

УДК 621.43-57:621.313.1

Фещенко Александр Иванович, канд. техн. наук, проф.,

МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, electro@madi.ru

Масленников Иван Константинович, магистрант,

МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, ivanmaslennikov94@gmail.com

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ НА ТРАНСПОРТНОМ СРЕДСТВЕ

Аннотация. В данной статье рассматривается стартер-генераторная установка (СГУ) как один из наиболее перспективных вариантов для улучшения топливной экономичности транспортного средства, уменьшения его вредных выбросов и увеличения мощности системы электроснабжения. В статье приведен обзор существующих СГУ, их основные функции и концепция «мягкого» гибрида. Также в работе приводится описание и сравнение существующих типов бесконтактных электрических машин, которые могут быть в составе СГУ, их основные преимущества и недостатки.

Ключевые слова: стартер-генераторная установка, «мягкий» гибрид, вентильно-индукторная машина, асинхронная машина с короткозамкнутым ротором, синхронная машина с постоянными магнитами.

Feshchenko Alexander I., Ph. D., professor,

MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, electro@madi.ru,

Maslennikov Ivan K., undergraduate,

MADI, 64, Leningradsky prosp., Moscow, 125319, Russia, ivanmaslennikov94@gmail.com

PROSPECTS OF STARTER-GENERATOR IN AUTOMOTIVE APPLICATION

Abstract. This paper discusses starter-generator as one of the most promising options for vehicle's fuel economy improvement, emission reduction, and increasing the power of power supply system. The types of starter-generators, their main functions and mild hybrid concept are reviewed. Also, main types of brushless electric machines for starter-generator application, their benefits and drawbacks are discussed and compared here.

Key words: starter-generator, mild hybrid, switched reluctance machine, induction machine, permanent magnet synchronous machine.

Введение

С развитием технологий и принятием новых международных стандартов, вызванных повышенными требованиями к безопасности и комфортабельности транспортных средств (ТС), увеличивается количество и мощность электрических потребителей на автомобиле. В связи с этим требуются более мощные и высокоэффективные энергетические установки, способные обеспечить заданный уровень потребления электроэнергии. Кроме того, в последние десятилетия одной из основных тенденций в автомобильной промышленности является уменьшение вредных выбросов ТС в атмосферу. С каждым годом требования к нормам выбросов ужесточаются, поэтому в автомобилестроении приоритет отдается технологиям, которые могут обеспечить существенное снижение вредных выбросов в атмосферу. Обеспечить требуемые характеристики усовершенствованием традиционных систем транспортного средства становится сложнее. В сложившейся ситуации наиболее приоритетным и перспективным вариантом могут стать совмещенные электромеханические преобразователи – стартер-генераторные установки (СГУ), которые заменяют традиционный стартер и генератор одной бесконтактной электрической машиной (ЭМ). У этого решения есть такие несомненные преимущества, как экономия подкапотного пространства, высокая надежность, повышенная мощность в режиме генератора (от 4 до 25 кВт), улучшенная экологичность ТС. В отличие от СГУ традиционный стартер после пуска ДВС не используется, и поэтому большую часть времени эксплуатации автомобиля выступает в качестве дополнительного груза. Кроме того, совмещение ЭМ с ДВС позволяет снизить рабочий объем последнего при сохранении выходных характеристик силового агрегата в целом.

В настоящее время используемая бортовая сеть автомобиля, рассчитанная на 12(14) В не может обеспечить повышенные мощности ежегодно растущего количества потребителей на борту. Поэтому оптимальный уровень напряжения бортовой сети возрастает с увеличением нагрузки. При одинаковой силе тока в 71 А бортовая сеть будет иметь оптимальный уровень рабочего напряжения 12(14) В, 24(28) В, 36(42) В, 48(56) В для 1–4 кВт мощности соответственно [1]. Однако питать повышенным напряжением от генераторной установки предлагается исключительно мощные потребители ТС (СГУ в двигательном режиме, электрический компрессор кондиционера, электрическая система обогрева и различные электродвигатели). Тем самым предлагается 2-уровневая архитектура бортовой сети автомобиля (рис. 1). Питание приборов стандартным напряжением в данной сети будет осуществляться при помощи преобразователя постоянного напряжения (ППН).

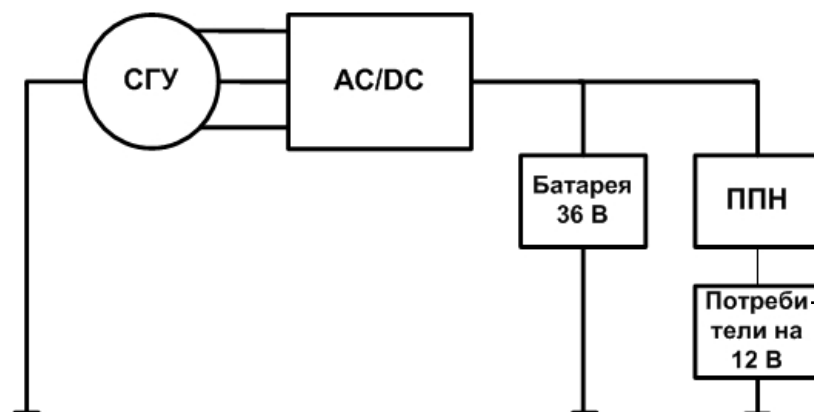


Рис. 1. Структурная схема 2-уровневой бортовой сети ТС

Типы стартер-генераторных устройств

Стартер-генераторные установки по типу конструкции подразделяются на СГУ с ременным приводом и интегрированные (ИСГУ).

СГУ с ременным приводом располагается на месте традиционного генератора и соединяется с коленчатым валом ДВС посредством ременной передачи (рис. 2а). Основными устройствами такого типа являются бесконтактная электрическая машина, ременная передача, система, управляющая натяжением приводного ремня, инвертор (AC/DC), понижающий преобразователь постоянного напряжения для питания низковольтных цепей (DC/DC). Такая система является наиболее дешевым и простым с точки зрения проектирования вариантом, так как не требует существенных изменений в конструкции силового агрегата. Однако ресурс и максимально возможный передаваемый крутящий момент ограничены несовершенством системы ременного привода, поэтому данный тип электромеханического преобразователя имеет меньше перспектив для применения по сравнению с ИСГУ.

Интегрированная стартер-генераторная установка (ИСГУ) является наиболее рациональным типом исполнения, так как ротор ЭМ в данном случае располагается на коленчатом валу между ДВС и коробкой передач (рис. 2б).

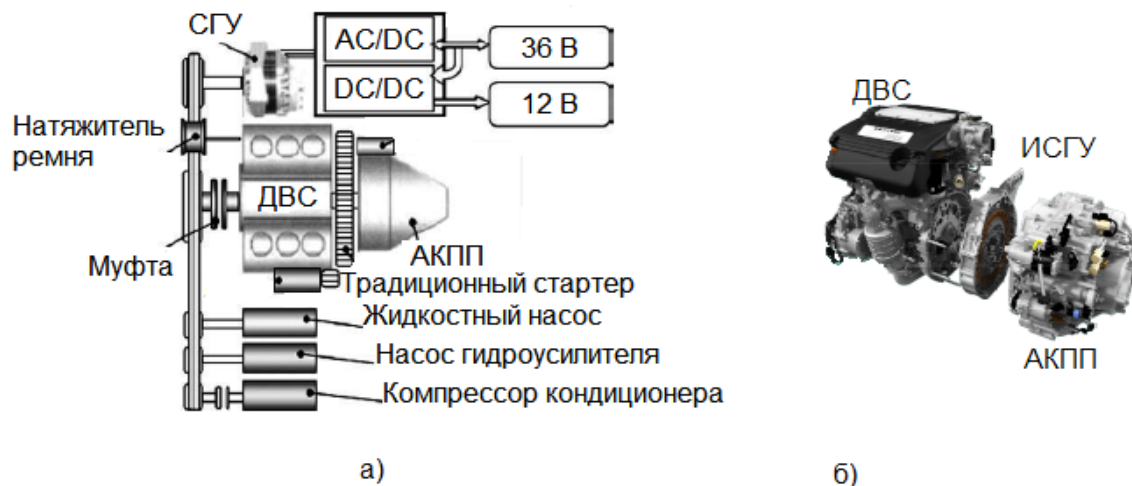


Рис. 2. СГУ с ременным приводом (а); интегрированная СГУ (б)

У такого типа конструкции есть ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционным и ременным типом: высокая надежность, так как отсутствуют быстро изнашивающиеся детали; ИСГУ позволяет осуществить более быстрый и менее шумный пуск ($t_{\text{пуска}} = 200$ мс, по сравнению с $t_{\text{пуска}} = 800$ мс традиционным стартером) за счет отсутствия ременной и редукторной передач [2]; высокий пусковой момент (200–400 Нм); пусковые частоты вращения ИСГУ достигают частоты холостого хода ДВС (800-1000 мин⁻¹), что в свою очередь приводит к уменьшению вредных выбросов в атмосферу; мощность ЭМ, применяемой в ИСГУ, ограничивается только требуемыми характеристиками, а не конструктивными особенностями; возможность реализации всех функций «мягкого» гибрида.

Концепция и функции «мягкого» гибрида

На основе соотношения электрической мощности ЭМ и общей мощности совмещенной силовой установки гибридные ТС можно разделить на 2 основных типа: «мягкий» (mild HEV) и «сильный» (strong HEV). Основное отличие первого типа от второго – это работа исключительно во вспомогательном режиме. В «сильном» гибриде используются более мощные ЭМ и аккумуляторные батареи, позволяющие двигаться ТС только на электрической тяге. В данной статье будет рассмотрен только «мягкий» гибрид, так как такой тип имеет меньшую стоимость по сравнению с «сильным» и позволяет улучшить ряд характеристик ТС.

На рис. 3 представлена структурная схема ИСГУ. Основными блоками данной схемы являются аккумуляторная батарея, преобразователь постоянного напряжения в переменное, бесконтактная электрическая машина, блок управления преобразовательным устройством. В данных схемах также показано направление преобразования энергии в ИСГУ

в двигательном (а) и генераторном (б) режимах. Кроме того, также может использоваться буферный источник энергии, такой как суперконденсатор. Использование суперконденсатора для пуска ДВС, в особенности при работе системы «стоп-старт», более выгодно, так как позволяет отдавать кратковременно большие значения токов. Кроме того, он имеет большое число циклов «заряд-разряд» (миллионы) [3]. Такой тип накопителя более «быстрый», чем аккумуляторная батарея, так как в нем отсутствуют электрохимические реакции и критическим является только омическое сопротивление.

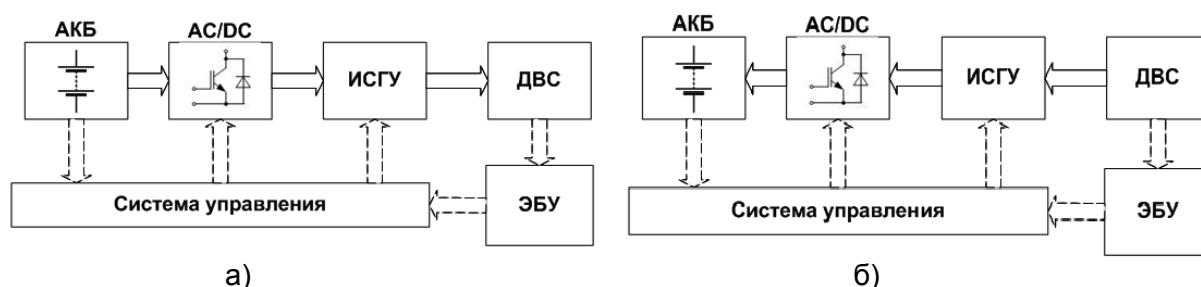


Рис. 3. Распределение энергии и сигналов в ИСГУ

ИСГУ может работать в 4-х основных режимах: пусковом, генераторном, тормозном (рекуперативное торможение ЭМ) и режиме «бустер».

На режиме пуска ИСГУ развивает достаточный пусковой момент и частоты вращения для быстрого и бесшумного пуска ДВС. Данный режим позволяет реализовать функцию «стоп-старт», которая в режиме городского движения при остановке ТС выключает ДВС и быстро перезапускает для продолжения движения, тем самым уменьшая расход топлива за счет снижения времени работы ДВС в режиме холостого хода.

В режиме «бустер» ЭМ может работать совместно с ДВС на режимах разгона, когда частоты вращения невысокие ($1000\text{--}2000\text{ мин}^{-1}$) и требуется высокий крутящий момент, тем самым повышается динамичность движения ТС.

Как только заканчивается пуск ДВС или режим «бустера», ИСГУ переходит в генераторный режим, при котором происходит заряд аккумуляторной батареи и питание электрических потребителей на борту ТС.

В традиционной системе торможения вся энергия трения в колодках преобразуется в тепло. ИСГУ в режиме генератора также может использоваться как электромагнитный тормоз, что позволит преобразовать часть энергии торможения в электрическую энергию для заряда буферного источника энергии или батареи, а если батарея полностью заряжена, то электрическая энергия рассеивается на тормозном реостате. Данная система позволяет не только получать электрическую энергию, но и совместно с традиционной системой торможения останавливать автомобиль, что в свою очередь снижает износ и эксплуатационные затраты традиционной системы торможения.

Кроме этих функций, ИСГУ также может осуществлять активное сглаживание пульсаций момента ДВС. Пульсации крутящего момента, происходящие в ДВС, наблюдаются из-за неравномерности выделения энергии в цилиндрах при сжигании топлива. «Активное демпфирование» осуществляется следующим образом: при превышении установленного значения пульсаций крутящего момента коленчатый вал тормозится генератором, и избыточная энергия, получаемая в результате этого, накапливается в суперконденсаторе и в последующем такте сжатия расходуется на увеличение скорости вращения коленчатого вала при недостаточном энергоснабжении.

Типы электрических машин, применяемых в стартер-генераторной установке

Применение ИСГУ позволило производителям расширить выбор применяемых ЭМ на ТС. На данный момент к наиболее используемым

и упоминаемым в литературных источниках типам ЭМ относятся асинхронная ЭМ с короткозамкнутым ротором, синхронная ЭМ с возбуждением от постоянных магнитов и вентильно-индукторная машина.

Синхронные машины с постоянными магнитами (СМ с ПМ) – бесконтактные ЭМ с возбуждением от постоянных магнитов, которые либо встраиваются в полость ротора, либо располагаются на его наружной части (рис. 4а). СМ с ПМ выделяются среди остальных типов машин тем, что имеют наибольшую эффективность в широком диапазоне частот вращения, относительно низкий уровень акустических шумов и высокую степень надежности, лучшие массогабаритные показатели [4]. Однако основной недостаток данного типа ЭМ связан с его высокой стоимостью, вызванной использованием в его конструкции редкоземельных элементов для изготовления постоянных магнитов. Наличие в конструкции ротора постоянных магнитов усложняет систему управления таким типом ЭМ, т.к. магнитное поле, создаваемое магнитами, постоянно взаимодействует со статорной обмоткой. Также СМ с ПМ требует наличия демпферных обмоток, предотвращающих размагничивание постоянных магнитов на пусковых режимах [5]. Несмотря на свою высокую стоимость, данный тип ЭМ наиболее часто применяется в гибридных ТС, таких как Toyota Prius, Chevrolet Volt, BMW i3.

Асинхронные машины (АМ) с короткозамкнутым ротором имеют статорную и роторную обмотки (рис. 4б). Они имеют ряд преимуществ, таких как высокая надежность, низкие требования к техническому обслуживанию и относительно низкую стоимость по сравнению с СМ с ПМ. Однако по энергетической эффективности такой тип ЭМ уступает машинам с постоянными магнитами, а наличие роторной обмотки усложняет охлаждение ЭМ. Также к недостаткам таких АМ можно отнести требования к относительно маленькому зазору между статором и ротором

и дополнительные емкостные элементы, необходимые для работы в генераторном режиме, наличие которых увеличивает габаритные показатели такого типа электрохимического преобразователя и его стоимость [5]. Экспериментальный образец ИСГУ на базе АМ представлен в [2, 6].

Последний тип ЭМ – вентильно-индукторная машина (ВИМ) (рис. 4в). Данный тип ЭМ относится к синхронным реактивным машинам, которые работают в режиме шагового привода с непрерывным вращением. Однако следует отличать ВИМ от синхронной реактивной машины, которая работает при синусоидально изменяющемся напряжении фазы обмотки якоря вне зависимости от положения ротора. Широкого применения ВИМ не получила, однако количество публикаций, посвященных применению такого типа ЭМ, ежегодно растет [7]. Предлагаются различные методики расчетов, и на их основе проектируются экспериментальные образцы [8]. В [9] представлено сравнение характеристик асинхронного двигателя и ВИМ.

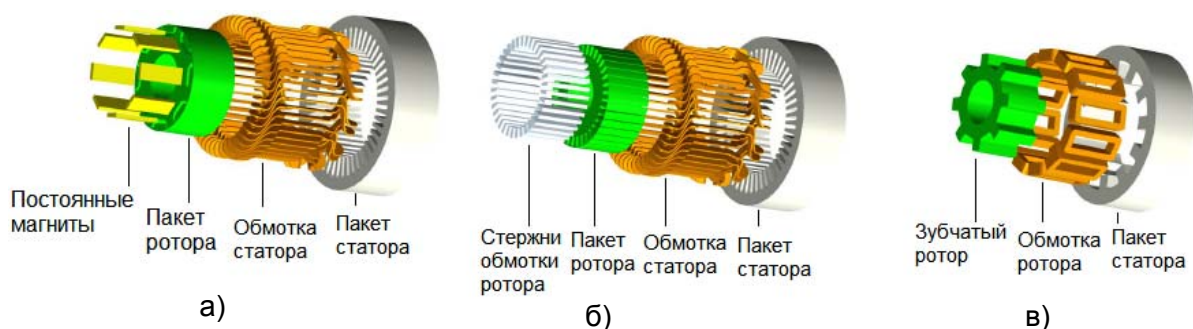


Рис. 4. Синхронная машина с постоянными магнитами (а); асинхронная машина с короткозамкнутым ротором (б); вентильно-индукторная машина (в)

Преимущества ВИМ по сравнению с рассмотренными типами ЭМ [4, 5, 7, 8, 9, 10]:

1 – обмотка на статоре выполняется в виде сосредоточенной и размещенной на зубцах катушки, что делает производство данного типа ЭМ более экономичным по сравнению с распределенными обмотками других типов ЭМ;

2 – отсутствие роторной обмотки и магнитов делает данный тип ЭМ более выгодным с точки зрения прочностных характеристик конструкции ротора и затрат материалов;

3 – статор является основным источником тепла, выделяемым в процессе работы, что в свою очередь делает охлаждение более простым, так как к статору проще получить доступ, чем к ротору;

4 – потери в роторе намного меньше по сравнению со статором, в отличие от асинхронных машин;

5 – поскольку обмотки электрически независимы, то при неисправности в одной из фаз работа ИМ возможна, но с меньшей мощностью;

6 – низкие эксплуатационные затраты;

7 – высокий пусковой момент в стартерном режиме и высокая частота генерируемого напряжения, что уменьшает пульсации выпрямленного напряжения в случае использования ЭМ как генератора постоянного тока.

Недостатки ВИМ:

1 – высокая пульсация момента, которую можно снизить путем управления перекрыванием фазных токов;

2 – повышенные акустический шум и вибрации, которые вызывают деформацию в статоре, но которую за счет подбора числа зубцов статора и ротора и алгоритма коммутации фаз можно значительно снизить;

3 – средние массогабаритные показатели по сравнению с рассмотренными типами ЭМ;

4 – относительно малый ток отдачи в генераторном режиме, в особенности в режиме холостого хода ДВС.

На рис. 5 представлена диаграмма, позволяющая сравнить основные характеристики рассмотренных ЭМ.



Рис. 5. Лепестковая диаграмма сравнения основных характеристик ЭМ

Заключение

Проведенный в данной статье анализ показал, что ТС с СГУ и повышенным напряжением бортовой сети является перспективным направлением в автомобилестроении, так как данная технология позволяет улучшить топливную экономичность ТС, его комфортабельность и эффективность силовой установки в целом, уменьшить вредные выбросы в атмосферу. Кроме того, возможность получить достаточно высокую мощность в генераторном режиме и повышение напряжение бортовой сети ТС могут сделать СГУ одной из неотъемлемых частей современного автомобиля, так как ежегодно на борту размещаются новые системы, обеспечивающие комфортабельность и безопасность пассажиров и водителя. Развитие современной электроники, систем автоматизации, компьютерной базы и преобразовательной аппаратуры, позволяющей точно и эффективно управлять ЭМ, также способствуют внедрению СГУ на ТС. Таким образом, некоторое разнообразие существующих типов ЭМ на данный момент позволяет производителю, руководствуясь технико-экономическими показателями, выбрать наиболее подходящий тип ЭМ

для конкретного типа ТС. При этом концепция «мягкого» гибрида с параллельной структурой носит вспомогательный характер, в отличие от «сильного» гибрида, и не требует сложных конструктивных решений, поэтому с точки зрения массового производства ТС с СГУ выгоднее и дешевле.

Список литературы

1. Драгомиров, С.Г. Современные и перспективные направления развития автомобильного электрооборудования и электроники / С.Г. Драгомиров // Автотракторное электрооборудование. – 2001. – № 3–4. – С. 3–6.
2. Integrated starter generator for 42-V powernet using induction machine and direct torque control technique/ A.K. Jain, S. Mathapati, V.T. Ranganathan, V. Narayanan // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2006. – № 3. – P. 701–710.
3. Беляков, А.И. Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы развития / А.И. Беляков // Электрохимическая энергетика. – 2006. – № 3. – С. 146–149.
4. Weisheng, J.J. Three-Phase 24/16 Switched Reluctance Machine for Hybrid Electric Powertrains: Design and Optimization ... Ph.D. dissertation / J.J. Weisheng; College of Automobile Engineering. – S. 1, 2015. – 183 p.
5. Николаев, В.В. Стартер-генератор автономных объектов на основе вентильно-индукторной машины: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Николаев; МЭИ. – М., 2005. – 138 с.
6. Rehman, H. An Integrated Starter-Alternator and Low-Cost High-Performance Drive for Vehicular Applications / H. Rehman // IEEE Transactions on vehicular technology. – 2008. – № 3. – P. 1454–1465.
7. Кузнецов, В.А. Вентильно-индукторные двигатели: учебно-практ. пособие / В.А. Кузнецов, В.А. Кузмичев. – М.: МЭИ, 2010. – 71 с.

8. Schofield, N. Generator Operation of a Switched Reluctance Starter/Generator at Extended Speeds / N. Schofield, S. Long // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2009. – № 1. – P. 48–56.
9. Голландцев, Ю.А. Сравнение механических характеристик асинхронных и вентильных индукторно-реактивных двигателей / Ю.А. Голландцев // Информационно-управляющие системы. – 2006. – № 6. – С. 50–53.
10. Krishan, R. Switched Reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and application / R. Krishan. – Florida: CRC press, 2001. – 417 p.

References

1. Dragomirov S.G. *Avtotraktornoe elektrooborudovanie*, 2001, no. 3–4, pp. 3–6.
2. Jain A.K., Mathapati S., Ranganathan V.T., Narayanan V. Integrated starter generator for 42-V powernet using induction machine and direct torque control technique, IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, no. 3, pp. 701–710.
3. Belyakov A.I. *Elektrohimicheskaya ehnergetika*, 2006, no. 3, pp. 146–149.
4. Weisheng, J.J. Three-Phase 24/16 Switched Reluctance Machine for Hybrid Electric Powertrains: Design and Optimization ... Ph.D. dissertation, College of Automobile Engineering, S. 1, 2015, 183 p.
5. Nikolaev V.V. *Starter-generator avtonomnyh ob'ektov na osnove ventil'no-induktornoj mashiny* (The starter-generator of Autonomous objects on the basis of switched-reluctance machines), dissertation of candidate of Sciences, MEHI, Moscow, 2005, 138 p.
6. Rehman H. An Integrated Starter-Alternator and Low-Cost High-Performance Drive for Vehicular Applications, IEEE Transactions on vehicular technology, 2008, no. 3, pp. 1454–1465.

7. Kuznecov V.A., Kuzmichev V.A. *Ventil'no-induktornye dvigateli* (Valve-inductor motors), Moscow, MJeI, 2010, 71 p.
8. Schofield N., Long S. Generator Operation of a Switched Reluctance Starter/Generator at Extended Speeds, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, no. 1, pp. 48–56.
9. Gollandcev Y.A. *Informacionno-uprvlyayushchie sistemym*, 2006, no. 6, pp. 50–53.
10. Krishan R. Switched Reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and application, Florida, CRC press, 2001, 417 p.