

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Н.В. Савостеенко, Ю.С. Усынин

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Рассматривались требования и особенности эксплуатации основных электротехнических элементов транспортных средств. Приведены технические и эксплуатационные характеристики аккумуляторной батареи, стартера и генератора. Приведен анализ современного состояния стартер-генераторов, указаны их достоинства и недостатки применительно к промышленным транспортным средствам средней мощности. Полученные результаты позволяют определить особенности и оценить возможность реализации стартер-генератора. Показано, что попытка совместить в одном электротехническом комплексе функции стартера и генератора в современных транспортных средствах средней мощности (промышленных тракторах, вездеходах и т. д.) с учетом возможностей современного электрооборудования весьма затруднена и вряд ли рациональна. Решение видится в рамках многосвязных систем электропривода, в частности, на основе дифференциального электропривода с применением планетарных механических передач и синхронных реактивных машин с независимым возбуждением. Описаны основные преимущества и особенности эксплуатации планетарных механизмов. Дана краткая характеристика и обоснование выбора синхронной реактивной машины независимого возбуждения с позиции реализации стартер-генератора для промышленных транспортных средств средней мощности.

Ключевые слова: стартер-генератор, промышленные транспортные средства, планетарный редуктор, дифференциальный электропривод, синхронная реактивная машина независимого возбуждения.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется массогабаритным показателям электрооборудования транспортных средств. Одним из возможных путей улучшения массогабаритных показателей можно признать попытку совмещения в одном электротехническом комплексе функций стартера и генератора в транспортных средствах среднего диапазона мощностей (тракторы и т. д.). Однако при этом следует учесть те возможные ограничения и трудности, которые могут встретиться при реализации этой идеи.

Возможности существующего силового электрооборудования

Аккумуляторная батарея (АКБ) на транспортных средствах обеспечивает электроснабжение электростартера при пуске двигателя, а также электроснабжение других потребителей электроэнергии на автомобиле и тракторе при неработающем генераторе или его недостаточной мощности. Как указывают авторы [1–5], емкость АКБ, используемых в промышленных транспортных средствах, лежит в диапазоне от 120 до 1550 А·ч при номинальном значении напряжения 14 В или 28 В. Еще в прошлом веке основным потребителем энергии аккумуляторной батареи являлся электростартер, однако в настоящее время в связи с активным развитием полупроводниковой техники

источников потребления электроэнергии автономного источника питания стало значительно больше. Также стоит отметить, что сфера применения промышленных транспортных средств расширяется в сторону тяжелых условий работы (Крайний Север, Арктика), и в данном случае АКБ традиционного типа не всегда могут обеспечить необходимый рабочий диапазон.

Как правило, мощность батареи должна быть соизмерима с мощностью, развиваемой стартером, но при этом необходимо обеспечивать стабильное напряжение питания бортовой сети, однако при работе в условиях низких температур мощность АКБ приходится завышать, что неумолимо приводит к увеличению массогабаритных параметров. Таким образом, ставится задача применения промышленных транспортных средств в тяжелых условиях работы без завышения габаритов автономного источника питания, существенного изменения конструкции электрооборудования, а также без использования специальных материалов.

Стартерные электрические двигатели должны обеспечить [1–4] необходимую пусковую частоту вращения (100–150 об/мин) и величину момента сопротивления прокрутки при запуске ДВС (от 70 до 700 Н·м). Как правило, мощность стартерных электрических машин, установленных на промышленных транспортных средствах, лежит в диапазоне от 1 до 10 кВт. На большинстве тракто-

ров в роли стартерной электрической машины чаще всего встречаются машины постоянного тока со смешанным и последовательным возбуждением. Такие схемы электростартеров используются достаточно давно и не всегда справляются со своими задачами.

Генераторные электрические машины являются основным источником электроэнергии в системе электроснабжения автотранспорта. Как правило, мощность генераторов, используемых на промышленных транспортных средствах, лежит в диапазоне от 100 до 1000 Вт и необходима для электроснабжения электронной системы впрыскивания топлива, системы зажигания, информационно-измерительной системы, габаритных огней и фонарей освещения номерного знака. Чаще всего в роли генератора на транспортных средствах выступают электрические машины переменного тока, а именно – вентильные синхронные генераторы [3, 6–9].

На сегодняшний день мощность генераторов существенно меньше, чем стартеров, но она растет, так как увеличивается перечень потребителей промышленных транспортных средств, требующих электроэнергии; увеличение генерируемой мощности, к примеру, до 30 кВт, позволит перейти на принципиально новый уровень электрификации промышленных транспортных средств.

Вопрос объединения стартерных и генераторных электрических машин встает довольно часто, однако устаревшее электрооборудование не позволяет реализовать данную задачу. Стоит отметить, что характеристики генераторных электрических машин резко отличаются от стартерных, что является основной сложностью при попытке объединить в одной электрической машине функции двух устройств без завышения массогабаритных параметров. На этот счет полезно обратить особое внимание на публикации последних лет.

Ряд авторов [10–13] предлагают решение данной задачи на базе асинхронных и синхронных электрических двигателей. Также широкое применение нашли двигатели с постоянными магнитами, так как они имеют очевидные преимущества по массогабаритным параметрам [6, 7, 10–13]. Предложенные варианты более подходят к сельскохозяйственным типам тракторов, которые имеют щадящий режим работы, а вот для промышленных тракторов данные решения не всегда годятся, так как условия работы существенно отличаются, соответственно и предъявляемые требования к электрооборудованию жестче.

Обзор существующей литературы, посвященной разработке стартер-генераторов для транспортных средств, показал, что основным типом электрической машины, применяемой в роли стартер-генератора, авторы видят вентильные электрические машины [13–18]. Очевидно, что вентильные двигатели имеют преимущества в сопостав-

лении с синхронными с постоянными магнитами или асинхронными с короткозамкнутым ротором. К примеру, синхронные с постоянными магнитами имеют довольно высокую стоимость, а асинхронные двигатели не в состоянии обеспечить удовлетворительный уровень регулировочных и энергетических характеристик.

Также авторы отмечают, что в настоящее время перспективно применение на транспортных средствах интегрированных стартер-генераторов, которые непосредственно устанавливаются на коленчатый вал ДВС. Авторы отмечают, что наилучшие технические, эксплуатационные и экономические показатели в этом случае достигаются, если встроенная электрическая машина будет выполнять роль как генератора, так и стартера за счет работы системы управления [6, 7, 14–16].

Как показывает практика, в настоящее время является актуальным вопрос разработки стартер-генератора для промышленных транспортных средств, который бы позволил обеспечить надежный пуск ДВС не только в нормальных, но и тяжелых условиях, давал необходимое количество электроэнергии в режиме генератора, не требовал использования дорогостоящих и не пригодных для ремонта материалов.

Возможность реализации стартер-генератора

На транспортных средствах имеются две электрические машины (стартер и генератор) приблизительно одинаковой мощности, но с совершенно различными механическими и электромеханическими характеристиками: стартеру требуются относительно малые скорости при очень больших моментах, а генератору – сравнительно малые моменты при высоких скоростях. При этом отношения $\frac{n_{гmax}}{n_{стmax}}$ и $\frac{M_{стmax}}{M_{гmax}}$ могут достигать 10:1 и выше. Здесь $n_{гmax}$ и $n_{стmax}$ – максимальные значения угловой скорости генератора и стартера; $M_{стmax}$ и $M_{гmax}$ – максимальные значения момента на валу стартера и генератора. Другими словами, даже при близких значениях мощности на валу у них резко отличаются предельные значения скорости и момента.

Поставленная задача реализации стартер-генератора в рамках однопоточного электропривода, как показывает приведенный обзор научнотехнической информации, удовлетворительно не решена. По этой причине следует рассмотреть многосвязные системы электропривода, которые хотя и сложнее, но обладают большими возможностями. Здесь в первую очередь необходимо указать на дифференциальные электроприводы [19–23], многопоточность в которых достигается применением планетарных механизмов [24–30], которые применительно к нашему случаю имеют следующие преимущества:

– крутящий момент от приводного механизма передается параллельно на основные звенья (солнечную шестерню, эпицикл, водило) одновременно через несколько полюсов зацепления, благодаря чему значительно повышается износостойкость и надежность механизма, а также отсутствуют радиальные усилия на подшипники;

– шестерни редуктора находятся в постоянном зацеплении независимо от режима работы электрического привода, а переключение передаточного числа редуктора производится элементами трения (фрикционными муфтами и тормозами), что исключает ударные нагрузки;

– предлагаемый тип планетарного дифференциального редуктора давно освоен отечественной промышленностью и успешно применяется, например, на тяжелых промышленных тракторах [25, 26].

Эти преимущества позволяют разрешить главную трудность совмещения стартера и генератора в одной электроустановке – резкое несовпадение их механических характеристик, поэтому попытку решить поставленную задачу упрощения кинематических связей применением планетарного дифференциального редуктора следует считать актуальной и полезной.

Электрическая машина для стартер-генератора

На наш взгляд, наиболее перспективным типом электрических машин для стартер-генератора являются синхронные реактивные двигатели с независимым возбуждением (СРДНВ). Принцип работы данного типа двигателей описан в ряде работ [31, 32]. Наиболее глубоко СРДНВ представлен в [33], где даны математические модели электропривода, обращается внимание на отличительные признаки, позволяющие добиться особенно высоких результатов в показателях регулирования и энергетике, теоретические выводы подкреплены экспериментами, предложены алгоритмы управления и типовые структуры электропривода.

Предлагаемый электрический двигатель имеет следующие преимущества:

– повышенную *надежность*, что обусловлено полным отсутствием обмоток на роторе, большой радиальной механической жесткостью ротора и отсутствием коллектора или колец ротора;

– большие (до 10 крат) *перегрузки* по моменту, что обусловлено естественным влиянием давления реакции якоря при насыщении магнитопровода машины [31–34];

– повышенную *живучесть* машины. Например, при числе фаз, равном 6 (наиболее часто употребляемый вариант при желании выполнить СРДНВ в корпусе серийного асинхронного двигателя), сохраняется работоспособность при отключении одной, двух и даже трех фазных обмоток;

– *технологичность* изготовления (простая однослойная обмотка статора с полным шагом; сокращение числа технологических операций даже по сравнению с асинхронным двигателем; исключается использование дефицитных материалов, например, редкоземельных металлов);

– *простую систему управления* преобразователем из-за пониженных требований в форме тока статора;

– *малую* электромагнитную и механическую *инерцию* при управлении по каналам якоря и возбуждения;

– очень *высокие*, значительно превышающие номинальные значения *угловые скорости* электрического двигателя (если это требуется по условиям работы электрического привода) благодаря большой механической прочности ротора.

Все вышесказанное подводит к тому, что имеет смысл реализация стартер-генератора на базе дифференциального электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

Выводы

Проведя анализ работ, посвященных проектированию и внедрению стартер-генераторов на автономных объектах, можно заключить, что данное направление является актуальным и изложенные выше предположения о возможности совмещения стартера и генератора на промышленных транспортных средствах вполне реализуемо.

Большие возможности, на наш взгляд, заложены в разработке стартер-генератора на базе дифференциального электропривода. Правда, слабая кооперация между предприятиями машиностроительного и электротехнического профиля затрудняет успешное решение поставленной задачи в короткие сроки.

Литература

1. Ютт, В.Е. *Электрооборудование автомобилей: учеб. для студентов вузов / В.Е. Ютт. – 3-е изд. – М.: Транспорт, 2000. – 320 с.*
2. Bosch, R. *Automotive Electric / Electronic Systems / R. Bosch. – Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Publ., 1995.*
3. Чижков, Ю.П. *Электрооборудование автомобилей и тракторов: учеб. / Ю.П. Чижков. – М.: Машиностроение, 2007. – 656 с.*
4. Малюгин, П.Н. *Электрооборудование автомобилей / П.Н. Малюгин, В.А. Ковригин. – М.: СибАДИ, 2003. – 130 с.*
5. Набоких, В.А. *Электрооборудование автомобилей и тракторов / В.А. Набоких. – М.: Академия, 2004. – 105 с.*

6. Denton, T. *Automobile Electrical and Electronic Systems* / T. Denton. – Oxford: Routledge Publ., 2012. – 685 p.
7. Schäfer H. *Integrierter Starter-Generator (ISG): Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bord-Netz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug* / H. Schäfer. – Deutschland: Expert Publ., 2001. – 286 p.
8. *The Use of a Mean Value Model to Achieve the Best Efficiency of a Variable Speed Generator Coupled to a Diesel Engine* / A.F. Pacheco, J.R. Tibola, M.E.S. Martins et al. // 21th SAE BRASIL International Congress and Exhibition. – 2012. DOI: 10.4271/2012-36-0333
9. *Interconnection Technology for Engine Generators* / Y. Kotani, Y. Shinogi, Y. Nakada, Y. Nakagawa // SAE/JSAE 2003 Small Engine Technology Conference and Exhibition. – 2003. DOI: 10.4271/2003-32-0053
10. Николаев, В.В. Исследование режимов работы вентильного стартер-генератора / В.В. Николаев // 11-я Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 2005. – С. 28–29.
11. Николаев, В.В. Стартер-генератор автономных объектов на основе вентильно-индукторной машины: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Николаев. – М., 2005. – 145 с.
12. Анисимов, В.М. Электромеханические стартер-генераторные системы автомобильных транспортных средств (Теория, проектирование, исследование): дис. ... д-ра техн. наук. / В.М. Анисимов. – 2004. – 378 с.
13. Анисимов, В.М. Анализ конструктивных вариантов бесконтактных автомобильных вентильных стартер-генераторов постоянного тока / В.М. Анисимов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Серия «Актуальные проблемы радиотехники». – 2002. – Вып. 6. – С. 75–81.
14. Каппель, А.И. Стартер-генераторы коленчатого типа (KSG). Основа будущих концепций / А.И. Каппель. – ФРГ: Expert, 1999. – 120 с.
15. Kruse, R. *Integrierter Starter-Generator für das 42-V-Bordnetz* / R. Kruse, H. Schäfer, L. Wähler // ATZ: Automobiltechn. Zeitungshifte. – 2002. – No. 7–8. – P. 668–674.
16. Буренков, К.Э. Интегрированный стартер-генератор – основа перспективных конструкций автомобиля / К.Э. Буренков, Ю.А. Купеев, А.Н. Агафонов // Автотракторное электрооборудование. – 2001. – № 3–4. – С. 23.
17. Каскод-Электро. Вентильные реактивные электродвигатели / генераторы (Switched Reluctance Motors / Generators) / Каскод-Электро. – http://www.kaskod.ru/produkt/motorsrm/srm_article01/ (дата обращения: 02.09.2020).
18. ФГУП НИИАЭ. Вентильный индукторный двигатель с самоподмагничиванием (ВИМС) / ФГУП НИИАЭ. – <http://niiae.ru/ru/napravleniya-raboty/elektrodvigateli/224-2012-03-14-06-40-50> (дата обращения: 02.09.2020).
19. Усынин, Ю.С. Энергосиловые показатели дифференциального электропривода стартера для запуска двигателя внутреннего сгорания / Ю.С. Усынин, А.С. Несмеянов // Межвузовский сборник научных трудов. – 1995. – С. 65–67.
20. Пат. 2189691 С1 Российская Федерация. Способ электрического пуска двигателя внутреннего сгорания / Ю.С. Усынин, А.С. Несмеянов; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. – № 2001100773/06; заявл. 09.01.2001; опубл. 20.09.2002, Бюл № 26. – 1 с.
21. Savosteenko, N.V. *Starter-Generator Differential Electric Drive of the Medium-Powered Industrial Vehicles* / N.V. Savosteenko, A.N. Shishkov, A.E. Bychkov // 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice. – 2019. DOI: 10.1109/peami.2019.8915420
22. Пат. 2711097 С1 Российская Федерация. Стартер-генератор с дифференциальным электроприводом и способ управления стартер-генератором / Ю.С. Усынин, А.Н. Шишков, Е.В. Белоусов, Н.В. Савостеенко; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». – № 2019107107; заявл. 12.03.2019; опубл. 15.01.2020, Бюл № 2. – 1 с.
23. *Differential twin-engine automobile electric drive* / E.V. Belousov, N.V. Savosteenko, T.A. Funk et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. DOI: 10.1088/1757-899x/537/6/062086
24. Denton, T. *Automobile Mechanical and Electrical Systems* / T. Denton. – 2nd ed. – London: Taylor & Francis Ltd Publ., United Kingdom, 2017. – 368 p.
25. Антонов, А.С. Силовые передачи колесных и гусеничных машин. Теория и расчет / А.С. Антонов. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1975. – 480 с.
26. Красеньков, В.И. Проектирование планетарных механизмов транспортных машин / В.И. Красеньков, А.Д. Вашеев – М.: Машиностроение, 1986. – 272 с.
27. Hu, Y. *A load distribution model for planetary gear sets* / Y. Hu, D. Talbot, A. Kahraman // Journal of Mechanical Design. – 2018. – Vol. 140, iss. 5. DOI: 10.1115/1.4039337
28. *Analysis of planetary gear transmission in non-stationary operations* / F. Chaari, M.S. Abbes, F.V. Rueda, A.F. Del Rincon, M. Haddar // Frontiers of Mechanical Engineering. – 2013. – No. 8 (1). – P. 88–94. DOI: 10.1007/s11465-013-0361-8

29. Устройство тракторов / В.М. Шарипов, К.И. Городецкий, А.П. Маринкин и др. – М.: МГТУ «МАМИ», 2007. – 320 с.

30. Козловский, В.Н. Оценка влияния размерных параметров активной зоны автомобильного стартер-генераторного устройства на его технические характеристики / В.Н. Козловский, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта ЭЭТ. – 2009. – № 2–3. – С. 14–16.

31. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. – 2007. – № 3. – С. 21–26.

32. Усынин, Ю.С. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 37–43.

33. Григорьев, М.А. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: моногр. / М.А. Григорьев, под. ред. Ю.С. Усынина. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2010. – 159 с.

34. Усынин, Ю.С. Многовязные системы управления электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // Электротехника. – 2014. – № 10. – С. 49–53.

Савостеенко Никита Вадимович, аспирант, кафедра «Автоматизированный электропривод», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; nikita.epa@gmail.com.

Усынин Юрий Семенович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированный электропривод», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Поступила в редакцию 14 октября 2020 г.

DOI: 10.14529/power200411

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL VEHICLES STARTER-GENERATORS

N.V. Savosteenko, nikita.epa@gmail.com,

Yu.S. Usynin

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper considers the requirements for and operation features of the vehicles main electrical elements. It presents the technical and operational characteristics of the storage battery, starter and generator along with the analysis of the current starter-generators state, their advantages and disadvantages in relation to medium-power industrial vehicles. The results obtained allow determining the features and assessing the possibility of implementing a starter generator. It is shown that an attempt to create an electrical complex combining the functions of both a starter and a generator in modern medium-power vehicles (industrial tractors, all-terrain vehicles, etc.), taking into account the capabilities of modern electrical equipment, is hardly rational an complex. The solution could be found within the framework of multiply connected electric drive systems, in particular, based on a differential electric drive using planetary mechanical gears and field regulated reluctance machine. The paper also describes the main advantages and features of the operation of planetary mechanisms. A brief description and justification for the choice of a field regulated reluctance machine from the standpoint of the implementation of a starter-generator for industrial vehicles of medium power is given.

Keywords: starter-generator, industrial vehicles, planet gearbox, differential electric drive, field regulated reluctance machine.

References

1. Yutt V.E. *Elektrooborudovanie avtomobiley* [Electrical Equipment of Cars]. 3rd ed. Moscow, Transport Publ., 2000. 320 p.
2. Bosch R. *Automotive Electric / Electronic Systems*, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Publ., 1995.
3. Chizhkov Yu.P. *Elektrooborudovanie avtomobiley i traktorov* [Electrical Equipment of Cars and Tractors]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 2007. 656 p.
4. Malugin P.N., Kovrigin V.A. *Elektrooborudovanie avtomobiley* [Electrical equipment of cars]. Moscow, SibADI Publ., 2003. 130 p.

5. Nabokikh V.A. *Elektrooborudovanie avtomobiley i traktorov* [Electrical Equipment of Cars and Tractors]. Moscow, Academia Publ., 2004. 105 p.
6. Denton T. *Automobile Electrical and Electronic Systems*, Oxford, Routledge Publ., 2012. 685 p.
7. Schäfer H. *Integrierter Starter-Generator (ISG): Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bord-Netz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug*. Deutschland, Expert Publ., 2001. 286 p.
8. Pacheco A.F., Tibola J.R., Martins M.E.S., MacHado P.R.M., Pinheiro H., Gründling H.A. The Use of a Mean Value Model to Achieve the Best Efficiency of a Variable Speed Generator Coupled to a Diesel Engine. *21th SAE BRASIL International Congress and Exhibition*, 2012. DOI: 10.4271/2012-36-0333
9. Kotani Y., Shinogi Y., Nakada Y., Nakagawa Y. Interconnection Technology for Engine Generators. *SAE/JSAE 2003 Small Engine Technology Conference and Exhibition*, 2003. DOI: 10.4271/2003-32-0053
10. Nikolaev V.V. [Research of Operating Modes of a Valve Starter-Generator]. *11-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya studentov i aspirantov* [11th International Scientific and Technical Conference of Undergraduate and Graduate Students], 2005, pp. 28–29. (in Russ.)
11. Nikolaev V.V. *Starter-generator avtonomnykh ob"yektov na osnove ventil'no-induktornoy mashiny: dis. kand. tekhn. nauk* [Starter-Generator of Autonomous Objects Based on a Valve-Inductor Machine. Cand. sci. diss.]. Moscow, 2005. 145 p.
12. Anisimov, V.M. *Elektromekhanicheskiye starter-generatornyye sistemy avtomobil'nykh transportnykh sredstv (Teoriya, proyektirovaniye, issledovaniye): dis. d-ra tekhn. nauk* [Electromechanical Starter-Generator Systems of Automobile Vehicles (Theory, Design, Research). Doct. sci. diss.]. Samara, 2004. 378 p.
13. Anisimov V. M. [Analysis of Design Options For Non-Contact Automobile Valve Starter-Generators of Direct Current]. *Bulletin of the Samara State Aerospace University. Ser. Actual Problems of Radio Engineering*, 2002, iss. 6, pp. 75–81. (in Russ.)
14. Kappel' A.I. *Starter generatory kolen-valovogo tipa (KSG). Osnova budushchikh kontseptsiy* [Starter Crankshaft Generators (KSG). The Basis for Future Concepts]. Germany, Expert Publ., 1999. 120 p.
15. Kruse R., Schäfer H., Wähner L. [Integrierter Starter-Generator für das 42-V-Bordnetz]. *ATZ: Automobiltechn. Zeitschrift*, 2002, no. 7–8, pp. 668–674.
16. Burenkov K.E., Kupeev Yu.A., Agafonov A.N. [Integrated Starter-Generator - the Basis for Future Vehicle Designs]. *Automotive electrical equipment*, 2001, no. 3–4, p. 23. (in Russ.)
17. *Ventil'nye reaktivnye elektrodvigateli / generatory* [Switched Reluctance Motors / Generators]. Available at: http://www.kaskod.ru/produkt/motorsrm/srm_article01/ (accessed 02.09.2020).
18. *Ventil'nyy induktorny dvigatel' s samopodmagnichivaniem* [Valve Inductor Motor with Self-Magnetization]. Available at: <http://niiae.ru/ru/napravleniya-raboty/elektrodvigateli/224-2012-03-14-06-40-50> (accessed 02.09.2020).
19. Usynin Yu.S., Nesmeyanov A.S. [Energy-Power Indicators of a Differential Electric Starter Drive for Starting an Internal Combustion Engine. *Interuniversity collection of scientific papers*, 1995, pp. 65–67. (in Russ.)
20. Usynin Yu. S., Nesmeyanov A.S. *Sposob elektricheskogo pushka dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Method of Electric Start of an Internal Combustion Engine]. Patent RF no. 2001100773/06, 2002.
21. Savosteenko N.V., Shishkov A.N., Bychkov A.E. [Starter-Generator Differential Electric Drive of the Medium-Powered Industrial Vehicles]. *2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice*, 2019. DOI: 10.1109/peami.2019.8915420
22. Usynin Yu.S., Shishkov A.N., Belousov E.V., Savoosteenko N.V. *Starter-generator s differentsial'nym elektroprivodom i sposob upravleniya starter-generatorom* [A Starter-Generator With a Differential Electric Drive and a Method of Controlling a Starter-Generator]. Patent RF no. 2019107107, 2020.
23. Belousov E.V., Savosteenko N.V., Funk T.A., Denisova T.V., Rummyantseva E.A. [Differential twin-engine automobile electric drive]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. DOI: 10.1088/1757-899x/537/6/062086
24. Denton T. *Automobile Mechanical and Electrical Systems*. 2nd ed, London, Taylor & Francis Ltd Publ., United Kingdom, 2017. 368 p.
25. Antonov A.S. *Silovye peredachi kolesnykh i gusenichnykh mashin. Teoriya i raschet* [Power Transmissions of Wheeled and Tracked Vehicles. Theory and Calculation]. 2nd ed., Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 480 p.
26. Krasnen'kov V.I., Vashets A.D. *Proektirovaniye planetarnykh mekhanizmov transportnykh mashin* [Design of Planetary Mechanisms of Transport Machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 272 p.
27. Hu Y., Talbot D., Kahraman A. A load distribution model for planetary gear sets. *Journal of Mechanical Design*, 2018, vol. 140, iss. 5. DOI: 10.1115/1.4039337
28. Chaari F., Abbes M.S., Rueda F.V., Del Rincon A.F., Haddar M. Analysis of planetary gear transmission in non-stationary operations. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013, no. 8 (1), pp. 88–94. DOI: 10.1007/s11465-013-0361-8

29. Sharipov V.M., Gorodetskiy K.I., Marinkin A.P., Naumov E.S., Parfenov A.P., Sergeev A.I., Strelkov A.G., Feofanov Yu.A. Sharipova N.N., Shevelev A.S., Shchetinin Yu.S. *Ustroystvo traktorov* [Construction of tractors]. Moscow, Moscow State Technical University, 2007. 320 p.

30. Kozlovskiy V. N., Yutt V. E. [Assessment of the Influence of the Dimensional Parameters of the Core of an Automobile Starter-Generator Device on its Technical Characteristics]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and Electrical Equipment of Transport], 2009, no. 2–3, pp. 14–16. (in Russ.)

31. Usynin Yu.S., Grigor'ev M.A., Vinogradov K.M. [Electric Drives and Generators with Independent Excitation Synchronous Reluctance Machine]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2007, no. 3, pp. 21–26. (in Russ.)

32. Usynin Yu.S., Grigor'ev M.A., Shishkov A.N. [Valve Electric Drive with a Synchronous Reluctance Machine of Independent Excitation]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2013, no. 3, pp. 37–43. (in Russ.)

33. Grigor'ev M.A., Usynin Yu.S. (Ed.). *Ventil'nyy elektroprivod s sinkhronnoy reaktivnoy mashinoy nezavisimogo vzbuzhdeniya: monogr.* [Valve Electric Drive with a Synchronous Reluctance Machine of Independent Excitation: Monograph]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2010. 159 p.

34. Usynin Yu.S. [Multiply Connected Control Systems of Electric Drives with a Synchronous Reluctance Machine of Independent Excitation]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2014, no. 10, pp. 49–53. (in Russ.)

Received 14 October 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Савостеенко, Н.В. Перспективы развития стартер-генераторов для промышленных транспортных средств / Н.В. Савостеенко, Ю.С. Усынин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 96–102. DOI: 10.14529/power200411

FOR CITATION

Savosteenko N.V., Usynin Yu.S. Prospects for the Development of Industrial Vehicles Starter-Generators. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 96–102. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200411