

УДК 629.1.04

**АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ СТРУКТУРНЫХ  
СХЕМ БОРТОВЫХ ЗАРЯДНЫХ  
УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ***Охрименко И. В., Руденко Н. В.*

Донской государственной технической  
университет, Ростов-на-Дону, Российская  
Федерация

[igor.oxr@mail.ru](mailto:igor.oxr@mail.ru)[rnv.2017@mail.ru](mailto:rnv.2017@mail.ru)

В статье рассмотрены известные структурные схемы бортовых зарядных устройств электрических транспортных средств (ЭТС). Выполнен анализ различных режимов зарядки, таких как: однофазная зарядка, применение комбинированного зарядного устройства без компенсации и с компенсацией потоков. В качестве перспективной структурной системы ускоренного заряда ЭТС может быть реализована трехфазная структура силовой электроники, где каждая фаза содержит множество модулей, соединенных в каскад.

**Ключевые слова:** зарядное устройство, электрическое транспортное средство, многоуровневый модульный преобразователь.

**Введение.** На современном этапе развития транспортных средств представляется актуальной научно-технической задачей повышение эффективности автомобилей с электрическими двигателями. Этим объясняется интерес исследователей к вопросам совершенствования заряда аккумуляторных батарей наземного автотранспорта с электрическим приводом.

**Цель статьи** — анализ известных структурных схем бортовых зарядных устройств электрических транспортных средств.

**Основная часть.** Намечилась долгосрочная тенденция к совершенствованию двунаправленных и гибких функций зарядных устройств, позволяющих не только получать энергию из сети, но и возвращать избыток энергии. Например, напряжением можно управлять, меняя реактивную мощность. Это поддерживает частоту и напряжение в узкой полосе. Данная стратегия хорошо известна. Обычно ее применяют к генераторам для первичного управления частотой. Кроме того, она используется для управления параметрами сети — такими, как частота и напряжение. При этом частота уменьшается с увеличением нагрузки (активная мощность). Что касается напряжения в сети, то его можно:

- увеличить путем ввода емкостной реактивной мощности,
- уменьшить за счет индуктивной реактивной мощности.

Интеграция электромобилей должна сопровождаться совершенствованием управления перегрузкой интеллектуальных сетей. Однако двунаправленная функция зарядки еще не доступна для коммерческих электромобилей.

UDC 629.1.04

**ANALYSIS OF KNOWN STRUCTURAL  
SCHEMES OF ON-BOARD BATTERY  
CHARGERS FOR ELECTRIC VEHICLES***Okhrimenko I. V., Rudenko N. V.*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation

[igor.oxr@mail.ru](mailto:igor.oxr@mail.ru)[rnv.2017@mail.ru](mailto:rnv.2017@mail.ru)

The article considers the known structural schemes of on-board chargers of electric vehicles. The analysis of various charging modes, such as: single-phase charging, application of a combined charger without flux compensation, application of a combined charging device with flux compensation is performed. As a promising structural system of accelerated charge of electric vehicles, a three-phase structure of power electronics can be realized, where each phase contains a multitude of modules connected to a cascade.

**Keywords:** charger, electric vehicle, modular multilevel converter.

В связи с быстрым ростом электронных систем питания в электросетях растет значимость многоуровневых типологий построения преобразователей, которые позволяют преодолевать слабые места полупроводников с высоким уровнем блокировки. Поэтому многоуровневые типологии являются ключевой технологией для создания эффективных и экономичных силовых электронных систем с высоким и средним типом напряжения.

В настоящее время в электросетях широко используются известные трехуровневые инверторы с фиксированной нейтралью для малых и средних тяговых и солнечных инверторов. Однако новое семейство, основанное на принципе модульного многоуровневого преобразователя (ММП), открывает путь к мощным передающим системам, таким как высоковольтные системы передачи постоянного тока. Многоуровневые преобразователи применимы и в других областях. К примеру, при зарядке и разрядке аккумулятора электрического транспортного средства (ЭТС) конфигурируемый модульный многоуровневый преобразователь (КММП) обеспечивает большую гибкость управления различными уровнями напряжения и интенсивностью тока. Метод помогает достичь высокой концентрации мощности и компактного преобразования энергии для электромобилей. Это позволяет подключать ЭТС к зарядным инфраструктурам, начиная от стандартной бытовой фазной розетки и заканчивая сверхскоростными зарядными станциями постоянного тока (*direct current — DC stations*). Концепция основана на интеграции подсистемы двигателя, подсистемы управления батареями и универсальной и гибкой подсистемы подзарядки. Фактически преобразование мощности базируется на ММП [1] с разделенным интегрированным хранилищем (РИХ) на основе аккумуляторных модулей [2].

Рассмотрим стандартное строение ЭТС. Одна из важнейших задач электромобильной отрасли — снижение затрат на разработку и производство. Обычно работу ЭТС обеспечивают основная аккумуляторная и тяговая подсистемы, как показано на рис. 1.

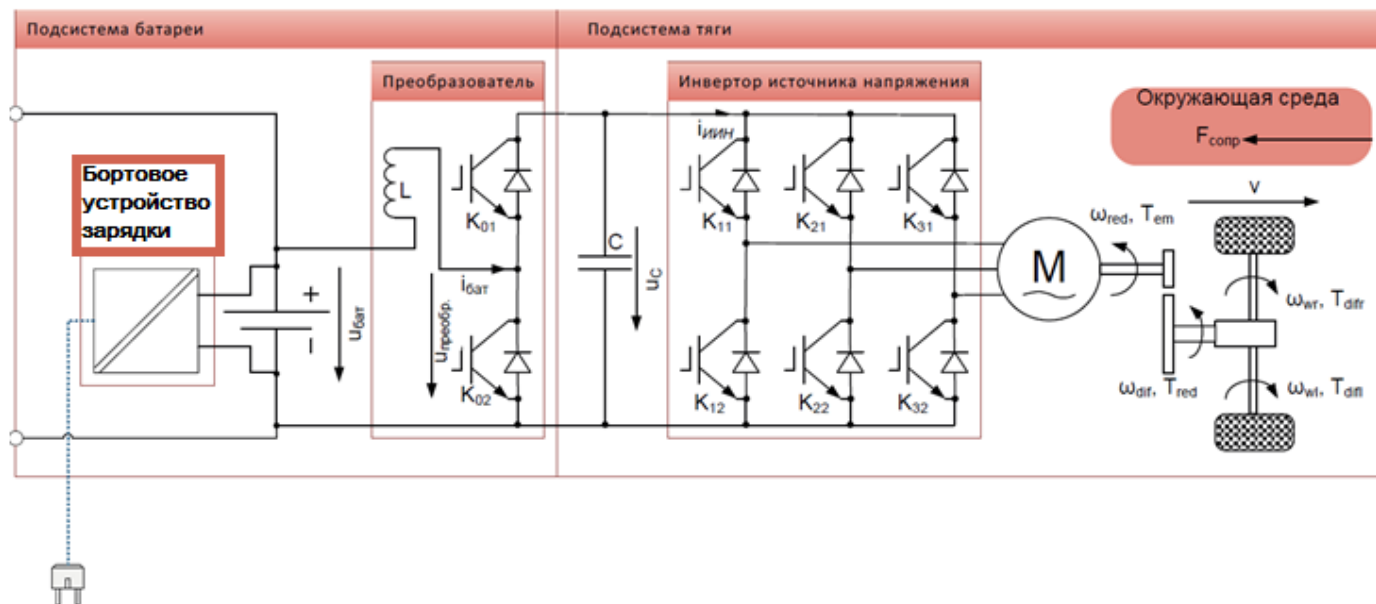


Рис. 1. Базовая схема ЭТС

В аккумуляторной системе модули ячеек снабжают автомобиль электрической энергией через шину постоянного тока. Чаще всего используется полумостовой преобразователь постоянного тока для адаптации переменного напряжения от батареи к квазипостоянному напряжению шины постоянного тока. Тормозная энергия частично используется во время замедления.

Тяговая подсистема состоит из электродвигателя и полномостового инвертора источника напряжения. Трансмиссия адаптирует соотношение скоростей между колесами и валом двигателей. Затем с помощью механического дифференциала изменяются соотношения скоростей между

двумя тяговыми колесами.

В стандартных бортовых зарядных устройствах предусмотрен запуск с трехфазного диодного мостового выпрямителя на нескольких типологических расширениях — например, выведены схемы выпрямителя трехфазного усиления и компенсатора коэффициента мощности [3, 4]. Также хорошо известны двухуровневая и трехуровневая топологии выпрямителя  $\Delta$ -переключателя. Их эффективность может превышать 98%. Следует отметить также выпрямительную систему с шестью переключателями и швейцарскую выпрямительную систему. Они перспективны с точки зрения внедрения высокопроизводительного интерфейса компенсатора коэффициента мощности для зарядного устройства ЭТС [5]. Однако наиболее распространенной схемой бортового зарядного устройства для электромобиля остается режим 1.

Рассмотрим режим 1. Уровень такой однофазной зарядки ограничен 3,6 кВт и состоит из двух частей.

Первая: преобразователь источника напряжения H-моста. Это однофазный преобразователь переменного/постоянного тока, который работает так же, как инвертор источника напряжения (рис. 2).

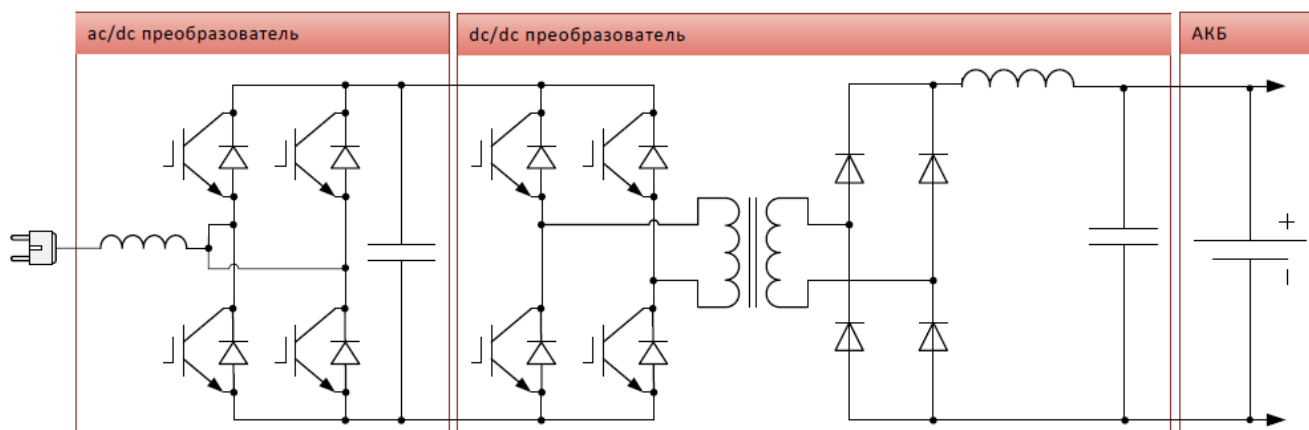


Рис. 2. Базовая схема питания

При работе схемы в качестве источника питания постоянного тока с управлением широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) условие нулевого напряжения может быть получено путем включения только одного из переключателей с токовым выводом через переключатель и диод.

Вторая: двухтактный преобразователь. Он подходит для конструкции с высокой мощностью и управляет высокочастотным трансформатором переменного тока, а также изолированным управляемым напряжением. Такой преобразователь не требует необычайной магнитной связи, вполне достаточно маленького ядра без воздушной прослойки. Однако у него есть проблемы с балансировкой, которую необходимо контролировать. Это встроенное зарядное устройство ограничено по плотности мощности, поскольку содержит громоздкие компоненты и ограничено в зарядной мощности. Таким образом, слияние конвертера зарядки с моторным инвертором является перспективным методом. Предполагается, что это приводит к увеличению плотности мощности зарядки и может способствовать уменьшению эффективных затрат на преобразование мощности [6].

Рассмотрим режимы 2 и 3 — комбинированное встроенное зарядное устройство. В статье [7] представлен обзор используемых сегодня встроенных зарядных устройств. Отмечено, что встроенные преобразователи могут быть недорогими, с небольшим количеством дополнительных компонентов. Разумеется, в данном случае не учитывается силовая электроника управления батареями и большой диапазон зарядных инфраструктур. Речь идет об использовании существующего

тягового преобразователя в качестве зарядного преобразователя, а также существующих обмоток двигателя в качестве фильтра тока во время зарядки — это позволяет отказаться от громоздкой катушки индуктивности или большого трансформатора в автомобиле.

Для реализации такой концепции существует два метода.

Первый основан на жесткой блокировке ротора с использованием открытой схемы ротора. Это позволяет избежать индуцированных токов в цепи ротора, поскольку такая цепь ротора во время зарядки исключает электромагнитный крутящий момент.

Второй метод основан на мягкой блокировке ротора с использованием самокомпенсации потоков статора.

Рассмотрим комбинированное зарядное устройство без компенсации нагрузки. Для доступа к обеим клеммам обмоток статора требуется трехфазный двигатель с обмотками открытого конца. Поэтому трехфазные клеммы статора подключены к инвертору / зарядному устройству с одной стороны и к зарядному разъему — с другой стороны. Этот зарядный разъем механически закорочен, чтобы соединить двигатель со звездой в режиме движения. Данный метод обычно реализуется с синхронными двигателями с выведенными трехфазными клеммами, где питание схемы возбуждения осуществляется в режиме зарядки.

На рис. 3 изображена типичная схема комбинированного устройства зарядки без компенсации потоков.

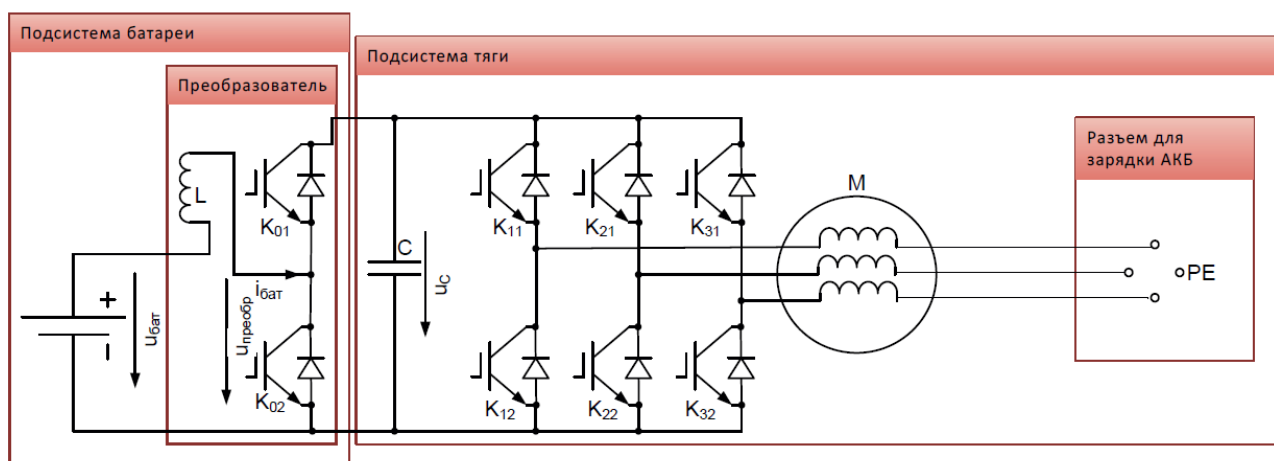


Рис. 3. Комбинированная схема устройства зарядки без компенсации потоков

Однако в описанном случае невозможно избежать передачи энергии моторному магнитному сердечнику, и это основной недостаток данного подхода. Кроме того, для его реализации требуется механическая открытая схема ротора, т. е. с выведенными трехфазными клеммами, что предполагает увеличение стоимости двигателя. В частности, зарядное устройство «Хамелеон» от «Рено» основано на комбинированном зарядном устройстве без компенсационного подхода к потокам.

На рис. 4 показаны генерируемые вращающиеся магнитные поля в магнитном сердечнике во время зарядки трех фаз.

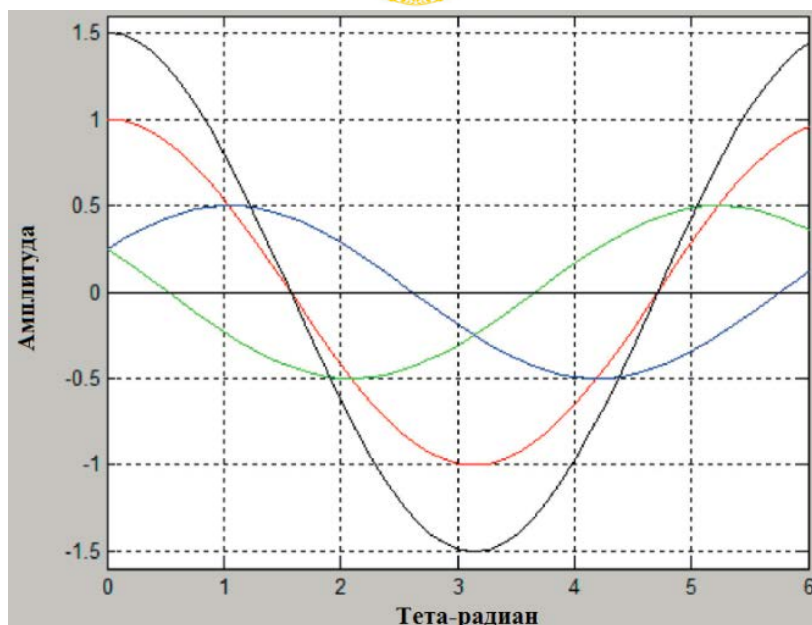


Рис. 4. Моделирование в независимой системе координат генерируемого вращающегося магнитного поля, создаваемого тремя фазами зарядки токов без компенсации потока (на единицу)

Трёхфазные токи представлены зеленой, синей и красной кривыми, созданное вращающееся магнитное поле — черной. Это означает, что во время зарядки поток мощности направлен от статора к части ротора двигателя.

По этой причине цепь ротора должна быть открыта, чтобы избежать индуцированных потоков ротора. В результате эффективность такого зарядного устройства ограничена, потому что потери в стали не компенсируются. При высокой мощности это реальная проблема. Кроме того, в данном случае необходима специальная система охлаждения, потому что ротор, который вращает охлаждающий вентилятор через общий вал, не перемещается. По этим причинам в [8, 9] введен метод, основанный на мягкой блокировке ротора.

Рассмотрим комбинированное зарядное устройство с компенсацией нагрузки. Используется электродвигатель с нарезным статическим статором. Он снабжается двойным инвертором [8], который способен генерировать в статоре ток противоположной формы волны. Это приводит к самокомпенсации электромагнитных моментов в режиме зарядки (рис. 5).

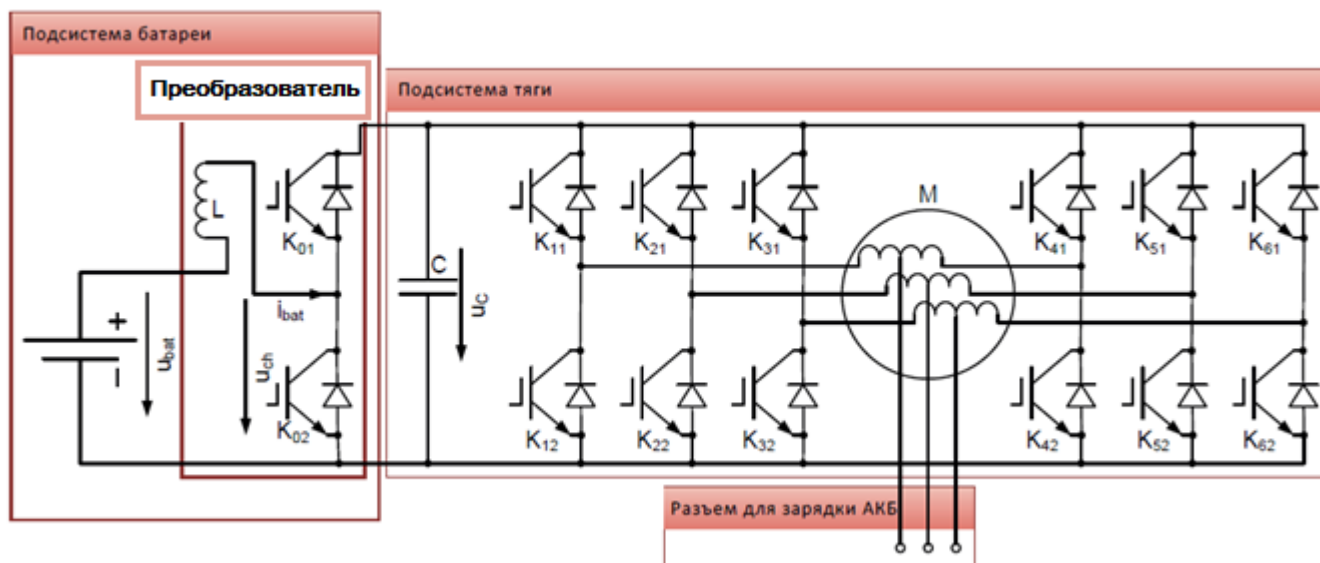


Рис. 5. Комбинированное устройство зарядки с компенсацией потоков

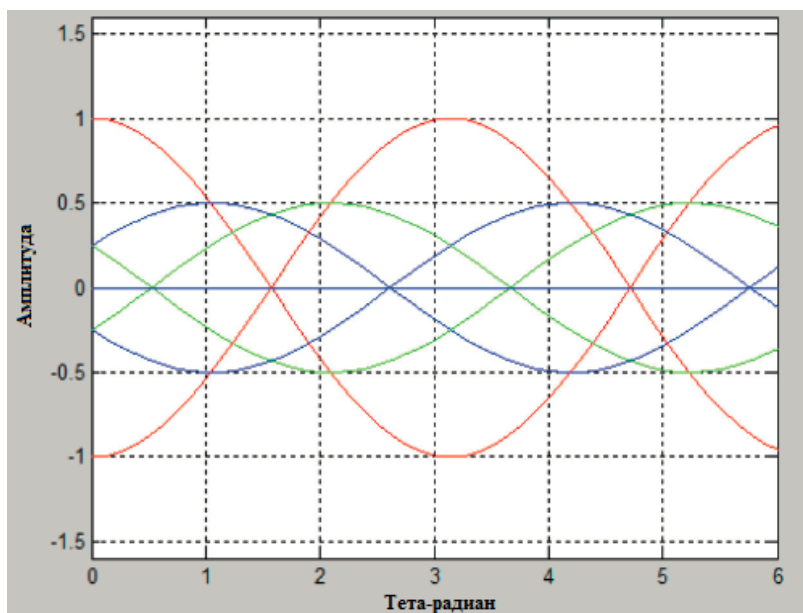
На рис. 5 показан типичный пример комбинированного силового зарядного устройства с мягким блокированием ротора во время зарядки. Этот трехфазный режим зарядки переменного тока соответствует уровню 2 и 3 режима зарядки (табл. 1).

Таблица 1

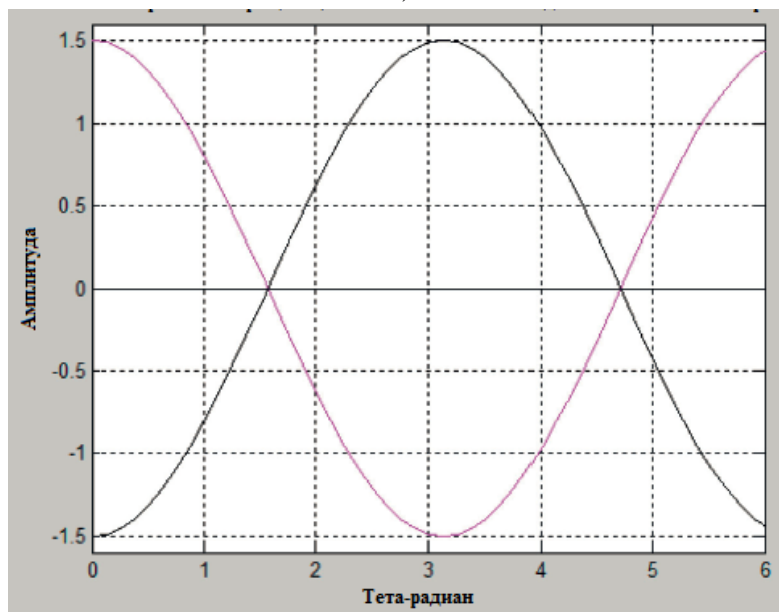
Методы зарядки аккумуляторных батарей АКБ

Ре-	Максимальный ток на	Максимальная мощность на	Расположение зарядки
1	16 А (переменный)	3,6 кВт	На борту
2	32 А (переменный)	7,3 кВт	
3	63 А (переменный)	14,7 кВт	
4	400 А (постоянный)	150 кВт	За бортом

На рис. 6 показана компенсация вращающегося магнитного поля, создаваемого трехфазными токами.



а)



б)

Рис. 6. Моделирование генерируемого вращающегося магнитного поля, создаваемого тремя фазами зарядки токов (а) с компенсацией потока (на единицу) (б)

На рис. 6, *а* видно, что фазовые токи отменяют друг друга. Поэтому генерируемые вращающиеся магнитные поля компенсируют друг друга, как показано на рис. 6, *б*. Это позволяет избежать передачи мощности от статора к роторной части двигателя. Благодаря самокомпенсации магнитного тока отсутствуют потери в стали. Такой подход более эффективен (в сравнении с подходом без компенсации потока).

Уровень 1-го режима зарядки может быть выполнен путем добавления дополнительного бортового заряда 1-го режима (см. рис. 1). Режим 4, который соответствует быстрой зарядке *DC* вне платы, не включен в эту систему, и, чтобы обеспечить быструю зарядку, следует использовать зарядные устройства большой мощности [2], [10].

Итак, комбинированное встроенное зарядное устройство вносит большой вклад в высокую интеграцию преобразования мощности ЭТС. Несмотря на это, ЭТС все еще не комплектуются быстрыми зарядными устройствами постоянного тока. Дополнительные зарядные устройства поставляются за дополнительную плату. Зарядные устройства большой мощности по-прежнему очень объемные и тяжелые, и именно по этой причине ЭТС остаются дорогими и громоздкими автомобилями.

Таким образом, главная задача заключается в определении параметров конструкции электромобиля и его аккумуляторов, которые обеспечат большую гибкость при зарядке и будут совместимы с доступной инфраструктурой зарядки.

**Перспективное решение.** В 2002 году концепция ММП была введена Р. Марквартом [11]. Модульный многоуровневый преобразователь является наилучшим решением для преобразования мощности без трансформаторов. Он состоит из каскадных соединений модулей и накопителей энергии постоянного тока, и такая структура требует непрерывного контроля напряжения. ММП — одна из наиболее перспективных многоуровневых топологий конвертеров. У нее много преимуществ, в частности:

- простая реализация избыточности,
- сравнительно низкая стоимость устройств,
- простота масштабирования,
- возможность построения общей конфигурации шины постоянного тока для приложений с несколькими приводами.

Почти все исследования этой топологии основаны на ее фундаментальной функции — усреднении и балансировке напряжения конденсатора. Балансировка (или управление напряжением конденсатора) реализуется контуром управления обратной связью с использованием датчиков напряжения.

На рис. 7 показана типичная схема модульного многоуровневого преобразователя с раздельным интегрированным хранилищем энергии°[12].

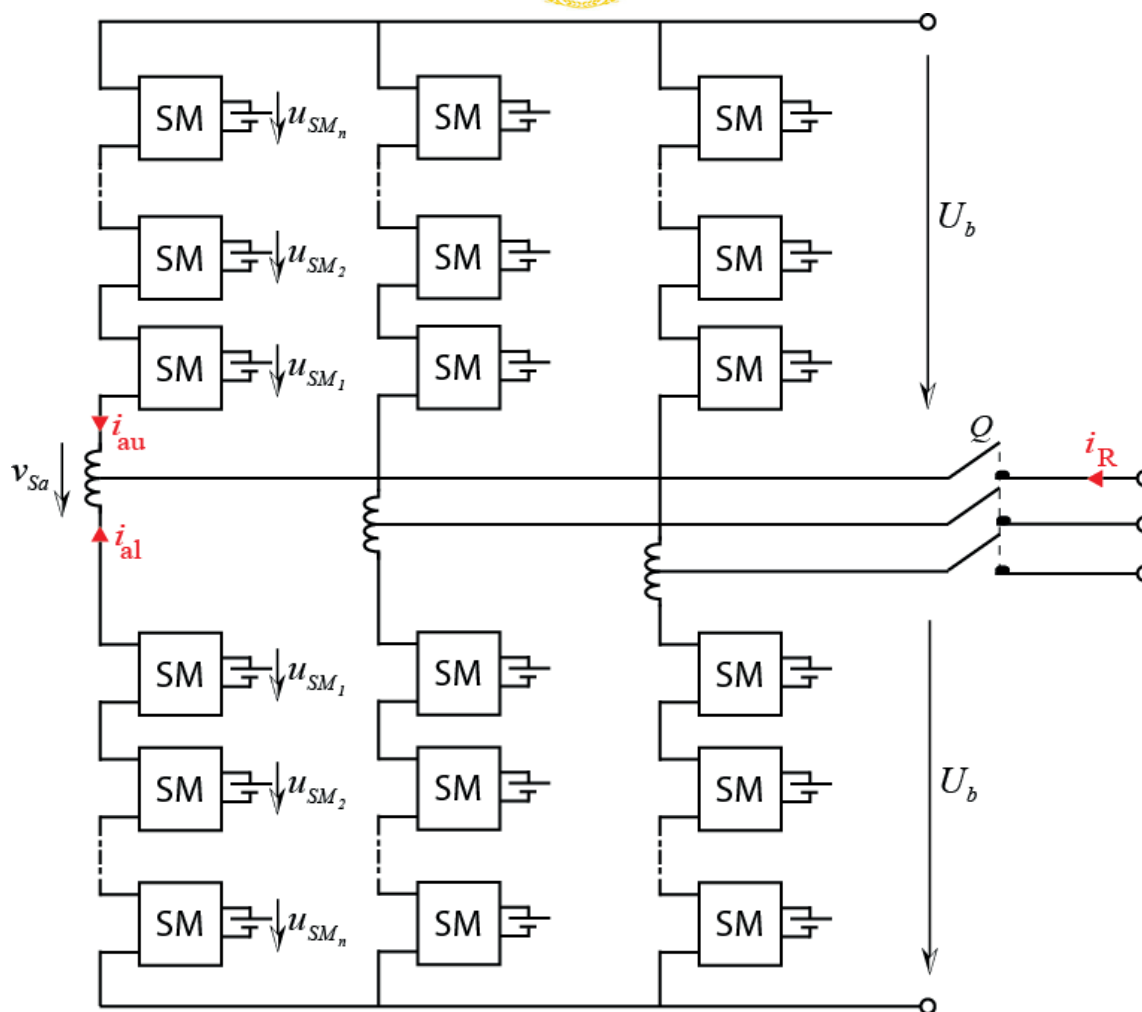


Рис. 7. Схема модульного многоуровневого преобразователя с разделенным интегрированным хранилищем энергии

С одной стороны, использование датчиков напряжения для измерения напряжений конденсатора представляет собой прямой подход. С другой стороны, по мере увеличения количества каскадных модулей необходимо будет увеличить количество датчиков напряжения. Это может привести к увеличению аппаратной сложности, что негативно скажется на надежности системы. Для надежной работы инверторов, входящих в ММП, может потребоваться уменьшение количества измерительных датчиков.

На рис. 7 показана базовая структура ММП с разделенным интегрированным хранилищем. Подмодуль может быть выполнен на базе двух- или четырехквadrантного подмодуля  $DC/DC$ . Это уменьшает сложность балансировки внутреннего напряжения.

**Выводы.** В качестве перспективной структурной системы ускоренной зарядки ЭТС может быть предложена трехфазная структура силовой электроники, где каждая фаза содержит множество модулей, соединенных в каскад. В свою очередь, каждый модуль состоит из аккумуляторного модуля и двухкаскадного преобразователя, который питает трехфазную электрическую машину. Данная структура настраивается в режимах  $AC/DC$ ,  $DC/AC$  и  $AC/AC$  в соответствии с режимом конфигурации. Это позволяет электромобилям быть совместимыми с большим диапазоном зарядных инфраструктур: однофазного переменного, трехфазного переменного или постоянного тока.



**Библиографический список**

1. Akagi, H. Classification, Terminology, and Application of the Modular Multilevel Cascade Converter (ММСС) [Электронный ресурс] / H. Akagi // IEEE Xplore Digital Library. — Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5543243/> (дата обращения: 16.04.18).
2. Vasiladiotis, M. Modular Multilevel Converters with Integrated Split Battery Energy Storage [Электронный ресурс] / M. Vasiladiotis // EPFL theses. — Режим доступа: <https://zdoc.site/modular-multilevel-converters-with-integrated-infoscience-ep.html> (дата обращения: 16.04.18).
3. Achieving Unity Power Factor with a Unidirectional Single-Phase Four Reverse Blocking IGBTs Buck Type Rectifier [Электронный ресурс] / C. Saber [et al.] // IEEE Xplore Digital Library. — Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7149030> (дата обращения: 04.07.18).
4. Challenges Facing PFC of a Single-phase On-board Charger for Electric Vehicles based on a Current Source Active Rectifier Input Stage [Электронный ресурс] / C. Saber [et al.] // IEEE Xplore Digital Library. — Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7330013> 7149030 (дата обращения: 04.07.18).
5. Soeiro, T. Three-phase unity power factor mains interfaces of high power EV battery charging systems / T. Soeiro, T. Friedli, J.-W. Kolar // Proceedings of the 27th Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2012) in Orlando on February 5–9, 2012. — Zürich : ETH ; IEEE ; Power Electronic Systems Laboratory, 2012. — P. 2603–2610.
6. Zeltner, S. Actual and Advanced Converter Technologies for On-Board Chargers [Электронный ресурс] / S. Zeltner. — Режим доступа: [https://www.iisb.fraunhofer.de/content/dam/iisb2014/en/Documents/Research-Areas/vehicle\\_electronics/FraunhoferIISB\\_Brochure\\_Vehicle-Power-Electronics.pdf](https://www.iisb.fraunhofer.de/content/dam/iisb2014/en/Documents/Research-Areas/vehicle_electronics/FraunhoferIISB_Brochure_Vehicle-Power-Electronics.pdf) (дата обращения: 04.07.18).
7. Sakr, N. A review of on-board integrated chargers for electric vehicles / N. Sakr, D. Sadarnac, A. Gascher // IEEE Xplore Digital Library. — Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6910865> (дата обращения: 04.07.18).
8. Control of a combined multiphase electric drive and battery charger for electric vehicle [Электронный ресурс] / W. Lhomme [et al.] // IEEE Xplore Digital Library. — Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6631890> (дата обращения: 04.07.18).
9. Martel, T. Electric vehicle driving and fast charging system based on configurable modular multilevel converter (СММС) [Электронный ресурс] / T. Martel, A. Rufer // IEEE Xplore Digital Library. — Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6634376> (дата обращения: 04.07.18).
10. Höimoja, H. Power interfaces and storage selection for an ultrafast EV charging station [Электронный ресурс] / H. Höimoja, M. Vasiladiotis, A. Rufer PEMD // IEEE Xplore Digital Library. — Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6242161> (дата обращения: 04.07.18).
11. Marquardt, R. Modulares Stromrichterkonzept für Netzkupplungsanwendungen bei hohen Spannungen / R. Marquardt, A. Lesnicar, J. Hildinger // Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen, Vorträge der ETG-Fachtagung : Kongress in Bad Nauheim, 23–24. Apr., 2002. — Berlin ; Offenbach : VDE-Verlag, 2002. — S. 155–161.
12. Tsirinomeny, R.-M.-D. Contribution to the Ultra-Fast Charging of Electric Vehicles — The Configurable Modular Multilevel Converter (СММС) [Электронный ресурс] / R.-M.-D. Tsirinomeny // Semantic Scholar. — Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/Contribution-to-the-Ultra-Fast-Charging-of-Electric-TSIRINOMENY/b4e16970dd357b5a6b20c40326f90fa232cd785f> (дата обращения: 04.07.18).