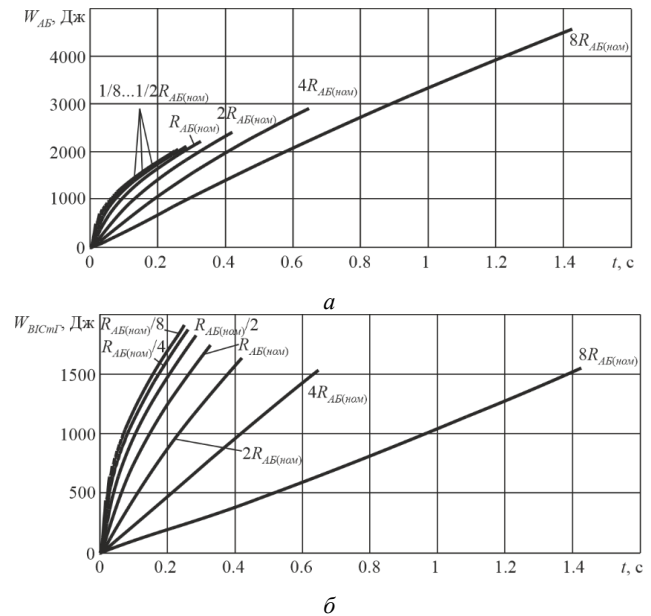


Рис. 6 – Часові залежності енергії при пуску ВІСтГ за зміни опору АБ: *a* – загальна і *б* – корисна енергія витрачена АБ

Таблиця 1 – Дослідження пусків ВІСтГ при зміні параметрів

Параметри	Відношення $W_{AB}/W_{AB(nom)}$, в.о.	Відношення $W_{BICMГ}/W_{BICMГ(nom)}$, в.о.	Відношення $W_{вт}/W_{вт(nom)}$, в.о.
$J_C=0,2$ кг·м ²	2,067	2,04	2,197
$J_C=0,3$ кг·м ²	3,148	3,084	3,453
$J_C=0,4$ кг·м ²	4,237	4,129	4,749
$J_C=0,5$ кг·м ²	5,336	5,179	6,079
$J_C=0,6$ кг·м ²	6,444	6,236	7,437
$J_C=0,7$ кг·м ²	7,561	7,296	8,82
$C=0,01$ Ф, $R_C=R_{C(nom)} \cdot C/C_{ном}$	1,202	1,039	1,976
$C=0,1$ Ф, $R_C=R_{C(nom)} \cdot C/C_{ном}$	1,113	1,025	1,53
$C=0,2$ Ф, $R_C=R_{C(nom)} \cdot C/C_{ном}$	1,072	1,016	1,334
$C=0,3$ Ф, $R_C=R_{C(nom)} \cdot C/C_{ном}$	1,046	1,01	1,219
$C=0,4$ Ф, $R_C=R_{C(nom)} \cdot C/C_{ном}$	1,035	1,011	1,149
$C=0,5$ Ф, $R_C=R_{C(nom)} \cdot C/C_{ном}$	1,025	1,009	1,102
$C=0,6$ Ф, $R_C=R_{C(nom)} \cdot C/C_{ном}$	1,017	1,007	1,068
$C=0,7$ Ф, $R_C=R_{C(nom)} \cdot C/C_{ном}$	1,011	1,004	1,041
$C=0,8$ Ф, $R_C=R_{C(nom)} \cdot C/C_{ном}$	1,005	1,002	1,019
$C=1$ Ф, $R_C=R_{C(nom)} \cdot C/C_{ном}$	0,995	0,998	0,983
$R_{AB}=R_{AB(nom)}/8$	0,927	1,093	0,135
$R_{AB}=R_{AB(nom)}/4$	0,937	1,077	0,269
$R_{AB}=R_{AB(nom)}/2$	0,955	1,045	0,527
$R_{AB}=2 \cdot R_{AB(nom)}$	1,1	0,943	1,847
$R_{AB}=4 \cdot R_{AB(nom)}$	1,34	0,887	3,5
$R_{AB}=8 \cdot R_{AB(nom)}$	2,168	0,914	8,136

Висновки.

1. Досліджено вплив моменту інерції, ємності конденсаторів у колі постійного струму ВП та внутрішнього опору АБ на процеси в стартерному режимі ВІСтГ. Показано, що при зміні моменту інерції та внутрішнього опору АБ можливо змінювати час за який електрична машина сягає заданої частоти обертання, а також енергію, витрачену АБ під час пуску та спожити ВІМ. Час стартерного режиму та енергія що споживається ВІМ не залежить від величини ємності конденсаторів. Величина ємності впливає на енергію, що витрачається АБ за час пуску.

2. Параметри, вплив яких досліджувався, недостатньо знижують струми електричної машини на початковій стадії пуску.

3. Доцільно розробити нові принципи формування процесів в стартерних режимах ВІСтГ, які забезпечили б одночасно заданий час пуску, мінімальну енергію, спожиту від АБ, та задані фазні струми в цих режимах.

Список літератури

1. Мазуренко Л. І. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок / Л. И. Мазуренко, А. И. Лищенко. – К.: Наукова думка. – 2011. – 271 с.
2. Николаев В. В. Разработка интегрированного стартер-генератора на основе вентильно-индукторной машины / В. В. Николаев, В. А. Рыбников // Электричество. – 2005. – № 5. – С. 32-38.
3. Miller T. J. E. Electronic Control of Switched Reluctance Machines / T. J. E. Miller. – UK, Oxford: Newnes Publ., 2001. – 272 p.
4. Krishnan R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications / R. Krishnan – US, Florida: CRC Press Publ., 2001. – 416 p.
5. Мазуренко Л. І. Моделювання режимів та регулювання частоти обертання вентильно-індукторного двигуна з перетворювачем із С-скиданням і коливальним поверненням енергії при зміні кутів

комутації / Л. І. Мазуренко, О. В. Бібік, Білик О. А., М. О. Шихненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2016. – № 11 (1183). – С. 64–69.

6. Shykhnenko M. O. Mathematical Model, Research and Improvement of the Switched Reluctance Generator Voltage Stabilization Methods / M. O. Shykhnenko, L. I. Mazurenko // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – 2018. – С. 338–342.

References (transliterated)

1. Mazurenko L. I., Lishchenko A. I. *Asinchronnyie generatoryi s ventilnyim i ventilno-emkostnyim vzbuzhdeniem dlya avtonomnyih energoustanovok* [Asynchronous generators with valve and valve-capacitive excitation for autonomous power installations]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2011, 271 p. (Rus)
2. Nikolaev V. V., Rybnikov V. A. *Razrabotka integrirovannogo start'er-generatora na osnove ventil'no-induktornoj mashiny* [Development of an integrated starter-generator based on a switched reluctance machine]. *Electricity*. 2005, no. 5, pp. 32-38. (Rus)
3. Miller T. J. E. *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*. UK, Oxford: Newnes Publ., 2001, 27 p.
4. Krishnan R. *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*. US, Florida: CRC Press Publ., 2001, 416 p.
5. Mazurenko L. I., Bibik O. V., Bilyk O. A., Shihnenko M. O. *Modelyuvannya rezhimiv ta reguluyuvannya chastoti obertannya ventilno-induktornogo dviguna z peretvoryuvachem iz S-skidanniam i kolivallynim povertenniam energii pri zmini kutiv* [Simulation mode and speed control of switched reluctance motor using a converter with the C-dump and the oscillation return of energy at changing switching angles]. *Visnik NTU «HPi»*. Seriya: *Elektrichni mashini ta elektromehaniche peretvorennia energiyi*. 2016, no. 11 (1183), pp. 64-69. (Ukr)
6. Shykhnenko M. O., Mazurenko L. I., Dzhura O. V., Bilyk O. A. *Mathematical Model, Research and Improvement of the Switched Reluctance Generator Voltage Stabilization Methods*. 2018 *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2018, pp. 338–342.

Надійшла (received) 13.02.2020

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Мазуренко Л. І. Дослідження стартерного режиму вентильно-індукторного стартер-генератора / Л. І. Мазуренко, М. О. Шихненко, О. В. Джура, О. А. Білик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 97-100. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.16.

Мазуренко Л. І. Исследования стартерного режима вентильно-индукторного стартер-генератора / Л. И. Мазуренко, М. О. Шихненко, А. В. Джура, А. А. Билык // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 97-100. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.16.

Mazurenko L. I. The research of the switched reluctance starter-generator in starter mode / L. I. Mazurenko, M. O. Shykhnenko, O. V. Dzhura, O. A. Bilyk // *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – 2020. – No. 3 (1357). – P. 97-100. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.16.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мазуренко Леонід Іванович (Мазуренко Леонид Иванович, Mazurenko Leonid Ivanovych) – доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, завідувач відділом електромеханічних систем, м. Київ, Україна, тел.: (044)366-24-91; ORCID: 0000-0002-7059-249X; e-mail: mlins@ied.org.ua.

Шихненко Максим Олегович (Шихненко Максим Олегович, Shykhnenko Maksym Olehovych) – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, молодший науковий співробітник, м. Київ, Україна, тел.: (044)366-25-72; ORCID: 0000-0003-4012-1731; e-mail: s.maxim@email.ua.

Джура Олександр Васильович (Джура Александр Васильевич, Dzhura Oleksandr Vasylovych) – кандидат технічних наук, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, старший науковий співробітник; тел.: (044)366-25-72; ORCID: 0000-0002-0224-3351; e-mail: mlins@ied.org.ua.

Білик Олександр Анатолійович (Билык Александр Анатольевич, Bilyk Oleksandr Anatoliiovych) – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, провідний інженер; тел.: (044)366-25-72; ORCID: 0000-0003-4459-6718; e-mail: mlins@ied.org.ua.