

УДК 621.331.3

Г. С. ЗИНОВЬЕВ, А. В. РОЖЕНЦЕВА, А. С. СУСЛОВА (НГТУ)

Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, Россия, пр-т К. Маркса, 20, тел.: +7 (383) 346-11-82, эл. почта: [genstep@mail.ru](mailto:genstep@mail.ru)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### Введение

Потребность в электровозах большой мощности нарастает в связи с повышением грузопотоков на железнодорожном транспорте и увеличения скорости движения. Достоинства систем тяги на постоянном токе ограничиваются сегодня их мощностями электровозов на уровне не более 5-8 мВт при напряжении в контактной сети 3 кВ. На необходимость повышения уровня постоянного напряжения в контактной сети до значений 12-24 кВ уже давно указывалось в печати [1-4], но приемлемых схемотехнических решений для построения понижающего двунаправленного DC-DC преобразователя предложено не было.

В последнее время в работах [5,6] проанализирована новая схема безтрансформаторного понижающего двунаправленного DC-DC преобразователя, позволяющего связать сети постоянного напряжения 12-24кВ с типовой бортовой сетью электровоза 3кВ. Но отсутствие общей шины входа и выхода у такого преобразователя предъявляет повышенные требования к изоляции обмоток двигателя относительно его корпуса. Более перспективное решение, обеспечивающее гальваническую развязку входа и выхода преобразователя, является выполнение преобразователя по многоканальной схеме с последовательным включением их по входу и параллельным или автономным включением их по выходу [8].

Два схемотехнических варианта выполнения таких многоканальных преобразователей со звеном повышенной частоты сопоставлены в прилегающем разделе. Затем в следующем разделе рассмотрен вариант двунаправленного безтрансформаторного понижающего DC-DC преобразователя по лестничной схеме с общей шиной входа и выхода. Сравнение трех вариантов опирается на результаты моделирования преобразователей в программе PSIM.

### Многоканальные DC-DC, AC-DC преобразователи с промежуточным трансформаторным звеном повышенной частоты

Схема DC-DC преобразователя может быть выполнена в двух вариантах: однофазная полумостовая или мостовая схема, на рис.1 изображены мостовые схемы.

Такое решение увеличения пропускной способности участков железной дороги выглядит следующим образом: напряжение контактной сети повышается до напряжения 24 кВ; на электроподвижном составе располагается согласующий преобразователь 24 кВ-3 кВ, выход которого постоянный. Схема состоит из 8 последовательно соединенных по входу ячеек, таким образом, входное напряжение одной ячейки составляет 3 кВ. Этот уровень напряжения ориентирован на применение в схемах IGBT-транзисторов на 6,5 кВ. Сказанное иллюстрирует рис. 2.

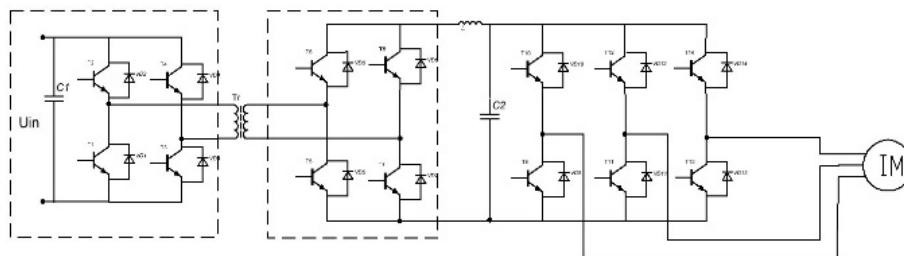


Рис. 1. Принципиальная схема одного канала преобразователя (инвертор и выпрямитель выполнены по однофазным мостовым схемам)

Ячейки инвертора и выпрямителя могут быть выполнены в виде однофазной полумостовой схемы путем замены плеча ключей на

плечо конденсаторов. Все выпрямители по выходу включены параллельно, чтобы обеспечить

независимое регулирование каждого асинхронного двигателя.

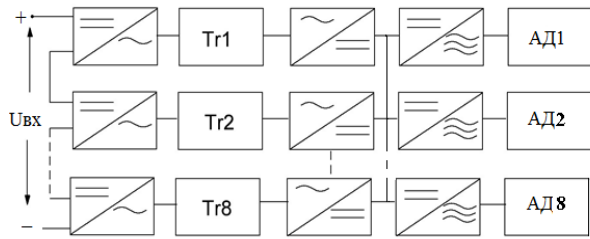


Рис. 2. Общий вид структурной схемы конвертора

Произведем сравнение с аналогичным преобразователем для системы переменного тока.

АС-DC преобразователь электротяги переменного тока состоит из 12 каналов, соединенных по входу последовательно, а по выходу выпрямителей – параллельно (рис.3).

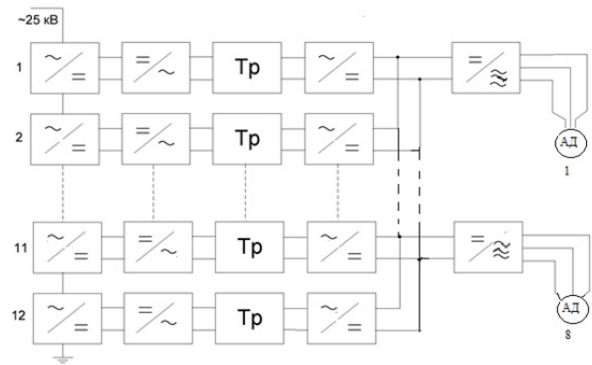


Рис. 3. Общий вид структурной схемы АС-DC конвертора

Необходимо отметить, что здесь преобразователь выполнен на основе мостовых схем.

В табл. 1 приведено сравнение двух схемных решений DC-DC преобразователей и АС-DC преобразователя.

Таблица 1

Параметры		Полумостовая схема (постоянный ток)	Мостовая схема (постоянный ток)	Мостовая схема (переменный ток)
Количество каналов	шт	8	8	12
Количество транзисторов	шт	64	64	72
Количество банок конденсаторов	шт	72	16	36
Действующее значение тока в ключах	А	580.8	281.2	127.5
Среднее значение тока в ключах	А	397.5	197.7	90,10
Потери в транзисторах	кВт	89.301	99.804	100.416
Потери в конденсаторах	Вт	1 236.16	433.43	245
КПД		0.952	0.962	0.962
Суммарный КПД контактной сети и электровоза		0.936	0.944	0.946
Масса преобразователя	кг	7 333.44		11 989
Общий занимаемый объем	м <sup>3</sup>	2.464		3,819
Стоимость комплектующих изделий	руб	9 681 851.6	8 072 948	13 803 928
Стоимость преобразователя	руб	9 697 635.3	8 086 918.4	13 819 447
Потери в транзисторах	кВт	53.227	56.3	53.725
КПД		0.97	0.97	0.971
Суммарный КПД контактной сети и электровоза		0.953	0.953	0.954

Примечания:

1. Количество банок конденсаторов для полумостовой схемы указано с тем условием, что в плече конденсаторов, в параллель ставятся 2 конденсатора.

2. Количество транзисторов для полумостовой схемы указано с тем условием, что в плече, в параллель ставятся 2 транзистора.

3. Для системы переменного тока, значения тока указаны в ключах инвертора.

Данные табл. 1. были получены при использовании следующей элементной базы:

Конденсаторы фирмы «Epcos»:

Система постоянного тока:

- B25650D3258K024 (для мостовой схемы), B25650D1528K004 (для полумостовой схемы)

Система переменного тока

- B25650D3258K024, B25650D3128K004.

IGBT транзисторы фирмы «Infineon» (для обеих систем):

- FZ600R65KF2:  $I_a=600$  А;  $U=6500$  В (для мостовой и полумостовой схем)

Контактный медный фасонный провод для системы постоянного тока с площадью сечения  $123 \text{ мм}^2$ , для системы переменного тока – с площадью сечения  $85 \text{ мм}^2$

Если сравнивать предложенные схемные решения для системы постоянного тока, то практически по всем показателям имеет преимущество схема, построенная на однофазных мостах.

Так, для построения понижающего преобразователя на базе мостовой схемы мощностью около 10 МВт, для 8 каналов необходимо 64 IGBT транзистора на напряжение 6.5 кВ и ток 600А; для полумостовой схемы необходимо 64 ключа на 6.5 кВ и ток 600А. Но в данном схемном решении, требуется также в 4.5 раз больше конденсаторов, чем для мостовой схемы.

Для обоих схемных решений требуется восемь асинхронных двигателей типа НТА-1200 кВт.

Преобразователь для системы переменного тока тяжелее и дороже, содержит большее количество ключей и имеет более сложную систему управления.

Обратимся к одному из важных параметров электрифицированной железной дороги – суммарному КПД контактной сети и электровоза.

Общий КПД электровоза переменного тока и контактной сети в режиме тяги, без учета затрат на собственные нужды и работу компрессоров, по расчетам получается равным 0.94 и мало зависит от расстояния между тяговой подстанцией и электровозом.

Общий к.п.д. электровоза постоянного тока и контактной сети меняется в зависимости от расстояния до тяговой подстанции от 0.95 вблизи ее, до 0.73 на расстоянии 10 км, усредненное значение КПД электровоза постоянного тока и контактной сети не превышает 0.84.

Например, функционирующие электровозы на сегодняшний день имеют:

КПД ЭП2к не менее 0.88 (электровоз постоянного тока)

КПД ЭП10-0.86 (электровоз переменного тока)

В предлагаемых нами схемах, по предварительным расчетам КПД составит 0.952 (полумостовая схема) и 0.962(мостовая схема), для системы постоянного тока, 0.962 для системы переменного тока.

### Основные характеристики преобразователей

#### 1. Внешние характеристики

На рис. 4 приведена зависимость выходного напряжения от выходного тока, для трех рассмотренных преобразователей.

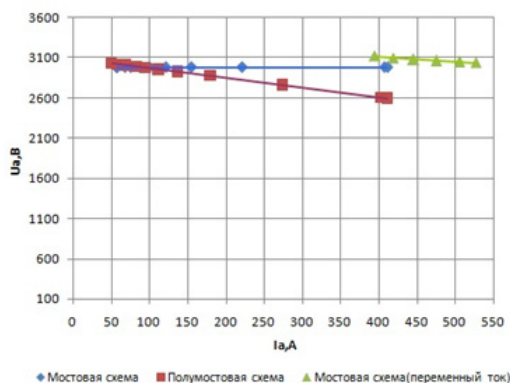


Рис. 4. Внешние характеристики

© Зиновьев Г. С. и др., 2013

#### 2. КПД преобразователей.

На рисунке 5 показана зависимость КПД от тока нагрузки, для трех рассмотренных преобразователей.

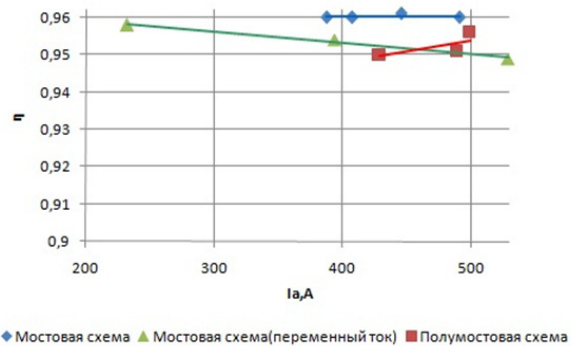


Рис. 5. КПД преобразователей

Как видно из рисунка 5, система постоянного тока превосходит по КПД систему переменного тока.

#### 3. Электромагнитная совместимость преобразователей электровозов

Переменный несинусоидальный ток в контактной сети и на входе выпрямителя электровоза переменного тока создает серьезные проблемы и для оборудования электровоза и для других систем, примыкающих к контактной сети. Контактная сеть электровоза постоянного тока загружена практически постоянным током и не создает указанных проблем.

#### Двунаправленный DC-DC конвертор без гальванической изоляции выхода от входа

Возможно построение понижающих DC-DC преобразователей и без использования промежуточного высокочастотного звена с трансформатором, вносящего свои ограничения на мощность канала преобразования. Это можно сделать на основе лестничных структур DC-DC конверторов с мягкой коммутацией добавлением транзисторных ключей, обеспечивающих режим рекуперации [11]. Двунаправленные однотактный и двухтактный преобразователи постоянного напряжения показаны на рис. 6а, б соответственно. Они содержат конденсаторный делитель КД, реакторно-конденсаторную цепочку РК и диодно-транзисторную цепочку ДТ с соответствующей системой управления, а также токовый делитель ТД во второй схеме. При IGBT с напряжением 6.5кВ в модели конвертора в программе PSIM получается уровень мощности 1МВт.

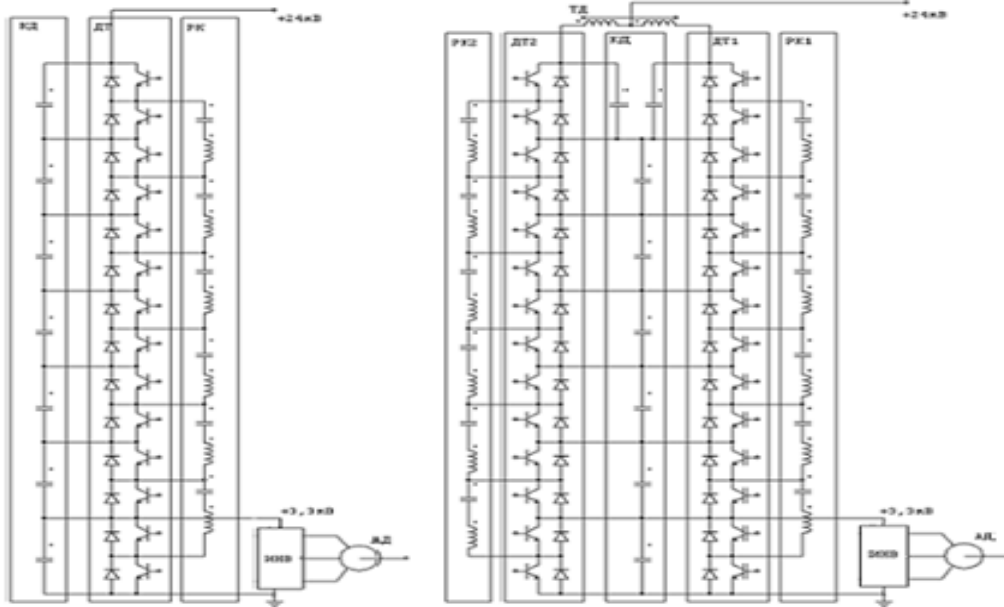


Рис. 6. Двухнаправленные а) однофазный и б) двухфазный преобразователи постоянного напряжения

### Тяговые подстанции

Затраты на построение тяговой подстанции играют не мало важную роль при выборе системы тока. Но стоимости тяговых подстанций для двух систем тока существенно зависят от их исполнения. Поэтому пока ограничимся “экономическим весом” подстанций на уровне оценки мощностей основных ее элементов.

Положим, что обе подстанции рассчитаны на одинаковую активную мощность в контактной сети. Полная мощность сетевого трансформатора для высоковольтной тяги постоянного тока равна активной мощности при условии использования на новой подстанции активного выпрямителя, потребляющего синусоидальный ток, синфазный с напряжением сети [10]. Полная мощность сетевого трансформатора для высоковольтной тяги переменного тока равна активной мощности, деленной на входной коэффициент мощности существующего электровоза на шинах тяговой подстанции (0.7-0.8 с учетом индуктивности контактной сети). Это обстоятельство, помимо требуемого увеличения полной мощности трансформатора на 30-50%, обусловит еще и дополнительные затраты на устройства компенсации реактивной мощности и мощности искажения (активные или пассивные фильтры), чтобы сравнение сделать с учетом одинакового уровня электромагнитной совместимости тяговой подстанции с питающей энергосистемой. При коэффициенте мощности 0.7 это потребует активной компенсации неактивной мощности на входе, равной активной, что по затратам на компенсатор (с ШИМ) это будет порядка затрат

на активный выпрямитель тяговой подстанции постоянного тока. Но у последней есть еще одно преимущество – возможность компенсации неактивной мощности других нелинейных потребителей энергосистемы, от которой питается подстанция постоянного тока. Таким образом, появляется еще один существенный плюс в пользу системы постоянного тока.

### Выводы

1. Увеличение напряжения до 24 кВ в контактной сети постоянного тока позволит построить электровозы мощностью до 25 МВт и более, в соответствии с требованиями времени.
2. Все основные преимущества системы тяги переменного тока присущи в системах постоянного тока на то же напряжение. Основные недостатки системы тяги переменного тока устраняются в системах тяги постоянного тока.
3. Существующие тяговые сети железных дорог могут быть использованы для испытаний новых образцов высоковольтных электровозов постоянного тока. Контактная сеть 3кВ постоянного напряжения позволяет поднять напряжение в ней до 10кВ, т. к. она имеет изоляторы на 20 кВ. Контактная сеть переменного тока 25 кВ позволяет по изоляции запитать ее постоянным напряжением 24 кВ.
4. В связи с этим повышение напряжения в контактной сети постоянного тока представляется перспективным вариантом для увеличения пропускной способности железных дорог и скорости движения поездов.
5. Стоимость тяговой подстанции системы постоянного тока дешевле, чем тяговая подстанция для системы переменного тока.

© Зиновьев Г. С. и др., 2013

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Розенфельд, В. Е. Система электрической тяги постоянного повышенного напряжения с тиристорными преобразователями на подвижном составе [Текст] / В. Е. Розенфельд, В. В. Щевченко, В. А. Майбога, Г. П. Долаберидзе // Электрическая и тепловозная тяга. - 1968. - №3. - С 4 - 6.
2. Steigerwald R. L. Comparison of High-Power DC-DC Soft-Switched Converter Topologies / R. L. Steigerwald, R. W. De Doncker, M. H. Kheraluwala // Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE. - 1994. – Pp. 1139 - 1145.
3. Курбасов, А.С. Система электрической тяги XXI века [Текст] / А.С. Курбасов // Железные дороги мира. - 1999. - №4. – С. 24-26.
4. Kim J. Modeling, Control, and Design of Input-Series-Output-Parallel- Connected Converter for High-Speed-Train Power System / Jung-Won Kim, Jung- Sik You, B. H. Cho // IEEE transactions on power electronics. 2001, Vol. 48, № 3.
5. Lopatkin N. N. Bi-Directional High-Voltage DC-DC-Converter of Advanced Railway Locomotives / N.N. Lopatkin, G.S. Zinovyev, L.G. Zotov // Proceedings of IEEE Energy Conversion Congresss, September, 12-16, 2010,USA, Atlanta, Georgia, pp. 1123-1128.
6. Зиновьев, Г. С. Высоковольтный DC-DC конвертор для электровозов новой волны [Текст] / Г. С. Зиновьев, Н. Н. Лопаткин, Х. Вайс // Электротехника. – 2009. – №12. – С. 46-51.
7. Зиновьев, Г. С. Пути модернизации систем электроснабжения и электрооборудования высоковольтных электровозов постоянного напряжения [Текст] / Г. С. Зиновьев, С. Сальва // Электромеханика. – 2012. – №6. – С. 83-88.
8. D. Pefitsis, G. Tolstoy, A. Antonopoulos, J. Rabkowski, M. Bakowski, L. Angquist, and H. Nee, "High-power modular multilevel converters with SiC JFETs," IEEE Trans. Power Electr., vol. 27, no. 1, pp. 28–36, Jan. 2012.
9. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники [Текст]: учебное пособие, 4-изд. / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. - 671 с.
10. Zinoviev G. S., Rozhentseva A., Suslova A. Comparative analysis of high-voltage DC prospective converters of electric loco. Proc. EDM2013, Altay, 2013, p. 399-401.
11. Высоковольтный преобразователь постоянно- го напряжения. Материалы заявки на изобретение №2013136472. НГТУ, 2013.

Поступила в печать 12.11.2013.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

В данной работе сопоставлены двунаправленные понижающие DC-DC преобразователи перспективных высоковольтных электровозов постоянного тока. Определены параметры и количество требуемых активных элементов (транзисторов), удельные энергии установленных конденсаторов, ход внешних характеристик и КПД преобразователей.

Сравниваются два вида DC-DC преобразователей, построенных с использованием однофазной мостовой и однофазной полумостовой схем ячеек в многоканальной системе с промежуточным трансформаторным звеном переменного тока повышенной частоты, обеспечивающим гальваническую развязку входных

REFERENCES

1. Rozenfel'd V. E., Shchevchenko V. V., Mayboga V. A., Dolaberidze G. P. *Sistema elektricheskoy tyagi postoyannogo povyshennogo napryazheniya s tiristornymi preobrazovatelyami na podvizhnom sostave* [DC electric traction system of high voltage thyristor converters for rolling stock]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga – Electric and diesel traction*, 1968, no.3, pp.4-6.
2. Steigerwald R. L. Comparison of High-Power DC-DC Soft-Switched Converter Topologies / R. L. Steigerwald, R. W. De Doncker, M. H. Kheraluwala // Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE. - 1994. – Pp. 1139 - 1145.
3. Kurbasov A.S. *Sistema elektricheskoy tyagi XXI veka* [Electric traction system of XXI century]. *Zheleznyye dorogi mira – Railways world*, 1999, no.4, pp.24-26.
4. Kim J. Modeling, Control, and Design of Input-Series-Output-Parallel- Connected Converter for High-Speed-Train Power System / Jung-Won Kim, Jung- Sik You, B. H. Cho // IEEE transactions on power electronics. 2001, Vol. 48, № 3.
5. Lopatkin N. N. Bi-Directional High-Voltage DC-DC-Converter of Advanced Railway Locomotives / N.N. Lopatkin, G.S. Zinovyev, L.G. Zotov // Proceedings of IEEE Energy Conversion Congresss, September, 12-16, 2010,USA, Atlanta, Georgia, pp. 1123-1128.
6. Zinov'ev G. S., Lopatkin N. N., Vays Kh. *Vysokovol'tnyy DC-DC konvertor dlya elektrovozov novoy volny* [High Voltage DC-DC converter for electric new wave]. *Elektrotekhnika – Electrical Engineering*, 2009, no.12, pp.46-51.
7. Zinov'ev G. S., Sal'va S. *Puti modernizatsii sistem elektrosnabzheniya i elektrooborudovaniya vysokovol'tnykh elektrovozov postoyannogo napryazheniya* [Road upgrading of electrical systems and electrical high-voltage DC electric voltage]. *Elektromekhanika – Electromechanics*, 2012, no.6, pp.83-88.
8. D. Pefitsis, G. Tolstoy, A. Antonopoulos, J. Rabkowski, M. Bakowski, L. Angquist, and H. Nee, "High-power modular multilevel converters with SiC JFETs," IEEE Trans. Power Electr., vol. 27, no. 1, pp. 28–36, Jan. 2012.
9. Zinov'ev G. S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of Power Electronics]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2009. 671 p.
10. Zinoviev G. S., Rozhentseva A., Suslova A. Comparative analysis of high-voltage DC prospective converters of electric loco. Proc. EDM2013, Altay, 2013, p. 399-401.
11. *Vysokovol'tnyy preobrazovatel' postoyannogo napryazheniya* [High Voltage DC converter]. Application materials for the invention, no. 2013136472, 2013.

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

и выходных цепей, также произведено сравнение предложенных DC-DC преобразователей с AC-DC преобразователем (по основным параметрам), построенный по такому же принципу. Также рассматривается вариант двунаправленного безтрансформаторного понижающего DC-DC преобразователя по ленточной схеме с общей шиной входа и выхода. Сравнение опирается на результаты моделирования конверторов в программе PSIM.

**Ключевые слова:** двунаправленный DC-DC преобразователь, ВЧ промежуточное звено, современные электровозы, многоканальная конверторная система.

УДК 621.331.3

Г. С. ЗИНОВ'ЄВ, А. В. РОЖЕНЦЕВА, А. С. СУСЛОВА (НДТУ)

Новосибірський державний технічний університет, 630073, м. Новосибірськ, Росія, пр-т К. Маркса, 20, тел.: +7 (383) 346-11-82, ел. пошта: [genstep@mail.ru](mailto:genstep@mail.ru)

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПЕРСПЕКТИВНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

У даній роботі зіставлені двунаправлені понижуючі DC-DC перетворювачі перспективних високовольтних електровозів постійного струму. Визначено параметри і кількість необхідних активних елементів (транзисторів), питомі енергії встановлених конденсаторів, хід зовнішніх характеристик і ККД перетворювачів.

Порівнюються два види DC-DC перетворювачів, побудованих з використанням однофазної мостової, і однофазної полумостової схем комірок у багатоканальній системі з проміжною трансформаторною ланкою змінного струму підвищеної частоти, що забезпечує гальванічну розв'язку вхідних і вихідних ланцюгів, також виконано порівняння запропонованих DC-DC перетворювачів з AC-DC перетворювачем (за основними параметрами), що побудований за таким же принципом. Також розглядається варіант двунаправленого безтрансформаторного понижуючого DC-DC перетворювача по стрічковій схемі із загальною шиною входу і виходу. Порівняння спирається на результати моделювання конверторів у програмі PSIM.

**Ключові слова:** двунаправлений DC-DC перетворювач, ВЧ проміжна ланка, сучасні електровози, багатоканальна конверторна система.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 621.331.3

G. S. ZINOVIEV, A. V. ROZHENTSEVA, A. S. SUSLOVA (NSTU)

Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia, 20 K. Marksa Avenue, tel.: +7 (383) 346-11-82, e-mail: [genstep@mail.ru](mailto:genstep@mail.ru)

## COMPARATIVE ANALYSIS OF HIGH-VOLTAGE CONVERTERS DC ELECTRIC PERSPECTIVE

In this paper we compared the bidirectional DC-DC step-down converters promising high DC electric. Defined parameters and the required number of active elements (transistors), the specific energy capacitors installed, move the external characteristics and efficiency converters.

Compared two types of DC-DC converters built using single-phase and single-phase half-bridge bridge circuits of cells in a multichannel system with an intermediate transformer link AC high frequency, providing galvanic isolation of input and output circuits, also made a comparison of the proposed DC-DC converters with AC-DC converter (General Settings), built on the same principle. Also considering the possibility of bidirectional transformerless DC-DC buck converter with tape circuit with common rail input and output. Comparison based on the results of the simulation program converters PSIM.

**Keywords:** bi-directional DC-DC converter, HF intermediate, advanced electric, multi-channel converter system.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*