

ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКА ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА

Л.І. Мазуренко*, докт. техн. наук, О.В. Джура**, канд. техн. наук, М.О. Шихненко***, О.А. Білик****

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: mlins@ied.org.ua

Розглянуто вентильно-індукторну машину як альтернативу стартер-генераторам на основі асинхронних машин та машин постійного струму. Представлено структурну схему експериментального зразка вентильно-індукторного стартер-генератора. Проведено експериментальні дослідження стартер-генератора в режимі двигуна при пусках за наявності регулювання рівня фазного струму. Досліджено роботу вентильно-індукторного стартер-генератора в генераторному режимі, проаналізовано квазісталі та перехідні процеси, викликані зміною навантаження. Водночас визначено динамічні та статичні показники якості енергії в разі накидання та скидання навантаження: тривалість перехідних процесів, перехідне та стале відхилення напруги постійного струму, її коефіцієнт пульсації та гармонічний склад. Показано, що генерована електроенергія за якістю відповідає стандартам. Дані експериментальних досліджень підтверджують можливість використання вентильно-індукторної машини як стартер-генератора за умови його виконання відповідно до описаного в статті технічного рішення. Бібл. 10, рис. 5, таблиця.

Ключові слова: вентильно-індукторна машина, вентильний перетворювач, стартер-генератор, система керування, акумуляторна батарея, перехідний процес, гармонічний склад.

Вступ. Для запуску двигунів енергоблоків і транспортних засобів як електричних стартерів доцільно використовувати стартер-генератор. Під час пуску він працює як двигун, а після запуску – як генератор. Застосування стартер-генератора дає значну економію за масою пускових пристроїв, оскільки в одній машині поєднано двигун і генератор.

У конструктивному відношенні стосовно безпосередньо електричних машин стартер-генератори як на основі машини постійного струму, так і асинхронної машини, практично не відрізняються від класичних машин цих типів. Однак стартер-генератор на основі машини постійного струму (наприклад, типу ГСР-СТ) має паралельну і послідовну обмотки збудження: у режимі двигуна працюють або обидві обмотки, або тільки послідовна; у режимі генератора збудження здійснює паралельна обмотка [1]. Асинхронний стартер-генератор укомплектований напівпровідниковим перетворювачем, виконаним за схемою автономного інвертора напруги. У генераторному режимі перетворювач виконує функції системи збудження і забезпечує асинхронний генератор реактивною потужністю. У режимі двигуна за його допомогою здійснюється запуск первинних двигунів відповідно до заданих умов [2, 3].

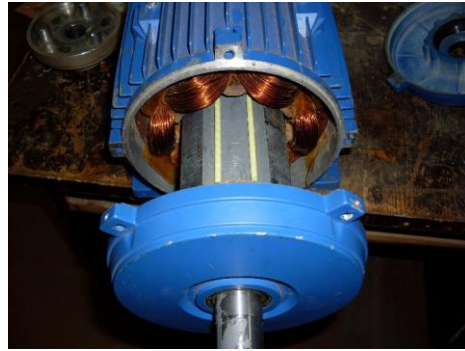
Перспективне використання вентильно-індукторних машин (ВІМ) як стартер-генераторів описано в [4]. Водночас питання розробки і створення їх фізичних моделей та дослідження режимів у технічній літературі розглянуто недостатньо [5–7].

Метою статті є проілюструвати одне із можливих технічних рішень, яке використано при розробці та створенні експериментального зразка вентильно-індукторного стартер-генератора (ВІСтГ) та результати дослідження його стартерного і генераторного режимів.

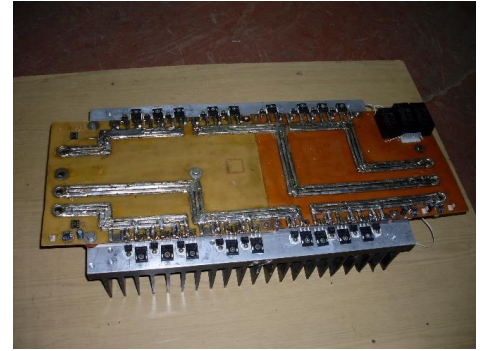
Експериментальний зразок ВІСтГ. Зразок складається з ВІМ, комутатора фаз (вентильний перетворювач), блоку накопичувальних конденсаторів та системи керування. Вентильно-індукторну машину (рис. 1 а) виконано за схемою: шість полюсів статора (рис. 2 а) і чотири полюси ротора (рис. 2 б). Комутатор створено на основі MOSFET транзисторів та зворотних діодів, закріплених на теплопровідному радіаторі та сполучених з блоком конденсаторів (БК) та з фазними обмотками ВІМ (рис. 1 б). Стартер-генератор має такі номінальні дані: потужність – 3 кВт; напруга постійного струму – 28 В; частота обертання – 3000 об/хв.

Технічне рішення, використане в процесі розробки та створення експериментального зразка ВІСтГ, ілюструє його блок-схема (рис. 3).

У стартерному режимі на БК подається напруга від акумуляторної батареї (АБ). Датчик положення ротора (ДПР А В С) формує сигнал логічної одиниці для логічного елемента та фази, відносно полюса статора якої полюс ротора зсунуто на кут $0...30^\circ$. Цей логічний елемент керує драйвером верхнього та нижнього плечей комутатора відповідної фази (Др А – Др С). Сигнал з датчика струму (ДС А – ДС С), який на початку дорівнює нулю через відсутність



а



б

Рис. 1



а



б

Рис. 2

струму у фазі, подається через підсилювач (П) на інверсний вхід компаратора з гістерезисом (КГ). На неінверсний вхід цього компаратора подається сигнал з формувача опорної напруги ФОН1, який забезпечує рівень обмеження струму фази ВІМ. За такої подачі сигналів на виході компаратора (КГ) присутня позитивна напруга, яка для логічного елемента і є логічною одиницею. При натисканні кнопки «пуск» на відповідному вході цього логічного елемента з'являється ще одна логічна одиниця, що призводить до появи логічної одиниці на його виході. Це своєю чергою спричинює формування драйвером верхнього та нижнього плечей напруг на затворах відповідних MOSFET ключів та до подання напруги на обмотку відповідної фази ВІМ. У фазі починає зростати струм.

У випадку розташування полюса ротора зі зсувом $25...30^\circ$ до полюса статора індукти-

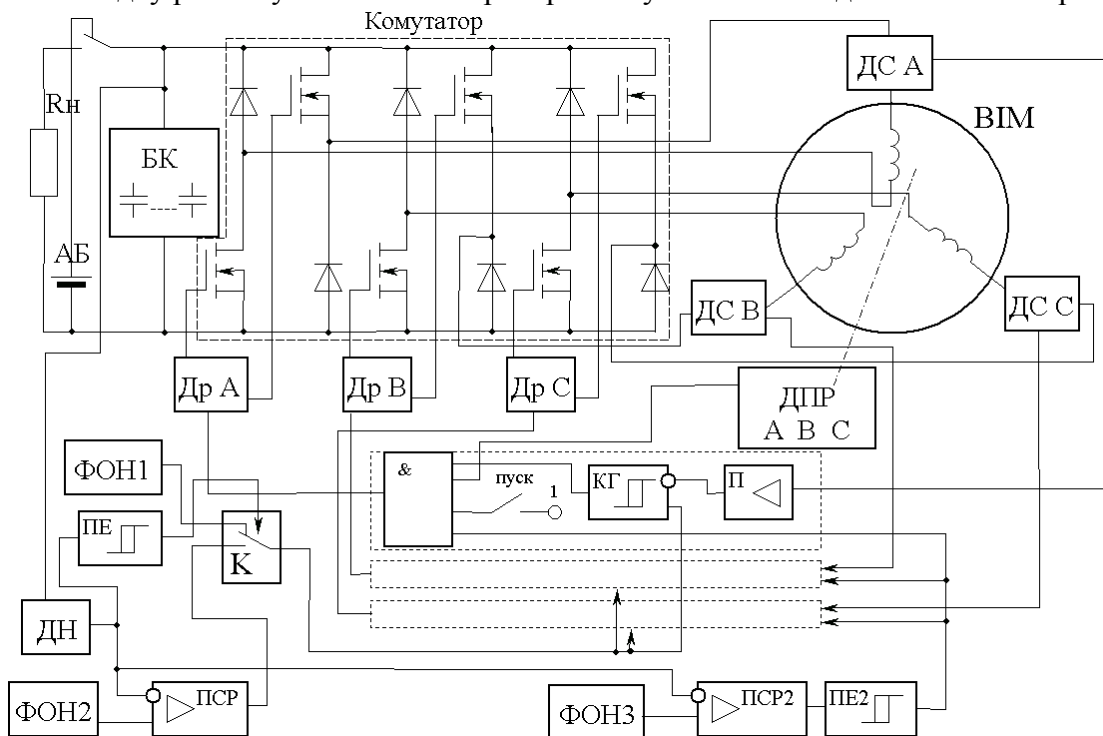


Рис. 3

вність фази статора має найменше значення і наростання струму відбувається досить інтенсивно, що з огляду на нерухомість ротора може призвести до виникнення значних струмів ключів комутатора. Для уникнення цього здійснюється обмеження струму фази. При перевищенні напругою підсиленого сигналу датчика струму напруги ФОН1 на величину уставки гістерезису на виході компаратора формується від'ємна напруга, яка для логічного елемента & є нулем. На виході цього елемента формується такий самий логічний нуль, що змушує драйвери перевести ключі комутатора в закритий стан. Струм обмотки фази замикається через відповідні зворотні діоди та АБ, зменшуючи своє значення. Коли підсилений сигнал з датчика струму стає меншим, ніж напруга ФОН1 на величину уставки гістерезису, на виході компаратора з'являється позитивна напруга, яка знову вмикає ключі відповідної фази, і струм в обмотці починає зростати. Зі зникненням сигналу ДПР у результаті обертання ротора, процес збудження відповідної фази припиняється і розпочинається в іншій. Зміною напруги ФОН1 здійснюється регулювання максимального значення струму фази, а отже і механічного моменту на валу машини та частоти обертання ВІМ в стартерному режимі.

У генераторному режимі, коли напруга на БК починає зростати, за певного її значення пороговий елемент (ПЕ) перемикає вихід комутатора К на ланцюг стабілізації, що складається з генератора опорної напруги ФОН2 та підсилювача сигналу розузгодження (ПСР). Напруга на виході ПСР починає зменшуватися, що призводить до більш раннього вимкнення фази внаслідок відміни на виході компаратора КГ логічної одиниці і відповідно на вході елемента &, при меншому рівні підсиленого сигналу з датчика струму. У результаті цього зменшується і струм обмотки фази, що спричинює уповільнення наростання напруги БК. У разі холостого ходу процес зупиняється при напрузі БК і струмі фази такого рівня, коли вся згенерована енергія витрачається на втрати в обмотках, комутаторі й БК та на механічні втрати. При накиданні навантаження напруга БК починає зменшуватися, що призводить до збільшення напруги на виході ПСР та до збільшення значення струму фази. Це своєю чергою нівелює зменшення напруги на БК. Елементи ФОН3, підсилювач сигналу розузгодження ПСР2 та пороговий елемент ПЕ2 формують систему захисту від аварійних ситуацій, яка блокує подачу імпульсів на відкриття транзисторів при досягненні напругою БК певного критичного значення, яке визначається ФОН3.

Експериментальні дослідження ВІСтГ. Для експериментального дослідження ВІСтГ вал ВІМ через пальцеву муфту був стикований з валом асинхронного двигуна (АД) типу 4А100L2У3 потужністю 5,5 кВт. За допомогою осцилографа Siglent SDS1102CML+ знімалися розгонні характеристики в стартерному режимі, форми струму й напруги фаз, пульсації напруги на конденсаторах у генераторному та стартерному режимах. Для розрахунку коефіцієнта корисної дії ВІСтГ та інших характеристик у генераторному режимі до фаз асинхронної машини було підключено комплект К506, що вимірював її потужність, напругу та струм фаз, а в ланцюг навантаження постійного струму ВІСтГ був включений амперметр та вольтметр.

Стартерний режим ВІСтГ має здійснюватися при мінімальних втратах у електричній машині та елементах вентиляного перетворювача. За таких умов необхідно забезпечити заданий час пуску та плавність розкрутки первинного двигуна, оскільки різкі удари та поштовхи можуть призвести до виходу його з ладу [2].

Стартер має розкручувати, наприклад, газову турбіну, в якій номінальна частота обертання складає 4000...9000 об/хв, до частоти 1200...1500 об/хв. Ускладнення під час пуску викликають стрибки струму через напівпровідникові елементи комутатора. Найбільш простим рішенням за цих обставин є обмеження фазного струму, що здійснюється шляхом відключення фази від джерела напруги за досягнення її струмом заданого значення. Такий підхід реалізовано в експериментальному зразку (рис. 3).

Осцилограми на рис. 4 а ілюструють характер зміни частоти обертання і фазного струму експериментального зразка ВІСтГ у випадку обмеження фазного струму (масштаб $m_t=50$ мс/поділ; $m_n=919,33$ об/хв/поділ; $m_I=86,67$ А/поділ). Тривалість розгону до частоти обертання 1500 об/хв складає 0,23 с за умови, що ЕРС акумуляторної батареї – 25,5 В, а її внутрішній опір – 0,0782 Ом. Характер зміни фазної напруги в разі обмеження струму пока-

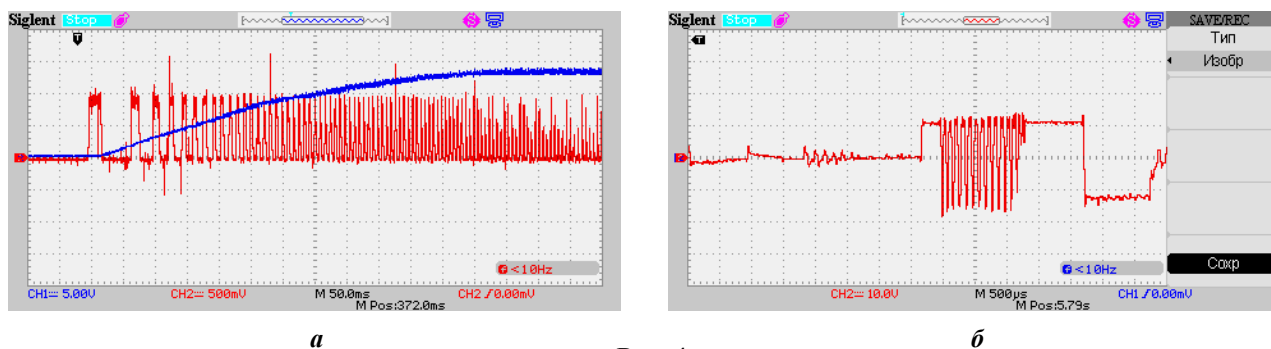


Рис. 4

зано на рис. 4 б. Осцилограма отримана за частоти обертання 1742 об/хв та напруги постійного струму близько 12 В ($m_t=0,5$ мс/поділ; $mU=10$ В/поділ).

Використовуючи обмеження струму, можна як зменшити викиди струму через напівпровідникові елементи, так і забезпечити заданий час запуску.

У генераторному режимі ВІСтГ досліджувались коливання вихідної напруги постійного струму та час її відновлювання при накиданні та скиданні навантаження (динамічні показники) та показник відхилення цієї напруги під навантаженням від її рівня в режимі холостого ходу (статичний показник). Ці показники характеризують якість електроенергії незалежно від типу генератора й області його використання [2, 8]. Результати досліджень ілюструє осцилограма вихідної напруги постійного струму на рис. 5. Перехідне відхилення напруги постійного струму при накиданні/скиданні номінального навантаження становить $\delta U=2,4\%$ та $\delta U=6,85\%$, а час відновлення напруги – 0,2 та 0,15 с ($m_t=100$ мс/поділ; $mU=0,5$ В/поділ). Статичний показник відхилення напруги не перевищує 1...2 %.

Важливим показником якості на постійного струму є коефіцієнт пульсацій $k_{П}$, який визначається відношенням діючого значення змінної складової пульсуючої напруги до її номінального значення [2, 9]. Зі зростанням навантаження цей коефіцієнт зростає.

При ємностях конденсаторів у колі постійного струму експериментального зразка понад 0,03 Ф напруга задовольняє стандарт, що визначає якість напруги двигунів постійного струму [10]. Коефіцієнт $k_{П}$ – менший, ніж 8 %. За номінального навантаження при ємностях у колі постійного струму $C=0,4$ Ф та $C=0,9$ Ф $k_{П}$ складає лише 0,49 та 0,22 % відповідно.

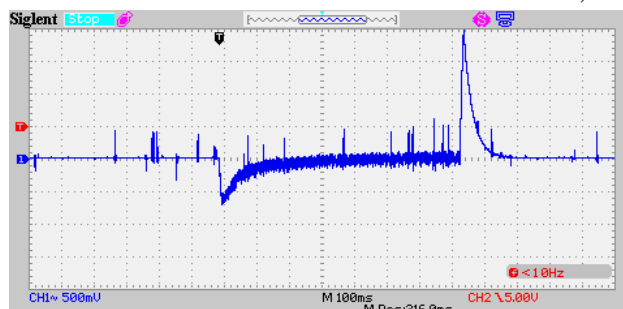


Рис. 5

Таблиця 1

U_d , В	I_d , А	$I_{\phi(max)}$, А	$U_{л}$, В	$I_{л}$, А	P_{1AD} , Вт	Q_{1AD} , ВАр	η_{AD}	$P_{2BICmГ}$, Вт	$P_{2BICmГ}$, Вт	$\eta_{BICmГ}$
28,4	105,6	395	380	8,63	4950	2550	0,877	4343	2999	0,691
28,6	97,6	319	380	7,68	4400	2500	0,879	3869	2791	0,721
28,8	83,2	250	383	6,55	3650	2350	0,88	3214	2396	0,746
29	59,2	154	387	5,15	2600	2200	0,873	2269	1717	0,757
29,1	45,2	150	390	4,5	2000	2200	0,857	1714	1315	0,767
29,1	33,2	109	392	4,07	1600	2250	0,839	1342	966	0,72
29,2	21,6	79	394	3,78	1170	2200	0,81	948	631	0,666
29,2	17	67	396	3,68	980	2200	0,793	777	496	0,638
29,2	0	27	398	0	305	1650	0,711	217	0	0

У табл. 1 представлено результати дослідження робочих характеристик ВІСтГ у генераторному режимі, де: $U_{л}$, $I_{л}$ – відповідно лінійні напруга та струм АД; P_{1AD} , Q_{1AD} – активна та реактивна потужності, що споживаються АД; $P_{2BICmГ}$, $P_{2BICmГ}$ – підведена і корисна потужності ВІСтГ; U_d , I_d – напруга і струм кола постійного струму; η_{AD} , $\eta_{BICmГ}$ – ККД асинхронного

двигуна та ВІСтГ. За номінального навантаження 3 кВт значення ККД сягає 70 %. Це на 12 % більше, ніж, наприклад, ККД стартер-генератора типу Ст-18 [1].

Висновки. Розроблено та створено експериментальний зразок ВІСтГ з такими номінальними даними: потужність – 3 кВт, напруга постійного струму – 28 В, частота обертання – 3000 об/хв.

Дослідження експериментального зразка продемонстрували:

- у стартерному режимі застосування обмеження фазного струму дає змогу сформувати перехідний процес таким чином, що фазні струми є безпечними для транзисторів вентиляно-перетворювача. Крім того, можливе регулювання часу розгону стартера до заданої частоти обертання;
- у генераторному режимі ВІСтГ динамічні й статичні показники якості енергії задовольняють стандарти;
- значення коефіцієнта корисної дії в генераторному режимі ВІСтГ – 70 %, що на 12 % більше, ніж ККД Ст-18;
- експериментальні дослідження ілюструють доцільність використання запропонованого технічного рішення в стартер-генераторах вентиляно-індукторного типу.

Фінансується за держбюджетною темою «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр «Інтехен-2»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ від 18.12.2019 р., протокол № 339. Державний реєстраційний номер роботи 0118U005367.

1. Тузов В.П. Электротехнические устройства летательных аппаратов: Учеб. пособие для авиац. неэлектротехн. спец. вузов. Москва: Высш. шк., 1987. 152 с.
2. Мазуренко Л.И. Асинхронный стартер-генератор с транзисторным преобразователем для транспортных энергоустановок постоянного тока. Дисс. ... канд. техн. наук. Институт электродинамики АН УССР. Киев. 1990. 266 с.
3. Мазуренко Л.И., Лищенко А.И. Асинхронные генераторы с вентиляльным и вентиляно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок. Київ: Наук. думка, 2011. 271 с.
4. Мазуренко Л.І., Шихненко М.О., Джура О.В., Білик О.А. Дослідження стартерного режиму вентиляно-індукторного стартер-генератора. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». 2020. № 3 (1357). С. 97–100. DOI: <http://doi.org/10.20998/2409-9295.2020.3.16>
5. Miller T.J.E. Electronic Control of Switched Reluctance Machines. Oxford: Newnes, 2001. 272 с.
6. M.Ma, Z.Chang, Y.Hu, F.Li, C.Gan and W.Cao. An Integrated Switched Reluctance Motor Drive Topology With Voltage-Boosting and On-Board Charging Capabilities for Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs). *IEEE Access*, 2018. Vol. 6. Pp. 1550–1559. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8141878> (дата звернення: 10.03.2020)
7. Нгуен К.К. Исследование электромеханического комплекса: вентиляно - индукторный электропривод - центробежный насос. *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. Новочеркасск, 2016. № 4. С. 55–64. DOI: <http://doi.org/10.17213/0136-3360-2016-4-55-64>
8. Бертинов А.И., Мизюрин, С.Р., Резников, С.Б., Бочаров, В.В., Алешечкин В.А. Качество электроэнергии бортовых систем электроснабжения и способы его улучшения. *Электричество*. 1981. № 6. С. 32–36.
9. Шихненко М.О., Мазуренко Л.І. Перехідні процеси та якість електроенергії автономного вентиляно-індукторного генератора. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Харків, 2019. Вип. 1(45). С. 57–63. DOI: <http://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.57-63>
10. ГОСТ 13822-82. Электроагрегаты и передвижные электростанции, дизельные. Общие технические условия. Москва: Изд-во стандартов, 1989. 30 с.

УДК 621.313

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА

Л. И. Мазуренко, докт. техн. наук, **А. В. Джура**, канд. техн. наук, **М.О. Шихненко**, **О. А. Білик**

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Рассмотрено вентиляно-индукторную машину в качестве альтернативы стартер-генераторам на основе асинхронных машин и машин постоянного тока. Представлено структурную схему экспериментального образца вентиляно-индукторного стартер-генератора. Проведены экспериментальные исследования стартер-

генератора в режиме двигателя при пусках с наличием регулирования уровня фазного тока. Исследована работа вентильно-индукторного стартер-генератора в генераторном режиме, проанализированы квазиустановившиеся и переходные процессы, вызванные изменением нагрузки. При этом определены динамические и статические показатели качества при набросе и сбросе нагрузки: продолжительность переходных процессов, переходное и устойчивое отклонение напряжения постоянного тока, ее коэффициент пульсаций и гармонический состав. Показано, что генерируемая электроэнергия по качеству соответствует стандартам. Данные экспериментальных исследований подтверждают возможность использования вентильно-индукторной машины в качестве стартер-генератора при ее исполнении в соответствии с описанным в статье техническим решением. Библ. 10, рис. 5, таблица.

Ключевые слова: вентильно-индукторная машина, вентильный преобразователь, стартер-генератор, система управления, аккумуляторная батарея, переходный процесс, гармонический состав.

TECHNICAL IMPLEMENTATION AND RESEARCH OF THE SWITCHED RELUCTANCE STARTER-GENERATOR EXPERIMENTAL SAMPLE

L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura, M.O. Shykhnenko, O.A. Bilyk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The switched reluctance machine is considered as an alternative to starter-generators based on asynchronous and DC machines. An experimental sample structural diagram of the switched reluctance starter-generator is presented. Experimental research of the starter-generator in the motor mode when starting with the presence of the phase current level regulation were carried out. The operation of the switched reluctance starter-generator in the generator mode was investigated, quasi-steady-state and transient processes caused by a change in load were analyzed. Herewith dynamic and static quality indicators were determined during throw and drop the load: transient processes duration, DC voltage transient and steady deviation, its ripple coefficient and harmonic composition were established. It is shown that the generated electrical energy in quality meets the relevant standards. Data from experimental research confirm the possibility of using the switched reluctance machine as a starter generator when executed in accordance with the technical solution described in the article. References 10, figures 5, table.

Key words: switched reluctance machine, semiconductor converter, starter-generator, control system, battery, transient process, harmonic composition.

1. Tuzov V.P. Electrical devices of aircraft: Textbook for aviation non-electrical specialties of universities. Moskva: Vysshaya shkola, 1987. 152 p. (Rus)
2. Mazurenko L.I. Asynchronous starter-generator with transistor converter for direct current transport power. Cand. tech. sci. diss. Institute of electrodynamics AS of USSR. Kiev. 1990. 266 p. (Rus)
3. Mazurenko L.I., Lishchenko A.I., Asynchronous generators with valve and valve-capacitive excitation for autonomous power installations. Kyiv. Naukova dumka, 2011. 272 p. (Rus)
4. Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O., Dzhura O.V., Bilyk O.A. The research of the switched reluctance starter-generator in starter mode. *Bulletin of NTU KhPI. Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. Kharkiv, 2020. No 3 (1357). Pp. 97–100. (Ukr) DOI: <http://doi.org/10.20998/2409-9295.2020.3.16>
5. Miller T.J.E. Electronic Control of Switched Reluctance Machines. Oxford: Newnes, 2001. 272 p.
6. M.Ma, Z.Chang, Y.Hu, F.Li, C.Gan and W.Cao. An Integrated Switched Reluctance Motor Drive Topology With Voltage-Boosting and On-Board Charging Capabilities for Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs). *IEEE Access*, 2018. Vol. 6. Pp. 1550–1559. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8141878> (Accessed: 10.03.2020)
7. Nguyen Q.K. Research the electromechanical complex: switched reluctance drive – centrifugal pump. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. Novochoerkassk, 2016. No 4. Pp. 55–64. (Rus) DOI: <http://doi.org/10.17213/0136-3360-2016-4-55-64>
8. Bertinov A.I., Mizyurin, S.R., Reznikov, S.B., Bocharov, V.V., Aleshechkin, V.A. The quality of electricity on-board power supply systems and ways to improve it. *Elektrichestvo*. 1981. No 6. Pp. 32–36. (Rus)
9. Shykhnenko M.O., Mazurenko L.I., Dzhura O.V., Bilyk O.A. Transient processes and power quality of an autonomous switched reluctance generator. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*. Kharkiv, 2019. No 1(45). Pp. 57–63. (Ukr) DOI: <http://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.1.45.57-63>
10. GOST 13822-82. Electric power units and mobile power stations, diesel. General specifications. Moskva: Izdatelstvo standartov, 1989. 30 p. (Rus)

Надійшла 10.03.2020

Received 10.03.2020