

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ БОРТОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА ОСНОВЕ ДВУХЗВЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С РАЗДЕЛЕННОЙ КОММУТАЦИЕЙ

В. В. ИВАХНО*, **В. В. ЗАМАРУЕВ**, **Б. А. СТЫСЛО**, **Л. В. ФЕТЮХИНА**, **В. Ю. ТИХОМИРОВ**

кафедра «Промышленная и биомедицинская электроника», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

**email: v-ivakhno@ukr.net*

АННОТАЦИЯ. В статье предложена реализация бортовой аккумуляторной системы накопления энергии железной дороги постоянного тока – усиливающего пункта, обеспечивающего регламентируемые параметры качества электрической энергии в контактной сети. Показана целесообразность применения согласующего преобразователя, обеспечивающего принцип разделенной коммутации с целью минимизации потерь переключения силовых ключей преобразователя. Обосновано размещение усиливающего пункта в непосредственной близости от потребителя – непосредственно на подвижном составе – на локомотиве либо в специальном прицепном вагоне. Дана оценка энергетических и массогабаритных параметров системы. Выполнены расчеты, позволяющие произвести выбор конкретных силовых ключей преобразователя. Определена оптимальная частота переключения силовых ключей преобразователя, обеспечивающая компромисс между габаритными свойствами магнитных элементов и потерями в магнитном материале. Дана оценка необходимой величины индуктивности рассеяния трансформатора, массы магнитных элементов и аккумуляторных батарей.

Ключевые слова: БСНЭ; усиливающий пункт; электроснабжения железной дороги; согласующий преобразователь; разделенная коммутация; ZVS; ZCS; алгоритм управления силовыми ключами; обратимый двухзвенный преобразователь

PERFORMANCE EVALUATION OF THE RAIL TRANSIT ON-BOARD BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM BASED ON TWO STAGE DC-DC CONVERTER WITH SEPARATED COMMUTATION

V. IVAKHNO*, **V. ZAMARUIEV**, **B. STYSLO**, **L. FETIUKHINA**, **V. TIKHOMYROV**

**Department “Industrial and biomedical electronics”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine*

ABSTRACT. The article proposes the implementation of the on-board battery system of energy accumulation of the DC rail - a reinforcing point that provides regulated parameters for the quality of electrical energy in the contact network. The expediency of using a matching converter, which provides the principle of separate commutation, in order to minimize the loss of switching of the power keys of the converter, is shown. The location of the reinforcement point in the immediate vicinity of the consumer - directly on the rolling stock - on a locomotive or in a special trailer car is substantiated. The energy and mass parameters of the system are estimated. The calculations are made to make the choice of specific power keys of the converter. The optimal frequency of switching of the power keys of the converter is determined, which provides a compromise between the overall properties of the magnetic elements and the losses in the magnetic material. The necessary value of transformer scattering inductance, mass of magnetic elements and batteries is estimated.

Keywords: BESS; Additional power station; electricity supply to the railway; matching converter; split switching; ZVS; ZCS; power key management algorithm; reversible two-link converter

Введение

Одной из тенденций развития современных систем электроснабжения, использующих линии постоянного тока, например, железная дорога (ЖД), FREEDM, различные варианты Microgrid, является присутствие в составе таких систем аккумуляторных батарей (АБ). Батарейные системы накопления энергии (БСНЭ, или Battery Energy Storage System – BESS) в составе системы электроснабжения железной дороги могут запасать электроэнергию при рекуператив-

ном торможении подвижного состава и отдавать ее в питающую контактную сеть (КС) при его разгоне [1]. Буферные свойства БСНЭ позволяют, кроме очевидного повышения к.п.д. системы, также обеспечивать достаточную жесткость напряжения КС [1], что является важным требованием качества системы электроснабжения железных дорог [2].

БСНЭ подключается к КС через согласующий преобразователь (СП); СП должен обладать

свойством обратимости потока энергии – от КС к АБ и наоборот [3]. В связи с требованиями гальванической развязки и обратимости СП строится по принципу обратимого двухзвенного преобразователя постоянного напряжения – DC/DC конвертора, или Isolated Bidirectional DC–DC Converters – IBDC [4, 5].

В таком IBDC каждое из двух звеньев СП представляет собой структуру автономного инвертора (АИ), причем зажимы постоянного тока для одного из звеньев (например, первичного звена) подсоединены к АБ, а другого (вторичного) – к нагрузке (в данном случае – КС), обладающей свойством источника напряжения. Согласующий трансформатор (СТ), подключенный к выводам переменного тока звеньев СП, осуществляет гальваническую развязку АБ и КС, а также согласование уровней напряжений АБ и КС. Очевидно, с повышением частоты преобразования СП появляется возможность уменьшить габариты и массу СТ. С другой стороны, с ростом частоты преобразования растет и величина удельных потерь магнитопровода СТ, что ограничивает возможность снижения габаритов СТ. С ростом частоты преобразования растут также и коммутационные потери силовых полупроводниковых ключей (СПК) АИ обоих звеньев (в силу ограниченности их частотных свойств), поэтому выбор частоты преобразования является важной задачей, влияющей на технические и экономические характеристики БСНЭ. На эти характеристики также оказывают существенное влияние и свойства самих АБ, связанные с их технологией: безопасность эксплуатации, экологичность, энергетическая эффективность, допустимое число циклов заряд – разряд, время заряда, удельные показатели энергоемкости, частотные свойства и др. В [6] приведен сравнительный анализ основных характеристик АБ различных технологий; для работы в составе БСНЭ одними из наиболее эффективных являются АБ на основе литий-феррум-полимерных (LiFePO₄) элементов [7].

В [7] также указывается, что БСНЭ (АБ плюс СП), то есть усиливающий пункт, может быть размещен: а) стационарно – непосредственно на тяговой подстанции (Traction Substations – TS) и/или между соседними либо б) непосредственно на подвижном составе (на локомотиве либо в специальном прицепном вагоне – как показано на рис. 1. Второй вариант может быть предпочтителен, исходя из следующих соображений:

- существенно повышается жесткость напряжения КС, поскольку уменьшается влияние основной причины «просадки» напряжение КС – падения на проводах от подстанции до локомотива;

- возрастает коэффициент использования оборудования БСНЭ, поскольку в стационарном варианте, при отсутствии состава между подстанциями, оборудование БСНЭ не работает;

- вагон с БСНЭ включают в состав поезда лишь при необходимости (для составов большой массы, на участках со «слабой» КС и т.п.);

- для бортовой БСНЭ, в сравнении с необслуживаемой БСНЭ (в т.ч. расположенной между соседними подстанциями) можно обеспечить принудительное охлаждение силовых компонентов, в т.ч. СТ, уменьшив массу СТ и охладителей СПК СП.

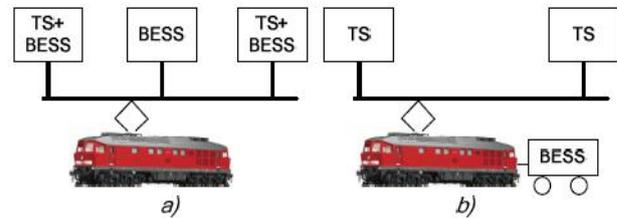


Рис. 1 - Варианты размещения БСНЭ ЖД: а) - стационарно; б) - на подвижном составе

Применительно к КС ЖД, имеющей величину напряжения КС U_{out} в диапазоне: минимальное напряжение $U_{out min}=2$ кВ, максимальное напряжение $U_{out max}=4$ кВ, номинальная величина $U_{out N}=3,3$ кВ, очевидно, управляемые СПК АИ вторичного звена должны быть достаточно высоковольтными. В данной работе в качестве таковых предполагается использование биполярных транзисторов с изолированным затвором – IGBT с обратными диодами. В настоящее время максимальная величина предельного напряжения доступных серийных IGBT основных производителей составляет 6,5 кВ. При разработке IBDC особое внимание уделяют специальным технологиям снижения коммутационных потерь СПК, что позволяет повысить частоту преобразования и, следовательно, уменьшить габариты и массу СТ. Известны большое число различных схем IBDC и алгоритмов управления их СПК [5, 8]. В ряде работ [9-11] предлагается и описывается схема, а также алгоритмы управления СПК IBDC на базе гибридной структуры (рис. 2).

Первичное звено такого СП – мостовой инвертор напряжения (ИН) на IGBT с обратными диодами, шунтированными конденсаторами снабберов выключения транзисторов; вторичное звено – инвертор тока (ИТ) (характерным признаком которого является, в частности, присутствие дросселя в цепи постоянного тока) на IGBT с обратными диодами, причем последовательно со вторичной обмоткой СТ T установлен четырехквадрантный ключ (FQS) на встречно-последовательно соединенных IGBT, а роль снабберов включения СПК выполняет индуктивность рассеяния трансформатора.

Специальный алгоритм так называемой разделенной коммутации обеспечивает согласованное управление ключами обоих звеньев так, что включение ключей ИН естественное, с отсутствием коммутационных потерь (в нулях напряжения – Zero Voltage Switching, ZVS); выключение ключей ИТ также естественное (в нулях тока – Zero Current Switching, ZCS).

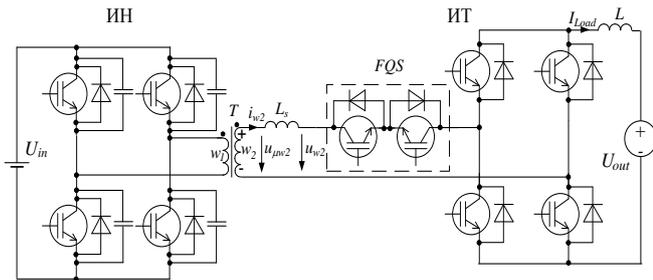


Рис. 2. - Схема СП на базе IBDC с разделенной коммутацией и дополнительным четырехквadrантным ключом в звене инвертора тока

Выключение транзисторов ИН принудительное; наличие снабберных конденсаторов ограничивает коммутационные потери выключения. Включение управляемых СПК ИТ принудительное; индуктивный снаббер (индуктивность рассеяния L_s) ограничивает потери включения. Предполагается, что выбором величин емкостей снабберов выключения и величины индуктивности рассеяния L_s можно снизить величины динамических потерь СПК звеньев (выключения для ИН и включения для ИТ) при определенной частоте преобразования до величин, существенно (примерно на порядок) меньших в сравнении со статическими потерями этих СПК. Алгоритмы переключения СПК СП в режиме передачи энергии от звена ИН с напряжением U_{in} (АБ) к звену ИТ с напряжением U_{out} (КС) (в прямом направлении) подробно описаны в [10], в обратном – в [11]. Работа СП в прямом направлении передачи энергии подобна работе понижающего преобразователя постоянного напряжения, в обратном – повышающего.

Цель работы

Целью данной работы является оценка ряда показателей и параметров компонентов СП по схеме рис. 2 в составе бортовой БСНЭ (Рис. 1, б) с целью выяснения возможности и целесообразности такого решения. Искомыми показателями и параметрами будут: целесообразная величина частоты преобразования, типы доступных серийных СПК, марка ферромагнитного материала сердечника СТ, оценка массы СТ и выходного дросселя звена ИТ; оценка потерь и характеристик температурного режима СТ, необходимой и фактической величины индуктивности рассеяния СТ, массы АБ. На основании этих оценок можно будет сделать вывод о перспективности данного подхода к построению бортовых БСНЭ ЖД.

Выбор типов СПК СП и оценка номинальной мощности СП

В [3, 13] обоснована целесообразность решения СП, в котором высоковольтное вторичное звено, подключенное своим выходом к КС, строится на базе ИТ; в этом случае выключение СПК звена ИТ будет в режиме ZCS (потери выключения отсутствуют). При использовании альтернативного варианта (высоко-

вольтное звено строится на базе ИН, при этом выключение СПК принудительное с помощью емкостных снабберов) придется считаться с эффектом «хвоста» тока IGBT: путем увеличения емкости снабберного конденсатора можно добиться снижения коммутационных потерь выключения до величины лишь примерно вдвое меньшей, чем при безснабберной коммутации [12]. В [13] дана оценка величины «критической» частоты преобразования, выше которой суммарные статические и динамические потери выключения ключей ИН в режиме ZVS со снабберной коммутацией в СП превышают статические потери ключей ИТ на основе IGBT с последовательным диодом в режиме ZCS. Для IGBT класса 1200 В эта частота 10-20 кГц, для класса 6,5 кВ – примерно 560 Гц. Установив величину частоты преобразования f на уровне выше «критической» для высоковольтных ключей, а именно, 1000 Гц (дополнительное обоснование этой величины будет дано ниже).

Чтобы получить выгоду при принудительном выключении СПК ИН, целесообразно использовать в звене ИН относительно низковольтные и, следовательно, «быстрые», широко распространённые IGBT класса 1200 В. Установив примерно двойной запас по напряжению СПК относительно входного напряжения ИН, т.е. напряжения АБ, получим требуемую величину номинального напряжения АБ: примерно 600 В ($U_{inN}=600$ В). Тогда можно дать оценку величине коэффициента трансформации:

$$K_T = w_2/w_1 = U_{out\ max}/U_{inN} = 6,67.$$

Будем считать, что пульсации тока выходного дросселя L ИТ (тока нагрузки I_{Load}) малы. Рассмотрим модуль с минимальной установленной мощностью СПК. Выберем в качестве СПК ИТ IGBT-модуль типа FZ250R65KE3 от Infineon [14] с предельным напряжением коллектора $V_{CES}=6,5$ кВ и номинальным током коллектора $I_{Cnom}=250$ А (одни из наименее «токовых» приборов данного класса среди доступных приборов основных производителей) и установим величину тока дросселя I_{Load} (т.е. амплитуду токов СПК звена ИТ) на уровне $I_{Load}=I_C=200$ А. Тогда получим оценку номинальной мощности P_{out} СП и, следовательно, трансформатора: $P_{out} = U_{outN} \cdot I_C = 660$ кВт.

Исходя из амплитуды тока первичной обмотки I_{w1m} величиной $I_{w1m} = I_{w2m} \cdot K_T = 200 \cdot 6,67 = 1330$ А, выберем в качестве трансисторов звена ИН IGBT-модули типа FZ1800R12HE4_B9 от Infineon [15] с предельным напряжением коллектора $V_{CES}=1200$ В и номинальным током коллектора $I_{Cnom}=1800$ А. На основании методики, приведенной в [16], можно показать, что при выбранных приборах звена ИН и частоты f доля динамических потерь выключения СПК ИН по отношению к статическим составляет величину менее 7% и для оценок этой величиной можно пренебречь (а в случае необходимости уточненных оценок – учесть эту долю).

На рис. 3 представлены упрощенные диаграммы тока i_{w2} вторичной обмотки, напряжения ЭДС вто-

ричной обмотки u_{w2} и напряжения u_{w2} вторичной обмотки при передаче энергии от звена ИН в КС при номинальной величине выходного тока и напряжения КС. Длительностью коммутационных интервалов в звене ИН пренебрегаем (поскольку потери выключения ключей ИН пренебрежимо малы).

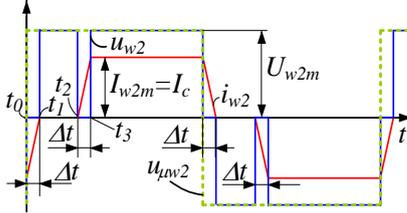


Рис. 3 - Упрощенные диаграммы тока и напряжений вторичной обмотки трансформатора

Длительность коммутационных интервалов Δt спада и нарастания тока i_{w2} определяется величиной индуктивности рассеяния L_S трансформатора T , приведенной к обмотке w_2 , величиной коммутируемого тока I_C и напряжения u_{w2} :

$$U_{w2m} = U_{in} N \cdot K_T = U_{out \max}; \Delta t = L_S \cdot I_{w2m} / U_{w2m}. \quad (1)$$

На интервалах Δt напряжение u_{w2} равно нулю и энергия в нагрузку не передается. Если пренебречь длительностями интервалов Δt , то напряжение трансформатора имеет форму меандра, а токи обмоток (и ключа FQS) имеют прямоугольную форму. В номинальном режиме коэффициент заполнения импульса тока D будет иметь величину $D = U_{out} / U_{out \max} = 0,825$.

Оценка основных параметров СТ

Определяющее влияние на характеристики трансформаторов оказывает выбор типа магнитного материала. При частоте преобразования около 1 кГц и мощности трансформатора около 660 кВт, очевидно, что в качестве материала сердечника не целесообразно принимать феррит – речь может идти лишь о ленточных материалах – электротехнических сталях (ЭТС) либо магнитных материалах типа аморфных сплавов. В дальнейшем будем рассматривать в качестве материала сердечника ленту из ЭТС толщиной 0,15 мм производства Arnold Magnetic Technologies: характеристики для синусоидального напряжения частот 400 и 800 Гц представлены в [17, 18] соответственно (близкие характеристики имеет ЭТС Э360 [19]).

Для определения удельных потерь в ферромагнитном материале, как правило, используется формула Бертогги [20]. В рамках феноменологического принципа, известного как разделение потерь, в первом приближении (без учета дополнительных потерь), удельные потери могут определяться как сумма потерь на гистерезис P_{zc} и вихревые токи $P_{вх}$, причем первые зависят от частоты линейно, а вторые – квадратично:

$$P_y = P_{zc} + P_{вх} = \kappa_1 \cdot f + \kappa_2 \cdot f^2. \quad (2)$$

В [21] вводится понятие граничной частоты $f_g = \kappa_1 / \kappa_2$, при которой имеет место равенство удельных потерь на гистерезис и вихревые токи. При ее достижении начинается быстрое сокращение эффекта, получаемого от повышения частоты (снижение габаритов и массы трансформатора при тех же условиях охлаждения) и в пределе, при $f \rightarrow \infty$, эффект вовсе исчезает [21]. Следовательно, целесообразность повышения частоты выше граничной является сомнительной.

Для оценки величины частоты f_g для выбранного материала сердечника, исходя из справочных данных [17, 18], для определенной величины амплитуды индукции B_m (например, 0,5 Тл) можно найти величины удельных потерь для двух различных частот f_1 и f_2 (400 и 800 Гц): $P_y(f_1) = 2,51$ Вт/кг и $P_y(f_2) = 6,6$ Вт/кг. При известных значениях частот и величин удельных потерь, решив для частот f_1 и f_2 систему из двух уравнений (2) относительно неизвестных κ_1 и κ_2 , можно получить значение граничной частоты $f_g = \kappa_1 / \kappa_2 = 862$ Гц. Аналогичная процедура для тех же частот, но амплитуды индукции $B_m = 1$ Тл дает $f_g = \kappa_1 / \kappa_2 = 755$ Гц. Для оценки величины граничной частоты можно принять среднюю величину – примерно 800 Гц.

Для оценки массогабаритных параметров СТ воспользуемся методикой, изложенной в ряде работ с участием авторов, например, [22] (основанной на методике [19]). Данная методика предполагает синусоидальность токов и напряжений трансформатора, тогда как фактическое напряжение при $\Delta t \rightarrow 0$ имеет форму меандра, а токи обмоток прямоугольную форму. Воспользуемся методом эквивалентной синусоиды [23], которая предполагает замену фактических токов и напряжений на синусоидальные. Частота f_s эквивалентной синусоиды напряжения U_2 составит величину $f_s = f \cdot (\kappa_\phi / \kappa_{\phi c})^2 = 812$ Гц, где κ_ϕ и $\kappa_{\phi c}$ – коэффициенты формы меандра и синусоиды соответственно.

Видно, что выбранная фактическая частота соответствует эквивалентной, практически совпадающей с граничной.

В качестве сердечника трансформатора выберем, в соответствии с рекомендациями [19], сердечник стержневой конструкции с относительными по отношению к ширине стержня a размерами: $b^* = b/a = 2$, $c^* = c/a = 1,6$, $h^* = h/a = 5$, где a – ширина стержня, b – толщина стержня, c – ширина окна, h – высота окна.

Исходя из задаваемых параметров: мощности трансформатора $S = P_{out} = 660$ кВт, плотности электротехнической стали $\gamma_c = 7600$ кг/м³, коэффициента теплоотдачи $\alpha = 12$ Вт/(°C·м²), допустимого перегрева поверхности $\tau_n = 60^\circ$, коэффициентов заполнения катушки $\kappa_k = 0,3$ и сердечника $\kappa_c = 0,9$, коэффициента формы синусоидального напряжения и тока $\kappa_{\phi c}$, частоты f_s , относительных величин сечения сердечника $F_{sc}^* = a \cdot b / a^2 = b^*$ и окна $F_{ок}^* = c \cdot h / a^2 = c^* \cdot h^*$, а также величины удельных потерь в материале сердечника $P_c = 22$ Вт/(кг·Тл²) для частоты 800 Гц, удельного сопротивления материала обмоток $\rho = 2,1 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (медь), относительных величин площадей охлаждения и объе-

мов сердечника Π_c^* , V_c^* и катушки Π_k^* , V_k^* можно найти оценки для базисного размера a :

$$a = 3 \sqrt{\frac{S}{2\kappa_c \kappa_c \kappa_\phi f_\phi \kappa_g \kappa_j F_c^* F_{ок}^*}} = 0,14 \text{ м}, \quad (3)$$

где

$$\kappa_g = \sqrt{\frac{\alpha \tau_n \Pi_c^*}{P_y \cdot \gamma_c \cdot V_c^* \cdot k_c}} = 0,07, \quad \kappa_j = \sqrt{\frac{\alpha \tau_n \Pi_k^*}{\rho V_k^* \kappa_k}} = 4,32 \cdot 10^5, \quad (4)$$

а также оценки для амплитуды индукции B_m и плотности тока j :

$$B_m = \kappa_g / a^{1/2} = 0,188 \text{ Тл}, \quad j = \kappa_j / a^{1/2} = 1,17 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2; \quad (5)$$

число витков обмотки $w_2=156$, масса сердечника $m_c=711$ кг, масса катушки $m_k=543$ кг (общая масса трансформатора m_T 1250 кг), потери в сердечнике $P_c=554$ Вт, потери в катушке $P_k=1670$ Вт (суммарные в трансформаторе P_T 2220 Вт).

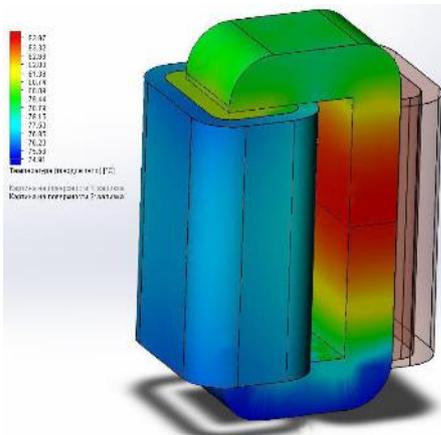


Рис. 4 - Результаты теплового моделирования трансформатора

Моделирование тепловых процессов в СТ с использованием пакета *SolidWorks / Flow Simulation* (рис. 3) для естественного охлаждения показало хорошее совпадение с результатами аналитических расчетов: при температуре окружающей среды 20° и задаваемом перегреве 60° получена примерно такая же температура наружной части сердечника, а температура на внутренней поверхности стержня – не выше 84°.

Оценка и обеспечение целесообразной величины индуктивности рассеяния трансформатора

Величина индуктивности рассеяния L_s , приведенной ко вторичной обмотке (см. рис. 2) играет важную роль.

Когда транзистор FQS (например, левый по схеме рис.2) в момент t_2 (рис. 3) начинает включаться, его энергия включения E_{on} определяется величинами заряда обратного восстановления (Q_{rr}) выключающихся обратных диодов [24] инверторных стоек звена ИТ (в данном случае - левого нижнего и правого верхнего) (эффект сквозного тока) как произведение коммутируемого напряжения на заряд. Известно, что величина Q_{rr} зависит от величины коммутируемого тока, а также от скорости спада тока диода [24]: при

уменьшении скорости спада тока диода и, соответственно, скорости нарастания тока транзистора $I_{w2m}/\Delta t$, величина энергии включения транзистора уменьшается. Ограничение скорости нарастания тока включающегося транзистора и выключающихся диодов обеспечивается снаббером включения - индуктивностью рассеяния L_s .

Согласно спецификации СПК FZ250R65KE3, при принудительном («жестком») включении на номинальный ток $I_{Cnom}=250$ А при коммутируемом напряжении 3,6 кВ и номинальной скорости нарастания тока $(di/dt)_{nom}=625$ А/мкс, энергия включения $E_{on(nom)}$ составляет 2,2 Дж. В первом приближении примем, что с уменьшением di/dt потери E_{on} пропорционально уменьшаются. Необходимо уменьшить среднюю мощность потерь при включении $P_{on(nom)}=f \cdot E_{on(nom)}$ до значения, которое существенно, например, в десять раз, меньше, чем суммарные статические потери в транзисторе и диоде FQS, то есть до величины $P_{on}=0,1 \cdot (V_{CE sat} + V_F) \cdot I_{Cnom} D$, где: $V_{CE sat}=3,7$ В и $V_F=2,95$ В - падение напряжения на транзисторе и диоде при токе I_{Cnom} , $D=0,5$ - максимальное значение рабочего цикла импульса тока транзистора.

Величина K необходимого уменьшения потерь составит $K=P_{on(nom)}/P_{on}=26$, для чего следует снизить di/dt в K раз (до 24 А/мкс). Последнее, в соответствии с (1), дает минимально необходимую величину $L_s > 150$ мкГн и $\Delta t > 8,3$ мкс. Общая длительность четырех интервалов Δt , в течение которых энергия в нагрузку не передается, составит около 35 мкс - лишь 3,5% периода. Без существенного ухудшения эксплуатационных и энергетических характеристик эту продолжительность можно увеличить до 10%, что соответствует $\Delta t=25$ мкс, $L_s=500$ мкГн. Тогда имеем оценку разумного значения L_s : $150 \text{ мкГн} \leq L_s \leq 500 \text{ мкГн}$.

На основании методики [21] была дана оценка величины индуктивности L_s трансформатора, описанного выше: $L_s=864$ мкГн, что значительно превышает допустимую величину. Определение величины L_s проводилось также при помощи специализированного пакета имитационного моделирования электромагнитных полей *Ansys Maxwell* и показало близкий, но неприемлемый результат: $L_s=686$ мкГн (отличие 19%).

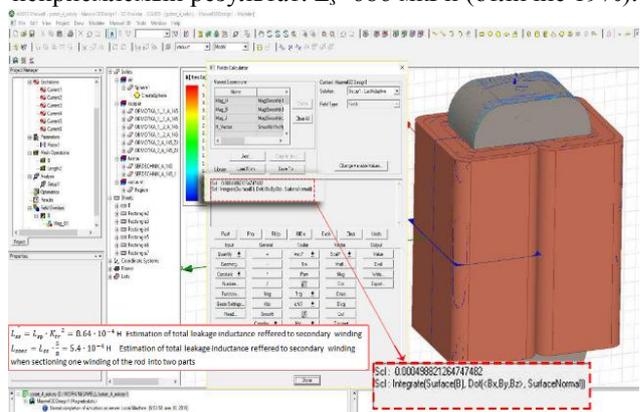


Рис. 5 - Окно результата определения индуктивности рассеяния трансформатора с секционированными обмотками

Известно [22], что одним из способов снижения индуктивности рассеяния трансформаторов является секционирование обмоток: одну из обмоток каждого стержня, например, вторичную, следует разделить на две с вдвое меньшим числом витков и расположить катушки, начиная от стержня так: половина вторичной, первичная, половина вторичной. Тогда индуктивность рассеяния снизится почти вдвое (точнее, составит 5/8 исходной, т.е. 540 мкГн). Моделирование в пакете *Ansys Maxwell* показало приемлемый результат - 498 мкГн (см. рис.4 - совпадает с максимально допустимой величиной 500 мкГн).

Оценка массы выходного дросселя

Для дросселя такой же конструкции, что и трансформатор, она может быть проведена на основе тех же выражений (3, 4). При этом учтем, что при той же частоте масса и объем такого элемента будут пропорциональны установленной мощности - произведению действующего тока и действующего напряжения.

Поскольку основная функция дросселя - подавление пульсаций тока, расчет следует проводить для режима максимального коэффициента его пульсаций - для режима минимальной величины напряжения КС $U_{out\ min}=2$ кВ, что соответствует величине коэффициента заполнения импульса тока вторичной обмотки СТ $D=0,5$. Тогда, очевидно, напряжение дросселя будет иметь форму меандра с амплитудой вдвое меньшей напряжения вторичной обмотки u_{w2} . Поскольку в номинальном режиме действующий ток дросселя мало отличается от действующего тока вторичной обмотки, сумма вторичного и приведенного первичного токов трансформатора будет вдвое больше тока дросселя. Поэтому для оценки можно считать, что установленная мощность дросселя примерно в 4 раза меньше мощности трансформатора и следует ожидать, что масса дросселя примерно в 4 раза будет меньше массы трансформатора, т.е. около 550 кг. Подробный расчет и анализ характеристик дросселя не входят в цели данной работы.

Оценка массы аккумуляторной батареи

В случае установки БСНЭ непосредственно на тяговом составе, определяющим критерием являются массогабаритные параметры батареи. В данной статье исходными данными для оценки массы накопителя являются результаты реальных экспериментальных исследований на конкретном участке ЖД [26].

На рис. 5 приведены осциллограммы тока, потребляемого тяговым составом и соответствующее значение напряжения на пантографе электровоза в течение всего интервала движения (190 км) [25].

Для определения суммарной необходимой емкости накопителя, воспользуемся следующими допущениями: на интервалах времени, где наблюдается просадка уровня напряжения КС ниже допустимого значения (2900 В), в КС с выхода СП (своим входом

подключенного к АБ) протекает постоянный ток величиной 200 А (номинальный выходной ток СП); на прочих интервалах времени БСНЭ не получает заряд от КС.

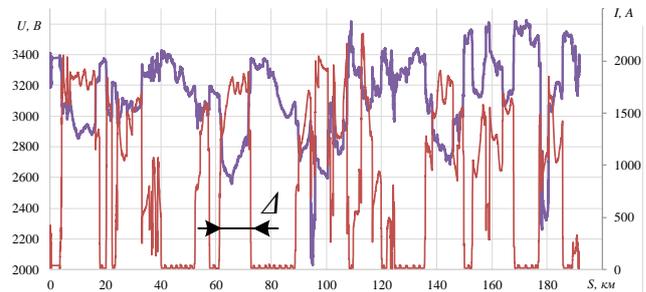


Рис. 6 - Осциллограммы тока и напряжения КС

Такие допущения позволят дать оценку необходимой емкости аккумуляторной батареи для наихудшего режима работы - отсутствия режима рекуперации.

Необходимая ёмкость аккумуляторной батареи C_p в режиме разряда может быть определена путем численного интегрирования функции тока, потребляемого СП от аккумуляторного пункта подпитки (АПП):

$$C_p = dt \cdot \sum_{j=1}^N i_{АПП_j}, \quad (5)$$

где C_p - емкость аккумуляторной батареи, А·ч; dt - шаг интегрирования (период дискретизации выборок), ч; j - номер выборки тока; N - общее количество выборок; $i_{АПП}$ - мгновенное значение тока аккумуляторного пункта подпитки.

Значение емкости C_p , определенное по выражению (5) для экспериментальных данных (рис. 5) с шагом дискретизации 1 сек. составляет 285 А·ч. С учетом коэффициента трансформации согласующего трансформатора K_T , фактическая величина ёмкости накопителя должна быть увеличена в K_T раз:

$$C_p = 285 \cdot 6,67 = 1900 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Определим необходимую установленную мощность АБ для обеспечения рассмотренных условий: пусть расчетная емкость составляет 2000 А·ч. При номинальном значении напряжения на АБ $U_{in N}=600$ В, необходимое значение энергии составит

$$W_{АКБ} = C_p \cdot U_{in N} = 2000 \cdot 600 = 1,2 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

В реальном случае, процессы разряда и заряда АБ будут чередоваться. Для выбранного участка ЖД энергии рекуперации и кондиционирования КС близки, поэтому емкость батареи может быть существенно снижена. Фактически, граничной величиной минимально необходимой емкости является C_{\min} :

$$C_{\min} = \int_0^{\Delta} i_{АПП} dt,$$

где Δ – длительность максимального интервала просадки напряжения.

Для экспериментальных данных рис. 5, значение Δ составляет 20 мин. (интервал между 1,5 и 2 ч.). Тогда, с учетом K_T , минимальная емкость накопителя составит 665 А·ч, а его энергия – 400 кВт·ч;

В работе [7] показана целесообразность применения LiFePO₄ аккумуляторных батарей в составе усиливающих пунктов тяговых подстанций. Типовым значением удельной массы АБ данного типа является 1 кг/140 Вт·ч [26]. Исходя из полученных данных, можно дать оценку массы накопителя: масса накопителя, обеспечивающего полную компенсацию просадки составит 9000 кг, а с учетом режима рекуперации, масса накопителя может быть уменьшена до 3000 кг.

Полученные значения массы являются минимально необходимыми. При их расчете не учтены требования к режимам работы накопителей. Рекомендуемая допустимая глубина разряда АБ составляет до 40% [26]. Следовательно, расчетная масса АБ должна быть соответственно (в 2,5 раза) увеличена до 22500 кг. Таким образом, масса накопителя является определяющей в БСНЭ, а с учетом массы СП общая масса БСНЭ может составить от 11 до 25 т, что позволит его выполнить в бортовом исполнении.

Выводы

1. С целью обеспечения регламентируемых параметров сети электроснабжения железной дороги, рекомендуется использование бортовой батарейной системы накопителей электрической энергии. Их применение требует использования специализированных согласующих преобразователей для обеспечения двухстороннего обмена энергией между батарейной системой и КС. Потери в силовых ключах преобразователя могут быть существенно ограничены при реализации алгоритма разделенной коммутации. Проведена предварительная оценка параметров согласующего преобразователя с использованием IGBT-модулей типа FZ250R65KE3 и FZ1800R12HE4_V9 от *Infineon*. Номинальное напряжение АБ согласовано с величиной рабочего напряжения низковольтных IGBT-модулей (600 В). Номинальная мощность преобразователя составляет 660 кВт. Динамические потери выключения СПК ИН по отношению к статическим составляют величину менее 7%.

2. Проведенные оценки позволили определить частоту переключения силовых ключей преобразователя на уровне 1 кГц, что соответствует компромиссу между габаритами магнитных элементов и потерями в них.

3. Произведена оценка массы согласующего трансформатора (1250 кг), силового дросселя (550 кг), требуемой индуктивности рассеяния согласующего

трансформатора (150 ... 500 мкГн). Показано, что требуемая величина индуктивности рассеяния может быть получена при секционировании обмоток.

4. На основе экспериментальных исследований определена необходимая энергоемкость накопителя для полной (без учета энергии рекуперации) либо частичной компенсации провалов напряжения в контактной сети. Для рассматриваемого участка электроснабжения она составляет 1,2 и 0,4 МВт·ч соответственно.

5. Показано, что масса мобильного усиливающего пункта, в основном, определяется массой аккумуляторных накопителей – 9000 кг при полном использовании емкости накопителей. Обеспечение рекомендуемой глубины разряда аккумуляторов до 40%, приводит к увеличению их массы в 2,5 раза до 22500 кг. Суммарное значение массы устройства от 11 до 25 т позволяет выполнить его в бортовом исполнении.

Список литературы

1. **Zhaofeng Li; Shunichiro Hoshina and others.** Development of DC/DC Converter for Battery Energy Storage Supporting Railway DC Feeder // *IEEE Transactions on Industrial Applications*. 2016, V.52, p. 4218 – 4224 DOI: [10.1109/TIA.2016.2582724](https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2582724)
2. **Sychenko V.** Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current. Sychenko V., Bosiy D., Kosarev E. // *The archives of transport. Volume 35, Issue 3*, 2015, p. 63-70.
3. **Ивахно В.В., Замаруев В.В., Стысло Б.А., Блинов А.Б.** Ассиметричный согласующий DC/DC преобразователь для систем электроснабжения с накопителями электрической энергии *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: новые решения в современных технологиях. Харьков : НТУ «ХПИ». – 2018. №26 (1302). Т.1. – С. 48-56. doi:10.20998/2413-4295.2018.26.07
4. **Inoue S.** A bidirectional dc-dc converter for an energy storage system with galvanic isolation / S. Inoue, H. Akagi // *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 6, pp. 2299–2306, Nov. 2007. DOI: [10.1109/TPEL.2007.909248](https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.909248)
5. **Zhao B.** Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC–DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System / B. Zhao, Q. Song, W. Liu, Y. Sun // *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 8, pp. 4091 – 4106, Aug. Nov. 2014
6. **A. Chih-Chiang Hua, B. Zong-Wei Syue** “Charge and Discharge Characteristics of Lead-Acid Battery and LiFePO₄ Battery” *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA* -. Sapporo, Japan 21-24 June 2010 pp. 1478 - 1483. doi:10.1109/ipecc.2010.5544506
7. **E. Sokol; V. Zamaruiev; S. Kryvosheev; B.Styslo; V. Makarov** “The specificity of electrical energy storage unit application” *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) 29 May-2*

- June 2017 Kiev, Ukraine pp. 432 - 435 DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100524
8. **M. Forouzes, Y. Siwakoti, S. Gorji, F. Blaabjerg, and B. Lehman.** "Step-Up DC-DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications" *IEEE transactions on power electronics*, vol. 32, no. 12, december 2017 pp. 9143- 9178 doi: 10.1109/tpe.2017.2652318
 9. **Kosenko R.** Full soft-switching high step-up current-fed DC-DC converters with reduced conduction losses / R. Kosenko, O. Husev, A. Chub // *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, Riga, 2015, pp. 170-175 DOI: 10.1109/PowerEng.2015.7266313
 10. **Ivakhno V.** Bidirectional Isolated ZVS DC-DC Converter with Auxiliary Active Switch for High-Power Energy Storage Applications / V. Ivakhno, V. Zamaruiev, B. Styslo, R. Kosenko, A. Blinov // *2017 IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON) CONFERENCE PROCEEDINGS* May 29 – June 2, 2017 Kyiv, Ukraine pp. 589 - 592 DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100315
 11. **Y. Sokol** Full soft switching dual DC/DC converter with four-quadrant switch for systems with battery energy storage system / Y. Sokol; V. Ivakhno; V. Zamaruiev; B. Styslo // *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* 10-14 Sept. 2018 Kharkiv, Ukraine Page s: 155 - 160 DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559490
 12. **Naayagi R.T** Investigating the effect of snubber capacitor on high power IGBT tum-off / R.T. Naayagi, R. Shuttleworth, Forsyth // *1st International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 2011, pp.50-55, Jan. 2011 doi: 10.1109/ICEES.2011.5725301
 13. **Ивахно В.** О «критической» частоте преобразования двухзвенных преобразователей постоянного напряжения со звеном на основе инвертора тока / В.В. Замаруев, Б.А. Стысло и др. // *Електротехніка і електромеханіка – Харків: 2016. Спец. випуск №4(1) Том 1. с. 31-36.*
 14. DataSheet FZ250R65KE3 [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FZ250R65KE3-DS-v03_00-en_de.pdf?fileId=db3a3043382e8373013895a5f3f6169f
 15. DataSheet FZ1800R12HE4_B9 [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FZ1800R12HE4_B9-DS-v02_04-EN.pdf?fileId=db3a30433e4143bd013e46c6e7e2411b
 16. **Сокол Є.І.,Ивахно В.В.,Замаруев В.В. Стисло Б.О.** Сравнение показателей эффективности различных схем двухзвенных обратимых преобразователей с разделенной коммутацией с четырехквadrантными ключами в силовом коммутаторе звена инвертора тока. *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017, 27 (1249). – с. 171-176.
 17. <https://www.arnoldmagnetics.com/wpcontent/uploads/2017/10/6-Mil-Grain-Oriented-Silicon-Steel-Hysteresis-Curve-at-400Hz.pdf>
 18. <https://www.arnoldmagnetics.com/wpcontent/uploads/2017/10/6-Mil-Grain-Oriented-Silicon-Steel-Hysteresis-Curve-at-800Hz.pdf>
 19. **Бальян Р. Х.** Трансформаторы для радиоэлектроники. М.: Советскоерадио, 1971, 720 с.
 20. **G. Bertotti,** "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 1, pp. 621-630, Jan. 1988. doi: 10.1109/20.
 21. **Сокол Е.И.** Применение однофазного переменного тока повышенной частоты в низковольтных распределительных сетях электроснабжения/Сокол Е.И., Гончаров Ю.П., Ивахно В.В., Замаруев В.В., Лобко А.В., Войтович Ю.С., Опанасенко Е.И. // *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск 2013 р.* – Київ: Інститут електродинаміки НАН України. -2013. - С. 128-135
 22. **Гончаров Ю.П., Ересько А.В., Замаруев В.В., Ивахно В.В., Чернетченко М.А.** Характеристики однофазных трансформаторов при передаче напряжений и токов повышенной частоты квазипрямоугольной формы//*Технічна електродинаміка Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1. -К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2010. С. 81-84*
 23. *Перетворювальна техніка. Ч2. За редакцією В.С.Руденка.* - Харків: Фоліо, 2000 – 300 с.
 24. AN5028 Application note https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group0/2b/f3/cc/22/81/d3/4d/89/DM00380483/files/DM00380483.pdf/jcr:content/translations/en.DM00380483.pdf
 25. **Y. Sokol; V. Ivakhno; V. Zamaruiev; B. Styslo.** Improving the Quality of Electrical Energy in the Railway Power Supply System 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) Page s: 563 - 566 DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477533
 26. A123 SYSTEMS. A123 Automotive Litium-ion Solutions [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.a123systems.com>.

References (transliterated)

1. **Zhaofeng Li; Shunichiro Hoshina** and others. Development of DC/DC Converter for Battery Energy Storage Supporting Railway DC Feeder // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016, V.52, p. 4218 – 4224 DOI: 10.1109/TIA.2016.2582724
2. **Sychenko V.** Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current. **Sychenko V., Bosiy D., Kosarev E.** // *The archives of transport. Volume 35, Issue 3*, 2015, p. 63-70.
3. **Ivakhno V.V., Zamaruiev V.V., Styslo B.A., Blinov A.B.** Assimetrichnyj soglasuyushij DC/DC preobrazovatel dlya sistem elektrosnabzheniya s nakopitelnyami elektricheskoy energii Vestnik NTU «HPI», Seriya: novye resheniya v sovremennyh tehnologiyah. Harkov : NTU «HPI». – 2018. №26 (1302). Т.1. – S. 48-56.

4. **Inoue S.** A bidirectional dc-dc converter for an energy storage system with galvanic isolation / **S. Inoue, H. Akagi** // *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 6, pp. 2299–2306, Nov. 2007. DOI: 10.1109/TPEL.2007.909248
5. **Zhao B.** Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC–DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System / B. Zhao, Q. Song, W. Liu, Y. Sun // *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 8, pp. 4091 – 4106, Aug. Nov. 2014
6. **A. Chih-Chiang Hua, B. Zong-Wei Syue** “Charge and Discharge Characteristics of Lead-Acid Battery and LiFePO₄ Battery” *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA* -. Sapporo, Japan 21-24 June 2010 pp. 1478 - 1483 doi:10.1109/ipec.2010.5544506
7. **E. Sokol ; V. Zamaruiev ; S. Kryvosheev ; B. Styslo ; V. Makarov** “The specificity of electrical energy storage unit application” *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) 29 May-2 June 2017* Kiev, Ukraine pp. 432 - 435 DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100524
8. **M. Forouzesh, Y. Siwakoti, S. Gorji, F. Blaabjerg, and B. Lehman.** “Step-Up DC–DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications” *IEEE transactions on power electronics*, vol. 32, no. 12, december 2017 pp. 9143- 9178 doi: 10.1109/tpe.2017.2652318
9. **Kosenko R.** Full soft-switching high step-up current-fed DC-DC converters with reduced conduction losses / R. Kosenko, O. Husev, A. Chub // *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, Riga, 2015, pp. 170-175 DOI: 10.1109/PowerEng.2015.7266313
10. **Ivakhno V.** Bidirectional Isolated ZVS DC-DC Converter with Auxiliary Active Switch for High-Power Energy Storage Applications / V. Ivakhno, V. Zamaruiev, B. Styslo, R. Kosenko, A. Blinov // *2017 IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON) CONFERENCE PROCEEDINGS* May 29 – June 2, 2017 Kyiv, Ukraine pp. 589 - 592
11. **Y. Sokol** Full soft switching dual DC/DC converter with four-quadrant switch for systems with battery energy storage system / Y. Sokol; V. Ivakhno; V. Zamaruiev; B. Styslo // *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)* 10-14 Sept. 2018 Kharkiv, Ukraine Page s: 155 - 160
12. **Naayagi R.T** Investigating the effect of snubber capacitor on high power IGBT turn-off / R.T. Naayagi, R. Shuttleworth, Forsyth // *1st International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 2011, pp.50-55, Jan. 2011 doi: 10.1109/ICEES.2011.5725301
13. О «критических» частоте преобразованиа двухзвенных преобразователей постойанного напрузжениа со звеном на основе инвертора тока / **V.V. Ivahno, V.V. Zamaruev, B.A. Styslo** i dr. // *Elektrotehnika i elektromehanika* – Harkiv: 2016. Spec. vipusk №4(1) Tom 1. s. 31-36.
14. DataSheet FZ250R65KE3 [Online]. – Access mode: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FZ250R65KE3-DS-v03_00-en_de.pdf?fileId=db3a3043382e8373013895a5f3f6169f
15. DataSheet FZ1800R12HE4_B9 [Online]. – Access mode: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FZ1800R12HE4_B9-DS-v02_04-EN.pdf?fileId=db3a30433e4143bd013e46c6e7e2411bSokolYe.I.,IvahnoV.V.,ZamaruyevV.V.StisloB.O.Sravnenie pokazatelej effektivnosti razlichnyh shem dvuhzvennyh obratimyh preobrazovatelej s razdelennoj kommutaciej s chetyrehkvadrantnymi klyuchami v silovom kommutatore zvena invertora toka. Visnik NTU «HPI». – Harkiv: NTU «HPI», 2017, 27 \(1249\). – s. 171-176](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FZ1800R12HE4_B9-DS-v02_04-EN.pdf?fileId=db3a30433e4143bd013e46c6e7e2411bSokolYe.I.,IvahnoV.V.,ZamaruyevV.V.StisloB.O.Sravnenie pokazatelej effektivnosti razlichnyh shem dvuhzvennyh obratimyh preobrazovatelej s razdelennoj kommutaciej s chetyrehkvadrantnymi klyuchami v silovom kommutatore zvena invertora toka. Visnik NTU «HPI». – Harkiv: NTU «HPI», 2017, 27 (1249). – s. 171-176)
16. <https://www.arnoldmagnetics.com/wpcontent/uploads/2017/10/6-Mil-Grain-Oriented-Silicon-Steel-Hysteresis-Curve-at-400Hz.pdf>
17. <https://www.arnoldmagnetics.com/wpcontent/uploads/2017/10/6-Mil-Grain-Oriented-Silicon-Steel-Hysteresis-Curve-at-800Hz.pdf>.
18. **Balyan R. H.** Transformatory dlya radioelektroniki. M.: Sovetskoeradio, 1971, 720 s.
19. **G. Bertotti,** “General properties of power losses in soft ferromagnetic materials,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 1, pp. 621-630, Jan. 1988. doi: 10.1109/20.43994
20. **Vasyutinskij S.** Voprosy teorii i raschyota transformatorov / S. B. Vasyutinskij. - Leningrad: Energiya, 1970 - 432 s.
21. **Goncharov Yu.P.,** Harakteristiki odnofaznyh transformatorov pri peredache napruzhenij i tokov povyshennoj chastoty kvazipryamougolnoj formy / Goncharov Yu.P., Eresko A.V., Zamaruev V.V., Ivahno V.V., Chernetchenko M.A.//*Tehnichna elektrodinamika Tematichnij vipusk: Silova elektronika ta energoefektivnist. Ch. 1. -K.: Institut elektrodinamiki NAN Ukrayini, 2010. S. 81-84*
22. Peretvoryvalna tehnika. Ch2. Za redakciyeyu V.S.Rudenka. - Harkiv: Folio, 2000 – 300 s.Calculation of turn-off power losses generated by an ultrafast diode.
23. AN5028 Application note https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group0/2b/f3/cc/22/81/d3/4d/89/DM00380483/files/DM00380483.pdf/jcr:content/translations/en.DM00380483.pdf
24. The specificity of electrical energy storage unit application / **E. Sokol, V. Zamaruiev, S. Kryvosheev** and oth. // *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. – Kyiv, 2017. – P. 432 - 435.
25. **Y. Sokol; V. Ivakhno; V. Zamaruiev; B. Styslo.** Improving the Quality of Electrical Energy in the Railway Power Supply System 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) Page s: 563 - 566 DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477533
26. A123 SYSTEMS. A123 Automotive Litium-ion Solutions <http://www.a123systems.com>.

Сведения об авторах (About authors)

Ивахно Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина; e-mail: v-ivakhno@ukr.net

Volodymyr Ivakhno – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Professor, Department of Industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: v-ivakhno@ukr.net

Замаруев Владимир Васильевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина; e-mail: vvz@kpi.kharkov.ua

Volodymyr Zamaruev – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Professor, Department of Industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: vvz@kpi.kharkov.ua

Стысло Богдан Александрович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина; e-mail: bohdanstyslo@gmail.com

Bohdan Styslo – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Department of "Industrial and Biomedical Electronics", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: bohdanstyslo@gmail.com

Фетюхина Людмила Викторовна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина

Ludmyla Fetiukhina – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Department of Industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

Тихомиров Владислав Юрьевич – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры промышленной и биомедицинской электроники; г. Харьков, Украина

Vladyslav Tykhomyrov – Department of Industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" PhD student, Kharkiv, Ukraine

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Ивахно, В. В. Оценка показателей бортовой аккумуляторной системы накопления энергии железной дороги на основе двухфазного преобразователя постоянного напряжения с разделенной коммутацией / **В. В. Ивахно, В. В. Замаруев, Б. А. Стысло, Л. В. Фетюхина, В. Ю. Тихомиров** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: *Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 92-101. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.13.

Please cite this article as:

Ivakhno, V., Zamaruev, V., Styslo, B., Fetiukhina, L., Tykhomyrov, V. Numerical-field evaluation of an efficiency of a shortening of a three-phase stator winding of a cylindrical magnetic field inductor. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 92-101, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.13.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ивахно, В. В. Оцінка показників бортової акумуляторної системи накопичення енергії залізниці на основі дволанцюгового перетворювача постійної напруги з розділеною комутацією / **В. В. Ивахно, В. В. Замаруєв, Б. О. Стисло, Л. В. Фетюхіна, В. Ю. Тихоміров** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, *Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 92-101. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.13.

АНОТАЦІЯ. У статті запропонована реалізація бортової акумуляторної системи накопичення енергії залізниці постійного струму - підсилюючого пункту, що забезпечує регламентовані параметри якості електричної енергії в контактній мережі. Показана доцільність застосування узгоджуючого перетворювача, що забезпечує принцип розділеної комутації з метою мінімізації втрат перемикачів силових ключів перетворювача. Обґрунтовано розміщення підсилюючого пункту в безпосередній близькості від споживача - на локомотиві або в спеціальному причіпному вагоні. Дана оцінка енергетичних і масогабаритних параметрів системи. Виконано розрахунки, що дозволяють зробити вибір конкретних силових ключів перетворювача. Визначено оптимальну частоту перемикачів силових ключів перетворювача, що забезпечує компроміс між габаритними властивостями магнітних елементів і втратами в магнітному матеріалі. Дана оцінка необхідної величини індуктивності розсіювання трансформатора, маси магнітних елементів і акумуляторних батарей.

Ключові слова: БСНЕ; підсилюючий пункт; електропостачання залізниці; узгоджуючий перетворювач; розділена комутація; ZVS; ZCS; алгоритм керування силовими ключами; оборотний дволанковий перетворювач

Надійшла (received) 25.08.2019