

УДК 621.316.722.025

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ С ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ
В НАКОПИТЕЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ*****А.В. Удовиченко, В.Г. Токарев, Е.В. Гришанов, С.В. Кучак**
Новосибирский государственный технический университет

В статье предложено согласующее устройство между аккумуляторной батареей и инвертором напряжения в системах накопления электрической энергии на базе реверсивного преобразователя постоянного напряжения в постоянное с улучшенными массогабаритными и стоимостными показателями. К литий-ионным аккумуляторным батареям предъявляются жесткие требования их эксплуатации. Разряд таких батарей не должен превышать их трехкратную емкость (C), тогда как заряд ограничен $0,5C$, при этом в зарядном токе не должно присутствовать низкочастотных пульсационных составляющих. Эти требования возможно осуществить с помощью предлагаемого согласующего устройства, особенностью которого являются меньшие габариты и стоимость, что достигается за счет блока дросселей. В статье предложен расчет схемы преобразователя и приведены результаты моделирования, полученные в среде имитационного моделирования Psim (the PowerSim environment). Проведена экономическая оценка преобразователя.

Ключевые слова: регулятор, система накопления, аккумулятор, дроссель, пульсация тока.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-43-52

Введение

В настоящее время существует проблема недостатка генерационных мощностей. Зачастую она вызвана увеличением энергопотребления потребителя. В свою очередь ухудшает ситуацию низкое качество потребляемой электрической энергии. Последствиями данной проблемы может стать износ оборудования электростанций и систем распределения, увеличение количества аварийных ситуаций и даже выход из строя оборудования электростанций. Решить эту проблему можно, в том числе за счет введения механизмов распределенной энергетики. Сюда можно отнести распределенную генерацию, управляемую нагрузку и системы накопления энергии (СНЭ), обладающие не только функцией бесперебойной подачи энергии, но и функцией улучшения качества электрической энергии (статический компенсатор). Введение СНЭ с соответствующими алгоритмами в энергосистему позволит повысить качество потребляемой электрической энергии, это подавление высокочастотных пульсаций токов и напряжений, компенсация реактивной мощности, а также ограничение скорости нарастания и сброса мощности нагрузки, введение дополнительных мощностей и собственно накопление энергии в периоды низкой загрузки энергосистемы.

Накопители электрической энергии на базе полупроводниковых преобразователей, работающие в сетях переменного тока 0,4 кВ, позволяют повысить качество потребляемой электрической энергии, снизить расходы на электроэнергию, выровнять график энергопотребления. Накопление в ночное время с учетом

* Настоящее исследование финансировалось за счет гранта Президента Российской Федерации по исследовательскому проекту № МК-2204.2020.8.

тарифных ставок, которые меньше в это время суток, и разряд накопителя в дневное время также позволит сэкономить денежные средства потребителю ЭЭ [1, 2].

Распространенным типом СНЭ являются накопители с аккумуляторными батареями (АБ). Основными типами АБ являются свинцово-кислотные, никель-кадмиевые и литий-ионные аккумуляторы. При этом литий-ионные аккумуляторы являются наиболее перспективными, так как обладают наибольшей энергоемкостью ($100\text{--}190 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$) по сравнению с конкурентами 30 и $60 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$, соответственно глубокими циклами заряда/разряда (до $70\text{--}80\%$), отсутствием эффекта памяти. В свою очередь данные АБ крайне критичны к качеству зарядного и разрядного тока, что должно учитываться при разработке конструкции зарядного устройства. Однако следует учесть, что инвертор напряжения топологии Н-мост, в составе накопителя электрической энергии формирующий переменный ток, не может обеспечить предъявляемых требований к качеству зарядно-разрядного тока.

Аккумуляторы заслужили высокую популярность благодаря стационарности, модульности и отсутствию движущихся деталей. Данные достоинства позволяют размещать накопители на их основе в помещениях и на подвижных объектах, формировать системы накопления от единиц ватт-часов до единиц мегаватт-часов.

Как уже было сказано ранее, наиболее перспективными на рынке энергетической сферы и обладающими высокими темпами развития типом аккумуляторов являются литий-ионные аккумуляторы. Благодаря использованию материалов с низким классом токсичности, замене взрывоопасного металлического лития на его соли и применению графитового покрытия анодных пластин данная технология занимает одно из ведущих мест по безопасности среди вторичных источников тока. Преимуществами литий-ионных элементов являются низкая величина внутреннего сопротивления ($85\text{--}135 \text{ мОм} \cdot \text{А} \cdot \text{ч}$), высокая циклоустойкость ($2000\text{--}3000$ циклов), а также возможность быстрого заряда током до $1C$, где C – номинальная емкость аккумулятора [3]. Среди недостатков литий-ионных аккумуляторов выделяются недопустимость заряда при отрицательных температурах, критичность к высоким температурам, а также нелинейность зарядной характеристики при достижении высоких степеней заряда. Проявление данных недостатков минимизируется применением систем контроля батареи (BMS), отслеживающих состояние каждой ячейки (напряжение, температура, ток) и управляющих режимами работы батареи.

подавляющее число потребителей используют электрическую энергию в виде переменного тока. Поскольку аккумуляторная батарея является источником постоянного тока, необходимым элементом системы накопления энергии является инверторный полупроводниковый преобразователь. Особенностью работы однофазных инверторов является наличие на входе пульсаций тока удвоенной частоты относительно первой гармоники выходного напряжения [4]. Таким образом, при работе на частоте 50 Гц частота пульсаций на входе составит 100 Гц .

В свою очередь особенностью большинства аккумуляторов, в том числе и литий-ионных, является значительное увеличение внутреннего сопротивления на диапазоне частот от 1 до 100 Гц относительно частот более 1000 Гц [5]. Увеличению сопротивления соответствует увеличение активных потерь, приводящих к нагреву электродов и уменьшению срока эксплуатации аккумулятора [4, 6, 7]. Для подавления низкочастотных гармоник тока рекомендуется применение согласующих устройств на базе DC/DC преобразователей (постоянного тока). Применение DC/DC преобразователя смещает диапазон пульсаций в область единиц – десятков килогерц, позволяет поддерживать напряжение на входе инвертора на постоянном уровне независимо от состояния заряда аккумуляторной батареи.

Одним из основных элементов такого согласующего устройства является индуктивный реактор. При работе накопителя на электрическую сеть преобразователь должен работать как на разряд батареи на сеть, так и на заряд от сети. В свою очередь, индуктивность должна адекватно соответствовать как нетребовательному к качеству тока высокоамперному режиму разряда (до 3С), так и слаботочному заряду со строгими ограничениями по величине пульсаций. Применение единого реактора требует поиска оптимального соотношения его параметров: величины индуктивности, сечения проводника намотки, применяемого сердечника и т. д.

Таким образом, в настоящее время наиболее универсальным, эффективным и перспективным среди сетевых накопителей можно считать накопитель на основе литий-ионной аккумуляторной батареи с согласующим устройством на базе модифицированного DC/DC-преобразователя, где будет применяться разделение индуктивного реактора на зарядную и разрядную ветвь.

Существует значительное число работ, посвященных преобразователям постоянного напряжения в постоянное. Так, например, в [8] предложен повышающий преобразователь. К достоинствам такого преобразователя можно отнести малое количество ключей (по одному транзистору и диоду) и реактивных элементов (два конденсатора и дроссель). Однако данный преобразователь обеспечивает только одностороннюю передачу энергии от источника к нагрузке в повышающем режиме, что не подходит для системы накопления энергии, где требуется заряд батареи и ее разряд, т. е. двусторонняя передача энергии. В работе [9] рассмотрен понижающий преобразователь, который ввиду наличия двух транзисторных ключей может работать в режиме понижающего преобразователя, передавая энергию от источника напряжения к нагрузке в виде аккумуляторной батареи, обеспечивая ее заряд. А также и в повышающем режиме, передавая накопленную в аккумуляторной батарее энергию на входную клемму источника питания в случае, когда входное напряжение меньше требуемого значения или отсутствует. Здесь также к достоинствам можно отнести простую топологию схемы. Однако при использовании указанного преобразователя в системе накопления энергии большой мощности – сотни и тысячи киловатт массогабаритные показатели силового дросселя будут весьма значительны, поскольку токи через него могут достигать сотни ампер, а сечение провода соответственно – от 50 мм и больше.

Следовательно, для создания аккумуляторных накопителей электрической энергии с высокой энергоемкостью, в частности на базе литий-ионных АБ, актуальна разработка специальных устройств согласования между АБ и полупроводниковым преобразователем, обеспечивающих качество зарядно-разрядного тока АБ и обладающих малыми массогабаритными и стоимостными показателями. Применение данного согласующего устройства позволит повысить ресурс использования АБ, количество циклов заряда/разряда, снизить требования к техническому обслуживанию и повысить ремонтпригодность накопителей электрической энергии.

Тем самым задача сводится к разработке согласующего устройства, позволяющего повысить эффективность работы системы накопления электрической энергии с аккумуляторной батареей. За основу такого устройства взят импульсный преобразователь постоянного тока в постоянный [10, 11]. Входной дроссель такого устройства является определяющим как для массогабаритных, так и для стоимостных показателей. Это обуславливается тем, что батарее требуется качественный зарядный ток, позволяющий увеличить ее ресурс, а для этого необходима высокая индуктивность. Рассматривается два режима работы (преобразования уровня напряжения): повышающий (разряд аккумуляторной батареи) и понижающий (заряд аккумуляторной батареи). Предлагается модификация известного импульсного преобразователя, заключающаяся в установке дополнительного дросселя, использование которого требуется в режиме заряда аккумуляторной

батареи. А также предлагается алгоритм включения дополнительного дросселя. Это позволит существенно уменьшить габариты согласующего устройства, поскольку в режиме заряда ток дросселя не превышает 50 % от тока аккумуляторной батареи, выдаваемого аккумуляторной батареей за один час. В свою очередь при разряде аккумуляторной батареи этот дроссель шунтируется и используется уже входной дроссель преобразователя, рассчитанный на трехкратный ток аккумуляторной батареи, выдаваемый за один час эксплуатации.

1. Согласующее устройство аккумулятора с инвертором

На рис. 1 приведена схема предлагаемого устройства.

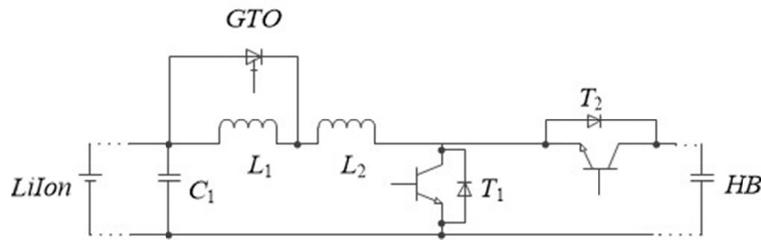


Рис. 1 – Согласующее устройство на базе модифицированного преобразователя постоянного напряжения в постоянное

Fig. 1 – A matching device based on a modified DC-DC converter

Предложенное устройство (рис. 1) содержит два транзисторных ключа, способ управления которыми задает режим работы преобразователя (понижающий или повышающий). Дроссель L_1 задействован только для понижающего режима. При работе в повышающем режиме он шунтируется тиристором GTO. В обоих случаях конденсатор C_1 будет являться высокочастотным фильтром, пропуская только низкочастотную составляющую тока в литий-ионную батарею.

В соответствии с техническим заданием коэффициент гармоник тока и напряжения (K_T) принят за 2 %, частота коммутации ключей T_1 и T_2 ($f_{pwmDCDC}$) принимается равной 5 кГц, коэффициент пульсаций высокочастотной составляющей тока ($K_{n(I)}$) примем равным 3 %, коэффициент пульсаций высокочастотной составляющей напряжения ($K_{n(U)}$) примем равным 5 %, емкость выбранных литий-ионных батарей равна 270 Ач, время заряда АКБ (t_{ch}) составляет 24 часа.

Данное устройство разрабатывалось для СНЭ мощностью 2 МВт. Тогда как в качестве инверторов использовалась модульная система на основе топологии Н-мост. Каждый модуль состоял из АБ, предлагаемого устройства и инвертора. Всего в 2 МВт СНЭ предполагалось 6 модулей, каждый мощностью 360 кВт.

При этом для понижающего режима работы максимальный ток заряда аккумуляторной батареи не должен был превышать 135 А. Индуктивность силового дросселя в DC-DC преобразователе при частоте преобразования 5 кГц и уровне пульсаций в 10 % должна быть не менее 3 мГн. При этом оценочная масса дросселя составляла 5 кг. Для повышающего режима работы максимальный ток разряда аккумуляторной батареи не должен превышать 810 А. Индуктивность силового дросселя в DC-DC преобразователе при частоте преобразования 5 кГц и уровне пульсаций в 10 % должна быть не менее 0,3 мГн. При этом оценочная масса дросселя составила 16 кг. В свою очередь универсальный дроссель как для понижающего, так и для повышающего режима индуктивностью 3 мГн и выдерживающий

ток в 810 А оценивается в 200 кг массы. Таким образом, решение шунтировать дроссель $L1$ позволяет получить значительный выигрыш в массогабаритных показателях преобразователя.

2. Расчет схемы согласующего устройства на базе модифицированного преобразователя постоянного напряжения в постоянное

Максимальная мощность DC-DC преобразователя определяется, исходя из мощности НВ-инвертора:

$$P_b = \frac{S_{НВ} \cdot \cos(\varphi_{НВ})}{\eta_{НВ} \cdot \eta_{DCDC}} = \frac{1/6 \cdot 2000000 \cdot 1}{0,95 \cdot 0,97} = 361\,729 \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $S_{НВ}$ – выходная мощность одного Н-моста, равная 1/6 части всей мощности, равной 2000 000 Вт.

Режим разряда

Предельный входной ток DC-DC примем равным максимально допустимому току разряда батареи $I_b \leq 810 \text{ А}$ (270 Ач · 3С). В соответствии с ТЗ на СНЭ [12] входное напряжение DC-DC ($U_{b \max}$) является выходным напряжением инвертора и равно 650 В. Число ячеек АКБ (N_b) составляет 204 шт., и минимальное входное напряжение DC-DC ($U_{b \min}$), исходя из разброса напряжений на элементе литий-ионной батареи – 2,5–3,7 В, составит 510 В [13–15]. В свою очередь минимальный входной ток DC-DC составит

$$I_{b \min} = P_b / U_{b \max} = 557 \text{ А}, \quad (2)$$

а максимальный входной составит

$$I_{b \max} = P_b / U_{b \min} = 710 \text{ А}. \quad (3)$$

Режим заряда

Ток заряда принимается равным $I_{ch} = 0,5C = 135 \text{ А}$. Напряжение заряда примем равным выходному напряжению DC-DC $U_{ch \min} = 700 \text{ В}$. При этом требуемое напряжение заряда (U_{ch}), исходя из расчета инвертора, должно быть равно 714 В, тогда как в звене постоянного тока оно уже будет равным 764 В (режим активного выпрямителя ($U_{DC(AR)}$)). Мощность на выходе DC-DC в этом режиме составит

$$P_{ch \max} = U_{DC(AR)} I_{ch} = 103\,140 \text{ Вт}. \quad (4)$$

Расчет дросселя в режиме заряда будет определяться как

$$L_{buck} = \frac{U_{ВХ} \cdot t_{ВКЛ.СОСТ.}}{I_{Lbuck} \cdot k_{пульс}}, \quad (5)$$

где I_{Lbuck} – ток протекающий через дроссель, соответствующий 0,5 от емкости аккумуляторной батареи.

Расчет дросселя в режиме разряда:

$$L_{boost} = \frac{U_{ВХ} (U_{ВЫХ} - U_{ВХ})}{(I_{Lcp} + 0,5 I_{Lпульс}) k_{пульс} f_{PWM} U_{ВХ}}, \quad (6)$$

где I_{Lcp} – среднее значение тока, протекающего через дроссель.

3. Результаты моделирования

При моделировании согласующего устройства были приняты следующие начальные условия и допущения.

1. Аккумуляторная батарея упрощенно представлена в виде источника напряжения VDC3 (рис. 2), диапазон напряжений – от 588 до 750 В, сопротивление $R_{bat} = 0,05$ Ом. Предложенный вариант имеет очень жесткую входную характеристику в режиме заряда по сравнению с реальной аккумуляторной батареей.

2. Емкость конденсатора на стороне аккумуляторной батареи 470 мкФ, емкость конденсатора на стороне H-моста 2000 мкФ, индуктивность $L_d = 2,67$ мГн.

3. Частота ШИМ взята равной 4 кГц, период между выборками ADC 50 мкс (частота 20 кГц).

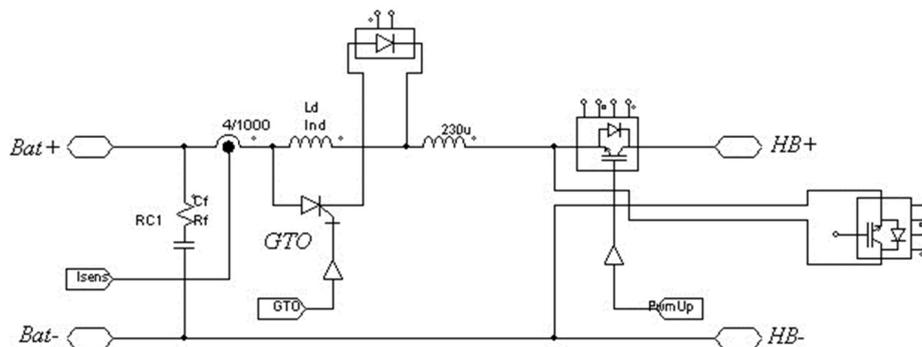


Рис. 2 – Схема силовой части DC-DC преобразователя

Fig. 2 – The circuit of the DC-DC converter power section

Моделирование преобразователя (рис. 2) производилось в ПО PSIM. Было проведено два эксперимента: на заряд батареи и на ее разряд. Осциллограммы для режима заряда и разряда представлены соответственно на рис. 3 и 4.

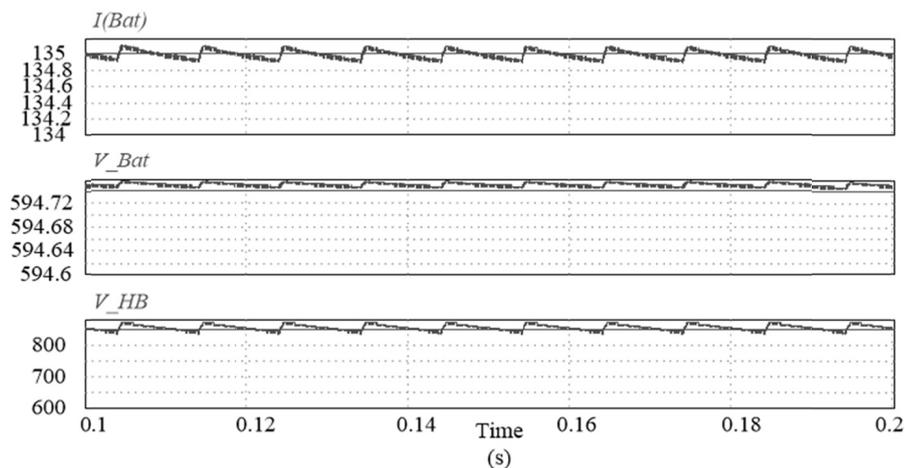


Рис. 3 – Осциллограммы режима заряда, ток батареи, напряжение батареи и напряжение H-моста (сверху вниз)

Fig. 3 – Waveforms of the charge mode, battery current, battery voltage, and H-bridge voltage (top to bottom)

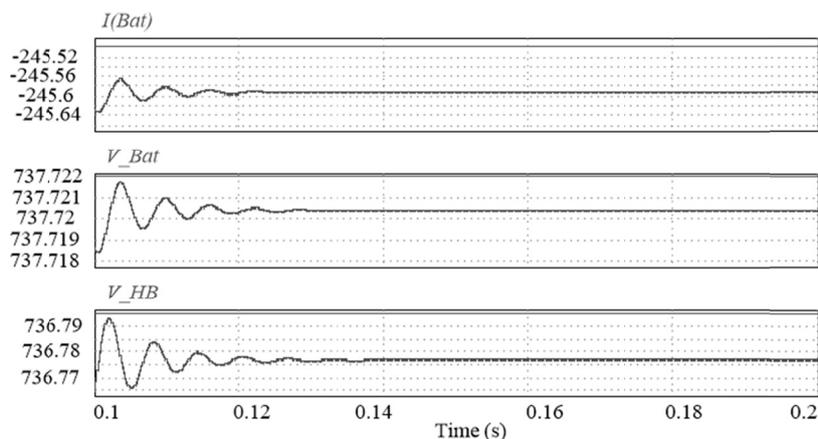


Рис. 4 – Осциллограммы режима разряда, ток батареи, напряжение батареи и напряжение H-моста (сверху вниз)

Fig. 4 – Oscillograms of the discharge mode, battery current, battery voltage and H-bridge voltage (top to bottom)

Из полученных кривых токов и напряжений видно, что пульсации незначительны и укладываются в требования, предъявленные в ТЗ. Дальнейшим шагом исследований станет оценка работы преобразователя с тепловыми моделями в Matlab Simulink. Но по предварительным расчетам в модуле, мощность которого (как обозначено далее) 360 кВт, на ключах теряется около 2 кВт. В модели предполагается оценить потери не только на ключах, но и в реактивных элементах.

Заключение

1. Предложено согласующее устройство литий-ионной аккумуляторной батареи с H-мостовым инвертором напряжения на базе модифицированного DC-DC преобразователя. За счет используемых в этой схеме LC-фильтров удалось подавить низкочастотную пульсацию зарядного тока. А поскольку преобразователь основан на известной схеме buck-boost [9], возможно осуществить регулирование напряжения до требуемого в СНЭ.

2. За счет разделения дросселя для режима заряда и разряда удалось выиграть в массогабаритных показателях в 5 раз, 18,5 г/кВт против 100 г/кВт.

3. В работе приведена методика расчета предлагаемой схемы, в частности упор сделан на силовой дроссель.

4. Кроме того, была произведена стоимостная оценка, результаты которой приведены в таблице. Выигрыш оценивается в 30 % в сравнении со схемой с одним дросселем.

Транзисторы (DC-DC, 5 на H-мост)	Количество для 6 H-мостов	Сумма
SKM300GA12V	60	146,49 руб/кВт
Драйверы (DC-DC)		
SKNI 22B R	30	64,68 руб/кВт
Дроссель (3 мГн, 3С, при $f = 5000$ Гц)	30	1 333,26 руб/кВт
Дроссель (0,3 мГн, 3С, при $f = 5000$ Гц)	30	550,935 руб/кВт
Дроссель (3 мГн, 0,5С, при $f = 5000$ Гц)	30	364,275 руб/кВт
Конденсаторы	180	18 руб/кВт (ориентировочно)
ИТОГО		34 663,064 руб/кВт

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dybko M.A., Brovanov S.V.** Active power filter with battery energy storage based on NPC inverters // 2015 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, 2015. – P. 415–421.
2. Тарифы на электрическую энергию. – URL: <https://www.nskes.ru/pomoshch-i-spravka/tarify/tarify-na-elektricheskuyu-energiyu/> (дата обращения: 30.06.2021).
3. Лиотех. Литий-ионные аккумуляторы. – Новосибирск, 2017. – URL: <http://liotech.ru/newsection7159> (дата обращения: 30.06.2021).
4. **Park J.-H., Jeong H.-G., Lee K.-B.** Output current ripple reduction algorithms for home energy storage systems // *Energies*. – 2013. – Vol. 6. – P. 5552–5569.
5. BU-907: testing lithium-based batteries // Battery University. – 2019. – September 30. – URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-907-testing-lithium-based-batteries> (accessed: 30.06.2021).
6. **Ale Ahmad A., Abrishamifar A., Samadi S.** Low-frequency current ripple reduction in front-end boost converter with single-phase inverter load // *IET Power Electronics*. – 2012. – Vol. 5 (9). – P. 1676–1683.
7. Analysis of battery current microcycles in autonomous renewable energy systems / A.J. Ruddell, A.G. Dutton, H. Wenzl, C. Ropeter, D.U. Sauer, J. Merten, C. Orfanogiannis, J.W. Twidell, P. Vezin // *Journal of Power Sources*. – 2002. – Vol. 112. – P. 531–546.
8. Patent US 7180275, B 2 G 05 F 1/62, H 02 M 3/156. DC-DC high frequency boost converter / Stefan Reithmaier. – N 11/115,524; date of patent 20.02.2007.
9. Patent “US 5414341, A H 02 M 3/10, G 05 F 1/563, H 02 M 3/158 S. DC-DC converter operable in an asynchronous or synchronous or linear mode / Alan E. Brown. – N 163,477; date of patent 09.05.1995.
10. State of charge control of the, mixed-type battery energy storage system, based on the modular multilevel converter / A. Dudin, T. Ellinger, J. Petzoldt, O. V. Nos // 17th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – Erlagol, Russia, 2016. – P. 395–400.
11. Создание высокотехнологичного производства систем бесперебойного питания и накопления электрической энергии большой мощности (грант, 218 постановление, НИОКТР, N02.G25.31.0194 от 27 апреля 2016 г.).
12. **Keil P., Jossen A.** Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life – an experimental study with different 18650 high-power cells // *Journal of Energy Storage*. – 2016. – Vol. 6. – P. 125–141.
13. **Zinoviev G., Udovichenko A.** The calculating program method of the integrated indicator of grid electromagnetic compatibility with consumers combination of non-sinusoidal currents / 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Novosibirsk, 2017. – P. 481–484.
14. Mathematical models for analysis of electromagnetic processes in thyristor circuits of AC voltage regulators / A.V. Udovichenko, E.V. Grishanov, S.V. Brovanov, M.A. Dybko // 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, Russia, 2018. – P. 6403–6409.

**DEVELOPMENT OF AN EFFECTIVE ACCUMULATOR
BATTERY WITH A VOLTAGE INVERTER
IN THE ELECTRIC ENERGY STORAGE UNIT**

Udovichenko A.V., Tokarev V.G., Grishanov E.V., Kuchak S.V.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The article proposes a matching device between an accumulator battery and a voltage inverter in electric energy storage systems based on a reversible DC-DC converter with improved weight, size and cost indicators. Lithium-ion batteries are subject to tough operational requirements. The discharge of such batteries is not recommended to exceed their three-fold capacity (C), while the charge is limited to 0.5C, and low-frequency ripple components should not be present in the charging current. These requirements can be fulfilled with the help of the proposed matching device which is characterized by smaller dimensions and cost achieved due to the choke unit.

The article proposes the calculation of the converter circuit and presents the simulation results obtained in the Psim simulation environment (the PowerSim environment). An economic assessment of the converter has been carried out.

Keywords: regulator, storage system, battery, choke, current ripple.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-43-52

REFERENCES

1. Dybko M.A., Brovanov S.V. Active power filter with battery energy storage based on NPC inverters. *2015 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, Erlagol, 2015, pp. 415–421.
2. *Tarifny na elektricheskuyu energiyu* [Electricity tariffs]. Available at: <https://www.nskes.ru/pomoshch-i-spravka/tarify/tarifny-na-elektricheskuyu-energiyu/> (accessed 30.06.2021).
3. *Liotekh. Litii-ionnye akkumulyatory* [Lithium-ion batteries]. Novosibirsk, 2017. Available at: <http://liotech.ru/newsection7159> (accessed 30.06.2021).
4. Park J.-H., Jeong H.-G., Lee K.-B. Output current ripple reduction algorithms for home energy storage systems. *Energies*, 2013, vol. 6, pp. 5552–5569.
5. BU-907: testing lithium-based batteries. *Battery University*, 2019, September 30. Available at: <https://batteryuniversity.com/article/bu-907-testing-lithium-based-batteries> (accessed: 30.06.2021).
6. Ale Ahmad A., Abrishamifar A., Samadi S. Low-frequency current ripple reduction in frontend boost converter with single-phase inverter load. *IET Power Electronics*, 2012, vol. 5 (9), pp. 1676–1683.
7. Ruddell A.J., Dutton A.G., Wenzl H., Ropeter C., Sauer D.U., Merten J., Orfanogiannis C., Twidell J.W., Vezin P. Analysis of battery current microcycles in autonomous renewable energy systems. *Journal of Power Sources*, 2002, vol. 112, pp. 531–546.
8. Reithmaier S. *DC-DC high frequency boost converter*. Patent US, no. 7180275, 2007.
9. Brown A.E. *DC-DC converter operable in an asynchronous or synchronous or linear mode*. Patent US, no. 5414341, 1995.
10. Dudin A., Ellinger T., Petzoldt J., Nos O. V. State of charge control of the, mixed-type battery energy storage system, based on the modular multilevel converter. *17th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM*, Erlagol, Russia, 2016, pp. 395–400.
11. Creation of high-tech production of uninterruptible power supply systems and high-power electric energy storage (grant, Resolution 218, R&D, N 02.G25.31.0194 of April 27, 2016). (In Russian).
12. Keil P., Jossen A. Charging protocols for lithium-ion batteries and their impact on cycle life – an experimental study with different 18650 high-power cells. *Journal of Energy Storage*, 2016, vol. 6, pp. 125–141.
13. Zinoviev G., Udovichenko A. The calculating program method of the integrated indicator of grid electromagnetic compatibility with consumers combination of non-sinusoidal currents. *2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, Novosibirsk, 2017, pp. 481–484.
14. Udovichenko A.V., Grishanov E.V., Brovanov S.V., Dybko M.A. Mathematical models for analysis of electromagnetic processes in thyristor circuits of AC voltage regulators. *2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Erlagol, Russia, 2018, pp. 6403–6409.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Удовиченко Алексей Вячеславович – родился в 1987 году, канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). Область научных интересов: энергоэффективные регуляторы переменного напряжения, плавный пуск двигателей, силовая электроника. Опубликовано 44 научных работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru).

Udovichenko Aleksey Vyacheslavovich (b. 1987) – Candidate of Sciences (Eng.), an associate professor at the Electronics and Electrical Engineering Department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on energy-efficient AC voltage regulators, soft-start of engines, and power electronics. He is the author of 44 research papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru).



Токарев Вадим Геннадьевич – 1967 года рождения, старший преподаватель кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Автор 5 научных работ. Область научных интересов: фильтры активной мощности, преобразователи источников напряжения, системы автоматизации и цифровая обработка сигналов. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: v.tokarev@corp.nstu.ru).

Tokarev Vadim Gennadievich (b. 1967) – He is a senior lecturer at the Computer Engineering Department, Novosibirsk State Technical University. He is a co-author of 5 research papers. His research interests include active power filters, voltage source converters, automation systems, and digital signal processing. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: v.tokarev@corp.nstu.ru).



Гришанов Евгений Валерьевич – 1988 года рождения, канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета, автор 11 научных работ. Область научных исследовательских интересов в настоящее время сосредоточена на системах генерации на основе NPC. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: e.grishanov@corp.nstu.ru).

Grishanov Evgeny Valerievich (b.1988) – Candidate of Sciences (Eng.). He is an associate professor at Computer Engineering Department, Novosibirsk State Technical University. He is the author of 11 research papers. His research interests are currently focused on generation systems based on NPC. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: e.grishanov@corp.nstu.ru).



Кучак Сергей Викторович – получил степень магистра электроники и микроэлектроники в Новосибирском государственном техническом университете, Россия, в 2014 году, старший преподаватель НГТУ. Область научных интересов: разработка устройств автономного питания. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kuchak.2012@corp.nstu.ru).

Kuchak Sergey Viktorovich received a Master's degree in Electronic and microelectronic from the Novosibirsk State Technical University, Russia, in 2014. Currently he is a senior lecturer at NSTU, Russia. His research interests include development of autonomic power supply devices. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kuchak.2012@corp.nstu.ru).

Статья поступила 27 мая 2021

Received May 27 2021

To Reference:

Udovichenko A.V., Tokarev V.G., Grishanov E.V., Kuchak S.V. Razrabotka effektivnogo soglasuyushchego ustroystva akkumulyatornoi bata-rei s invertorom napryazheniya v nakopitele elektricheskoi energii [Development of an effective accumulator battery with a voltage inverter in the electric energy storage unit]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 2 (51), pp. 43–52. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-2-43-52.