

**Автономность рекуперативного торможения – основа надежной и
энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе
постоянного тока**

Н. А. Костин (д. т. н., профессор), А. В. Никитенко (аспирант каф.
«Электротехника и электромеханика»)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта им. ак. В. Лазаряна (ДНУЖТ)

Постановка проблемы

Рекуперация является одной из важнейших составляющих энергосберегающей технологии перевозочного процесса на железных дорогах Украины, один из мощных источников сокращения электропотребления на тягу поездов [1, 2].

Путем использования процесса рекуперативного торможения (РТ) на электроподвижном составе возможно возвращение электроэнергии объемом до 8...10 % от энергии, затрачиваемой на электротягу поездов [1], а некоторые авторы увеличивают эти проценты до 10...15 % для электропоездов. В то же время в последние 20-25 лет объем энергии рекуперации не превышает 2,21 % от потребляемой [1, 3]. Более того, этот

процент ежегодно снижается настолько [3, 4], что в последние 15 лет этот показатель в среднем не превышает 1,71 % [1].

Указанное выше обусловлено рядом причин, частично приведенных в [1], а также, по нашему мнению, тем, что надежность, стабильность и электроэффективность существующих (в дальнейшем – традиционных) режимов РТ во многом зависит от системы тягового электроснабжения (СТЭ). Эта зависимость даже нормативно, согласно ГОСТ 19350-74, указывается в определении режима РТ: «Рекуперативное торможение – это режим электрического торможения, при котором электрическая энергия, вырабатываемая тяговыми электродвигателями, поступает в контактную сеть». По нашему мнению, именно этой необходимой связью с контактной сетью, этой неавтономностью ЭПС в режиме РТ; рассмотрим их.

1. Рекуперация электроэнергии и передача её в контактную сеть, как известно, возможны при условиях: а) что выходное напряжение U_p рекуперлируемых тяговых электродвигателей (ТЭД) электроподвижного состава (ЭПС) (согласно сумме ЭДС их якорей) выше напряжения на токоприемнике U_T ; б) но U_p не должно превышать максимально допустимое значение по потенциальным условиям на коллекторах ТЭД. Не соблюдение этого условия ведет к срыву РТ. Чем ниже U_T , тем проще и эффективнее осуществлять рекуперацию: снижение U_T позволяет увеличить дальность передачи энергии рекуперации от рекуперлируемого ЭПС до ЭПС, идущего в режиме тяги. Но возможность понижения U_T ограничена необходимостью

обеспечения пропускной способности данной фидерной зоны. Повышение же напряжения U_T вызывает опасение возникновения круговых огней на коллекторах ТЭД, что приводит к срыву рекуперации.

2. Вся электроэнергия, получаемая при традиционных режимах РТ и поступающая в контактную сеть, распределяется следующим образом.

Часть её должна потребляться ЭПС, идущими в режиме тяги на той же фидерной зоне. Но вероятность совпадения на данном участке актов рекуперации и тяги при существующих размерах движения невелика, не превышает 0,3.

Другая часть энергии, перетекая по шинам тяговой подстанции (ТП), распространяется на соседние фидерные зоны к ЭПС в режиме тяги (если таковые есть). Но такая передача возможна лишь в том случае, когда рекуперирующий ЭПС находится вблизи питающего фидера, иначе вследствие потерь в контактной сети будет нарушено условие, что $U_p > U_{ТП} + r_{к.с.} \cdot l_{к.с.} \cdot I_p$, и РТ не осуществится. Также очень незначительными являются потоки энергии рекуперации на соседние участки в случае их удаления от места РТ на 15 км и более.

Третья часть электроэнергии (избыточная) поступает на ТП к инверторным агрегатам (если таковые есть) или поглощающим балластным резисторам. Но в настоящее время по разным причинам инверторные установки практически на всех ТП всех железных дорог (за исключением ряда ТП Львовской дороги) или отсутствуют, или не эксплуатируются. К

тому же следует заметить, что решение проблемы повторного использования энергии рекуперации на основе инверторов является малоэффективным вследствие следующих причин:

а) при передаче рекуперированной электроэнергии от ЭПС к инверторам ТП и далее в первичную ЛЭП образуются потери энергии, достигающие до 25 % всей энергии рекуперации;

б) инверторные преобразователи обладают низким коэффициентом мощности λ , вследствие чего величина λ тяговой подстанции в режиме инвертирования составляет не более 0,6 [5]. В результате, да и вследствие нелинейности самого источника рекуперации, передаваемая во внешнюю энергосистему рекуперированная электроэнергия является энергией низкого качества, а значит, обладает низкой стоимостью и тем самым не оправдывает не только капитальных, но эксплуатационных затрат по осуществлению режима РТ;

в) применение инверторов приводит к ускоренному старению контактного провода в связи с протеканием дополнительных избыточных токов рекуперации, которые к тому же снижают пропускную способность контактной сети по условиям нагрева.

3. Диапазон скоростей, при котором возможно РТ узкий, при этом скорость нижней границы имеет высокое значение (например, для нового отечественного электропоезда ЕПЛ2Т она равна 45...50 км/час), так как в зоне небольших скоростей эффект от рекуперации мал, а опасность возникновения толчка тока при включении РТ на таких скоростях возрастает.

Изложенные выше «жесткие» условия возможного осуществления РТ и неэффективное использование рекуперированной и передаваемой в контактную сеть электроэнергии приводит к срывам рекуперации и снижает веру машинистов в её надежность, в результате они часто избегают применять рекуперативное торможение.

Следовательно, в настоящее время остро стал вопрос о повышении электроэнергетической эффективности рекуперативного торможения. По нашему мнению, необходимый новый толчок этому процессу возможен на основе теоретических и прикладных исследований по использованию в системах электрической тяги накопителей рекуперированной электроэнергии (НЭ).

Анализ последних публикаций по решаемой проблеме

Идея использования НЭ в различных устройствах и системах железнодорожного транспорта, в том числе в системах электротяги, не нова и не оспаривается. В публикациях преимущественно обсуждается два вопроса: первый – возможные варианты расположения НЭ (т.е. стационарные (на ТП или в тяговой сети) или бортовые (на ЭПС) установки НЭ); второй – необходимый тип НЭ и его массогабаритные и стоимостные показатели.

Наиболее обстоятельные исследования по возможности использования стационарных установок НЭ в системе электрической тяги постоянного тока и в метрополитене представлены в работах [6-10]. В этих работах рассматриваются вопросы применения установок или индуктивных, или

емкостных, или сверхпроводящих индуктивных накопителей в системе тягового электроснабжения: на ТП или в середине фидерной зоны на посту секционирования, или на остановочных пунктах (на станциях). Большинство исследователей, в том числе и зарубежных, считает, что наиболее целесообразными являются емкостные накопители (ЕНЭ). Поэтому, в частности, в Японии принято решение сосредоточить научные разработки в этом направлении [10]. Разработка и внедрение накопителей на базе суперконденсаторов (конденсаторов двойного электрического слоя (КДЭС)), позволяющих аккумулировать электроэнергию в режиме РТ, осуществляется на ТП г. Лозанны, Нью-Йорка, Лондона и в городах Германии [11]. Но режимы РТ, базирующиеся на стационарных НЭ, не обладают автономностью, они, как и традиционное РТ, связаны с контактной сетью, по которой идет передача накапливаемой и затем используемой электроэнергии. Поэтому такие режимы РТ обладают многими изложенными выше условиями, ограничениями и недостатками.

Имеющиеся на сегодня публикации свидетельствуют о том, что наиболее энергоэффективными, а поэтому и более перспективными, являются бортовые (автономные) системы НЭ, базирующиеся на КДЭС. Но в настоящее время такие системы еще только в стадии начальной теоретической разработки и поэтому публикации по ним немногочисленны, в частности.

В [8] авторы, базируясь на результатах и последующих электрических расчетах, оценивают потенциальный объем, поглощаемый бортовым

емкостным накопителем энергии рекуперации электровоза ВЛ10 с поездом массой 4200 т. на одном из двухпутных участков Западно-Сибирской железной дороги.

В ряде публикаций рассматриваются общие вопросы расположения емкостных НЭ на электроподвижном составе в городском электротранспорте, в частности, на троллейбусах типа ЗиУ-682Г.

В последние годы вопросы необходимости и возможности использования ЕНЭ исследуются и для дизель-поездов ДЕЛ-02 [12]. В частности, для дизель-поездов разрабатывать емкостные накопители энергии рекуперации рекомендуется на основе батареи ионисторов типа ЭСМА серии 300 (Украина).

Методика расчета емкости конденсаторного накопителя, размещенного непосредственно на вагонах метрополитена предложена в [13]. Конкретика выбора типа и энергоемкости КДЭС не рассматривается. Отсутствуют также исследования процесса разряда НЭ на тяговые двигатели.

Цель работы – предложение и обоснование нового вида, точнее режима, автономного фазового рекуперативного торможения и выбор для его осуществления типа и массогабаритных показателей бортовых систем емкостных НЭ. Предварительные расчеты показывают, что использование таких систем позволит повысить энергоэффективность рекуперации на 15...20 %.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований и их анализ

Сущность и новизна предлагаемого режима РТ заключается в следующем.

Представим цикл движения ЭПС (с поездами) следующими фазами: для электровозов с поездами – «тяга-РТ-выбег (или его отсутствие)-тяга»; для электропоездов – «пуск (тяга)-выбег-РТ-остановка-пуск (тяга)». Таких циклов при движении ЭПС на определенном участке железной дороги несколько. И для аккумуляирования всей рекуперирующей электроэнергии необходим бортовой емкостный накопитель очень большой энергоемкости и, следовательно, значительных массы и габаритов (вследствие параметров существующих пока что типов КДЭС). Поэтому в предлагаемом автономном фазовом режиме РТ предполагается (при отключенном ЭПС от контактной сети) накопление электроэнергии в фазе торможения, а её отдача осуществляется тяговыми двигателями ЭПС в следующей фазе цикла движения, то есть, в фазе тяги. Причем в начале фазы тяги ТЭД питаются только от ЕНЭ. По мере его разряда питание осуществляется параллельно, от НЭ и от контактной сети, а затем – только от контактной сети. Вследствие этого бортовой ЕНЭ должен рассчитываться исходя из рекуперирующей электроэнергии только одной фазы торможения ЭПС. Это позволяет использовать НЭ с минимально необходимой емкостью и массогабаритными показателями.

Кроме этого, применение предложенного режима позволяет: осуществлять РТ независимо от уровня напряжения в контактной сети; существенно расширить диапазон скоростей торможения, а, следовательно, увеличит величину эффективно используемой энергии РТ; обеспечить отсутствие потерь электроэнергии в контактной сети и устройствах ТП и тем самым повысить общий КПД системы тягового электроснабжения; повысить пропускную способность тяговой сети по условиям максимального тягового тока за счет отсутствия в контактной сети тока рекуперации.

Возможность практического осуществления предложенного режима РТ оценим на примере движения электропоездов типа ЕПЛ2Т (массой 566,5 т. с количеством осей 32) на участке Симферополь-Севастополь Приднепровской железной дороги и электровозов ВЛ8 с грузовыми поездами (массой 5250 т. с количеством осей 208) на участках Нижнеднепровск-Чаплино и Пятихатки-Нижнеднепровск-Чаплино той же дороги. Рассмотрение движения электропоездов обусловлено тем, что наиболее рациональное использование режимов РТ возможно в пригородном пассажирском движении, где торможение и пуск поездов происходит наиболее часто и независимо от рельефа местности пути (то есть, есть или отсутствуют уклоны).

На рис. 1 представлены регистрограммы напряжений на токоприемниках $U(t)$ соответственно ЕПЛ2Т и ВЛ8 и их тягово-рекуперативных токов $I(t)$, полученные экспериментальным путем на указанных участках. Как следует из этих зависимостей и работ [14, 15], напряжение $U(t)$ является

стационарным, а ток $I(t)$ – нестационарным случайными процессами. Поэтому для определения электроэнергии, расходуемой в фазе тяги W_T (далее - энергии тяги), и рекуперированной энергии W_P используем методы, базирующиеся на теории случайных процессов и изложенные в [15]. Поскольку в фазе тяги $U(t)$ и $I(t)$ продолжительные и практически непрерывные, то оценку энергии W_T за время $[0...T]$ необходимо выполнять по выражению

$$W_T = \int_0^T U(t) \cdot I(t) dt = \int_0^T P(t) dt, \quad (1)$$

где активная мощность в фазе тяги $P(t)$ определяется как [27]

$$P(t) = K_{UI}(t) - m_U(t) \cdot m_I(t), \quad (2)$$

где $K_{UI}(t)$ - взаимная корреляционная функция случайных процессов $U(t)$ и $I(t)$;

$m_U(t)$, $m_I(t)$ - функции математических ожиданий напряжения и тока.

В фазе рекуперации ток I относительно непродолжителен и поэтому энергию рекуперации W_P определим по выражению

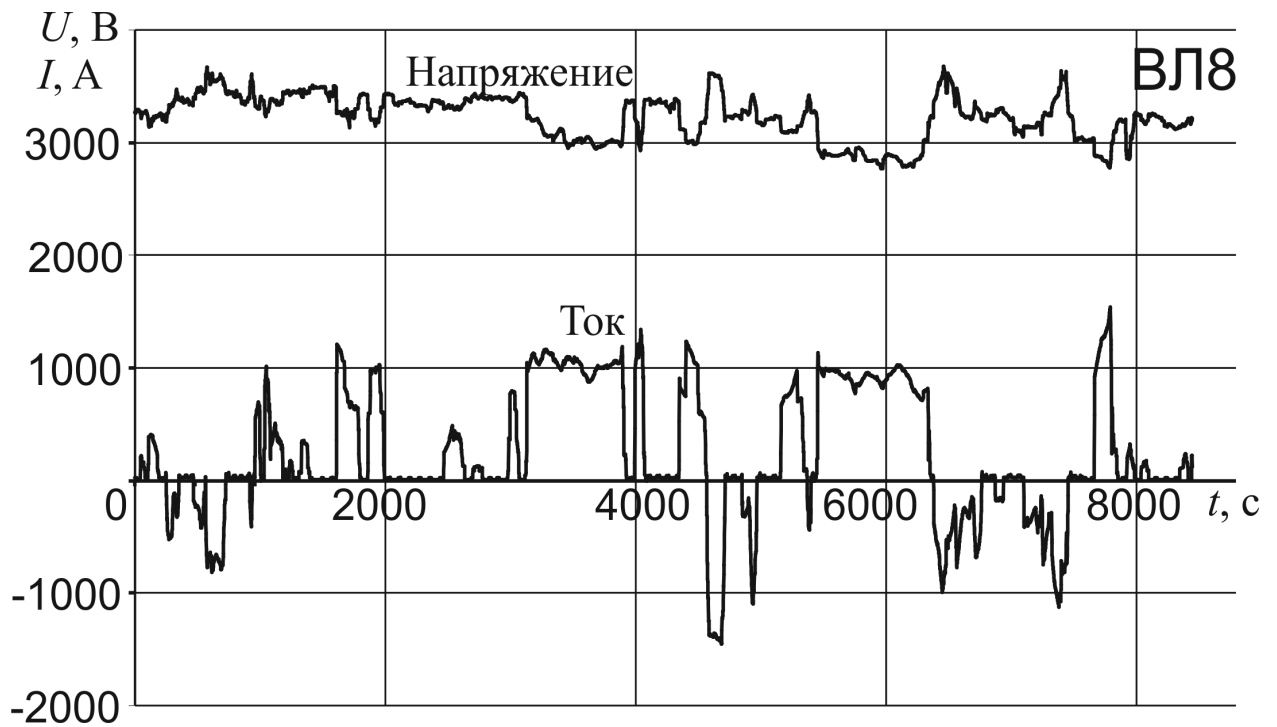
$$W_P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_k \cdot \Delta t = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k \cdot I_k \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где U_k , I_k - значения напряжения и тока в момент времени t_k при дискретизации процессов $U(t)$ и $I(t)$ в фазах рекуперации;

Δt - интервал дискретизации, определяемый по теореме Котельникова и равный в данной работе 1 с;

N - общее количество интервалов дискретизации.

На рис. 2, а и 3, а (соответственно для ЕПЛ2Т и ВЛ8) представлены гистограммы энергии рекуперации, полученной по формуле (3). Внешний вид этих статистических распределений свидетельствует о негауссовском законе распределения W_p .



(a)

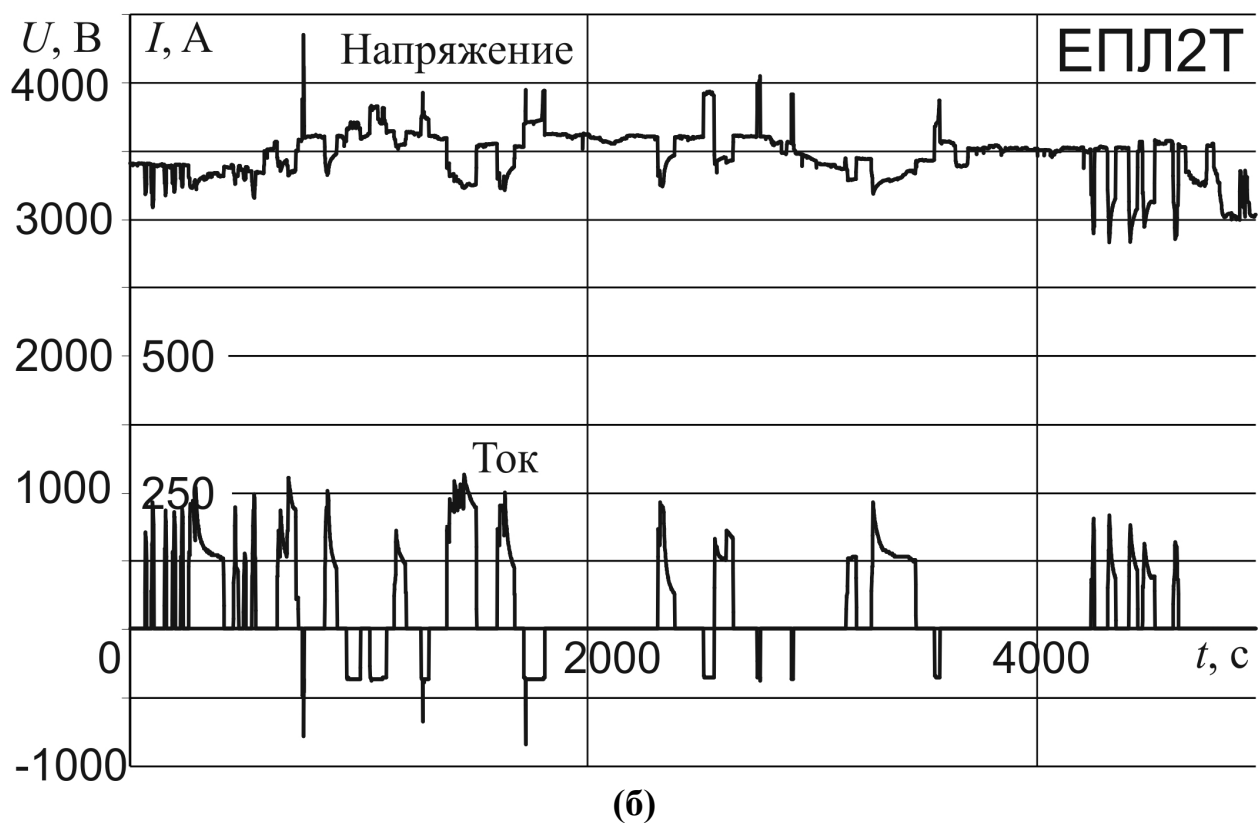
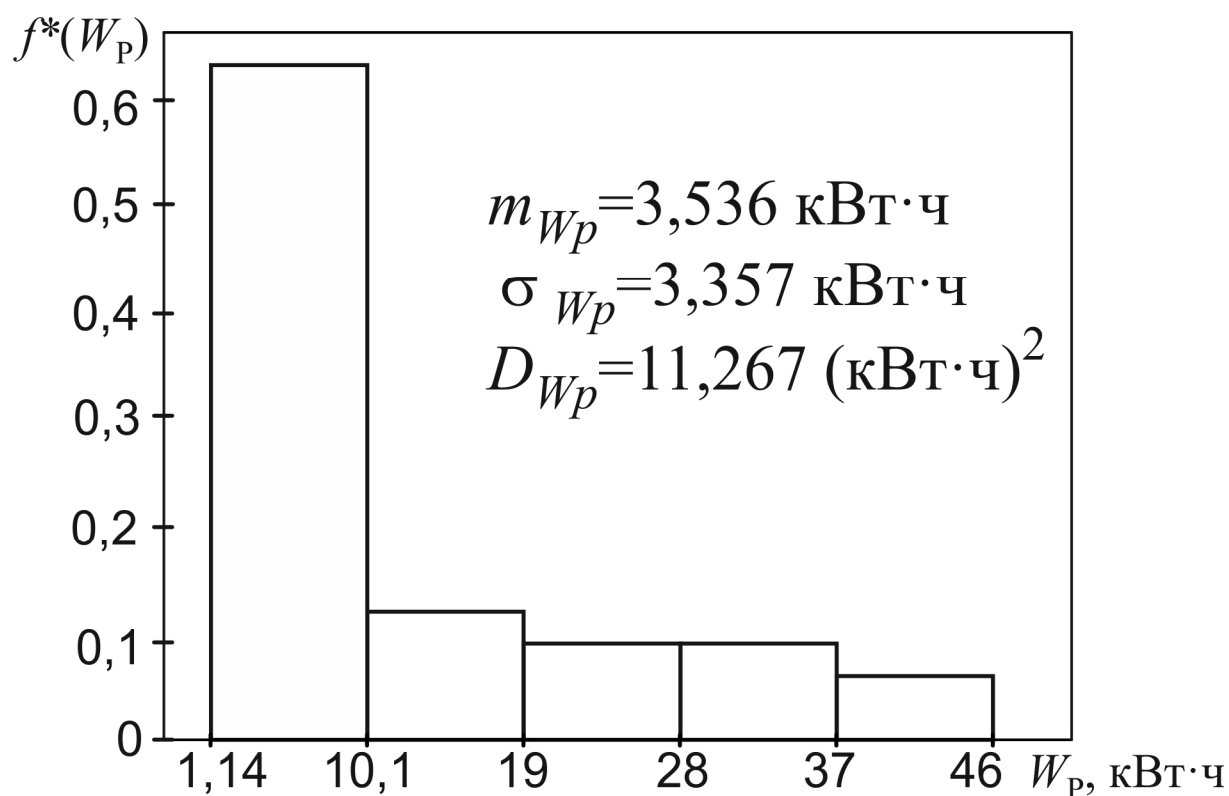
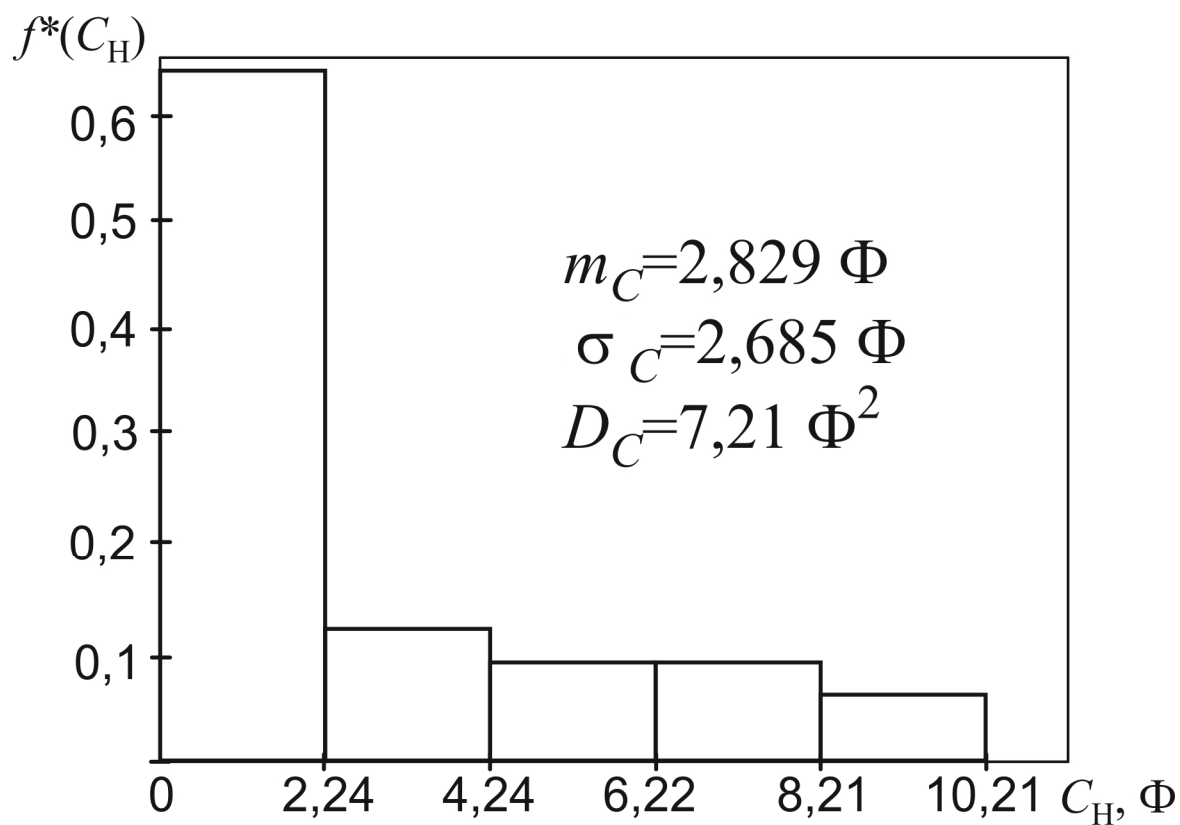


Рис. 1 Регистрограммы напряжений на токоприемниках $U(t)$ и тягово-рекуперативных токов $I(t)$ электровозов ВЛ8 (а) и электропоездов ЕПЛ2Т (б)

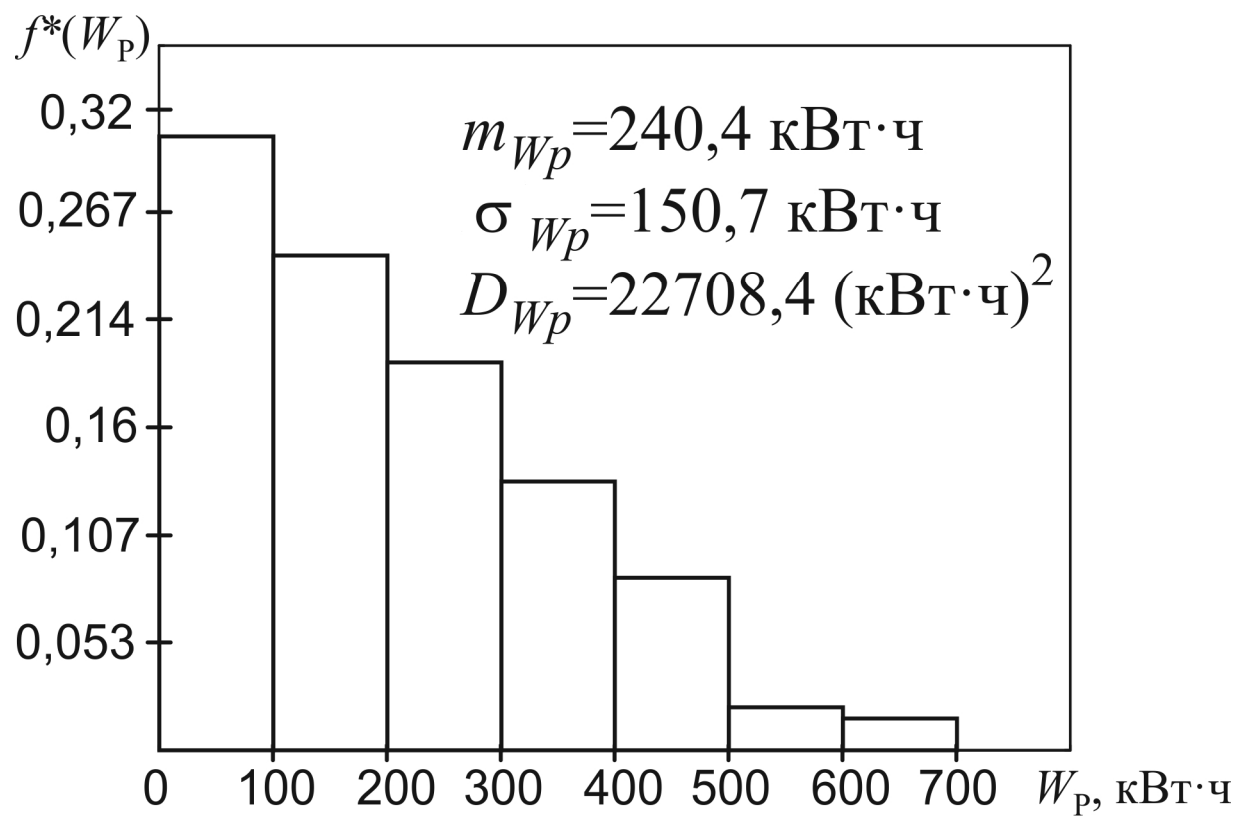


(a)

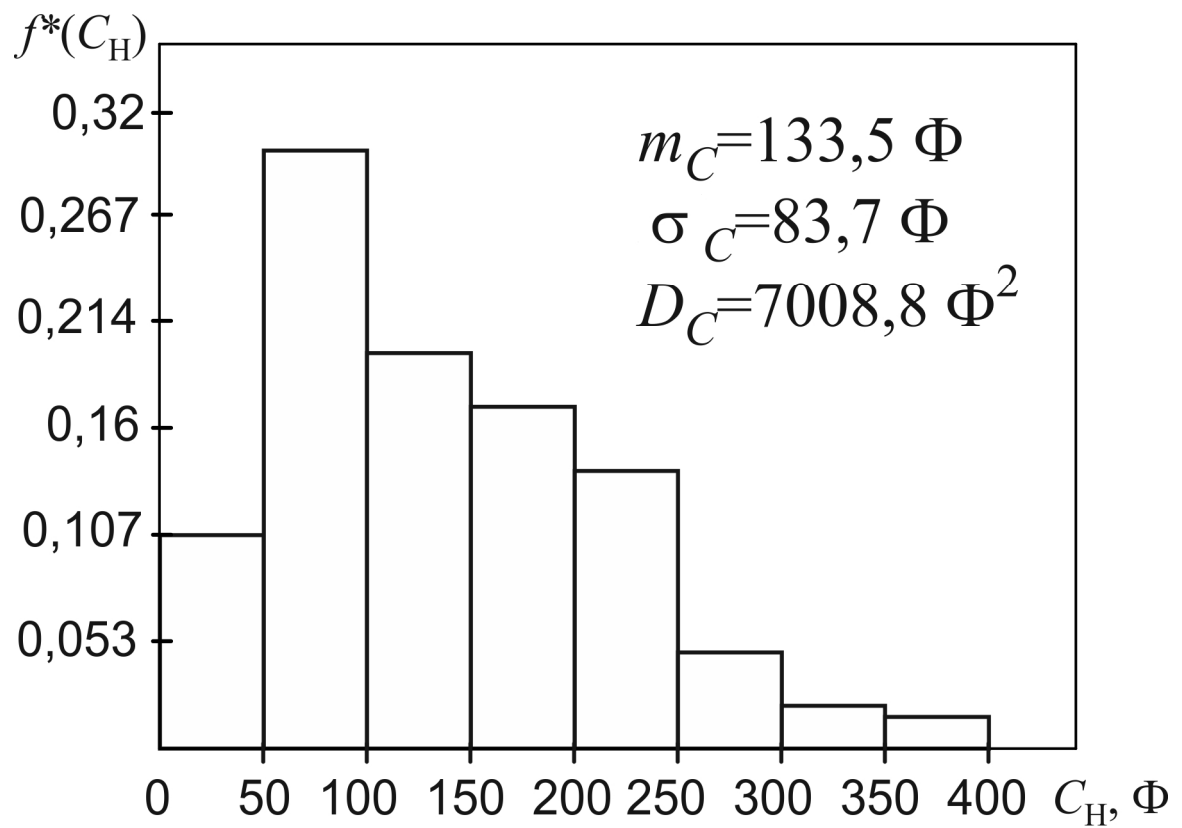


(б)

Рис. 2 Гистограммы энергии рекуперации W_p (а) и величин необходимых и достаточных емкостей C_H (б) бортового блока конденсаторов, размещенного на электропоезде ЕПЛ2Т



(a)



(б)

Рис. 3 Гистограммы энергии рекуперации W_p (а) и величин необходимых и достаточных емкостей C_H (б) бортового блока конденсаторов, размещенного на электровозе ВЛ8

Найденные выше значения энергии рекуперации W_p позволяют оценить энергоемкость НЭ, выбрать тип КДЭС и определить массогабаритные показатели всего бортового накопителя.

Емкость накопителя в первом приближении определим из известной формулы энергии электрического поля конденсатора

$$W_p = \frac{C_H \cdot U_{CH}^2}{2}, \quad (4)$$

здесь, W_p - энергия которая должна быть передана от ТЭД отключенного от контактной сети ЭПС емкостному накопителю;

U_{CH} - номинальное напряжение заряженного накопителя, равное 3000 В.

Это напряжение создается суммарной э.д.с. E_{Σ} якорей ТЭД, находящихся в режиме РТ и тем самым отключенных от контактной сети. Если в процессе РТ скорость V движения ЭПС снижается, тогда поддержание E_{Σ} , равной $c_e \cdot V \cdot \Phi$, возможно повышением Φ .

В результате расчета, согласно формуле (4), установлены величины необходимых и достаточных емкостей C_H блоков конденсаторов (БК), размещенных на ЕПЛ2Т и ВЛ8; их гистограммы представлены соответственно на рис. 2, б и 3, б. Дальнейшая задача, заключающаяся в

выборе типа КДЭС для обеспечения полученной величины C_H , является неоднозначной, так как от типа конденсатора зависят массогабаритные показатели всего БК, а последние являются основным критерием при оценке возможности использования ЕНЭ на ЭПС, то есть, бортовых систем накопления.

В настоящее время исследованиями и разработками в области КДЭС занимается большое количество компаний в различных странах. Наибольших успехов в области силовых КДЭС достигли фирмы Yünasko, Эконд, Элтон, Элитех, Maxwell, WIMA, Green-Cap, Nesscap, Epcos и др. Выборка наиболее подходящих модулей для создания БК с необходимыми для ЕПЛ2Т и ВЛ8, значениями емкостей, согласно рис. 2, б и 3, б, приведена в табл. 1 и 2. При комплектации БК целесообразно принять значения емкости C_H (рис. 2, б и 3, б), рассчитанные по наиболее вероятному (с вероятностью 0,94...0,95) объему электроэнергии, рекуперированной в процессе торможения.

Из анализа табл. 1 и 2 следует, что современный уровень технологических параметров КДЭС пока что таков, что бортовые установки накопления энергии торможения за всю поездку на рассматриваемом участке имеют такие значительные массу и объем, которые делают невозможным размещение НЭ на существующем ЭПС, в том числе на ЕПЛ2Т и ВЛ8. Однако прогресс в совершенствовании параметров КДЭС настолько быстр и безостановочен, что можно надеяться, что через 10...15 лет возможно будет

решить задачу бортовой системы НЭ для любого типа ЭПС в любом режиме автономного РТ.

А пока что, в настоящее время, учитывая параметры существующих КДЭС, возможна разработка и практическое использование бортовых ЕНЭ на моторвагонном подвижном составе, использующем предложенный автономный фазовый режим РТ, что видно на примере электропоезда ЕПЛ2Т. Действительно, согласно рис. 2, б, наиболее вероятное значение емкости накопительного блока составляет 2-5 Ф. При комплектации этого блока конденсаторами фирмы YUNASKO или Maxwell его масса составит ≤ 900 кг, а объем $\sim 1,2$ м³. Если принять C_H , равной 10 Ф (согласно рис. 2, б), масса и объем увеличатся соответственно до ~ 2200 кг и ~ 2 м³. В обоих случаях БК с такими массогабаритными показателями возможно разместить на 4-х моторных вагонах электропоезда. При этом масса накопителя составит не более 0,4 % от массы нетто электропоезда.

Таблица 1

Параметры системы накопления энергии рекуперации за всю поездку

W_p , кВт·ч	Произво- дитель	Емкость 1-го элемент., Ф	C_H , Ф	Вес, кг	Объем, м ³
для электропоезда ЕПЛ2Т					
от 26 до 98	YUNASKO (Украина)	3000	80,91	15679	16
	Maxwell (США)	3000	80,91	17013	16,6
для электровоза ВЛ8					
от 200 до 650	YUNASKO (Украина)	3000	402,96	118476	120,8
	Maxwell (США)	3000	402,96	128560	125,2

Таблица 2

Параметры системы накопления энергии рекуперации за акт торможения для электропоезда ЕПЛ2Т (2Г+2П+4М)

Производитель	Тип накопителя	Емкость 1-го элем., Ф	C_H , Ф	Вес, кг	Объем, м ³
YUNASKO (Украина)	E-cell	1500	5,396	1067,52	1,344
	E-cell	3000	10,792	2090,56	2,12
	E-cell	1200; 3000	15,1	2846,52	3,452
	E-cell	3000	21,584	4181,12	4,24
ЭКОНД (Россия)	60/200	3	4,8	8640	4,68
			10,4	18720	10,14
ЭЛТОН (Россия)	20ЭК401S	300	11,54	7488	5,408
	МКЭ-С-147-87С	147	16,8	11620	10,8
	10ЭК402S	1000	19,3	11178	7,535
ЭЛИТех (Россия)	24ПП-40/0,003	139	5,344	12480	8,9
	24ПП-30/0,003; 24ПП-50/0,002	104; 174	10,69	22672	15,768
Maxwell (США)	BCAP1500	1500	5,4	1245	1,361
	BCAP3000	3000	10,792	2268,48	2,21
	BCAP1200; BCAP3000	1200; 3000	15,11	3424,96	3,396
	BCAP3000	3000	21,584	4536,96	4,424
Nesscap (Корея)	ESHSR-1600C0-002R7A5T	1600	5,756	1512,32	1,379
	ESHSR-3000C0-002R7A5T	3000	10,792	2379,68	2,224
	ESHSR-1200C0-002R7A5T; ESHSR-3000C0-002R7A5T	1200; 3000	15,1	3647,36	3,425
	ESHSR-3000C0-002R7A5T	3000	21,58	4759,36	4,448

ВЫВОДЫ

1. Существующие режимы рекуперативного торможения на электроподвижном составе постоянного тока обладают рядом существенных недостатков, которые сдерживают их стабильное применение и заметно снижают также их энергоэффективность.
2. Повышение электроэнергетической эффективности традиционных режимов рекуперации наиболее целесообразно осуществлять разработкой и

использованием бортовых систем накопления рекуперированной электроэнергии, работающих в предложенном автономном фазовом режиме рекуперации.

3. Наиболее эффективными, удовлетворяющими основным требованиям бортовых систем аккумулирования электроэнергии рекуперации и поэтому наиболее перспективными, являются накопители на базе КДЭС. Последние сочетают в себе высокое значение запасаемой удельной энергии, большое число зарядно-разрядных циклов, высокий коэффициент полезного действия, длительное время хранения запасенной электроэнергии, работу в широком диапазоне температур и др.

4. В настоящее время разработка и внедрение бортовых систем НЭ наиболее актуальны для ЭПС пригородного пассажирского и городского электротранспорта

Литература

1. Щербак, Я. В. Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Залізничний транспорт України. – 2011. - №2. – С. 30-34.

2. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. №145-р. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link/FIN38530.html

3. Сергієнко, М. І. Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її результати / М. І. Сергієнко // Локомотив-інформ. – 2010. - №4. – С. 24-26.

4. Лашко, А. Д. Енергозбереження на залізничному транспорті України / А. Д. Лашко, М. І. Сергієнко // Залізничний транспорт України. – 2011. – №4. – С. 7-11.

5. Фукс, Н. Л. Оптимизация приема энергии рекуперации / Н. Л. Фукс // Железнодорожный транспорт. – 1983. – №3. – С. 40-42.

6. Шевлюгин, М. В. Ресурс- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.02 / Шевлюгин Максим Валерьевич ; Московский государственный университет путей сообщения. – М., 2009. – 49 с.

7. Бродский, Ю. А. Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе емкостных накопителей энергии / Ю. А. Бродский, А. И. Подаруев, В. Н. Пупынин, М. В. Шевлюгин // Электротехника. – 2008. – №7. – С. 38-41.

8. Черемисин, В. Т. Выбор мест установки накопителей электроэнергии на полигоне постоянного тока по критерию энергоэффективности / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, В. Л. Невезак // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. – 2013. – №2(6). – С. 48-52.

9. Moninger, F. Инерционные накопители энергии в системах тягового электроснабжения / F. Moninger // Железные дороги мира. – 2000. – №12. – С. 41-43.

10. Negishi, H. Аккумулирование энергии на железных дорогах // H. Negishi // Железные дороги мира. – 2003. – №6. – С. 55-59.

11. 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.

12. Сергієнко, М. І. Оцінка ефективності застосування накопичувачів електроенергії в енергетичній установці дизель-поїзда ДЕЛ-02 / М. І.

Сергієнко, М. В. Панасенко, В. І. Пелепейченко, Д. О. Гордієнко // Залізничний транспорт України. – 2011. – №4. – С. 29-35.

13. Рябцев, Г. Г. Расчет конденсаторных накопителей энергии для вагонов метрополитена / Г. Г. Рябцев, И. А. Ермаков, Н. А. Рубичев // Электротехника. – 2011. – №8. С. 15-19.

14. Kostin, Mykolay Statistics and Probability Analysis of Voltage on the Pantograph of DC Locomotive in the Recuperation Mode / Mykolay Kostin, Anatoliy Nikitenko // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. – 2013. – №2a. – P. 273-275.

15. Нікітенко А. В. Кореляційно-дисперсійний метод визначення складових повної потужності в пристроях електричної тяги / А. В. Нікітенко, М. О. Костін // Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ. – Д.: Видавництво ДНУЗТ, 2013. - №2(44). – С. 64-75.

Автономність рекуперативного гальмування – основа надійної і енергоефективної рекуперації на електрорухомому складі постійного струму / М. О. Костін, А. В. Нікітенко // Залізничний транспорт України. – 2014. – №3 – С.

В статті пропонується та обґрунтовується новий, автономний фазовий, режим рекуперативного гальмування електрорухомого складу постійного струму при умові застосування бортового накопичувача електроенергії, який базується на використанні сучасних суперконденсаторів. Виконано моніторинг напруг та струмів для електровозів ВЛ8 і електропоїзда ЕПЛ2Т, що працюють на ділянках Придніпровської залізниці. За результатами вимірів проведено числові розрахунки енергоемності і масогабаритних показників накопичувача енергії рекуперації.

Ключові слова: рекуперація, електроенергія, автономний режим, електрорухомий склад, ємнісний накопичувач, бортова система, енергоефективність, напруга, струм.

Автономность рекуперативного торможения – основа надежной и энергоеффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н. А. Костин, А. В. Никитенко // Залізничний транспорт України. – 2014. – №3 – С.

В статье предлагается и обосновывается новый, автономный фазовый, режим рекуперативного торможения электроподвижного состава постоянного тока при условии применения бортового накопителя электроэнергии, который основан на использовании

современных суперконденсаторов. Выполнено мониторинг напряжений и токов для электровазов ВЛ8 и электропоездов ЕПЛ2Т, которые работают на участках Приднепровской железной дороги. По результатам измерений проведены численные расчеты энергоемкости и массогабаритных показателей накопителя энергии рекуперации.

Ключевые слова: рекуперация, электроэнергия, автономный режим, электроподвижной состав, емкостный накопитель, бортовая система, энергоэффективность, напряжение, ток.

Recuperative braking autonomy is a basis of reliable and efficient energy recuperation in DC electric rolling stock / Kostin Mykola, Nikitenko Anatolii // Railway Transport of Ukraine. – 2014. – №3 – P.

The recuperative braking is one of the most significant parts of the energy saving technologies in the railway transport of Ukraine. It allows to recover the electric energy equals 8...15 % of the total energy which is spent to electric traction of the trains. In fact, it volume is 2.21 % of total energy and it has decreased over recent 20-25 years. This fact is explained by many shortcomings and one of them is connection of the electric rolling stock with traction power supply system. In the paper the off-line recuperative braking mode of the DC electric rolling stock is proposed. It based on the on-board energy storage system which uses the state-of-the-art supercapacitors. This mode allows to keep off the shortcomings which are in traditional recuperative braking mode. But the second main idea is the energy storage technology. The on-board storage system saves the energy for one phase (act) of recuperative braking. After this the storage system supply the traction motors in the next phase (traction mode). The numerical calculations of the storage capacity, weight and size indices of the storage system are evaluated for the electric locomotives VL8 and trains EPL2T which operate in the sections of Prydniprovsk railway. The results of calculation show that the off-line recuperative braking mode can be fully realized only for trains.

Key words: recuperation, electric energy, off-line mode, electric rolling stock, capacitive storage, on-board system, energy efficiency, voltage, current.

Микола Олександрович Костін,

д. т. н., професор,

каф. «Електротехніка та електромеханіка»,

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак.
В. Лазаряна (ДНУЗТ)

Кімн. 238, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна

Тел. +380563731537

dnurt_toe@mail.ru

Анатолій Володимирович Нікітенко,

асистент

каф. «Електротехніка та електромеханіка»,

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак.
В. Лазаряна (ДНУЗТ)

Кімн. 238, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна
Тел. +380935317623
nikitenko.diit@gmail.com

Николай Александрович Костин,
д. т. н., профессор,
каф. «Электротехника и электромеханика»,
Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта им. ак. В. Лазаряна (ДНУЖТ)
Комн. 238, ул. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск, 49010, Украина
Тел. +380563731537
dnurt_toe@mail.ru

Анатолий Владимирович Никитенко,
ассистент
каф. «Электротехника и электромеханика»,
Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта им. ак. В. Лазаряна (ДНУЖТ)
Комн. 238, ул. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск, 49010, Украина
Тел. +380935317623
nikitenko.diit@gmail.com

Mykola O. Kostin
D.Sc., prof.
Department «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk
national University of Railway Transport named after Ac. V. Lazarian (DNURT)
Lazariana Str., 2, Room 238, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine
Tel. +380563731537
dnurt_toe@mail.ru

Anatolii V. Nikitenko
Assistant of lecturer
Department «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk
national University of Railway Transport named after Ac. V. Lazarian (DNURT)
Lazariana Str., 2, Room 238, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine
Tel. +380935317623
nikitenko.diit@gmail.com