

СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ СОВРЕМЕННЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Кагдин В.Н., к.т.н. Малеев Р.А., Зимин А.Н., к.ф.-м.н. Зуев С.М., к.т.н. Яхутль Д.Р.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

eoep@mospolytech.ru

В данной статье описывается назначение и области применения стартер-генераторной установки. Рассмотрены режимы работы стартер-генераторной установки как в качестве электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения, осуществляющего вращение вала двигателя внутреннего сгорания, так и в качестве генератора, когда электрическая машина работает как источник постоянного тока независимого возбуждения, обеспечивающего питание электрических цепей управления, электродвигателей вспомогательного электрооборудования, освещения и заряда аккумуляторной батареи. Исследованы дополнительные функции стартер-генераторной установки в виде системы «старт-стоп», рекуперативного торможения, бустерного разгона автомобиля, гашения крутильных моментов вала двигателя внутреннего сгорания и управления потоками энергии в бортовой сети.

Проведен выбор и обоснование оптимальной схемы, а также конструкции стартер-генераторного устройства. Определены основные технико-экономические параметры стартер-генераторной установки. Была продемонстрирована конструкция стартер-генераторной установки, представляющая собой обратимую электрическую машину. Разработана блок-схема стартер-генераторной установки.

Рассмотрены электрические машины, применяемые для стартер-генераторных установок. Описаны конструкции асинхронной машины с короткозамкнутым ротором, синхронной машины с электромагнитным возбуждением, вентильной машины с постоянными магнитами, бесконтактной машины, синхронной машины с постоянными магнитами, вентильной индукторной машиной с самовозбуждением. Проведен обзор и анализ электрических машин, применяемых в стартер-генераторных установках ведущих зарубежных фирм.

Рассмотрена конструкция обратимой индукционно-динамической машины, в которой ротор вращается снаружи, а не внутри двигателя и представляет собой короткозамкнутую обмотку с литой алюминиевой клеткой. Проведен расчет основных параметров обратимой индукционно-динамической машины как в стартерном, так и в генераторном режимах. Расчет проведен по методике аналогичной, как и у асинхронного двигателя.

Ключевые слова: стартер-генераторная установка, рекуперация, электрическая машина, двигатель внутреннего сгорания, индукционно-динамическая машина.

Для цитирования: Кагдин В.Н., Малеев Р.А., Зимин А.Н., Зуев С.М., Яхутль Д.Р. Стартер-генераторные установки современных автомобилей // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 4 (50). С. 27–32. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-27-32

Введение

В последние годы ведущие зарубежные производители уделяют серьезное внимание разработке стартер-генераторных устройств (СГУ), применение которых позволяет существенно улучшить технико-экономические показатели автомобиля.

Применяемые на автомобилях электростартеры и генераторные установки отличаются относительно невысокой надежностью и требуют ухода в эксплуатации. Электрическая машина, которая была разработана как электродвигатель, значительно хуже работает в режиме генератора, и наоборот машина, спроектированная как генератор, плохо работает в режиме электродвигателя.

Создание СГУ позволит сэкономить подкапотное пространство автомобиля.

Изначально предполагалось использовать СГУ только для выработки энергии и для запуска двигателя, но впоследствии перечень его функций был существенно расширен. На сегодняшний день СГУ рассматривается в качестве основы для будущих перспективных конструкций автомобилей.

Основная часть

На каждом автомобиле с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) применяются две электрические машины — электростартер и генератор, которые работают попеременно,

то есть при пуске двигателя работает электростартер, а генератор принудительно отключается от аккумуляторной батареи (АБ), чтобы исключить ее дополнительный разряд. После запуска ДВС электростартер отключается и работает генератор, который обеспечивает питание потребителей электроэнергии и зарядку АБ. Таким образом, на определенных режимах работы автомобиля одна из электрических машин бездействует. Объединение двух электрических машин в одном устройстве позволит значительно уменьшить габариты и массу всей системы, повысив тем самым технико-экономические показатели автомобиля. Вопросом совмещения двух электрических машин в одном корпусе занимаются не один десяток лет, но только с развитием современной электронной базы такие разработки стали находить реальное техническое исполнение [1].

В настоящее время ведущие западные автопроизводители *Honda*, *BMW AG*, *Volkswagen AG*, *Citroen*, *Peugeot* применяют на некоторых моделях своих автомобилей СГУ [2]. Разработка СГУ занимается фирмы *Siemens* и *Bosch*. Мощность разработанных устройств лежит в пределах 5 кВт. СГУ, разработанный *BMW*, использует жидкостное охлаждение, остальные производители применяют традиционное воздушное охлаждение [3]. Все разработанные машины рассчитаны на рабочее напряжение 42 В.

СГУ предназначено для запуска ДВС, выработки энергии и реализации дополнительных функций:

- система старт-стоп;
- бустерный разгон автомобиля;
- гашение крутильных колебаний вала ДВС;
- управление потоками энергии в бортовой сети.

Возможность использования гибридной силовой установки совместно с СГУ вместо привычной силовой установки на базе ДВС даст нам такие преимущества, как:

- снижение расхода топлива автомобилей;
- уменьшение теплового и звукового излучения, что очень важно для специальных и военных машин;
- снижение токсичности отработавших газов двигателя за счет уменьшения расхода топлива;
- повышение КПД силовой установки;
- возможность рекуперации энергии на спусках под уклон;
- улучшение динамических характеристик автомобиля;

– возможность применения бесступенчатых или малоступенчатых передач в системе привода ведущих колес автомобиля.

В настоящее время в России разработкой СГУ серьезно занимается крупнейший отечественный автопроизводитель АО «АвтоВАЗ». В сотрудничестве с Новосибирским государственным техническим университетом разработан и изготовлен СГУ для перспективных автомобилей ВАЗ. В данной разработке применяется индукторная электрическая машина, которая отличается простотой и надежностью. Разработанная машина в режиме генератора выдает напряжение 14 В, с возможностью повышения в трансформаторно-выпрямительном блоке до 42 В [4].

В режиме генератора (основном режиме) происходит выработка электроэнергии, которая запасается в АБ или суперконденсаторе. В момент, когда это необходимо стартер-генератор переходит в режим электродвигателя и начинает работать совместно с ДВС. На текущий момент разработкой гибридных автомобилей занимаются практически все ведущие автомобильные фирмы мира, при этом некоторые модели (*Toyota Prius*, *Honda Insight*, *Nissan Tino*) выпускаются уже довольно давно [5]. Однако в настоящее время отсутствует преобладающая концепция гибридной энергоустановки. При этом наиболее важными факторами, определяющими основные показатели силовой установки и автомобиля в целом и требующие первоочередного рассмотрения, являются:

- использование ДВС только для привода мощной генераторной установки, с помощью которой будет осуществляться электроуправление автомобилем [6];
- применение комбинированной энергоустановки, при которой используется как электрическая, так и механическая энергия [7];
- выбор типа и параметров накопителя энергии;
- оптимизация алгоритма управления силовой установкой.

СГУ первоначально разрабатывались как электрические машины с целью снижения массогабаритных показателей и уменьшения количества электрических машин на транспортном средстве. Наибольшее применение СГУ находит на гибридных автомобилях. На рис. 1 представлена конструкция СГУ, представляющая собой обратимую электрическую машину,

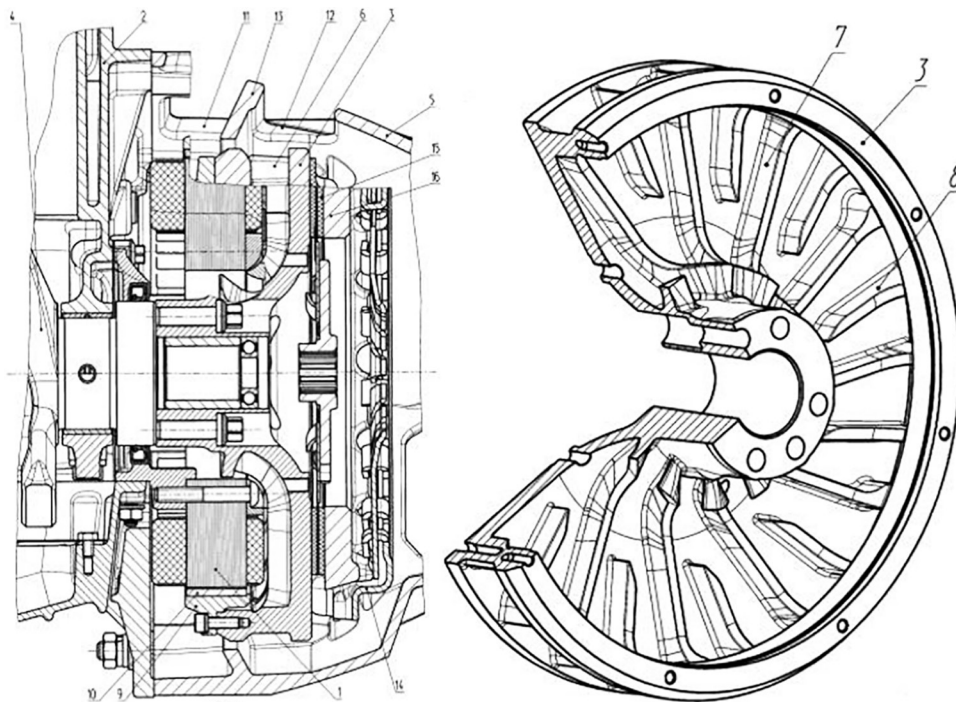


Рис. 1. Конструкция стартер-генераторной установки

Fig. 1. Starter generator set design

в состав которой входит статор 1, совмещенный с корпусом ДВС 2, и ротор 3, который механически связан с коленчатым валом 4 при помощи резьбового крепежа. В данной конструкции присутствует кожух 5, который закреплен на корпусе ДВС. Обмотка статора электрической машины подключена к АБ. Ротор представляет собой чашеобразную форму с отверстиями 6, разделенными длинными 7 и короткими 8 лопастями, а вогнутая поверхность ротора с лопастями направлена к статору. Таким образом,

при помощи лопастей образуются перегородки окон. Обруч 9 закреплен на роторе и окружает статор, а между ними располагается цилиндрическое кольцо, изготовленное из магнитоласта 10. В кожухе электрической машины расположены вентиляционные отверстия 11 и 12 для охлаждения обмоток.

Блок-схема СГУ представлена на рис. 2. Система включает электромеханическую часть (электродвигатель, генератор), автономный инвертор и систему управления.



Рис. 2. Блок-схема стартер-генераторной установки

Fig. 2. Block diagram of a starter-generator set

СГУ включает в себя датчики положения ротора двигателя, педалей акселератора, сцепления, тормоза, подключенные к системе управления СГУ. Система управления может быть подключена к внешнему персональному компьютеру (ПК) через СОМ порт, для отслеживания работы СГУ. Автономный инвертор СГУ (ИСГУ) выполняет следующие задачи:

- в режиме генератора – накопление энергии для зарядки АБ;
- в режиме стартера – питание обмоток стартера от накопительного конденсатора.

При пуске СГУ развивает достаточный пусковой момент и минимальную пусковую частоту вращения. Данный режим позволяет реализовать функцию «стоп-старт», которая в режиме городского движения при остановке автомобиля 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» СГУ может работать совместно с ДВС, повышая динамичность движения автомобиля. Как только заканчивается пуск ДВС или режим «бустера», СГУ переходит в генераторный режим, при котором происходит заряд АБ и питание электрических потребителей автомобиля. В традиционной системе торможения вся энергия трения в колодках преобразуется в тепло. СГУ 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 того, СГУ позволяет уменьшить колебания момента ДВС из-за неравномерности коленчатого вала. «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 [8].

Проведенный обзор и анализ СГУ ведущих зарубежных фирм показывает, что применяют следующие виды электрических машин:

- асинхронная машина с короткозамкнутым ротором;
- синхронная машина с электромагнитным возбуждением;
- вентильная машина с постоянными магнитами;
- бесконтактная машина;
- синхронная машина с постоянными магнитами;
- вентильная индукторная машина с самовозбуждением.

Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором – наиболее часто встречающаяся электрическая машина СГУ. К числу достоинств асинхронной машины следует отнести простоту конструкции, высокую надежность и малую себестоимость. К числу недостатков асинхронной машины – относительно высокие потери в роторе, в результате чего снижается КПД.

Вентильная индукторная машина с самовозбуждением встречается крайне редко. К числу недостатков следует отнести достаточно высокие уровни вибраций и шумов. В РФ запатентована двухфазная вентильно-индукторная машина с электромагнитной асимметрией. Уменьшение числа фаз позволяет существенно упростить схему управления, которая содержит всего четыре ключа, а в роторе электрической машины отсутствуют постоянные магниты. Однако данная конструкция характеризуется значительным искажением вращающегося магнитного поля статора и большим шагом вращения результирующего вектора магнитного поля статора, что приводит к колебаниям электромагнитного момента, неравномерности вращения ротора и снижению КПД.

Несмотря на очевидные преимущества и недостатки конкретных типов СГУ и широкое применение гибридных силовых установок, в последние годы на мировом автомобильном рынке наблюдается достаточно жесткая конкуренция не только между крупными автомобильными фирмами, но и между небольшими фирмами, подтверждением чего являются тысячи патентов разных стран. Данная ситуация позволяет сделать прогноз, что в ближайшие 2–3 года ожидается резкий скачок в серийном и массовом производстве автомобилей с СГУ. Причиной тому является не только воз-

возможность повышения технико-экономических показателей автомобиля, но и забота производителей о собственном имидже.

В данной работе была рассмотрена конструкция обратимой индукционно-динамической машины (ИДМ), т.е. ротор вращается снаружи, а не внутри двигателя и представляет собой короткозамкнутую обмотку с литой алюминиевой клеткой. В режиме электродвигателя машина работает не более 30 с. Для увеличения продолжительности работы применяется мощный накопитель энергии. Коммутация обмоток СГУ при переключении его из одного режима работы в другой происходит с помощью схемы управления.

Был проведен расчет ИДМ по методике [9] аналогичной асинхронному двигателю, результаты которого представлены ниже:

- количество пазов статора и ротора 36/28;
- внешний диаметр статора 244 мм;
- длина статора 40 мм;
- внутренний диаметр статора 170 мм;
- воздушный зазор между ротором и статором 0,5 мм;
- внутренний диаметр ротора 245 мм;
- наружный диаметр ротора 290 мм;
- отношение наружного диаметра ротора к наружному диаметру статора 1.19;
- число полюсов возбуждения 4;
- мощность в режиме электродвигателя 4 кВт;
- мощность в режиме генератора Р 1,5 кВт;
- напряжение в режиме генератора 42 В;
- ток холостого хода 11 А;
- расчетный ток ротора в режиме генератора 40 А;
- расчетный ток в режиме стартера 122,4 А;
- линейная нагрузка стартера 351,9 А/см;
- линейная нагрузка ротора 309,3 А/см;
- коэффициент мощности 0,86;
- скольжение при максимальном моменте 0,19;
- КПД в режиме генератора – 68 %.

В дальнейшем предполагается проведение исследований СГУ с вышеуказанными параметрами.

Заключение

Применение СГУ на современных автомобилях приводит к объединению двух электрических машин в одном устройстве, что позволяет значительно уменьшить габариты и массу всей системы, повысив тем самым технико-эко-

номические показатели автомобиля. Использование СГУ дает возможность реализовать дополнительные функции: система старт-стоп, бустерный разгон автомобиля, гашение крутильных колебаний вала ДВС, управление потоками энергии в бортовой сети. Применение СГУ приводит к уменьшению расхода топлива автомобиля, повышению экологичности, сохранению энергии при рекуперации, улучшению динамических характеристик автомобиля, повышению КПД. Проведен расчет основных параметров ИДМ в СГУ.

Литература

1. Теория, конструкция, расчет автотракторного электрооборудования / Под редакцией Фесенко М.Н. М.: Машиностроение, 2006. 93 с.
2. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей. М.: Транспорт, 2019. 480 с.
3. Акимов С.В., Здановский А.А., Корец А.М. и др. Справочник по электрооборудованию автомобилей. М.: Машиностроение, 2004. 120 с.
4. Акимов С.В., Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей. Учебник для ВУЗов. М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2001. 234 с.
5. Ганджа С.А., Ерлышева А.В. Стартер-генератор для автономных источников электроснабжения. – Ч.: Вестник ЮУрГУ, 2005. № 9. С. 84–86.
6. Конструкция автомобиля. Электрооборудование. Системы диагностики. Учебник для вузов, под редакцией А.Л. Карунина. М., Изд. «Горячая линия – Телеком», 2005, 480 с.
7. Николаев В.В. Стартер-генератор автономных объектов на основе вентильно-индукторной машины. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МЭИ, 2005. 142 с.
8. Анисимов В.М. Автомобильный стартер-генератор с микропроцессорной системой управления. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург: УГТУ, 1997. 128 с.
9. Анисимов В.М. Электромеханические стартер-генераторные системы автомобильных транспортных средств: Теория, проектирование, исследование. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Самара: СамГТУ, 2004. 378 с.

Reference

1. Teoriya, konstruktsiya, raschet avtotraktornogo elektrooborudovaniya [Theory, design, calculation of automotive electrical equipment]. Pod redaktsiyey

- Fesenko M.N. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2006. 93 p.
- Yutt V.E. Elektrooborudovaniye avtomobiley [Electrical equipment of vehicles]. Moscow: Transport Publ., 2019. 480 p.
 - Akimov S.V., Zdanovskiy A.A., Korets A.M. i dr. Spravochnik po elektrooborudovaniyu avtomobiley [Automobile electrical handbook]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2004. 120 p.
 - Akimov S.V., Chizhkov Yu.P. Elektrooborudovaniye avtomobiley [Electrical equipment of vehicles]. Uchebnik dlya VUZov. Moscow: ZAO KZHI «Za ruleM» Publ., 2001. 234 p.
 - Gandzha S.A., Yerlysheva A.V. Starter-generator for autonomous power supply sources: Vestnik YUURGU, 2005. No 9, pp. 84–86 (in Russ.).
 - Konstruktsiya avtomobilya. Elektrooborudovaniye. Sistemy diagnostiki [Design of the automobile. Electrical equipment. Diagnostic systems]. Uchebnik dlya vuzov, pod redaktsiyey A.L. Karunina. Moscow, Izd. «Goryachaya liniya – TelekoM» Publ., 2005, 480 p.
 - Nikolayev V.V. Starter-generator avtonomnykh ob"yektov .na osnove ventil'no-induktornoy mashiny. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Starter-generator of autonomous objects based on a valve-inductor machine: Dissertation for Degree of PhD in Engineering]. Moscow: M·EI Publ., 2005. 142 p.
 - Anisimov V.M. Avtomobil'nyy starter-generator s mikroprotssornoy sistemoy upravleniya. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Automotive starter-generator with microprocessor control system: Dissertation for Degree of PhD in Engineering]. Yekaterinburg: UGTU Publ., 1997. 128 p.
 - Anisimov V.M. Elektromekhanicheskiye starter-generatorn-yye sistemy avtomobil'nykh transportnykh sredstv: Teoriya, proyektirovaniye, issledovaniye. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy doktora tekhnicheskikh nauk [Electromechanical starter-generator systems of automotive vehicles: theory, design, research: Dissertation for Degree of DrSc in Engineering]. Samara: SaMGU Publ., 2004. 378 p.

STARTER-GENERATOR SETS OF MODERN VEHICLES

V.N. Kagdin, PhD in Engineering R.A. Maleyev, A.N. Zimin, PhD in Physics and Mathematics S.M. Zuyev,
PhD in Engineering D.R. Yakhutl'
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia
eope@mospolytech.ru

This article describes the purpose and applications of the starter generator set. The modes of operation of a starter-generator set are considered both as a sequential excitation direct current electric motor, which rotates the shaft of an internal combustion engine, and as a generator, when an electric machine operates as a direct current source of independent excitation, supplying power to electric control circuits, electric motors of auxiliary electrical equipment, lighting and battery charging. Additional functions of a starter-generator set in the form of a start-stop system, regenerative braking, booster acceleration of a vehicle, damping of torsional moments of the shaft of an internal combustion engine and control of energy flows in the on-board network were studied.

The choice and substantiation of the optimal scheme, as well as the design of the starter-generator device, were carried out. The main technical and economic parameters of the starter-generator set were determined. The design of a starter-generator set was presented. This design is a reversible electric machine. A block diagram of a starter-generator set was developed.

Electrical machines used for starter-generator sets are considered. The design of an asynchronous machine with a squirrel-cage rotor, a synchronous machine with electromagnetic excitation, a valve machine with permanent magnets, a contactless machine, a synchronous machine with permanent magnets, and a valve machine with self-excitation are described. A review and analysis of electrical machines used in starter-generator sets of leading foreign companies is carried out.

The design of a reversible induction-dynamic machine is considered. The rotor rotates outside, and not inside the motor and is a short-circuited winding with a cast aluminum cage. The calculation of the main parameters of a reversible induction-dynamic machine was carried out both in the starting and in the generator modes. The calculation using a method similar to that of an induction motor was carried out.

Keywords: starter-generator set, recuperation, electric machine, internal combustion engine, induction-dynamic machine.

Cite as: Kagdin V.N., Maleyev R.A., Zimin A.N., Zuyev S.M., Yakhutl' D.R. Starter-generator sets of modern vehicles. Izvestiya MGTU «MAMI». 2021. No 4 (50), pp. 27–32 (in Russ.).

DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-27-32