

ТРЕХФАЗНЫЕ ИНВЕРТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЗАРЯДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ: ОБЗОР СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Бабушкин Дмитрий Германович, магистрант,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, electro@madi.ru

Сидоров Кирилл Михайлович, канд. техн. наук, доц.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, electro@madi.ru

Аннотация. В статье рассматриваются схемные решения в области трехфазных инверторов напряжения, применимых к зарядной инфраструктуре и системам автономного электроснабжения, в том числе энергетических установок, в составе которых применяются возобновляемые источники электрической энергии. Определены схемные исполнения трехфазных инверторов напряжения, обозначены их преимущества и недостатки, сделан акцент на работе при несимметричной нагрузке. В рамках данного исследования сформирована комплексная математическая модель энергетической установки в специализированной среде компьютерного моделирования. С целью сравнительного анализа выходных характеристик инверторов различных схемных исполнений проведены расчетные исследования, отражающие оценку качества выходного напряжения при неравномерном распределении нагрузки между фазами.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, зарядная инфраструктура, системы автономного электроснабжения, трехфазный инвертор, математическое моделирование, экологический транспорт.

THREE-PHASE INVERTERS FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS AND CHARGING INFRASTRUCTURE: OVERVIEW OF CIRCUIT SOLUTIONS AND COMPUTER MODELING

Babushkin Dmitry G., undergraduate,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, electro@madi.ru

Sidorov Kirill M., Ph. D., associate professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, electro@madi.ru

Abstract. In this article discusses circuit solutions in the field of three-phase voltage inverters applicable to charging infrastructure and Autonomous power supply systems, including power plants that uses renewable sources of electric energy. Circuit designs of three-phase voltage inverters are defined their advantages and disadvantages are indicated, and the emphasis is placed on working with an asymmetric load. As part of this research was formed a complex mathematical model of a power plant in a specialized computer modeling application. For the purpose of comparative analysis of circuit designs of inverters were conducted computational studies.

Keywords: renewable energy, charging infrastructure, autonomous power supply systems, three-phase inverter, mathematical modeling, environmental transport.

Актуальность темы. Область применения. Проблемы и перспективы

С каждым годом количество автотранспортных средств, как в мире, так и в России в частности, постоянно увеличивается. Следствием этого является рост потребления углеводородного топлива и загрязнения атмосферы отработавшими газами автомобилей. В связи с этим остро ставится вопрос о реализации комплекса мер по уменьшению содержания токсичных веществ в атмосфере. На сегодняшний день решение указанных проблем связано с несколькими направлениями [1], одним них является разработка, внедрение и эксплуатация электрических транспортных средств – электромобилей (ЭМ). Однако комфортная эксплуатация ЭМ связана с другой проблемой, а именно – ограниченностью или полным отсутствием соответствующей зарядной инфраструктуры, включающей в себя сети зарядных станций.

Следует отметить, что экологическая эффективность применения электромобилей определяется используемыми технологиями при производстве и преобразовании электроэнергии. Так, преимущественное использование электроэнергии, получаемой на тепловых электрических станциях, работающих на угле, сводит экологическую безопасность ЭМ к уровню автомобиля традиционной конструкции. И, наоборот, максимизация доли электроэнергии зарядных станций, полученной с

применением экологически чистых технологий, способно обеспечить электромобилю подлинный уровень нулевых выбросов.

Таким образом, одним из направлений повышения энергетической и экологической эффективности перспективных транспортных средств с электрическим приводом, является совершенствование систем электроснабжения, предусматривающих энергообеспечение объектов зарядной инфраструктуры. В этой связи действенное решение - формирование местных и локальных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ), в том числе ветроэлектрических установок и фотоэлектрических модулей. Последнее особенно актуально в свете развития автономного электрического транспорта и необходимости создания удаленных от городов и централизованного электроснабжения зарядных станций.

Использование ВИЭ при производстве электроэнергии, а также специфика спроса на электроэнергию в рамках зарядных станций, определяет необходимость использования накопителей электроэнергии и специального преобразовательного электрооборудования. Наряду с этим, аналогичные решения востребованы и в области автономного электроснабжения, активно использующей системы независимого и/или бесперебойного питания как в коммерческой сфере, так и в быту. Указанные системы представляют собой совокупность различных источников и устройств преобразования электрической энергии со звеном постоянного тока и варьируются по номинальной мощности, исходя из предъявляемых требований.

Принцип работы типовой системы электроснабжения (для указанных назначений и наибольшего состава используемых первичных источников энергии) основан на преобразовании в стабилизированное по величине и частоте переменное напряжение питания нагрузки:

- нестабилизированного постоянного напряжения фотоэлектрической станции;
- нестабилизированного переменного напряжения ветроэлектрической установки;
- постоянного напряжения промежуточного звена накопления электроэнергии;
- напряжения питающей сети общего электроснабжения;
- напряжения двигатель-генераторной установки.

В качестве функциональных особенностей указанной системы может выступать: бесперебойное питание нагрузки, стабилизация и улучшение качества выходного напряжения, распределение приоритета используемых источников энергии и др.

Неотъемлемой частью рассматриваемых систем со звеном постоянного тока являются автономные трехфазные инверторы напряжения (ТИН). Существует несколько схемных решений в области ТИН, каждое из которых имеет свои особенности работы, преимущества и недостатки.

Обзор схемных решений. Принцип работы, преимущества и недостатки

Для питания симметричной нагрузки, например, тяговых электродвигателей электромобилей, себя зарекомендовали мостовые трехфазные инверторы напряжения. Однако в системах автономного энергообеспечения при электропитании разветвленной сети потребителей, где возможна значительная несимметрия нагрузки и должна быть реализована четырехпроводная схема электроснабжения, для трехфазных инверторов особенно актуальным стоит вопрос равенства фазных напряжений и наличие устойчивой нейтрали.

Одно из решений указанной проблемы – наличие в составе трехфазного мостового инвертора, емкостного фильтра на стороне

постоянного тока, выполненного в виде двух последовательно включенных конденсаторных батарей, средняя точка которых соединена с выводом нейтрали нагрузки [2]. Схема энергетической установки, включающая в себя трехфазный инвертор напряжения (ТИН) с выводом средней точки блока силовых конденсаторов представлена на рис. 1. Данную схему можно трактовать как классическую, однако она не лишена ряда недостатков. Энергетическая установка, в составе которой используется такой инвертор, существенно подвержена несимметрии токов и напряжений, вызванных влиянием работы на несимметричную нагрузку [2].

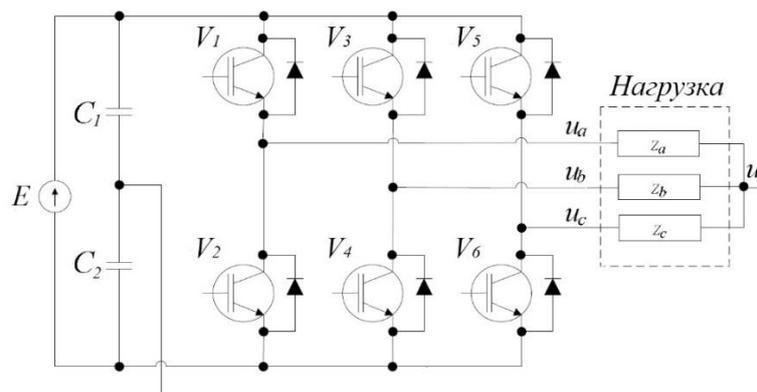


Рис. 1. Схема силовой части трехфазного инвертора напряжения с выводом нейтрали

К другим недостаткам указанной схемы следует отнести ухудшение гармонического состава выходного напряжения, увеличение емкости батарей конденсаторов, наряду с проблемой стабилизации потенциала средней точки [3].

Более лучшим, в части указанных недостатков, схемным решением является представленная на рис. 2 реализация трехфазного инвертора напряжения с дополнительным полумостом (ДПМ).

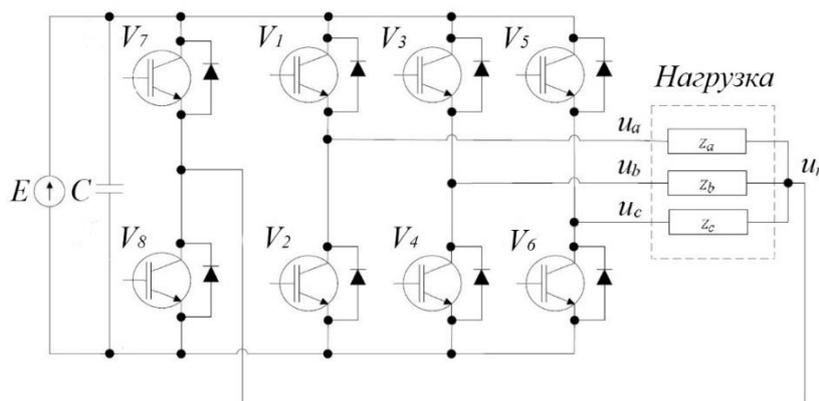


Рис. 2. Схема силовой части трехфазного инвертора напряжения с дополнительным полумостом

Система управления таким инвертором реализуется по принципу ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой, при которой управляющий сигнал для каждого из четырех полумостов включает нулевую последовательность, содержащую третью гармонику основной частоты в заданном соотношении [2].

Схема энергетической установки, имеющей в своем составе трехфазный инвертор напряжения с дополнительным полумостом имеет ряд преимуществ, по отношению к схеме согласно рис. 1, а именно:

- позволяет при работе на несимметричную нагрузку улучшить качество выходного напряжения и добиться относительного равенства фазных напряжений;
- обеспечивает требуемый по ГОСТ уровень выходного напряжения при меньшем уровне номинального напряжения накопителя энергии, что способствует улучшению массогабаритных показателей системы;
- позволяет значительно снизить затраты на конденсаторы фильтра на стороне постоянного тока.

Очевидным недостатком инвертора с дополнительным полумостом являются дополнительные затраты на полупроводниковые ключи и драйверы дополнительного полумоста, однако эти затраты перекрываются экономией за счет снижения затрат на фильтры.

Кроме рассмотренных ранее схемных решений, также применяются многоуровневые NPC-инверторы напряжения (от англ. neutral point clamped – с фиксированной нейтральной точкой). Многоуровневые инверторы формируют выходное напряжение путём использования более чем двух уровней напряжения. Их неоспоримым преимуществом является улучшенный спектр выходного напряжения в сравнении с двухуровневой топологией. Многоуровневые преобразователи могут работать на высокой частоте коммутации, однако, следует отметить, что при снижении последней уменьшаются коммутационные потери, как следствие – увеличивается КПД инвертора [4]. Схема силовой части трёхуровневого NPC-инвертора напряжения представлена на рис. 3.

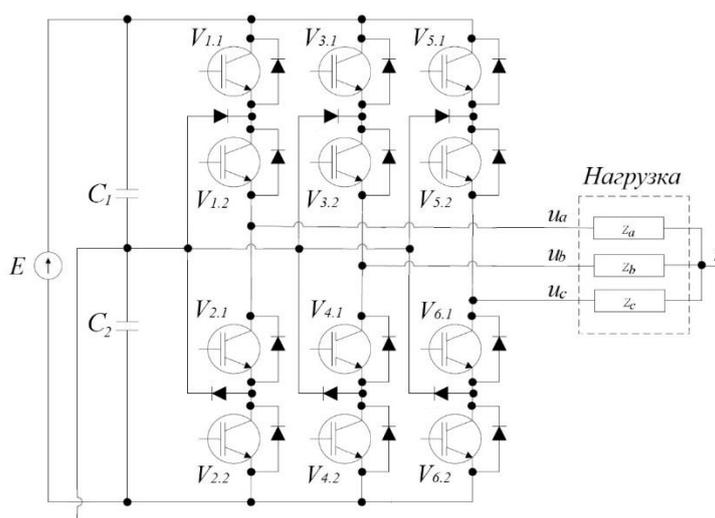


Рис. 3. Схема силовой части трёхуровневого NPC-инвертора напряжения

Основные недостатки многоуровневых инверторов:

- требуется в два раза большее количество полупроводниковых ключей, в сравнении с двухуровневыми топологиями, хотя в многоуровневом преобразователе можно использовать ключи с более низким номинальным напряжением;
- система управления таким инвертором сложнее ввиду большого количества ключей;

- существует проблема поддержания определённого уровня напряжения на конденсаторах, которые входят в состав многоуровневых схем.

Компьютерное моделирование ТИН

Для оценки показателей работы некоторых схемных решений в рамках настоящей работы сформирована математическая (компьютерная) модель с использованием специализированного программного обеспечения. Структурная схема энергетической установки представлена на рис. 4 и объединяет в своем составе следующие функциональные блоки:

- внешняя трехфазная сеть (ВТС);
- силовые контакторы (СК1, СК2);
- выпрямитель переменного напряжения (ВПН);
- преобразователь постоянного напряжения (ППН);
- накопитель электрической энергии (НЭ);
- трехфазный инвертор напряжения (ТИН);
- блок фильтрации и согласования напряжения (БФСН);
- электрическая нагрузка (ЭН).

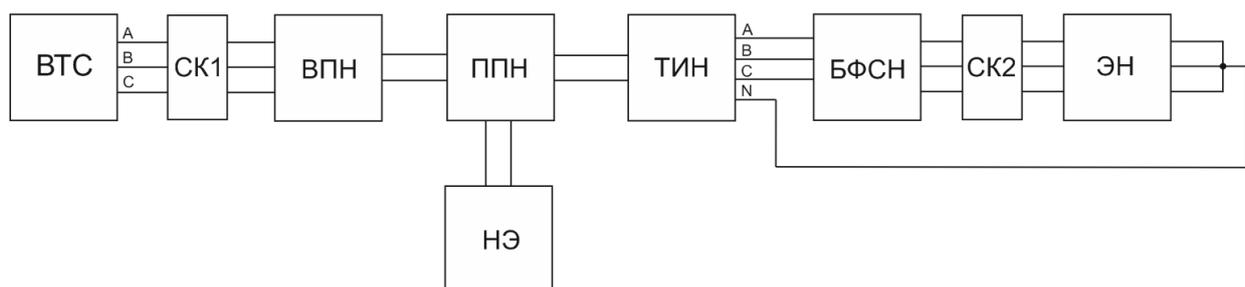


Рис. 4. Структурная схема комплексной математической модели энергетической установки

В составе модели:

- ВПН представлен в виде неуправляемого выпрямителя;

- НЭ основан на математическом описании напряжения разряда-заряда по методу Шеферда [6,7];
- БФСН включает схему замещения трехфазного синусоидального LC-фильтра;
- ВТС, СК, ЭН реализованы с использованием стандартных функциональных блоков.

Математическая модель реализована в специализированной среде компьютерного моделирования и воспроизводит процессы, протекающие в схеме энергетической установки [5]. Исходные данные для выполнения расчетных исследований сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчетных исследований ТИН

Параметр	Значение для ТИН	Значение для ТИН с ДПМ
Линейное напряжение трехфазного источника питания, В	400	400
Частота напряжения источника питания, Гц	50	50
Емкость НЭ, А·ч	33	33
Активная мощность нагрузки фаз (А/В/С), кВт	0.29/6.25/12.5	0.29/6.25/12.5

В результате осуществлено моделирование работы двух преобразователей согласно рассмотренным ранее схемам (см. рис. 1 и 2) в режиме несимметричной активной нагрузки со следующим распределением по фазам А, В и С соответственно: 2.3%, 50%, 100% от номинальной мощности нагрузки 12.5 кВт.

Результаты расчётных исследований

Полученные в результате расчетных исследований численные данные сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты математического моделирования работы ТИН при несимметричной нагрузке

Контролируемый параметр	ТИН	ТИН с ДПМ
Входное напряжение ТИН, В	603.2	540.5
Выходное действующее напряжение фазы А, В	245.6	236.0
Выходное действующее напряжение фазы В, В	228.1	232.7
Выходное действующее напряжение фазы С, В	242.6	231.2
Контролируемый параметр	ТИН	ТИН с ДПМ
Частота выходного напряжения, Гц	50	50
Действующий выходной ток фазы А, А	0.85	0.81
Действующий выходной ток фазы В, А	15.80	17.73
Действующий выходной ток фазы С, А	36.97	35.23
Выходная активная мощность, кВт	12.78	12.46
Максимальные и минимальные отклонения напряжения в нагрузке относительно номинального выходного напряжения, %	6.52	2.61
	-0.83	0.43
Кратковременная доза фликера, о.е.	0.98	1.14

На рис. 5, 6 представлены фрагменты осциллограмм, демонстрирующие работу комплексной математической модели энергетической установки на базе трехфазного инвертора напряжения с дополнительным полумостом.

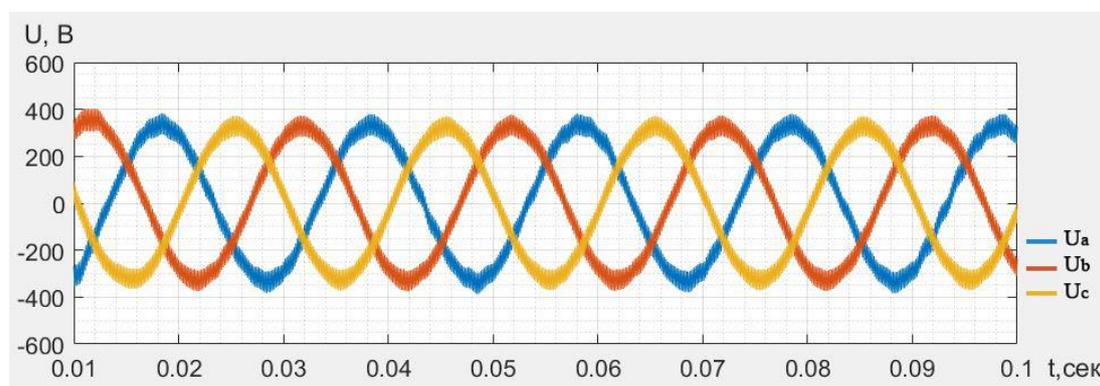


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения ТИН с ДПМ от времени

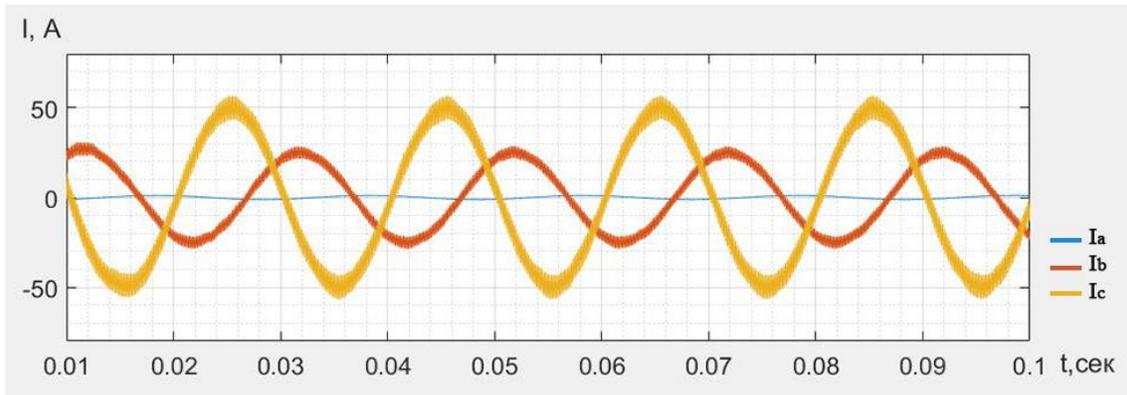


Рис. 6. Зависимость выходного тока ТИН с ДПМ от времени

Применение инвертора с дополнительным полумостом в составе комплексной энергетической установки при работе на несимметричную нагрузку позволило:

- добиться относительного равенства фазных напряжений, при этом максимальные отклонения напряжения в нагрузке относительно номинального выходного напряжения составили 2.61 %, что ниже аналогичного показателя для классической схемы (6.52 %);
- при одном и том же номинальном значении выходного напряжения снизить входное постоянное напряжение ТИН более чем на 10% в сравнении со схемой без ДПМ;
- снизить в 8 раз (применительно к рассматриваемой модели) необходимую эквивалентную емкость конденсаторов фильтра на стороне постоянного тока.

Вместе с этим обе рассматриваемые системы удовлетворяют требованиям по качеству электрической энергии, в том числе в части кратковременной дозы фликера, не превышающей установленных значений ($P_{st} < 1,38$) [8].

Заключение

Проблема загрязнения окружающей среды продуктами сгорания углеводородного топлива ввиду эксплуатации автомобильного транспорта

как никогда актуальна. Одним из решений может послужить массовая электрификация транспортных средств, переход от автомобилей традиционной конструкции к электромобилям. Однако комфортная и беспрепятственная эксплуатация электромобилей возможна только при соответствующем уровне развития зарядной инфраструктуры, как городской, так и загородной. В этой связи положительное влияние окажет использование возобновляемых источников электроэнергии в системах электроснабжения объектов зарядной инфраструктуры, главным образом, решения, с применением ветроэлектрических установок и фотоэлектрических модулей. Использование энергии, производимой с применением экологически чистых технологий, существенно улучшает экологический аспект эксплуатации электромобилей.

Трехфазный инвертор напряжения является ключевым звеном в составе такого рода энергетических установок и применение схемных решений, позволяющих повысить качество выходного напряжения здесь также актуально. Схема энергетической установки, имеющая в своем составе трехфазный инвертор напряжения с дополнительным полумостом, имеет ряд преимуществ по отношению к классическим решениям. Она позволяет при прочих равных условиях заметно снизить массогабаритные показатели всей системы за счет использования меньших фильтров и накопителей электрической энергии. Отдельно следует выделить и качество получаемого выходного напряжения при относительно простой топологии в сравнении с многоуровневыми схемами.

Список литературы

1. Белоусов, Б.Н. Современные вызовы развития теории автомобиля как интеллектуального транспортного средства / Б.Н. Белоусов, Г.И. Гладов, Т.И. Ксенович, М.П. Малиновский // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации государственной программы развития сельского хозяйства: сборник научных докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 15-16 сентября 2015 г. – М.: Изд-во ВИМ, 2015. – С.62-66.
2. Чаплыгин, Е.Е. Входные фильтры инверторов напряжения с несимметричной нагрузкой / Е.Е. Чаплыгин, Н.Г. Калугин, И.Ю. Рыбальченко // Практическая силовая электроника. – 2005. – №18. – С.28-32.

3. Чаплыгин, Е.Е. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в инверторах напряжения с дополнительным полумостом / Е.Е. Чаплыгин, А.Е. Вилков, С.В. Хухтиков // *Электричество*. – 2012 – №8. – С.36-43.
4. A. Fuerback, P. Arnaldo, M.L Heldwein, C.S. Postiglione Single-phase/-stage NPC-based rectifier integrating a simple DCM PFC technique. 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2013. 1-10. 10.1109/EPE.2013.6634436.
5. Хватов, С.В. Математическая модель единой электростанции автономного объекта на базе ДВС с переменной скоростью вращения / С.В. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, О.С. Хватов // *Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции, НГТУ, Н. Новгород*. – 2010 – С.1-9.
6. Иоанесян, А.В. Моделирование нестационарных режимов работы аккумуляторной батареи электромобиля / автореферат дисс. ... канд. техн. наук / А.В. Иоанесян. – М.: МАДИ(ГТУ) – 2009, 159 с.
7. С.М. Shepherd Design of primary and secondary cells: an equation describing battery discharge, *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 112, no. 7, 1965, pp. 657–664.
8. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с

References

1. Belousov B.N., Gladov G.I., Ksenevich T.I., Malinovsky M.P. *Intellektual'nyye mashinnyye tekhnologii i tekhnika dlya realizatsii gosudarstvennoy programmy razvitiya sel'skogo khozyaystva*, sbornik nauchnykh dokladov, Moscow, 2015, pp. 62-66.
2. Chaplygin E.E., Kalugin N.G., Rybalchenko I.Y *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2005, no.18, pp. 28-32.
3. Chaplygin E.E., Vilkov E.A., Huhtikov V.S. *Elektrichestvo* 2012, no.8, pp. 36-43.
4. A. Fuerback, P. Arnaldo, M.L Heldwein, C.S. Postiglione Single-phase/-stage NPC-based rectifier integrating a simple DCM PFC technique. 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2013. 1-10. 10.1109/EPE.2013.6634436.
5. Khvatov S.V., Darienkov A.B., Samoyavchev I.S., Khvatov O.S. *Aktual'nyye problemy elektroenergetiki*, materialy konferentsii, N. Novgorod, NGTU 2010 pp. 1-9.
6. Younesian A.V. *Modelirovaniye nestandartnykh rezhimov raboty akkumulyatornoy batarei electromobilya* (Simulation of transient operation modes of the battery of the electric car), PhD thesis, Moscow, MADI (GTU), 2009, 159 p.

7. C.M. Shepherd, *Design of primary and secondary cells: an equation describing battery discharge*, Journal of the Electrochemical Society, vol. 112, no. 7, pp. 657–664.

8. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya, GOST 32144-2013 (Electric energy. Electromagnetic compatibility. The quality standards of electric energy in power supply systems of general purpose State Standart 32144-2013), Moscow, Standardinform, 2014, 16 p.

Рецензент: В.Е. Ютт, д-р техн. наук, проф., МАДИ