

УДК 621.3:629.4:625.42

*Канд. техн. наук А.А. Сулим
Канд. техн. наук А.В. Донченко
Канд. техн. наук А.М. Гончаров
Канд. техн. наук П.А. Хозя
Инженер С.А. Мужичук*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОГО
НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ЗА-
ДАННОМ РЕЖИМЕ ВЕДЕНИЯ ПОДВИЖНОГО
СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА**

*Ключевые слова: подвижной состав мет-
рополитена, система электродинамического
торможения, накопитель энергии, конден-
саторный модуль, ионистор.*

Введение

Электродинамическое торможение является одной из важных составляющих энерго-сберегающих технологий перевозочного процесса в метрополитенах Украины.

Результаты исследований, проведенных в последнее время, свидетельствуют, что наибольший эффект от применения электродинамического торможения может быть достигнут именно в метрополитене за счет особенностей эксплуатации его подвижного состава (относительно малых расстояний между станциями, что требует частых разгонов и торможений, часто изменяющегося профиля пути и т.д.).

В силу данных особенностей результативное применение электродинамического торможения на подвижном составе метрополитена дает возможность сократить до 40 % электроэнергии, потребляемой на тягу. Однако в условиях реальной эксплуатации эффективность использования электроэнергии, полученной при электродинамическом торможении, ограничивается действием ряда факторов, которые необходимо учитывать при решении задачи повышения энергоэффективности осуществления перевозок в метрополитене.

Обзор исследований и публикаций

К наиболее значимому условию, которое влияет на эффективность использования электроэнергии электродинамического торможения, следует отнести значение напряжения на токоприемниках подвижного состава [2, 7]. Следует отметить, что значение напряжения на токоприемниках определяется уровнем тягового потребления других поездов в зоне рекуперации и зависит от интенсивности движения поездов в этой зоне. Более детально причины неэффективного использования электроэнергии торможения подвижного состава приведены в исследованиях [1–3, 7]. По результатам анализа приведенных исследований установлено, что при существующей инфраструктуре системы тягового энергообеспечения метрополитена использование энергии электродинамического торможения имеет вероятностный характер и не превышает 30 % [2]. Таким образом, в настоящее время возможности электродинамического торможения используются далеко не в полной мере, и существует проблема реализации избыточной электро-энергии при отсутствии потребителей в сети [1–8].

Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является применение накопителей энергии [1–12]. Идея использования накопителей энергии в различных устройствах и системах железнодорожного транспорта, в том числе в системах энергообеспечения метрополитена, не нова. В публикациях по данной тематике преимущественно рассматриваются два вопроса: первый, – возможные варианты размещения накопителей энергии (стационарные – на тяговой подстанции или в тяговой сети; бортовые – на электроподвижном составе); второй, – необходимый тип накопителя энергии и определение его параметров [1, 5, 7].

Исследования по возможности использования стационарных установок накопителей энергии в системе энергообеспечения метрополитена представлены в работах [4–6, 11]. В этих работах рассматриваются вопросы при-

менения различных типов накопителей энергии (литий-ионных, индуктивных, емкостных, электромеханических) и места их размещения (на тяговой подстанции, в середине фидерной зоны, вблизи остановочных пунктов (на станциях)). Большинство исследователей, в том числе и зарубежных, считает, что наибольшую перспективу имеют емкостные накопители энергии (ЕНЭ) [1, 4, 5, 7, 9, 12]. В настоящее время активно осуществляется разработка и внедрение ЕНЭ на базе ионисторов. Данным типом накопителя оснащены тяговые подстанции метрополитенов большого количества городов-мегаполисов (Лозанны, Нью-Йорка, Лондона, Москвы и др.). Однако режимы электродинамического торможения при стационарном размещении ЕНЭ не обладают автономностью, так как энергообменные процессы связаны с контактной сетью. Поэтому при данном размещении ЕНЭ эффективность использования избыточной электроэнергии зависит от многих условий и ограничений [7].

Имеющиеся на сегодня публикации свидетельствуют о том, что наиболее перспективным является бортовое размещение ЕНЭ на базе конденсаторных модулей (ионисторов) [1, 5, 7, 12]. Основными преимуществами бортового размещения ЕНЭ являются: максимальная эффективность энергообмена (потери электроэнергии сводятся к минимуму), повышение пропускной способности участка в «часы пик» (стабилизация напряжения контактной сети), обеспечение автономного движения подвижного состава при аварийном отключении питания контактной сети, снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций вследствие перегрузок в контактной сети. В настоящей статье рассматриваются вопросы повышения эффективности использования электроэнергии, получаемой при электродинамическом торможении, за счет размещения ЕНЭ на подвижном составе метрополитена, в частности определение пара-

метров ЕНЭ, прежде всего, определение рационального значения энергоемкости и мощности накопителя. Актуальность решения данной задачи определяется тем, что от правильного выбора параметров ЕНЭ зависит срок его окупаемости и эффективность использования электроэнергии электродинамического торможения.

Цель статьи состоит в разработке подхода к определению значений необходимой энергоемкости и мощности бортового ЕНЭ для заданных условий ведения подвижного состава метрополитена.

Изложение материалов исследования

Основная идея предлагаемого авторами подхода заключается в определении значений необходимой энергоемкости и мощности бортового ЕНЭ по установленным критериям на основании анализа плотности распределения количества и мощности энергии электродинамического торможения. Выбор критерия зависит от закона распределения соответственно количества или мощности электроэнергии торможения. При этом предусматривается определение вышеуказанных параметров при полном сохранении энергии электродинамического торможения.

Предложенный подход включает в себя следующие основные этапы: регистрацию энергообменных процессов при заданном режиме ведения подвижного состава, обработку полученных массивов данных, анализ вероятностных характеристик и непосредственно определение энергоемкости и мощности ЕНЭ.

Первый этап, который предусматривает экспериментальное исследование энергообменных процессов, был проведен с использованием испытательного комплекса, в состав которого входит подвижной состав метрополитена с системами электродинамического торможения и измерительная система, установленная на его борту. Блок-схема испытательного комплекса изображена на рис. 1.

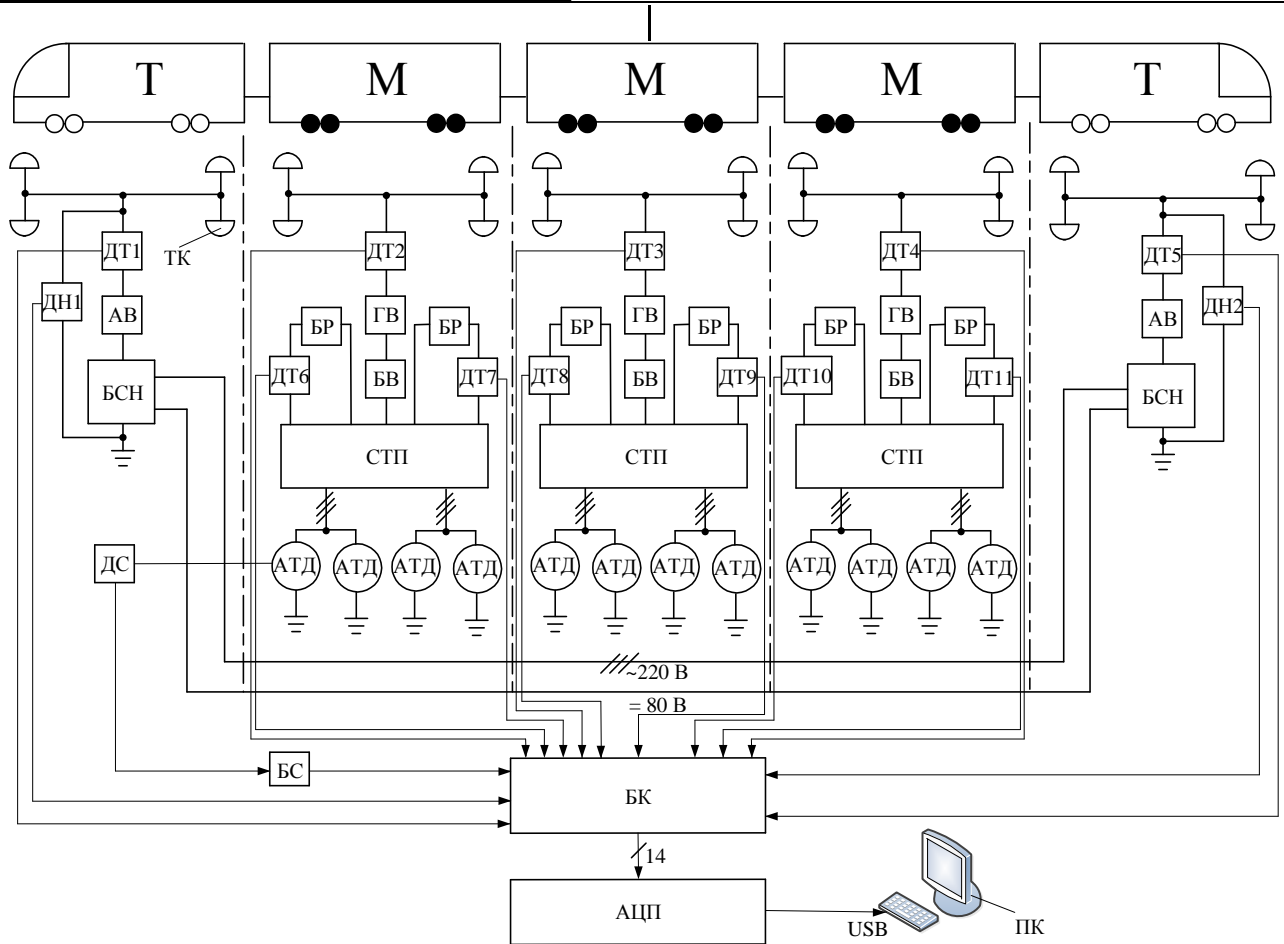


Рис. 1 – Блок-схема испытательного комплекса

Исследуемый подвижной состав представлял собой пятивагонный модернизированный поезд метрополитена производства ПАО «КВСЗ», с асинхронным тяговым приводом, в котором головные вагоны – безмоторные, промежуточные – моторные (комплектация 3М + 2П).

Головные вагоны укомплектованы блоками собственных нужд (БСН), которые соединены с токоприемниками (ТК) через автоматические выключатели (АВ). Установленные БСН обеспечивают питанием нетяговое электрооборудование поезда.

Основными функциями АВ являются подключение цепи питания нетягового электрооборудования к контактной сети и ее защита при возникновении аварийных режимов. Установленные на головных вагонах ТК обеспечивают потребление электроэнергии из сети на собственные нужды.

Промежуточные вагоны укомплектованы асинхронными тяговыми двигателями (АТД) типа МВ-5149-А на каждой оси колесной пары со следующими номинальными параметрами:

рами: $P_n = 150$ кВт; $U_n = 610$ В; $I_n = 185$ А; $f_n = 65$ Гц, $\eta_n = 0,91$; $n_n = 1900$ об/мин; $s_n = 2,4$ %.

Асинхронные ТД обмоторенных вагонов получают питание от статического тягового преобразователя (СТП), состоящего из двух инверторов и имеющего блочно-модульную конструкцию. Инверторы обеспечивают плавное регулирование выходного напряжения от нуля до максимального значения. Один инвертор обеспечивает управление двумя АТД. Конструкция инвертора также предусматривает отдачу энергии электродинамического торможения в сеть при наличии потребителя и реостатное торможение с помощью блоков резисторов (БР) при их отсутствии. Силовые тяговые преобразователи соединены с ТК через быстродействующий выключатель (БВ) и главный выключатель (ГВ).

Выключатели (БВ, ГВ) установлены на каждом промежуточном обмоторенном вагоне с целью подключения силового электрооборудования (СТП, АТД) к контактной сети

и его защиты при возникновении аварийных режимов в силовой цепи. Установленные на промежуточных обмоточных вагонах ТК, обеспечивают обмен электроэнергией между сетью и вагонами в режимах потребления и возврата электроэнергии.

Измерительная система разработана специалистами ГП «УкрНИИВ» для исследования энергообменных процессов между контактной сетью и поездом в реальных условиях его эксплуатации.

В состав измерительной системы входят: персональный компьютер (ПК), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блок коммутации (БК), блок согласования (БС) и измерительные датчики.

В качестве измерительных датчиков использовались: одиннадцать датчиков тока (ДТ1-ДТ11), два датчика напряжения (ДН1-ДН2) и датчик скорости (ДС). Контроль потребляемого тока на собственные нужды осуществлялся ДТ1 и ДТ5, контроль общего тока потребления на тягу выполнялся ДТ2-ДТ4, контроль тока при реостатном торможении соответственно ДТ6-ДТ11. Контроль напряжения контактной сети осуществлялся с помощью ДН1 и ДН2. Измерение скорости поезда осуществлялось с помощью штатного ДС.

Для согласования типа и уровня выходного сигнала ДС с входным каналом АЦП использовался БС. При проведении измерений сигналы с выходов измерительных датчиков через БК поступают на входные каналы АЦП, который выполняет функцию преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму для дальнейшей обработки на ПК.

Обработка данных на ПК осуществляется с помощью аттестованного программного обеспечения «ЭЛЕКТРО» [13, 14]. Измерительная система предусматривает получение, отображение и сохранение данных, полученных от измерительных датчиков, которые установлены на опытном поезде.

Экспериментальное исследование энергообменных процессов проводилось на Святошинско-Броварской линии КП «Киевский метрополитен».

Проведение измерений осуществлялось при максимальной загрузке вагонов модернизированного поезда. Измерения выполнялись при заданном режиме ведения поезда метрополитена между конечными станциями «Лесная-Академгородок-Лесная».

Режим ведения подвижного состава метрополитена с системами электродинамического торможения выполнялся с соблюдением «непикового» графика движения.

Осциллограммы напряжения контактной сети (на токоприемнике), тока и скорости подвижного состава при его эксплуатации между конечными станциями Святошинско-Броварской линии приведены на рис. 2-3.

Следует отметить, что осциллограммы (рис. 2-3) для наглядности приведены без учета времени стоянки поезда на станциях. График предусматривает время стоянки поезда на каждой станции 30 секунд.

В ходе обработки полученных массивов данных определены следующие показатели для каждого режима торможения: скорость начала торможения (V_T), средняя и максимальная мощность (P_{cp} , P_{max}), а также количество энергии электродинамического торможения (A). По результатам обработки установлено, что количество торможений для заданного режима ведения подвижного состава с системами электродинамического торможения составляет 36 раз ($n = 36$).

Мгновенная мощность подвижного состава в режиме электродинамического торможения определяется по выражению [15, 16]:

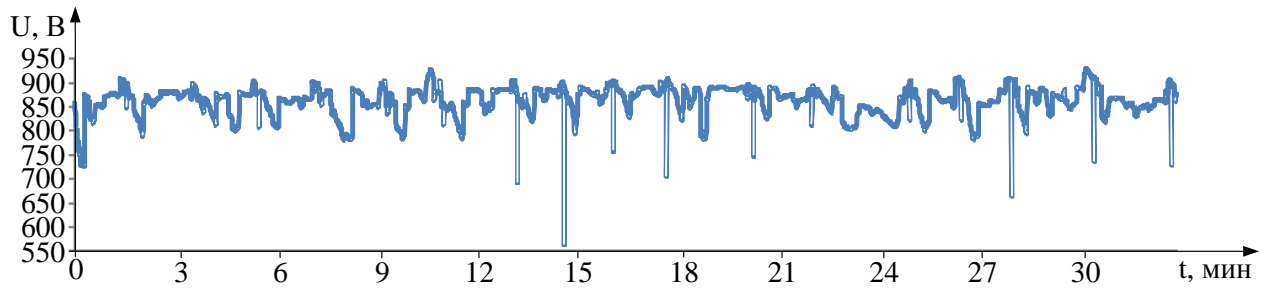
$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1)$$

Средняя мощность электроэнергии торможения определяется по выражению [7, 16]:

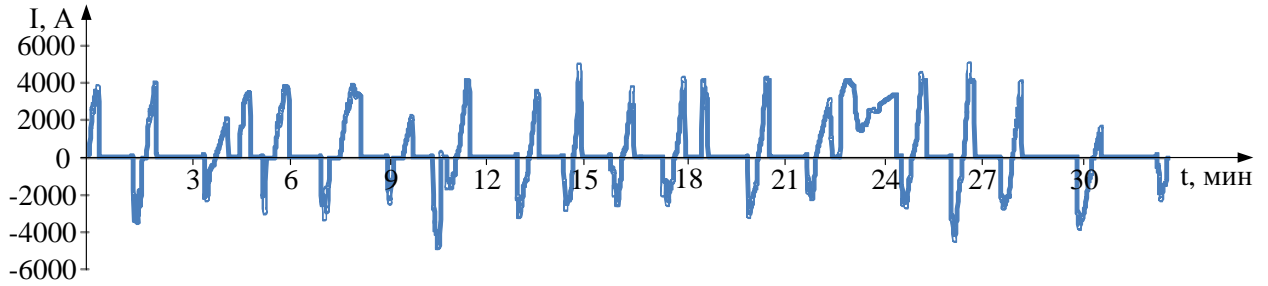
$$P_{cp} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N P_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N U_k \cdot I_k, \quad (2)$$

где N – общее количество интервалов дискретизации в процессе исследований;

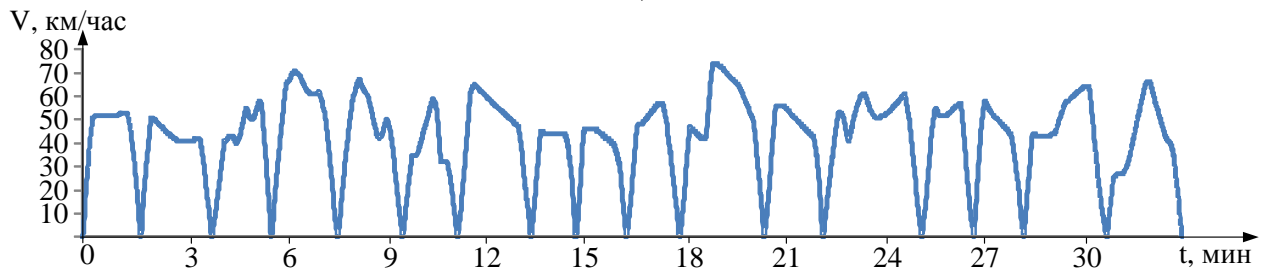
U_k , I_k – значения напряжения и тока в момент времени t_k при дискретизации сигналов $u(t)$ и $i(t)$.



a)

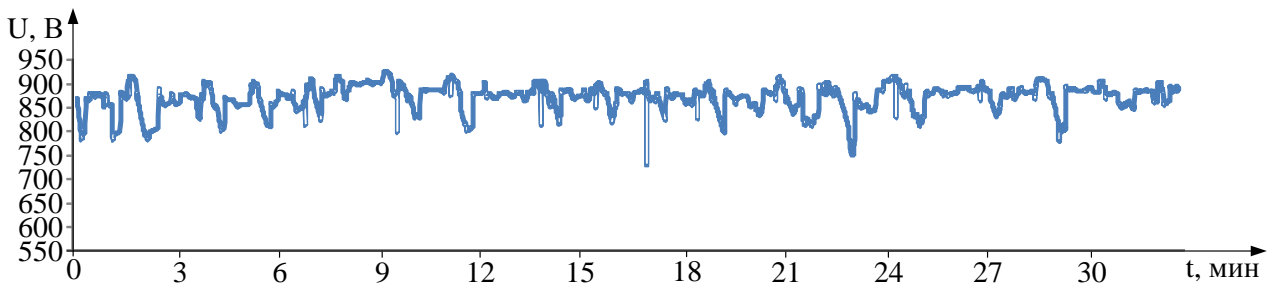


б)

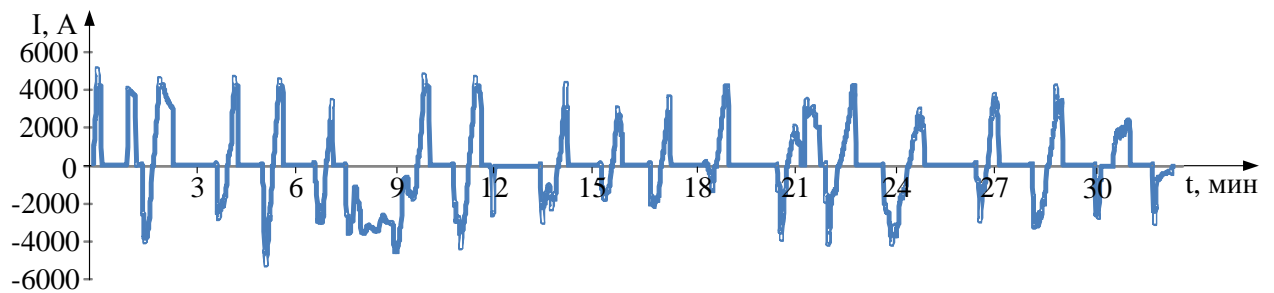


в)

Рис. 2 – Осцилограммы при эксплуатации поезда между станциями «Лесная–Академгородок»: а) напряжение на токоприемнике $U(t)$; б) ток поезда $I(t)$; в) скорость движения поезда $V(t)$



a)



б)

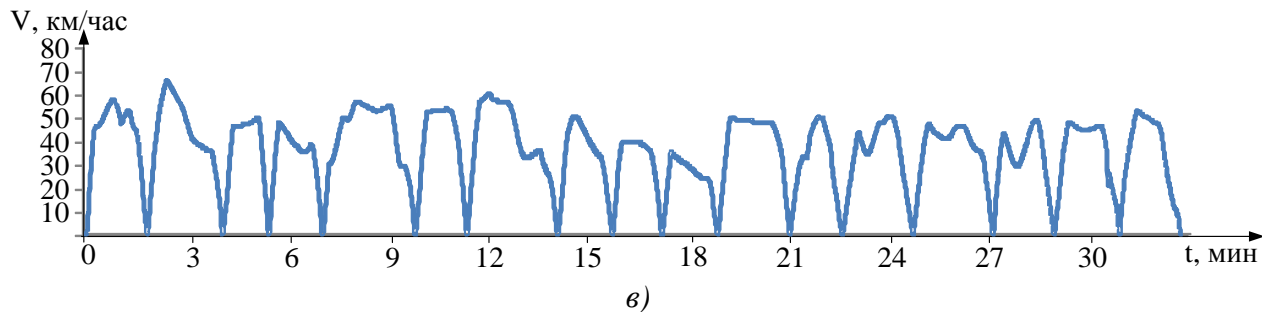


Рис. 3 – Осциллограммы при эксплуатации поезда между станциями «Академгородок–Лесная»: а) напряжение на токоприемнике \$U(t)\$; б) ток поезда \$I(t)\$; в) скорость движения поезда \$V(t)\$

Количество энергии электродинамического торможения определяется по выражению [7, 17]:

$$A = \frac{\int_0^T P dt}{3,6 \cdot 10^6} = \frac{\sum_{k=1}^T U_k \cdot I_k \cdot \Delta t}{3,6 \cdot 10^6}, \quad (3)$$

где \$T\$ – время (период) исследований;

\$\Delta t\$ – интервал квантования обработки сигналов \$u(t)\$ и \$i(t)\$, равный в данной работе 0,5 с. В предыдущих исследованиях [4, 18] выбор энергоемкости ЕНЭ предлагалось осуществлять по зависимости количества энергии электродинамического торможения подвижного состава от скорости начала торможения. Суть данного подхода заключается в определении диапазона необходимой энергоемкости для диапазона

максимальных скоростей начала торможения.

На основании обработки массивов данных был выполнен расчет необходимой энергоемкости ЕНЭ для заданных условий ведения подвижного состава с системами электродинамического торможения. График распределения скоростей начала торможения приведен на рис. 4.

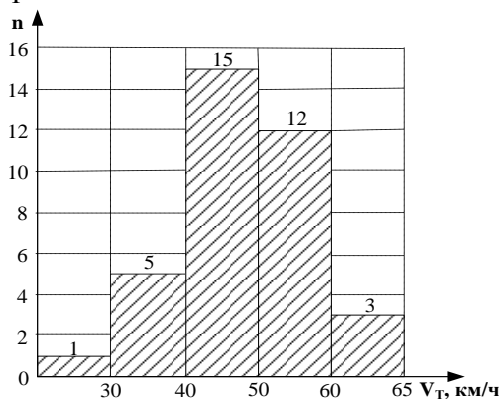


Рис. 4 – График распределения скоростей начала торможения для заданных условий ведения поезда

Полученная зависимость количества электроэнергии электродинамического торможения от скорости начала торможения на ровной площадке модернизированного поезда приведена на рис. 5.

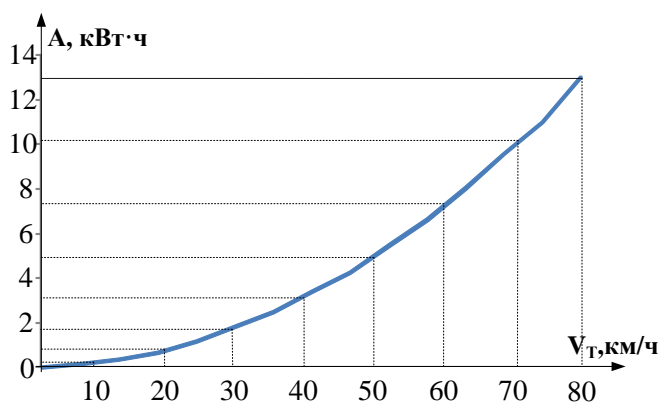


Рис. 5 – Зависимость количества электроэнергии электродинамического торможения модернизированного поезда от скорости начала торможения, при максимальной нагрузке

По результатам расчетов установлено, что для диапазона максимальных скоростей начала торможения равной 60–65 км/час энергоемкость ЕНЭ, устанавливаемого на борту модернизированного поезда, должна находиться в пределах 7,46–8,88 кВт·час.

В данном случае, при определении необходимой энергоемкости не учитывались профиль пути и количество энергии электродинамического торможения на «вредных» спусках. В реальных условиях эксплуатации количество выделяемой электроэнергии при подтормаживании на «вредных» спусках может в значительной степени превышать количество энергии при электродинамическом торможении с заданной скорости до полной остановки на ровном участке пути. Таким

образом, данный подход целесообразно применять при эксплуатации подвижного состава на ровных участках пути без наличия «вредных» спусков.

Также с применением данного подхода необходимая энергоёмкость ЕНЭ определяется исходя из зависимости количества энергии электродинамического торможения от скорости начала торможения, построенной при максимальной силе торможения. Как следствие, не предусматривается определение наиболее вероятной мощности торможения при эксплуатации поезда на заданном участке, что исключает корректное определение необходимой номинальной мощности ЕНЭ. Кроме того, данный подход неэффективен при электропневматическом (комбинированном) торможении, поскольку в данном случае количество энергии электродинамического торможения зависит от интенсивности. Вероятность применения комбинированного торможения возрастает при его максимальной интенсивности.

Авторами статьи предложен более совершенный подход к определению рациональных значений энергоёмкости и мощности бортового ЕНЭ, который учитывает вышеуказанные недостатки. Его суть заключается в определении необходимых параметров ЕНЭ на основании анализа плотности распределения количества и мощности энергии электродинамического торможения.

Зависимость количества энергии электродинамического торможения от скорости начала торможения для заданных условий ведения модернизированного поезда, полученная на основании экспериментальных исследований, приведена на рис. 6.

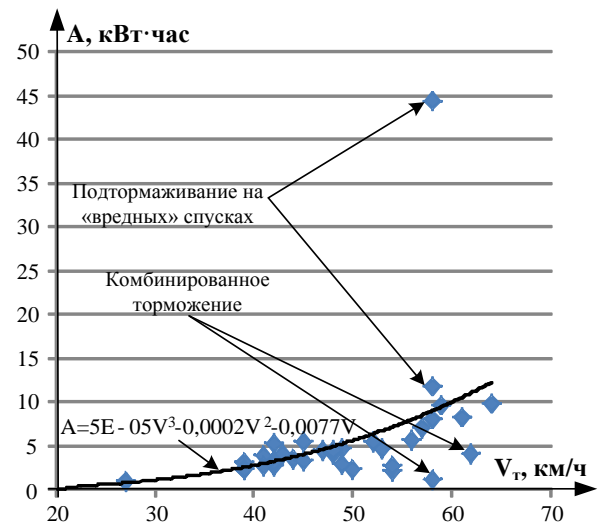


Рис. 6 – Зависимость количества энергии электродинамического торможения модернизированного поезда от скорости начала торможения при заданном режиме ведения

В данном случае по результатам полученных значений количества энергии электродинамического торможения для каждого режима торможения определяется диапазон изменения величины. После диапазон разбивается на несколько поддиапазонов. Для каждого поддиапазона определяется гистограмма плотности распределения количества электроэнергии с применением следующей формулы:

$$f = \frac{n_i}{n}, \quad (4)$$

где n_i – количество торможений для исследуемого поддиапазона.

Выбор рабочей энергоёмкости ЕНЭ предложено осуществлять в зависимости от закона распределения количества энергии электродинамического торможения для заданных условий ведения. При равномерном законе распределения энергоёмкость ЕНЭ предлагается выбирать по максимальному значению количества энергии электродинамического торможения (A_{max}) из n торможений. При других законах (треугольный, нормальный, логарифмически-нормальный, экспоненциальный и т.д.) – по среднему значению (A_{cp}), с учетом среднеквадратического отклонения (σ), то есть $A_{cp} + \sigma$. Среднее значение определяется для доверительного интервала выборки равного 0,95. Для получения необходимого доверительного ин-

тервала необходимо, чтобы объем выборки составлял $n \geq 30$ [19]. Значения количества энергии электродинамического торможения, не попадающие в доверительный интервал при определении среднего значения не учитываются.

Плотность распределения количества энергии электродинамического торможения подвижным составом для заданных условий ведения, представлена на рис. 7.

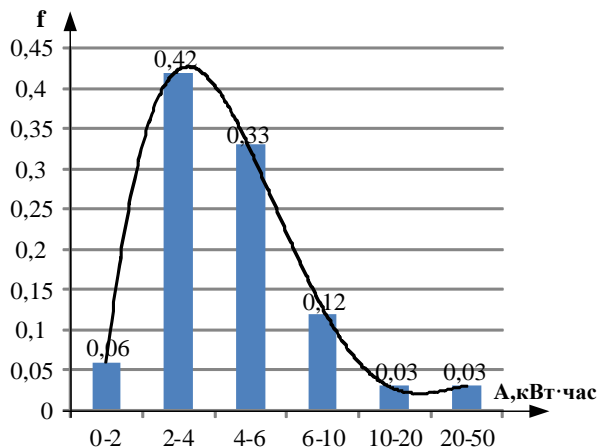


Рис. 7 – Гистограммы плотности распределения количества энергии электродинамического торможения

По результатам анализа рис. 5–7 установлено следующее:

- характер зависимостей количества энергии электродинамического торможения от скорости начала торможения на ровной площадке (рис. 5) и для заданных условий (рис. 6) одинаков, но разность численных значений с увеличением скорости торможения возрастает (для скорости начала торможения 50 км/час разность составляет 5,6 %, для 60 км/час – 22,5 %);
- значительное влияние на количество энергии электродинамического торможения оказывают профиль пути (наличие «вредных» уклонов) и наличие комбинированного торможения (рис. 6);
- необходимая энергоемкость ЕНЭ для сохранения полного количества энергии электродинамического торможения должна составлять не менее 44,4 кВт·час (рис. 6);
- плотность распределения количества энергии электродинамического торможения

для заданных условий ведения модернизированного поезда изменяется по логарифмически-нормальному закону (рис. 7).

Для логарифмически-нормального распределения закона определен доверительный интервал, который исключает значение количества энергии электродинамического торможения, равное 44,4 кВт·час. По результатам расчетов установлено, что для необходимого доверительного интервала среднее значение количества энергии электродинамического торможения (A_{cp}) составляет 4,58 кВт·час, среднее квадратическое отклонение (σ) – 2,75 кВт·час.

Таким образом, на основании предложенного подхода, оптимальная величина рабочей энергоемкости ЕНЭ, для рассматриваемого подвижного состава при заданных условиях, должна составлять 7,33 кВт·час.

Определение номинальной мощности ЕНЭ осуществлялась по среднему значению мощности электроэнергии торможения при эксплуатации поезда на заданном участке. Максимальную мощность ЕНЭ предлагается выбирать по максимальному (пиковому) значению мгновенной мощности энергии электродинамического торможения.

Зависимость средней мощности электродинамического торможения от скорости начала торможения для заданных условий ведения поезда, приведена на рис. 8. Плотность вероятности распределения средней мощности электродинамического торможения для заданных условий ведения подвижного состава, представлена на рис. 9. Максимальная (пиковая) мощность электродинамического торможения для каждого n-ого торможения, изображена на рис. 10.

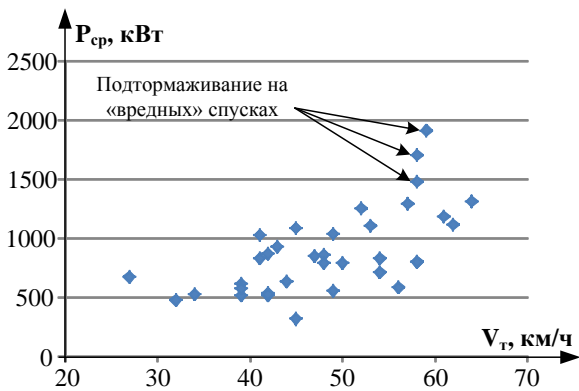


Рис. 8 – Зависимость средней мощности электродинамического торможения модернизированного поезда от скорости начала торможения при заданном режиме ведения

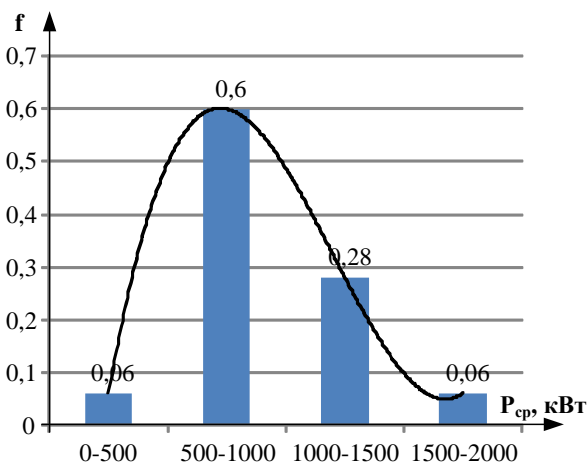


Рис. 9 – Гистограммы плотности распределения средней мощности электродинамического торможения

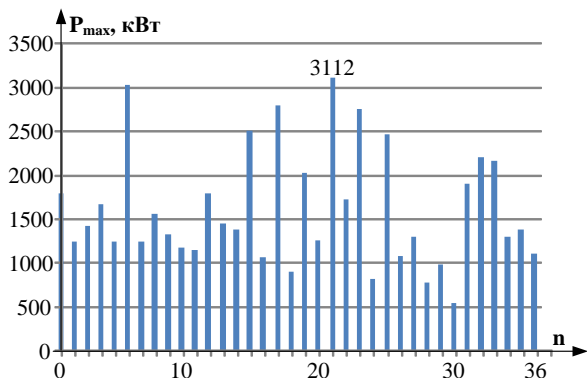


Рис. 10 – Максимальная мощность электродинамического торможения для n-ого торможения

Следует отметить, что гистограммы плотности распределения средней мощности торможения определяются аналогичным образом по формуле (4).

По результатам анализа зависимостей на рис. 8–10 установлено следующее:

– средняя мощность энергии электродинамического торможения находится в пределах 326ю...1924 кВт (рис. 8);

– плотность распределения средней мощности энергии электродинамического торможения для заданных условий ведения модернизированного поезда изменяется по нормальному закону (рис. 9);

– максимальная мощность энергии электродинамического торможения поезда для заданных условий составляет 3112 кВт (рис. 10).

Результаты расчетов значений необходимой энергоемкости и мощности бортового ЕНЭ для заданных условий ведения подвижного состава метрополитена, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения энергоёмкости и мощности бортового ЕНЭ

Параметр	Значение
Рабочая энергоемкость, кВт·час (МДж)	7,33 (26,4)
Номинальная мощность, кВт	883
Максимальная мощность, кВт	3112

В качестве бортового источника питания для данных параметров предложено использовать ЕНЭ, состоящий из конденсаторных модулей 60ЭК406 производства фирмы ЗАО «ЭЛТОН» («ЭСМА»). Внешний вид единичного конденсаторного модуля представлен на рис. 11.



Рис. 11 – Внешний вид конденсаторного модуля 60ЭК406

Основные технические характеристики этого модуля приведены в табл. 2.

Таблица 2
Параметры модуля 60ЭК406

Параметр	Значение
Рабочее напряжение, В	90-45
Ёмкость, Ф	147
Запасаемая рабочая энергоемкость, кДж	447
Внутреннее сопротивление, мОм	24
Масса, кг	82
Габаритные размеры, мм	774x423x223
Материал корпуса	Пластмасса
Рабочая температура, °С	-50...+60

По результатам расчетов получено, что для рабочего напряжения 450-900 В и рабочей энергоемкости 7,33 кВт·час (26,4 МДж), ЕНЭ должен состоять из 6 параллельных цепей по 10 последовательно соединенных конденсаторных модулей. Основные технические параметры блока ЕНЭ, предлагаемого для размещения на подвижном составе метрополитена с системами электродинамического торможения при заданных условиях его ведения, приведены в табл. 3.

Таблица 3
Технические параметры ЕНЭ

Параметр	Значение
Рабочее напряжение, В	900-450
Ёмкость, Ф	88,2
Запасаемая рабочая энергоемкость, Вт·час (МДж)	7,44 (26,8)
Внутреннее сопротивление, мОм	40
Масса, т	4,92
Габаритные размеры, м ³	4,5
Максимальная мощность, МВт	5,1

Данные, приведенные в табл. 3 свидетельствуют, что технические параметры ЕНЭ удовлетворяют ранее рассчитанным требованиям (табл. 1). При этом масса ЕНЭ составляет около 1,9 % от массы максимально нагруженного подвижного состава метрополитена.

Выводы

Анализ результатов исследований для заданных условий ведения подвижного состава (поезда) метрополитена с системами электродинамического торможения при его максимальной загрузке позволил установить следующее:

– для сохранения полного количества энергии электродинамического торможения необходим ЕНЭ, энергоемкость которого должна составлять не менее 44,4 кВт·час (160 МДж) при максимальной мощности 3,11 МВт;

– плотность количества энергии электродинамического торможения распределяется по логарифмически-нормальному закону, а плотность средней мощности – по нормальному закону;

– рабочая энергоемкость бортового ЕНЭ должна выбираться исходя из условий изменения количества энергии электродинамического торможения в пределах 0,95–44,4 кВт·час (3,42–160 МДж) и средней мощности в пределах 326–1924 кВт.

На основании предложенного подхода выполнен расчет, который позволил установить, что для заданного режима ведения поезда с системами электродинамического торможения, рабочая энергоемкость бортового ЕНЭ должна составлять 7,33 кВт·час (26,4 МДж), номинальная мощность – 883 кВт, максимальная мощность – 3112 кВт. По результатам анализа требований, предъявляемых к бортовому источнику питания, предложено использовать ЕНЭ, который состоит из 6 параллельных цепей по 10 последовательно соединенных конденсаторных модулей типа 60ЭК406 производства ЗАО «ЭЛТОН» («ЭСМА»).

Литература

1. Сулим А.А. Повышение эффективности энергообеспечения подвижного состава метрополитена с системами рекуперации путем применения емкостных накопителей энергии: дис. канд. техн. наук: 05.22.07./ Сулим Андрей Александрович.– Киев, 2015. – 188 с.

2. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О.І. Саблін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий: «Энергосберегающие технологии и оборудование». – X. Вип. 6/8 2014 – С. 9–13.

3. Сулим А.А. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена / А.А. Сулим, С.Д. Сычев, В.Р. Распопин, П.А. Хозя, А.А. Мельник, В.В.

Федоров // X Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів. Збірник матеріалів конференції. – Кременчук, КрНУ, 2012. – С. 344.

4. Щуров Н.И. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги / Н.И. Щуров, К.В. Щеглов, А.А. Штанг // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск, 2008. – Вып. № 1 (51). – С. 99–104.

5. Шевлюгин М.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореф. ди. д.т.н.: 05.09.03. / М.В. Шевлюгин. – М., 2013. – 49 с.

6. Бычкова М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро / М.П. Бычкова // электронный журнал «Энергосовест». – Петрозаводск, 2011. – Вып. 3 (16). – С. 74–76.

7. Костин Н.А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н.А. Костин, А.В. Никитенко // Залізничний транспорт України. – К., 2014. – Вып. 3. – С. 15–23.

8. Улитин В.Г. Проблема использования избыточной энергии рекуперации на городском электрическом транспорте / В.Г. Улитин // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – Харьков, ХГАГХ, 2009. – Вып. № 88. – С. 266–271.

9. Устенко А.В. Использование накопителей энергии для улучшения параметров локомотивов / А.В. Устенко, О.В. Пасько // Міжнародний інформаційний науково-технічний журнал «Локомотив-інформ». – Харків: Техностандарт, 2012. – № 10. – С. 4–6.

10. Омеляненко В.И. Накопители энергии – перспективная технология для железных дорог / В.И. Омеляненко, В.Е. Бондаренко, Г.В. Омеляненко, Л.В. Оверьянова // Міжнародний інформаційний науково-технічний журнал «Локомотив-інформ». – Харків: Техностандарт, 2011. – № 4. – С. 4–9.

11. Жемеров Г.Г. Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии / Г.Г. Жемеров, Н.А. Ильина, Д.В. Тугай, О.И. Холод // науково-практичний журнал «Електротехніка і електромеханіка». – Харків, 2013. – № 1. – С. 41–49.

12. Rufer, A. Power-Electronic Interface for a Supercapacitor-Based energy-Storage Substation in DC-Transportation Networks, EPE 2003: European Conference on Power Electronics and Applications, 2-4 September, Toulouse, France.

13. Сычев С.Д. Разработка программного обеспечения для измерительных комплексов на

базе персонального компьютера / С.Д. Сычев // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. № 15. – С. 131–134.

14. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 16669. Програмний комплекс для збору, відображення, запису та подальшої математичної обробки даних з аналого-цифрових перетворювачів у комп'ютеризованих вимірювальних комплексах («ЕЛЕКТРО») / Автор Сичов С.Д., авторські майнові права належать Сичов С.Д., ДП «УкрНДІВ», дата реєстрації 19.05.2006.

15. Нейман Л.Р., Теоретические основы электротехники – Л.: Энергоиздат, 1981. Т. 1. – 534 с.

16. Костин Н.А. Коэффициент мощности электроподвижного состава постоянного тока / Н.А. Костин, О.И. Саблин // Науково-практичний журнал «Електротехніка і електромеханіка». – Харків, 2005. – № 1. – С. 97–100.

17. Слепцов М.А. Основы электрического транспорта: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М.А. Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович и др. – М.: Издательский центр «Академия». – 2006. – 464 с.

18. Васильев В.А. Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / В.А. Васильев – СПб., 2012. – 16 с.

19. Вильгельм А.С. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на железных дорогах постоянного тока: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.07. / А.С. Вильгельм – Омск, 2013. – 20 с.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Сулим Андрей Александрович,
начальник отдела ГП «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения».
Ул. И. Приходько, 33, 39621, г. Кременчуг,
Украина.
Тел. +38 05366 620 43
E-mail: sulim1.ua@gmail.com

Донченко Анатолий Владимирович,
директор ГП «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения».
Ул. И. Приходько, 33, 39621, г. Кременчуг,
Украина.

Хозя Павел Александрович,
ГП «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»
Ул. И. Приходько, 33, 39621, г. Кременчуг,
Украина.
Тел.: +38 05366 620 43

Мужичук Сергец Александрович,
 головний конструктор по вагонам метрополитена
 ПАО «Крюковский вагоностроительный завод».
 Ул. И. Приходько, 139, 39621, г. Кременчуг,
 Україна.
 E-mail: zgk_metro@kvsz.com

Гончаров Александр Михайлович,
 начальник отдела подвижного состава филиала
 «Научно-исследовательский и конструкторско-
 технологический институт железнодорожного
 транспорта» ПАО «Укрзалізниця».
 Ул. И. Федорова, 39, Киев, Україна, 03038.
 Тел.: +38 044 465 39 92.
 E-mail: goncharov1520mm@gmail.com

Експлуатаційна робота

УДК 539.42:620.18:629.423

Канд. фіз.-мат. наук Л.Ф. Яценко
Інженер В.М. Повисий

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ НАНЕСЕННЯ МАРКУВАННЯ ТА ЇХ ВПЛИВ НА МІКРОСТРУК- ТУРУ БАНДАЖІВ

Ключові слова: бандаж, технологія марку-
 вання, втомне руйнування, мікро-структура.

Вступ та постановка проблеми

Більшість деталей, вузлів, а також облад-
 нання локомотивів під час експлуатації зна-
 ходяться під впливом як статичних, так і ди-
 намічних навантажень. З метою постійного
 контролю за роботою та технічним станом
 відповідальних вузлів протягом всього жит-
 тєвого циклу застосовуються різноманітні
 технології їх маркування.

Особливу увагу приділяють елементам, що
 мають безпосередній вплив на безпеку руху.
 Одним із таких елементів є бандаж колісної
 пари тягового рухомого складу.

На сьогодні в Україні застосовується єди-
 ний спосіб маркування бандажу методом гар-
 ячого штампування згідно вимог ГОСТ 398-
 96 [1].

Протягом останніх трьох років спеціаліс-
 тами філії «НДКТІ» ПАТ «Укрзалізниця»
 було проведено дослідження низки випадків
 руйнування бандажів колісних пар локомоти-
 вів через наявність втомних тріщин по знакам
 маркування.

Руйнування відбувалося по знакам «1»,
 «3», «8» та ін. незалежно від їх порядку роз-
 ташування на боковій зовнішній поверхні

бандажа. На рис.1 наведено злами окремих
 досліджених бандажів.

Загальною особливістю для всіх випадків є
 втомний характер розвитку тріщини та іден-
 тичний макро- і мікроефекти руйнування
 бандажів [2]. Осередком зародження втомної
 тріщини є концентратор напружень, який
 розташований в донній частині знаку марку-
 вання.

Враховуючи те, що руйнування бандажів
 тягового рухомого складу по знакам гарячого
 маркування є значною проблемою не тільки в
 Україні, а й поза її межами [3-6], то проблема
 її заміни та пошук інших альтернативних ме-
 тодів є актуальним питанням, що потребує
 уваги.

Метою статті є аналіз технологій марку-
 вання бандажів та встановлення умов, які
 сприяють втомному руйнуванню в зоні мар-
 кування на підставі фізико-хімічних, струк-
 турних та механічних досліджень фрагментів
 зруйнованих бандажів колісних пар, виготов-
 лених на ВАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ». Матеріал
 – сталь марки 2, маркування виконано спосо-
 бом гарячого штампування згідно ГОСТ 398-
 96.

При дослідженні використовувалося на-
 ступне обладнання: атомно-емісійний спект-
 рометр з лазерним збудженням «СПЕКС ЛА-
 ЕС МАТРИКС», оптичний мікроскоп
 Axiovert 25 SA, твердомір Брінелля, розривна
 випробувальна машина WDW-300E, маятни-
 ковий копер JB-W300A. Всі випробування
 здійснювалися у відповідності до норматив-
 них документів ГОСТ 9012 [7], ГОСТ 1778-70
 [8], ГОСТ 1497-84 [9], ГОСТ 9454-78 [10].