

УДК 621.314.1

**СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ ПИТАНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ 3000 В ПО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ****Т. Ю. Ларионова**

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69002, Украина. E-mail: tanyalarionova@mail.ru

В настоящее время для проведения энергетической экспертизы и энергетических обследований систем питания собственных нужд электроподвижного состава отсутствуют как количественные, так и качественные показатели для их сравнения по энергоэффективности. Для обеспечения такого сравнения систем питания собственных нужд электроподвижного состава постоянного тока напряжением 3000 В в работе выполнена систематизация этих систем питания собственных нужд по двум критериям – наиболее энергоемкому потребителю (двигательному потребителю) и преобразователю энергии для этого потребителя. Согласно этой систематизации получено шесть разновидностей систем питания собственных нужд электроподвижного состава постоянного тока напряжением 3000 В. Проведено качественное сравнение энергоэффективности выявленных разновидностей систем питания собственных нужд с использованием количественного показателя энергоэффективности для преобразователя энергии (КПД преобразования) и качественного показателя энергоэффективности для двигательного потребителя (наличие управления полезной мощностью). В результате проведенного анализа сформулировано определение энергоэффективной системы питания собственных нужд.

**Ключевые слова:** системы питания собственных нужд, электроподвижной состав, энергоэффективность, двигательные потребители, преобразователь энергии.

**ПОРІВНЯННЯ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НАПРУГОЮ 3000 В ЗА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ****Т. Ю. Ларионова**

Запорізький національний технічний університет

вул. Жуковского, 64, м. Запоріжжя, 69002, Україна. E-mail: tanyalarionova@mail.ru

На теперішній час для проведення енергетичної експертизи та енергетичних обстежень систем живлення власних потреб електрорухомого складу відсутні як кількісні, так і якісні показники для їх порівняння за енергоефективністю. Для забезпечення такого порівняння систем живлення власних потреб електрорухомого складу постійного струму напругою 3000 В у роботі виконана систематизація цих систем живлення власних потреб за двома критеріями – найбільш енергоємним споживачем (двигунним споживачем) і перетворювачем енергії для цього споживача. Згідно з цією систематизацією отримано шість різновидів систем живлення власних потреб електрорухомого складу постійного струму напругою 3000 В. Проведено якісне порівняння енергоефективності виявлених різновидів систем живлення власних потреб із використанням кількісного показника енергоефективності для перетворювача енергії (ККД перетворення) та якісного показника енергоефективності для двигунного споживача (наявність управління корисною потужністю). У результаті проведеного аналізу сформульовано визначення енергоефективної системи живлення власних потреб.

**Ключові слова:** системи живлення власних потреб, електрорухомий склад, енергоефективність, двигунні споживачі, перетворювач енергії.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Потребностями современного общества ставится задача энергоэффективного использования энергии во всех областях хозяйственной деятельности и в системах питания собственных нужд (СПСН) электроподвижных составов (ЭПС) в частности.

Для ЭПС постоянного тока Украины и стран СНГ основным значением напряжения контактной сети является постоянное напряжение с номинальной величиной 3000 В.

Рассматриваемые в работе ЭПС включают электровозы и электропоезда постоянного тока с напряжением контактной сети 3000 В.

К потребителям собственных нужд современных ЭПС относятся: различные двигательные потребители; системы микроклимата кабины машиниста; цепи управления и освещения; устройства плавного пуска и регулирования оборотов асинхронных двигателей вентиляторов охлаждения и тормозного компрессора; устройства, обеспечивающие заряд аккумуляторной батареи [1]. И этот перечень не является исчерпывающим и постоянно расширяется

для удовлетворения возрастающих потребностей.

В цепях питания оборудования собственных нужд на ЭПС используются различные значения напряжений. Для их получения применяются преобразователи напряжения. Эти функции выполняет СПСН [2].

СПСН не является отдельной продукцией, а интегрирована в ЭПС своими элементами. Тем не менее, СПСН нуждается в энергетической экспертизе и энергетических обследованиях, что требует наличия в СПСН показателя энергоэффективности [3]. В тоже время ни для одной СПСН не определен ни количественный, ни качественный показатель энергоэффективности. В работах [4, 5] для оценки энергоэффективности СПСН используются качественные и/или количественные показатели отдельных элементов системы. Эти показатели не формализованы в вид, представляющий однозначность при сравнении двух СПСН по энергоэффективности, т.к. элемент системы с высоким КПД в самой системе может использоваться не энергоэффективно, например как компрессор в СПСН электровоза ЧСЗ (опи-

сание приведено ниже по тексту). Кроме того, в известных работах [4, 5] не рассматривается энергоэффективность элементов СПСН, характерных для ЭПС постоянного тока напряжением 3000 В.

Цель работы – определить разновидности СПСН ЭПС постоянного тока напряжением 3000 В и их признаки; сравнить разновидности СПСН по энергоэффективности; сформулировать определение энергоэффективной СПСН.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Методы исследования, примененные для решения поставленной задачи – сравнительный и структурно-функциональный анализ систем (СПСН), метод эмпирической индукции для выполнения сравнения разновидностей СПСН.

В качестве количественного показателя энергоэффективности СПСН может быть использован показатель КПД. По аналогии с КПД электродвигателя [3]:

$$КПД_{СПСН} = \frac{\sum P_{\text{полезная}}}{\sum P_{\text{потребленная}}},$$

где  $\sum P_{\text{полезная}}$  – суммарная полезная мощность системы;  $\sum P_{\text{потребленная}}$  – суммарная общая потребляемая мощность системы.

Однако в процессе функционирования реальной СПСН её полезная мощность может меняться не только в зависимости, но и независимо от выполняемой функции СПСН. Например, в СПСН электровоза ЧС3 вентилятор непрерывно расходует энергию для охлаждения тягового двигателя. При этом тяговый двигатель может не нагреваться по одной из причин: ЭПС находится на стоянке; ЭПС движется по горизонтальному участку пути; температура окружающей среды относительно низкая и др. В этой же СПСН компрессор постоянно расходует

мощность двигателя на создание давления в системе, которое при достижении заданной величины через специальный клапан сбрасывается в атмосферу. И в этом случае только часть энергии двигателя используется для полезной работы СПСН [6].

Другой пример, когда при рекуперативном торможении СПСН расходует энергию, вырабатываемую при этом режиме. Встает вопрос, как учитывать эту энергию – как потребленную или как полезную? Существуют и другие проблемы оценки энергоэффективности СПСН, например оценка влияния управления энергоэффективностью как отдельных элементов системы, так и СПСН в целом.

Приведенное выше свидетельствует о том, что решение задачи количественного определения энергоэффективности является сложным и трудоемким. На данном этапе исследования ставится задача качественной оценки энергоэффективности СПСН. Такую оценку можно применять при энергетической экспертизе СПСН. Для сравнения СПСН по энергоэффективности предлагается использовать известный метод эмпирической индукции. В настоящей работе он заключается в выделении в сравниваемых СПСН нескольких общих существенных признаков, при этом не менее чем один общий признак должен иметь количественный параметр энергоэффективности. Если качественные параметры остальных признаков примерно одинаковы, то более энергоэффективной является та СПСН, у которой количественное значение показателя энергоэффективности общего параметра больше.

Для выработки общих подходов по определению какого-либо показателя для множества похожих систем проводят систематизацию этих систем. Для разработки критериев систематизации СПСН анализировались ЭПС, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 – Систематизация СПСН ЭПС постоянного тока напряжением 3000 В

№ разновидности СПСН	Преобразователь энергии		Двигательный потребитель		Наименование ЭПС	Состояние СПСН
	Вид преобразователя энергии	КПД преобразования	Тип двигательного потребителя	Управление полезной мощностью		
1	Отсутствует, имеется гасящий резистор	–	Высоковольтные двигатели постоянного тока на напряжение контактной сети	Отсутствует	ЧС1, ЧС2, ЧС3, ЧС5, ЧС6, ЧС7, ВЛ10, ВЛ11, ВЛ15	Эксплуатация
2	Импульсный регулятор	Не менее 0,98		Имеется		
3	Динамотор на напряжение 1500 В постоянного тока	0,4-0,5	Высоковольтные двигатели постоянного тока 1500 В	Отсутствует	ЭР1, ЭР2	Эксплуатация
4	Статические полупроводниковые преобразователи	0,85		Имеется		
5	Электромашинный преобразователь на переменное напряжение 380 В	0,5-0,6	Асинхронные двигатели 380 В переменного тока	Имеется	ЭР22...ЭД4М, ЭТ2М	Эксплуатация
6	Статические полупроводниковые преобразователи	Более 0,98				

Так как целью работы является сравнение разновидностей СПСН по энергоэффективности, то в качестве главного критерия систематизации СПСН выбран наиболее энергоемкий потребитель СПСН – двигательный потребитель. В СПСН выделены три типа двигательных потребителей: *первый* – высоковольтные двигатели постоянного тока на напряжение контактной сети; *второй* – высоковольтные двигатели постоянного тока 1500 В; *третий* – асинхронные двигатели (АД) 380 В переменного тока. В качестве второго критерия систематизации выбран вид преобразователя энергии для двигательного потребителя. В рассмотренных СПСН все преобразователи напряжения можно обобщить до четырех видов: преобразователь за счет гашения напряжения на резисторе; преобразователь напряжения с помощью динамотора; электромашинный преобразователь напряжения (ЭМПН); статический полупроводниковый преобразователь. Для наглядности и формализации разновидностей СПСН результаты систематизации сведены в табл. 1. Обоснование по объединению систем в отдельные разновидности приведено в нижеследующем описании.

*Первый тип* двигательных потребителей используется на электровозах постоянного тока ЧС1, ЧС2, ЧС3, ЧС5, ЧС6, ЧС7, ВЛ10, ВЛ11, ВЛ15 [6–10]. Достоинством СПСН с таким типом двигательных потребителей является функциональная простота, однако высоковольтные двигатели имеют низкий КПД преобразования электрической энергии в механическую. Вторым недостатком – высоковольтный двигатель компрессора (на 2600 В) подключается к контактной сети 3000 В через гасящий резистор, напряжение на котором выделяется в тепло, в результате чего возникает повышенное энергопотребление. В этих СПСН использованы двигатели вентиляторов на напряжение 1500 В, которые соединяются последовательно с контактной сетью 3000 В.

Ряд недостатков первой разновидности СПСН устранен во *второй* рассматриваемой разновидности СПСН, в которой все двигательные потребители питаются от постоянного напряжения 1500В. Для получения этого напряжения используется машинный делитель напряжения – динамотор [11]. КПД динамотора как преобразователя напряжения находится в диапазоне 0,4–0,5 [12]. СПСН с динамотором решает проблему чрезмерного потребления энергии, т.к. отсутствуют активные сопротивления в цепи главного тока, однако не избавляет от применения высоковольтных коллекторных двигателей постоянного тока. Эта разновидность СПСН применена в электропоездах ЭР1 и ЭР2 [11].

Для устранения недостатков высоковольтных двигателей постоянного тока используют АД переменного тока, для питания которых на борту ЭПС требуется трехфазная сеть. В *третьей* рассматриваемой СПСН такую сеть получают с помощью электромашинного преобразователя напряжения (ЭМПН). ЭМПН применяется на ЭПС, начиная с ЭР22 и заканчивая ЭД4М и ЭТ2М [13]. Эти СПСН обеспечивают качественные параметры питания вспомогательных машин, что повышает их КПД, кроме того, АД компрессоров отключаются от пита-

ния при достижении требуемого давления в системе, что повышает полезную работу АД. Однако ЭМПН постоянно потребляет энергию в независимости от состояния нагрузки, имеет низкий КПД электромашинного преобразования энергии (0,5–0,6 [14]).

На введенных в эксплуатацию в последние десятилетия ЭПС, таких как S252, E464, 2ЭС10, 2ЭС6, ЭП10, ЭП20 [4], вместо энергетически неэффективных ЭМПН используются статические полупроводниковые преобразователи напряжения. Их применение стало существенным шагом на пути к повышению надежности, безопасности и эффективности преобразования энергии в СПСН [14]. КПД новейших выпускающихся промышленностью статических полупроводниковых преобразователей может достигать более 0,98 [15].

Современные СПСН рассмотрим более детально. Вариант обобщенной структурной схемы СПСН со статическими полупроводниковыми преобразователями напряжения показан на рис. 1.

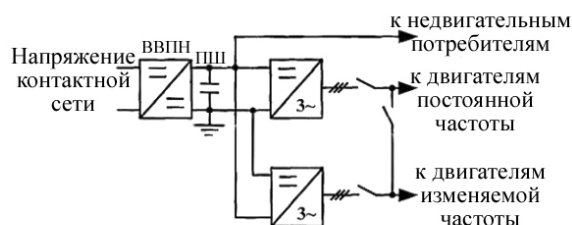


Рисунок 1 – Структурная схема СПСН ЭПС постоянного тока со статическими полупроводниковыми преобразователями: ВВПН – входной высоковольтный преобразователь напряжения; ПШ – промежуточная шина

В СПСН на рис. 1 к контактной сети через входной сетевой фильтр (не показан) подключен ВВПН, являющийся разновидностью статического полупроводникового преобразователя напряжения [14].

ВВПН может быть выполнен как с гальванической развязкой, так и с гальванической связью с контактной сетью. На территории Украины не используются ЭПС с ВВПН без гальванической развязки. Пример топологии ВВПН с гальванической развязкой приведен на рис. 2.

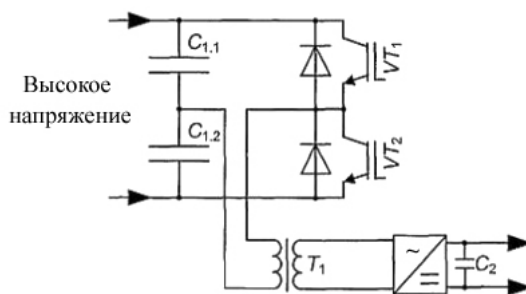


Рисунок 2 – Пример топологии ВВПН с гальванической развязкой

В схеме, изображенной на рис. 2, входное постоянное напряжение преобразуется в переменное при помощи двух ключей (VT1 и VT2). Затем это напряжение понижается на разделительном трансформаторе.

маторе, забезпечующем гальванічну розв'язку, і випрямляється з допомогою діодного моста. В цій схемі напругу стабілізують при допомозі силових ключів VT1 і VT2 (рис. 2). Ключі повинні працювати з високою частотою тактирування, що знижує енергоєфективність схеми [4]. Для того, щоб забезпечити більш енергоєфективну роботу ключів, виконують стабілізацію випрямленого напруги на низькій стороні роздільного трансформатора Т1.

К виходу ВВПН через ПШ підключені автономні інвертори напруги (АИН), які живлять напругою 380 В АД СПСН. АИН мають функцію регулювання напруги АД по амплітуді і частоті, що суттєво підвищує КПД преобразовання електричної енергії в механічну. Крім того, деякі АИН управляють корисною потужністю АД [16], що підвищує енергоєфективність СПСН. Приклад топології АИН наведено на рис. 3.

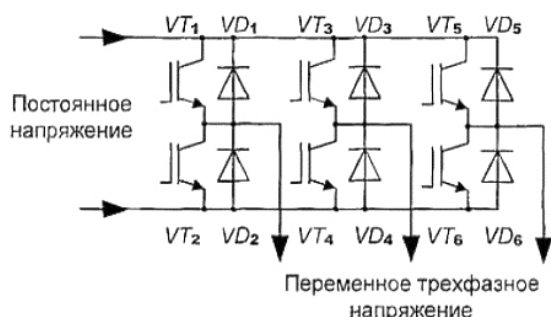


Рисунок 3 – Приклад топології автономного інвертора напруги

В результаті аналізу СПСН електровозів і електропоездів ЧС1, ЧС2, ЧС3, ЧС5, ЧС6, ЧС7, ВЛ10, ВЛ11, ВЛ15, ЭР1, ЭР2, ЭР22...ЭД4М, ЭТ2М, S252, E464, 2ЭС10, 2ЭС6, ЭП10, ЭП20 виявлено, що при їх створенні, крім СПСН зі статичними напівпровідниковими преобразовувачами (ЕПС S252, E464, 2ЭС10, 2ЭС6, ЭП10, ЭП20), показники енергоєфективності не входили в перелік задаваних параметрів. Так, в технічних характеристиках високовольтних двигачів для СПСН (додаток 6 [6]) не нормують їх КПД. Тим не менше, виявлені і введені в табл. 1 кількісні показники енергоєфективності, КПД преобразовувачів і якісний показник управління корисною потужністю двигача [13].

В роботі [17] наведено опис заміни динамомоторного преобразовувача на статичні напівпровідникові преобразовувачі з метою підвищення енергоєфективності СПСН електропоезда ЭР2. Модернізація дозволила підвищити КПД преобразовання до 0,85.

В роботі [18] описаний досвідчений зразок імпульсного регулятора для колекторного тягового двигача на напругу контактної мережі. Припускається, що в різновидності СПСН з високовольтними двигачевими споживачами на напругу контактної мережі може бути використаний аналогічний імпульсний регулятор. Це дозволить суттєво

підвищити енергоєфективність СПСН (КПД імпульсного регулятора напруги в довготривалому режимі становить не менше 98 % [18]). В систематизації (табл. 1) ця СПСН наведена як прогнозовувана. Така СПСН ще не розроблена, але вже знайшла своє відображення в табл. 1, що може свідчити про перспективність запропонованої систематизації для прогнозування і/або виявлення нових різновидностей СПСН за виду преобразовувача енергії.

Згідно табл. 1 СПСН зі статичними напівпровідниковими преобразовувачами більш енергоєфективні, ніж СПСН з іншими видами преобразовувачів при однакових типах двигачевих споживачів.

Припускаючи, що двигачеві споживачі мають приблизно однаковий кількісний показник енергоєфективності, з урахуванням якісного показника енергоєфективності двигачевого споживача (наличие управління корисною потужністю) і кількісного показника енергоєфективності преобразовувача можна однозначно утвердити:

- СПСН з АД (різновидність 6) більш енергоєфективні, ніж СПСН з високовольтними двигачами постійного струму (різновидності 1-4);
- СПСН з АД (різновидність 5) більш енергоєфективні, ніж СПСН з високовольтними двигачами постійного струму (різновидності 1, 3);
- СПСН з високовольтними двигачами постійного струму 1500 В (різновидність 4) більш енергоєфективні, ніж СПСН з високовольтними двигачами постійного струму (різновидність 1).

Усі наведені в роботі СПСН мають високу ремонтоспридатність і надійність. ЕПС з розглядаваними СПСН мають високу ціну і продовжують експлуатуватися на залізничних дорогах України і СНГ. В зв'язі з цим парк ЕПС суттєво не оновлюється, а СПСН мають можливість бути модернізованими для підвищення їх енергоєфективності або бути підвергнутими енергетичній експертизі для визначення цільовості їх подальшої експлуатації. Приклад такої модернізації відображений в табл. 1.

**ВИВОДИ.** В роботі виконана систематизація СПСН ЕПС постійного струму напругою 3000 В за двома критеріями: найбільш енергоємному споживачу і виду преобразовувача енергії для цього споживача.

В результаті систематизації визначені шість різновидностей СПСН ЕПС постійного струму напругою 3000 В і їх ознаки.

Систематизація формалізована таблицею, спрощуюча процес порівняння енергоєфективностей різновидностей СПСН.

Проведено якісне порівняння енергоєфективності виявлених різновидностей СПСН з одночасним використанням кількісного показника енергоєфективності для преобразовувача енергії (КПД преобразовання) і якісного показника енергоєфективності для двигачевого споживача (наличие управління корисною потужністю).

На основании выполненного в работе анализа можно сформулировать: энергоэффективная СПСН – это такая система, которая позволяет энергоэффективно использовать энергоэффективное оборудование и элементы.

Результаты работы могут быть использованы при проведении энергетической экспертизы и энергетических обследований СПСН.

Предполагается, что количественный показатель энергоэффективности СПСН можно определить с помощью нечеткой логики. Решение этой задачи является перспективной дальнейших исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент Российской Федерации 2 385 237 МПК В60L 1/00 (2006.01) В60L 9/04 (2006.01). Преобразовательная система / Андросов Н.Н., Бабкина Т.М., Булатов В.Л. и др.; заявл. 04.12.2008, опубл. 27.03.2010, Бюл. № 9.
2. Марченко А.В., Солтус К.П. Знакомьтесь: электровоз 2ЭС5 // Локомотив. – 2013. – № 1. – С. 38–42.
3. ГОСТ Р 51541–99. Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. – Введ. 2000–07–01. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 9 с.
4. Литовченко В.В., Невинский А.В. Совершенствование системы питания вспомогательных машин электровозов переменного тока // Сборник трудов XI научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», 21–22 октября 2010 г. – М.: МИИТ, 2010. – Т. 10. – С. 20–21.
5. Литовченко В.В., Паршин А.Н. Снижение расхода электроэнергии на собственные нужды электровозов переменного тока // Труды третьей научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте», 29–30 июня 2000 г. – М.: МИИТ, 2000. – С. 14–26.
6. Евтеев И.П., Осипов С.И., Пустовойтов М.П. Пассажирские электровозы ЧС1 и ЧС3. – М.: Всесоюзное издательско-полиграфическое объединение министерства путей сообщения, 1962. – 161 с.
7. Раков В.А. Пассажирский электровоз ЧС2. – М.: Транспорт, 1976. – 320 с.
8. Косарев И.И., Локомотивной бригаде об электровозе ЧС7. – М.: Академ-книга, 2003. – 223 с.
9. Чиракадзе Г.И., Кикнадзе О.А. Электровоз

ВЛ11. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1983. – 464 с.

10. Кужим М.Ф., Савичев Н.В. Электровоз ВЛ15: справочник для локомотивных и ремонтных бригад. – СПб.: Астерион, 2003. – 380 с.

11. Цукало П.В., Ерошкин Н.Г. Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р. – М.: Транспорт, 1986. – 359 с.

12. Dynamotor-Power Supply DY 105()/GRC-9X. Military Specification [Электронный ресурс]: MIL-B-130608 (EL) 12 September 1963. – Режим доступа: [http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-D/MIL-D-13060B\\_18114](http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-D/MIL-D-13060B_18114).

13. Кубышкин Ю.И. Электропоезда постоянного тока ЭТ2, ЭТ2М, ЭР2Т, ЭД2Т. – М.: ООО «Центр коммерческих разработок», 2003. – 184 с.

14. Скороход Ю.Ю. Сравнительный анализ потерь мощности в высоковольтных статических преобразователях [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Исследовано в России» – 2007. – Т. 10. – С. 1451–1460. – Режим доступа: <http://sci-journal.ru/articles/2007/132.pdf>.

15. Slobodan Cuk. Single-Stage Isolated Bridgeless PFC Converter Achieves 98% Efficiency [Электронный ресурс] // Power Electronics Technology – 2010. – № 11. – С. 28–37. – Режим доступа: [http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/images/DesignFeatures\\_3-1110.pdf](http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/images/DesignFeatures_3-1110.pdf).

16. Волков А.В., Скалько Ю.С. Энергосберегающее управление в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44), част. 2. – С. 103–106.

17. Озеров М.И., Мурашкин В.А., Изварин М.Ю., Чирин С.И. Снижение потерь электроэнергии в преобразователях собственных нужд электропоездов постоянного тока // Оборудование электроподвижного состава: межвузовский сбор. науч. трудов. – М.: МИИТ, 1996. – № 5 (293). – С. 140–148.

18. Андросов Н.Н. Булатов В.Л., Мансуров В.А. и др. Создание электровоза постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями и плавным регулированием напряжения тяговых двигателей на базе электровоза 2ЭС6 // Деловая Россия: промышленность, транспорт, социальная жизнь. – 2014. – № 12. – С. 126–127.

#### COMPARISON OF THE AUXILIARY POWER SUPPLY SYSTEMS OF THE ELECTRIC RAILWAY ROLLING STOCK DC 3000 V ACCORDING TO THE ENERGY EFFICIENCY

**T. Larionova**

Zaporozhye National Technical University  
vul. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69002, Ukraine, E-mail: tanyalarionova@mail.ru

Today for carrying out of the energy audits and energy inspections of the auxiliary power supply systems (APSS) of the electric railway rolling stock (ERRS) both quantitative and qualitative indexes for their comparison according to the energy efficiency are absent. To ensure such a comparison of APSS ERRS DC 3000 V the systematization of these APSS with respect to two criteria: the most powerful consumer (motor consumer) and the converter type for this consumer, was performed in the paper. According to this systematization six varieties of APSS ERRS DC 3000 V were obtained. It was carried out the qualitative comparison of energy efficiency of ascertained APSS varieties with usage of quantitative index of converter efficiency (conversion performance index) and qualitative index of energy efficiency for consumer motor (control of useful power availability). As a result of analysis the definition of energy-efficient APSS was stated.

**Key words:** APSS, ERRS, energy efficiency, motor consumers, energy converter.

## REFERENCES

1. Androsov, N.N., Babkina, T.M., Bulatov, V.L., Golovin, V.I., Kovalev, Yu.N., Kolesnikov, B.I., Mansurov, V.A., Manko, N.G., Novik, S.V., Podosenov, S.G. (2010), *Preobrazovatel'naya sistema* [Conversion system], Patent RF, no. 2385237, Bul. 9.
2. Marchenko, A.V., Soltus, K. P. (2013), "Familiarize with electric locomotive 2ES5", *Lokomotiv*, no. 1, pp. 38–42.
3. GOST R 51541–99, (2001), *Energoberezhenie. Energeticheskaya effektivnost. Sostav pokazateley* [Energy conservation. Energy efficiency. Composition of indicators. Basic concepts], Izdatelstvo standartov, Moscow, Russia.
4. Litovchenko, V.V., Nevinskiy, A.B. (2010), "Improvement of the auxiliary power supply system of AC locomotives", *Bezopasnost dvizheniya poezdov. Sbornik trudov XI nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Safety of the train operation. Collected papers of the XI th scientific and practical conference], Moscow, Moscow State University of Railway Engineering, October 21–22, vol. 5, pp. 20–21.
5. Litovchenko, V.V., Parshin, A.N. (2000), "Power consumption reduction of the AC electric locomotives auxiliaries", *Resursosberegayushchie tehnologii na zheleznodorozhnom transporte. Trudyi tretey nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Train safety. Papers of the 3rd scientific and practical conference], Moscow, Moscow State University of Railway Engineering, June 29–30, pp. 14–26.
6. Evteev, I.P., Osipov, S.I., Pustovoytov, M.P. (1962), *Passazhirskie elektrovozyi ChS1 i ChS3* [Passenger electric locomotives ChS1 and ChS3], Vsesoyuznoe izdatelsko-poligraficheskoe ob'edinenie ministerstva putey soobscheniya, Moscow, USSR.
7. Rakov, V.A. (1976), *Passazhirskiy elektrovoz ChS2* [Passenger locomotive ChS2], Transport, Moscow, USSR.
8. Kosarev, I.I. (2003), *Lokomotivnoy brigade ob elektrovoze ChS7* [For locomotive crew about electric locomotive ChS7], Akadem-kniga, Moscow, Russia.
9. Chirakadze, G.I., Kiknadze, O.A. (1983), *Elektrovoz VL11. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive VL11. Service manual], Transport, Moscow, Russia.
10. Kuzhim, M.F., Savichev, N.V. (2003), *Elektrovoz VL15. Spravochnik dlya lokomotivnykh i remontnykh brigad* [Electric locomotive VL15. Handbook for locomotive and repair crews], Asterion, Saint Petersburg, Russia.
11. Tsukalo, P.V., Eroshkin, N. G. (1986), *Elektropoezda ER2 i ER2R* [Electric trains ER2 and ER2R], Transport, Moscow, USSR.
12. Dynamotor-Power Supply DY 105()/GRC-9X. Military Specification: MIL-B-130608 (EL) (12 September 1963), available at: [http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-D/MIL-D-13060B\\_18114](http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-D/MIL-D-13060B_18114) (assessed May 12, 2015).
13. Kubyishkin, Yu.I. (2003), *Elektropoezda postoyannogo toka ET2, ET2M, ER2T, ED2T* [DC electric trains ET2, ET2M, ER2T, ED2T], OOO "Tsentri kommercheskikh razrabotok", Moscow, Russia.
14. Skorohod, Yu.Yu. (2007), "Comparative analysis of the power loss in the high-voltage static converters", *Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Issledovano v Rossii"*, vol. 10, available at: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/2335/2603>, (assessed May 22, 2015).
15. Slobodan, Cuk (2010), "Single-Stage Isolated Bridgeless PFC Converter Achieves 98% Efficiency", *Power Electronics Technology*, no. 11, pp. 28–37, available at: [http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/images/DesignFeatures\\_3-1110.pdf](http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/images/DesignFeatures_3-1110.pdf) (assessed April 10, 2015).
16. Volkov, A.V., Skalko, Yu.S. (2007), "Energy-saving control in variable frequency asynchronous drive", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 3 (44), part 2, pp. 103–106.
17. Ozerov, M.I., Murashkin, V.A., Izvarin, M.Yu., Chirin, S.I. (1996), "Reduction of power losses in the auxiliary converters of the DC electric locomotives", *Moscow State University of Railway Engineering*, no. 5 (293), pp. 140–148.
18. Androsov, N.N., Bulatov V.L., Mansurov, V.A. et al (2014), "Development of the DC electric locomotive with commutator traction motors and stepless voltage control of the traction motors on the basis of electric locomotive 2ES6", *Delovaya Rossiya: promyshlennost, transport, sotsialnaya zhizn*, no. 12, pp. 126–127.

Стаття надійшла 03.05.2015.