

УДК 629.33.03-83

Кравцов Сергей Геннадьевич, соискатель,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, electro@madi.ru
Сидоров Кирилл Михайлович, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, k.sidorov@bk.ru

АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ ПРИВОДНОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация. В течение последних десятилетий технологии производства электронных компонентов претерпели существенное развитие. Стало возможным использовать силовые и микроэлектронные компоненты в системах тягового электропривода, что инициировало возможность разработки современных систем управления электромобилями. Эволюция элементной базы позволила создать различные устройства, начиная от встроенных мотор-генераторов и заканчивая серийными электромобилями. В данной статье рассматриваются современные аспекты развития силовой электроники для приводной техники, используемой в электромобилях. Особое внимание уделено перспективным полупроводникам на основе карбида кремния и нитриде галлия, позволяющим существенно снизить такие критичные показатели для электромобиля как массу и габаритные размеры преобразовательного электрооборудования. Статья состоит из двух частей. Первая часть представляет историю развития силовой электроники. Во второй части рассматриваются потенциальные пути развития последней.

Ключевые слова: электроника; электронные компоненты; силовая электроника; электромобиль; электродвигатель; системы электронного управления.

Kravtsov Sergey G., external doctorate student,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, electro@madi.ru
Sidorov Kirill M., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, k.sidorov@bk.ru

ASPECTS OF DRIVES POWER ELECTRONICS EVOLUTION

Abstract. During the last decades, production technologies of electronic components have made a significant headway. It has become possible to use power and microprocessor electronics in the drive and power systems, which initiated the development of modern electric motor control systems used on electric vehicles. Evolution of components has allowed to create various devices starting with integrated alternator and ending with serial production electric vehicles. Particular attention is paid to semiconductors based on silicon carbide and gallium nitride, which allows to reduce such critical parameters of electric vehicle as the weight and overall dimensions of the electrical equipment. This article presents the modern development trends of electronic industry related to the drive systems for electric vehicles. The article consists of two sections. The first section describes the retrospective of power electronics. The second section deals with power electronics potential future perspectives.

Key words: electronics; electronic components; power electronics; electric vehicle; electric motor; electric control systems.

История развития современной силовой электроники для приводной техники

Концепт интегрирования силовой электроники с приводной техникой далек от новизны. Исторически система управления и электрические машины развивались параллельными путями. У истоков развития стоят системы с отдельно стоящими блоками управления, подключаемыми силовыми и управляющими кабелями к электродвигателям на расстояниях от одного метра до одного километра. С прогрессом в технической реализации силовой электроники стала возможной интеграция системы управления двигателем непосредственно в корпус самого двигателя. Что дает неоспоримое преимущество по массогабаритным параметрам, КПД, уменьшает суммарные затраты на производство, позволяет оптимизировать производственный цикл, а также уменьшить количество отказов. Хотя трудно найти объект, в котором максимально сочетаются все вышеупомянутые показатели, большинство из них присутствуют в устройствах, которые были разработаны и производились последние пятьдесят лет.

Одним из первых ярчайших примеров интеграции является автомобильный генератор. Данный пример не совсем подходит под описание интеграции приводной техники, но ярко описывает начальные подходы к данному вопросу. Неуправляемый мост Ларионова, состоящий из шести или более диодов, без какой-либо управляющей схемы был интегрирован в автомобильный генератор. Сходство данного генератора и интегрированной системы управления в том, что данные диоды устанавливались непосредственно внутри генератора и работали в повышенных температурных и вибрационных условиях. Компания Chrysler (США) внедрила данную разработку в 1960 году в модель Valiant в течение пяти лет после того, как силовые диоды впервые были представлены для массового потребления. В начале своего развития диоды

могли работать в диапазоне температур окружающей среды до 160°C, при этом максимальная мощность генераторов не превышала 500 Вт. Сегодня силовые диоды могут работать при температуре 200°C, а максимальная мощность генераторов составляет более 1,5 кВт.

Первым примером интеграции силовой управляющей электроники и электрического двигателя стал электродвигатель с электронной коммутацией, выпущенный компанией GE (США) в 1987 году для использования в приводах нагнетания воздуха печей, что позволило значительно увеличить КПД печи посредством плавного регулирования потока воздуха вместо использования релейного управления потоком в режиме «включено/выключено» [1–2].

В 1990 году компания Grundfos (Дания) произвела следующий прорыв в интеграции электронных компонентов и электродвигателей. Была разработана и представлена на рынке концепция водяного насоса с интегрированной системой управления скоростью вращения ротора, что позволило добиться постоянного водяного давления для потребителей в независимости от расхода воды. Уникальность данного проекта была в том, чтобы разместить электродвигатель и систему управления в цилиндре диаметром 7,6 см, а также использовать водяное охлаждение прокачиваемой воды для увеличения номинальной мощности насоса.

В 2000 году разработан высоко-оборотистый компрессор для холодильного оборудования компанией Turbosoc (США). Данный компрессор был революционным шагом в развитии интегрированных систем. Интеграция позволила существенно уменьшить массогабаритные показатели и заменить низкоскоростные (до 5000 об/мин) винтовые и спиральные компрессоры высокоскоростным центробежным компрессором с номинальной частотой вращения 48000 об/мин.

В течение последних 25 лет производители отдельно стоящих систем управления переориентировались на производство интегрированных решений для общепромышленных задач. Данные решения имеют различные массогабаритные показатели, но их объединяет одно – система управления установлена непосредственно на корпусе электродвигателя. Преимущество данного концепта в том, что электронные компоненты более изолированы от температурных и вибрационных нагрузок самого электродвигателя в сравнении с полностью интегрированными решениями. Тем не менее, полностью интегрированные решения остаются востребованы в том случае, где требуется заменить электродвигатель, не имеющий системы управления и установленный в ограниченном пространстве.

Несмотря на то, что интегрированные решения доступны уже многие годы, их коммерческий успех ограничен, если брать во внимание все имеющиеся решения в диапазоне мощностей до 10 кВт. Это связано с тем, что надежность интегрированной системы управления, по мнению потребителей, гораздо ниже чем надежность самого электродвигателя и при необходимости замены такой системы последнее осуществляется комплексно – одновременно с исправным электродвигателем, что отрицательно сказывается на экономической эффективности.

Еще одним шагом в сторону интеграции является разработка интегрированного промышленного сервопривода IndraDrive Mi Servo в 2017 году компанией Bosch Rexroth (Германия). Основной инновацией данного сервопривода стала передача силовых и управляющих сигналов посредством одного кабеля, что позволило использовать один блок управления для контроля «цепочки» сервоприводов.

И последним из примеров общепромышленного применения интеграции является сушилка для рук. В 2013 году компания Dyson (Великобритания) представила высокоскоростную сушилку для рук,

использующую синхронный электродвигатель на постоянных магнитах с интегрированной системой управления и номинальной частотой вращения ротора 100000 мин^{-1} и мощностью 1,6 кВт. Система управления состоит из однофазного инвертора на базе моста с так называемой H-топологией. Система позволяет развить 90000 мин^{-1} за 0,7 с и создать поток воздуха со скоростью 717 км/ч при номинальной частоте вращения ротора электродвигателя.

Одной из наиболее эффективных сфер применения интегрированных решений является гибридный и электрический автотранспорт, в том числе специального назначения [3].

Первое решение состояло в частичном уровне интеграции и было внедрено на автомобиле Toyota Prius в конце 90-х годов. Система управления с силовой электроникой была установлена отдельно от двигателя внутреннего сгорания, двух электродвигателей с постоянными магнитами и планетарным редуктором. Данное решение требовало массивных силовых разъемов и силовых кабелей для передачи мощности от системы управления к двигателям, что негативно повлияло на себестоимость и надежность системы.

В 2004 году компания Ford Motor Co (США) представила полностью интегрированное решение на гибридном автомобиле Ford Hybrid Escape. Силовая электроника была установлена непосредственно на корпусе планетарного редуктора и электродвигателей. Максимальная мощность инверторов электродвигателей составила 115 кВт, что было достигнуто благодаря водяному охлаждению инверторов и жидкостному охлаждению электродвигателей посредством масла автоматической коробки передач. Данная реализация позволила исключить силовые кабели и разъемы, что на практике доказало свою эффективность и была применена повторно в 2008 году на модели Ford Hybrid Fusion. Такое же решение было применено во втором поколении электромобиля Nissan Leaf в 2013 году –

инженеры Nissan (Япония) подтвердили, что интегрированное решение позволяет снизить до 10% массы силовой установки.

Еще одним ярким представителем интегрированных решений является электромобиль Tesla Model S, представленный в США 2012 году. Данный электромобиль имеет задний привод, реализованный с использованием двух, фактически одинаковых, цилиндрических блоков, состоящих из инвертора в одном и асинхронного электродвигателя в другом. Максимальная мощность установки составляет 325 кВт.

Наиболее амбициозное и сложное в реализации решение предложила компания Protean Electric (США), интегрировав электродвигатели и силовой инвертор в единый корпус мотор-колеса. В качестве электрической машины использовался обращенный электродвигатель с постоянными магнитами, установленными на роторе. Инвертор в такой системе размещен на кольцеобразной раме статора. Данное мотор-колесо развивает мощность до 75 кВт и крутящий момент до 1000 Нм.

Одним из самых перспективных современных решений в сфере интеграции силовой управляющей электроники и электродвигателей является решение компании Siemens (Германия), воплощенное в серии электрооборудования SIVETEC MSA 3300. Данное решение демонстрирует универсальный подход к использованию электродвигателей, при этом, в зависимости от задачи, может быть использован синхронный двигатель с постоянными магнитами либо асинхронный с короткозамкнутым ротором. В сравнении с решениями Ford и Nissan, Siemens удалось повысить плотность компонентов силовой электроники благодаря использованию планарной технологии соединений, а также благодаря технологии спекания элементов вместо пайки.

Пути развития и перспективные технологии

Один из наиболее вероятных путей развития интегрированных систем будущего вполне предсказуем – скорее всего будущие

интегрированные системы будут выглядеть точно также, как сейчас выглядит электродвигатель. Силовая электроника, при этом, будет установлена внутри корпуса. Трудно предположить, что массогабаритные показатели электродвигателей значительно улучшатся из-за налагаемых законами природы ограничений, но в тоже время кардинально изменятся функциональность, производительность, выходные параметры, скорость и крутящий момент, а также позиционирование ротора. Будут внедрены технологии удаленного беспроводного контроля и диагностики, с использованием консоли управления, компьютера или даже смартфона.

На пути инновационных продуктов будущего будут стоять следующие ключевые вопросы, которые шаг за шагом приходилось решать в течение всей истории развития интегрированных систем:

- уменьшение себестоимости силовой электроники;
- эволюция процессов производства, используемых материалов, изменение стандартов;
- расширение рабочих температурных диапазонов электронных компонентов;
- повышение КПД, увеличение теплопроводности, производство компонентов, работающих при температурах выше 200°C;
- повышение надежности электронных компонентов;
- увеличение количества температурных циклов;
- повышение устойчивости к вибрации и механическим нагрузкам.

Одна из будущих технологий, которая позволит улучшить параметры силовой электроники – это полупроводники с широкой запрещенной зоной, основанные на карбиде кремния SiC или нитриде галлия GaN. При использовании данных материалов в силовой электронике удастся повысить рабочую температуру, КПД, частоту переключения и понизить электрическое сопротивление в открытом состоянии примерно в 300 раз относительно стандартных кремниевых

полупроводниковых элементов. При увеличении частоты переключения силовых ключей появляется возможность уменьшения массогабаритных показателей фильтрующих элементов. К примеру, размер LC-фильтра на выходе силового ключа может быть уменьшен вдвое при увеличении частоты переключения с 20 до 50 кГц. В данный момент в гибридных автомобилях используется отдельный контур охлаждения для силовой электроники, рабочая температура которого составляет 80°C, при использовании элементной базы на SiC возможно использовать основной контур охлаждения ДВС с рабочей температурой 105°C, что значительно позволит снизить размеры и массу силовых установок [4–11].

Модульно-интегрированный двигатель является другой перспективной технологией. Первый концепт модульно-интегрированного двигателя был продемонстрирован в 2004 году и состоял из отдельно взятых полюсов электрической машины с обмотками, силовой электроникой и шиной управления. Несколько таких полюсов, соединенных друг с другом, являются статором электродвигателя с интегрированным инвертором. Существенным преимуществом данного решения является высокая отказоустойчивость электродвигателя в целом. Второе поколение модульно-интегрированных двигателей было представлено в 2014 году. Для проекта был выбран шестифазный десяти полюсный электродвигатель с постоянными магнитами. Номинальная мощность двигателя составила 10 кВт при пиковой 18 кВт. Каждый полюс включал в себя инвертор полумост с применением Si-транзисторов.

Третье поколение модульно-интегрированных двигателей, представленное в 2016 году, построено на базе асинхронного двигателя и GaN силовых ключей, что позволило существенно сократить массогабаритные показатели при увеличении частоты переключения с 20 кГц второго поколения до 100 кГц. При сравнении двух электрических машин, использующих Si и GaN, электрическая машина

на базе GaN электронных компонентов выигрывает в три раза по массогабаритным параметрам.

Следующей перспективной технологией является высокочастотный инвертор тока, использующий силовые ключи SiC или GaN. Данный инвертор имеет стандартную топологию трехфазного инвертора за исключением наличия индуктивности в цепи шины постоянного тока и емкости на фазных выходах. Преимуществом данного инвертора является непосредственное формирование синусоидального напряжения на выходе с минимальными неосновными гармониками посредством увеличенной до 200 кГц частоты коммутации широтно-импульсной модуляции. Вследствие высокой частоты переключения габариты LC-фильтра намного меньше, чем идентичных фильтров в стандартных инверторах.

Самой перспективной технологией, которая позволит совершить революцию в производстве силовых полупроводниковых компонентов для управления тяговым электроприводом, является аддитивное производство, известное под названием 3D-печать. Современные технологии массового производства позволяют использовать только два измерения при производстве силовых электронных компонентов, что отрицательно сказывается на массогабаритных показателях и затрудняет интеграцию инверторов и электродвигателей. Аддитивное производство позволит максимально уменьшить размеры полупроводниковых элементов инвертора. В настоящее время осуществляются первые шаги по внедрению и отработки данной технологии, первые прототипы инверторов используют до 50% полупроводниковых компонентов, напечатанных в 3D, и рассчитаны на мощность до 30 кВт.

Заключение

Исследование и внедрение в массовое производство новейших технологических процессов позволяет усовершенствовать текущие электронные компоненты, увеличивая мощности, токи, напряжения, КПД и улучшая массогабаритные показатели. Данная тенденция позволяет производить системы управления и силовые блоки в габаритах с возможной установкой на современные легковые электромобили, где проблема ограниченности свободного пространства и значительной массы энергетической системы особенно актуальна.

Список литературы

1. Jahns, T.M. The Past, and Future of Power Electronics Integration Technology in Motor Drives / T.M. Jahns, H. Dai // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. – September 2017. – Vol. 2, no. 3. – Pp. 197–216.
2. The Alternate Arm Converter: A New Hybrid Multilevel Converter With DC-Fault Blocking Capability / M.M.C. Merlin, T.C. Green, P.D. Mitcheson, D.R. Trainer, R. Critchley, W. Crookes, F. Hassan // IEEE Transactions on Power Delivery. – February 2014. – Vol. 29, no. 1. – Pp. 310–317.
3. Малиновский, М.П. Электропневмогидравлический тормозной привод и особенности его применения на тяжёлых автопоездах специального назначения / М.П. Малиновский, Д.В. Лукьянов, А.А. Петров // Вестник МАДИ. – 2018. – № 2 (53). – С. 54–61.
4. Boldea, I. Electric Generators and Motors: an overview / I. Boldea // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. – March 2017. – Vol. 1, no. 1. – Pp. 3–14.
5. Using High-Control-Bandwidth FPGA and SiC Inverters to Enhance High-Frequency Injection Sensorless Control in Interior Permanent Magnet Synchronous Machine / W. Qian, X. Zhang, F. Jin, H. Bai, D. Lu, B. Cheng // IEEE Access Special Section on Advanced Energy Storage Technologies and Their Applications. – August 2018. – Vol. 6. – Pp. 42454–42466.
6. Engelmann, G. Experimental Investigation on the Transient Switching Behavior of SiC MOSFETs Using a Stage-Wise Gate Driver / G. Engelmann, T. Senoner, R.W. De Doncker // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. – March 2018. – Vol. 3, no. 1. – Pp. 77–87.
7. Fang, Z. Study of the Characteristics and Suppression of EMI of Inverter with SiC and Si Devices / Z. Fang, D. Jiang, Y. Zhang // Chinese Journal of Electrical Engineering. – September 2018. – Vol. 4, no. 3. – Pp. 37–46.
8. A Fanless Operating Trans-Linked Interleaved 5 kW Inverter Using SiC MOSFETs to Achieve 99% Power Conversion Efficiency / T. Miyazaki, H. Otake, Y. Nakakohara, M. Tsuruya, K. Nakahara // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – December 2018. – Vol. 65, no. 12. – Pp. 9429–9437.
9. The Benefits of SiC MOSFETs in a T-Type Inverter for Grid-Tie Applications / A. Anthon, Z. Zhang, M.A.E. Andersen, D.G. Holmes, B. McGrath, C.A. Teixeira // IEEE Transactions on Power Electronics. April 2017. – Vol. 32, no. 4. – Pp. 2808–2821.

10. Three-Phase LLC Series Resonant DC/DC Converter Using SiC MOSFETs to Realize High-Voltage and High-Frequency Operation / Y. Nakakohara, H. Otake, T.M. Evans, T. Yoshida, M. Tsuruya, K. Nakahara // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – April 2016. – Vol. 36, no. 4. – Pp. 2103–2110.

11. Design and Characterization of Newly Developed 10 kV 2 A SiC p-i-n Diode for Soft-Switching Industrial Power Supply / M. Bakowski, P. Ranstad, J.-K. Lim, W. Kaplan, S.A. Reshanov, A. Schoner, F. Giezendanner, A. Ranstad // IEEE Transactions on Electron Devices. – February 2015. – Vol. 62, no. 2. – Pp. 366–373.

References

1. Jahns T.M., Dai H. The Past, and Future of Power Electronics Integration Technology in Motor Drives, CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, September 2017, vol. 2, no. 3, pp. 197–216.

2. Merlin M.M.C., Green T.C., Mitcheson P.D., Trainer D.R., Critchley R., Crookes W., Hassan F. The Alternate Arm Converter: A New Hybrid Multilevel Converter With DC-Fault Blocking Capability, IEEE Transactions on Power Delivery, February 2014, vol. 29, no. 1, pp. 310–317.

3. Malinovsky M.P., Lukyanov D.V., Petrov A.A. *Vestnik MADI*, 2018, no. 2 (53), pp. 54–61.

4. Boldea I. Electric Generators and Motors: an overview, CES Transactions on Electrical Machines and Systems, March 2017, vol. 1, no. 1, pp. 3–14.

5. Qian W., Zhang X., Jin F., Bai H., Lu D., Cheng B. Using High-Control-Bandwidth FPGA and SiC Inverters to Enhance High-Frequency Injection Sensorless Control in Interior Permanent Magnet Synchronous Machine, IEEE Access Special Section on Advanced Energy Storage Technologies and Their Applications, August 2018, vol. 6, pp. 42454–42466.

6. Engelmann G., Senoner T., De Doncker R.W. Experimental Investigation on the Transient Switching Behavior of SiC MOSFETs Using a Stage-Wise Gate Driver, CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, March 2018, vol. 3, no. 1, pp. 77–87.

7. Fang Z., Jiang D., Zhang Y. Study of the Characteristics and Suppression of EMI of Inverter with SiC and Si Devices, Chinese Journal of Electrical Engineering, September 2018, vol. 4, no. 3, pp. 37–46.

8. Miyazaki T., Otake H., Nakakohara Y., Tsuruya M., Nakahara K. A Fanless Operating Trans-Linked Interleaved 5 kW Inverter Using SiC MOSFETs to Achieve 99% Power Conversion Efficiency, IEEE Transactions on Industrial Electronics, December 2018, vol. 65, no. 12, pp. 9429–9437.

9. Anthon A., Zhang Z., Andersen M.A.E., Holmes D.G., McGrath B., Teixeira C.A. The Benefits of SiC MOSFETs in a T-Type Inverter for Grid-Tie Applications, IEEE Transactions on Power Electronics, April 2017, vol. 32, no. 4, pp. 2808–2821.

10. Nakakohara Y., Otake H., Evans T.M., Yoshida T., Tsuruya M., Nakahara K. Three-Phase LLC Series Resonant DC/DC Converter Using SiC MOSFETs to Realize High-Voltage and High-Frequency Operation, IEEE Transactions on Industrial Electronics, April 2016, vol. 36, no. 4, pp. 2103–2110.

11. Bakowski M., Ranstad P., Lim J.-K., Kaplan W., Reshanov S.A., Schoner A., Giezendanner F., Ranstad A. Design and Characterization of Newly Developed 10 kV 2 A SiC p-i-n Diode for Soft-Switching Industrial Power Supply, IEEE Transactions on Electron Devices, February 2015, vol. 62, no. 2, pp. 366–373.