

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

УДК 621.1

Ф.М.Алпатов

(Украина, Киев, Национальный технический университет Украины «КПИ»)

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЦА: ПРОБЛЕМЫ, РЕСУРСЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ.

Анотація. Стаття є оглядом автономних нетрадиційних джерел енергії. Представлені відомості про можливості і потенціал енергії Сонця. Розглянуті фотоелектричні системи перетворення сонячної енергії, паливні елементи, хімічні джерела струму. Проаналізовані особливості і масштаби їх використання.

Ключові слова: джерело, енергія, система, перетворення, можливості, показники

Аннотация. Статья представляет собой обзор автономных нетрадиционных источников энергии. Представлены сведения о возможностях и потенциале энергии Солнца. Рассмотрены фотоэлектрические системы преобразования солнечной энергии, топливные элементы, химические источники тока. Проанализированы особенности и масштабы их использования.

Ключевые слова: источник, энергия, система, преобразование, возможности, показатели

Abstract. The article is a review of the stand-alone non-traditional sources energii. Present information about the capabilities and potential of solar energy. Considers photovoltaic systems convert solar energy, fuel cells, chemical sources of electricity. The analysis of their use are described features of their use.

Keywords: source, energy, system, transformation, indicators, potentialities

Вступлення. Технологія источников возобновляемой энергии – область науки, промышленности и техники, охватывающая производство, передачу, накопление и потребление электрической, тепловой и механической энергии, получаемой за счёт использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии – солнца, ветра, тепла Земли, биомассы, малых рек, морей и океанов, низкопотенциального тепла, а также новых и альтернативных экологически чистых видов энергии. Эффективное использование всех без исключения видов энергии невозможно без применения наукоемких и нестандартных технологий и соответствующего оборудования. Существуют различные оценки принципиальной возможности решения энергетической проблемы с помощью источников возобновляемой энергии, в том числе энергии Солнца. Обоснованная оценка этой проблемы принадлежит академику П.Л. Капице [1]. Все энергетические процессы сводятся к трансформации одного вида энергии в другой. Трансформация энергии обычно происходит в некотором объеме, в который через поверхность поступает один вид энергии, а выходит другой. Математически плотность потока энергии описывается вектором Умова-Пойнтинга

$$\mathbf{U} = v\mathbf{F},$$

где v - скорость распространения процесса, \mathbf{F} – объемная плотность энергии.

Плотность энергии, поступающей в объем, ограничена скоростью v , которая определяется свойствами проводящей среды. Анализ показывает, что ограничение плотности потока энергии вынуждает отказаться от применения весьма эффективных способов преобразования энергии в энергетике больших мощностей. Так, в топливных элементах, в которых происходит прямое превращение химической энергии окисления водорода в электрическую энергию, этот процесс осуществляется с коэффициентом полезного действия около 70%. Но применение топливных элементов в энергетике больших мощностей ограничивается малой скоростью диффузионных процессов в электролитах, вследствие чего плотность потока энергии очень мала, и с квадратного метра электрода можно снять только 200 Вт. Для мощности 100 МВт необходимая площадь составляет $5 \cdot 10^5 \text{ м}^2$, и капитальные затраты на постройку такой станции не оправдаются производимой ею энергией.

Прямое превращение также связано с ограниченной плотностью потока энергии. Если считать, что снимаемая с одного квадратного метра солнечной батареи мощность равна 100 Вт, то для генерирования мощности 100 МВт необходима площадь в один квадратный километр. Капитальные затраты на строительство такой энергостанции не всегда оправдаются производимой ею энергией.

Особенности использования. Энергия, которая используется людьми, делится на две неравные части. Первая – это так называемая бытовая энергия, энергия малых мощностей, непосредственно обеспечивающая культурный образ жизни. Эта энергия используется для отопления, освещения и питания многочисленных бытовых приборов. Используемая в быту энергия исчисляется киловаттами. Второй вид энергии – это промышленная энергия, энергия больших мощностей, используемая в металлургии, на транспорте, в машиностроении, в сельском хозяйстве и т.д. Эта энергия значительно больше бытовой, мощность ее исчисляется в мегаваттах.

Из анализа, основанного на понятии плотности потока энергии, следует, что рентабельное использование возобновляемых источников возможно только при малых мощностях этих источников. Отсюда вытекает необходимость разработки автономных источников возобновляемой энергии.

Возобновляемые источники энергии не ведут к дополнительному насыщению планеты теплом. Их вредное воздействие на окружающую среду, загрязнение атмосферы, почвы и воды в целом гораздо ниже, чем у традиционных тепловых и атомных электростанций или гидроэлектростанций. При внедрении 1 МВт мощности на солнечных, ветровых или геотермальных энергоустановках при выработке около 2 млн. кВт·ч в год может быть предотвращен выброс почти двух тысяч тонн двуокиси углерода, пятнадцати тонн сернистого газа и двух тонн окислов азота.

При рациональном использовании энергии для создания комфортных по современным понятиям условий жизни требуется в среднем 2 кВт на человека. С одного квадратного метра земной поверхности за счет всех источников возобновляемой энергии можно получить около 500 Вт мощности. Даже если эффективность преобразования этой энергии в удобную для потребления форму равна всего лишь 4%, для мощности 2 кВт требуется площадь 100 м². Средняя плотность населения в городах составляет приблизительно 500 человек на 1 км². Для обеспечения их энергией из расчета 2 кВт на человека необходимо с 1 км² снимать 1000 кВт. Таким образом, для обеспечения населения электроэнергией достаточно использовать всего 5% занимаемой этим населением площади. Возобновляемые источники энергии в принципе могут обеспечить удовлетворительное качество жизни населения Земли. По прогнозу к 2020 г. эти источники заменят около 2,5 млрд. т топлива, их доля в производстве электроэнергии и теплоты составит 8%. В табл. 1 приведены данные о возобновляемых источниках энергии.

Таблица 1. Возобновляемые источники энергии

Первичный вид энергии	Источник энергии	Мировые ресурсы, 10 ¹⁵ кВт·ч/год
Механическая	Сток рек	0,028
	Волны	0,005-0,05
	Приливы и отливы	0,09
	Ветер	0,5-5,2
Тепловая	Градиент температур: воды морей и океанов	0,1-1,0
	воздуха	0,001-0,01
	недр земли (вулканов)	0,05-0,2
Лучистая	Солнечное излучение на поверхность Земли	200-280
	Полная энергия	1570
Химическая	Растения и торф	10

По данным международного энергетического агентства [3] в конце двадцатого столетия производство электроэнергии за счёт нетрадиционных возобновляемых источников энергии составило более в 200 млрд. кВт или около 2,0% от общего производства. В настоящее время доля этой энергии по различным оценкам возросла до 10 – 13 %. Потенциальные мощности возобновляемых источников энергии составляют (тонн условного топлива в год): энергии Солнца – 2300 млрд.; энергии ветра – 26,7 млрд.; энергии биомассы -- 10 млрд. Эти источники энергии создают перспективы для решения энергетических проблем без отрицательных экологических последствий. В настоящее время освоено производство широкой номенклатуры оборудования и установок нетрадиционной и малой энергетики, которые могут найти применение и уже используются на практике. В их числе:

- ветроэлектрические установки широкого ряда мощностей - от 100 Вт до 1 МВт;
- фотопреобразователи и модули солнечных батарей со сроком службы от 5 до 20 лет, а также их системы с аккумуляторами и инверторами;
- тепловые коллекторы, использующие современные материалы для коррозионно-стойких панелей и оптических покрытий;
- агрегаты малых и микро-ГЭС различных типоразмеров и мощностей от 5 кВт до 3 МВт,
- геотермальные тепловые станции блочно-модульного типа тепловой мощностью от 6 до 20 МВт и геотермальные электростанции электрической мощностью от 0,5 до 23 МВт;
- биогазовые установки для экологически чистой безотходной переработки различных органических отходов (навоз крупного рогатого скота, помёт птицы, пищевые и твёрдые бытовые отходы), с получением топлива – биогаза (с производительностью единичных агрегатов до 450 м³ в сутки) и экологически чистых органических удобрений;
- различные серии тепловых насосов теплопроизводительностью от 100 кВт до 4 МВт с высоким отношением (от 3 до 7) получаемой теплоты к электроэнергии, затрачиваемой на привод компрессора.

Источники возобновляемой энергии имеют как положительные, так и отрицательные свойства.

Положительные свойства – это повсеместная распространенность большинства их видов и экологическая чистота. Эксплуатационные затраты по использованию нетрадиционных источников не содержат затрат на топливо, так что в этом отношении энергия этих источников как бы бесплатна. Однако фактор бесплатности нивелируется значительными расходами на изготовление и приобретение необходимого оборудования.

Экологическая чистота источников возобновляемой энергии также становится относительной, если учесть загрязнение окружающей среды в процессе их производства.

Использование новых видов энергии порождает новые экологические последствия. Возведение солнечных электростанций связано с добычей и переработкой и другого сырья, производством металлов, стекла и т.д., которые влекут за собой загрязнение окружающей среды. Поглощение солнечной радиации большими полями фотоэлектрических преобразователей может привести к снижению температуры земной поверхности, изменению локального теплового баланса между Землей и атмосферой, и, как следствие, к возникновению неестественных атмосферных явлений. Ветроустановки создают шумовое загрязнение окружающей среды, производимое лопастями пропеллеров. Конструкции ветроустановок создают помехи распространению радиоволн. Отбор энергии ветра ослабляет воздушные потоки, что может ослабить проветривание промышленных районов и оказать влияние на погодные условия. Отрицательные качества, имеющие принципиальное значение – это малая плотность потока энергии и изменчивость его во времени.

Первое обстоятельство заставляет создавать относительно большие площади энергоустановок (приемные поверхности солнечных установок, площадь ветроколеса и т.п.). Это приводит к большой материалоемкости (на единицу мощности) подобных устройств и к увеличению удельных капиталовложений по сравнению с традиционными энергоустановками.

Второе обстоятельство также существенно. Изменчивы во времени солнечное излучение, ветер, тепло окружающей среды. Например, поток солнечной энергии, в среднем закономерный, содержит значительную случайную составляющую, связанную с погодными условиями. Еще более изменчива и непредсказуема энергия ветра.

Электрическая энергия представляет собой весьма специфический вид продукции, который может быть потреблен в тот же момент, что и произведен. Однако изменчивость поступления и потребления электрической энергии порождает фундаментальную научно-техническую проблему аккумулирования электрической энергии. Применительно к большим количествам энергии эта проблема не решена, и нет оснований полагать, что она будет решена в обозримом будущем. Однако решение этой проблемы применительно к автономным источникам небольшой мощности не представляет принципиальных затруднений, что говорит в пользу развития этого направления энергетики. Существует устойчивая во времени тенденция снижения стоимости нетрадиционных возобновляемых источников энергии, обусловленная научными достижениями в совершенствовании методов их использования, и тенденция повышения стоимости традиционных ископаемых источников энергии, вызванная их истощением и усложнением технологии добычи. В первую очередь это относится к преобразованию солнечной энергии в электрическую или тепловую. Солнечная радиация является практически неисчерпаемым источником энергии. Земли достигает лишь незначительная часть излучаемой Солнцем энергии. Около 95% солнечной энергии имеет вид коротковолнового излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 2,4 мкм.

Солнце имеет диаметр 1392 тыс. км. Его масса равна 2·10³⁰ кг. Химический состав Солнца: 81,76% водорода, 18,14% гелия и 0,1% азота. Средняя плотность вещества Солнца равна 1400 кг/м³, а в его центре она достигает 76000 кг/м³. Мощность потока солнечного излучения составляет 4·10²³ кВт. Температура фотосферы на поверхности Солнца – около 5900 К. Верхней границы атмосферы Земли за год достигает количество солнечной энергии, равное 5,6·10²⁴ Дж. Атмосфера Земли отражает 35% этой

энергии ($1,9 \cdot 10^{24}$ Дж) Остальная энергия расходуется на нагрев земной поверхности (около $2,4 \cdot 10^{24}$ Дж), испарительно-осадочный цикл (около $1,3 \cdot 10^{24}$ Дж), образование волн в морях и океанах, воздушных и океанских течений и ветра (около $1,2 \cdot 10^{22}$ Дж). Мощность потока солнечного излучения у верхней границы атмосферы Земли равна $1,78 \cdot 10^{17}$ Вт, а на поверхности Земли $1,2 \cdot 10^{17}$ Вт. Плотность потока солнечной энергии у верхней границы атмосферы через поверхность, расположенную нормально к направлению солнечных лучей, равна 1353 Вт/м^2 . Эта величина называется солнечной постоянной. Среднее количество энергии, поступающей за 1 час на 1 м^2 этой поверхности, равно 4871 кДж . Движение Земли вокруг Солнца по эллиптической орбите приводит к изменению расстояния между Землей и Солнцем. В течение года оно изменяется в пределах 150 млн. км. Вследствие этого количество солнечной энергии, поступающей на 1 м^2 нормальной поверхности, изменяется в течение года менее чем на 7%.

Количество солнечной энергии, поступающей на Землю в течение года, составляет $1,05 \cdot 10^{18}$ кВт·ч. На поверхность суши приходится только 20% этой энергии, то есть $2 \cdot 10^{17}$ кВт·ч. Часть энергии проявляется в виде ветра: $1,58 \cdot 10^{16}$ кВт·ч в год. Без ущерба для природы можно использовать до 1,5% всей попадающей на Землю солнечной энергии, то есть около $1,62 \cdot 10^{16}$ кВт·ч в год. Это эквивалентно $2 \cdot 10^{12}$ т условного топлива.

Распределение потока солнечной радиации на поверхности земного шара крайне неравномерно. Количество солнечной энергии, поступающей за год на 1 м^2 поверхности Земли, изменяется, в зависимости от географической зоны, приблизительно от 3000 МДж/м^2 до 8000 МДж/м^2 . Среднегодовое количество солнечной энергии, поступающей за 1 день на 1 м^2 поверхности Земли, в зависимости от географической зоны, колеблется от $7,2 \text{ МДж/м}^2$ до $21,4 \text{ МДж/м}^2$ табл. 2 [3]. Пиковая плотность потока солнечной энергии достигает 1 кВт/м^2 . Солнечное излучение у верхней границы земной атмосферы приблизительно соответствует излучению абсолютно чёрного тела с температурой 5900 К . Спектр излучения включает в себя ультрафиолетовое излучение с длиной волны от $0,2$ до $0,4 \text{ мкм}$, видимый свет с длиной волны от $0,4$ до $0,78 \text{ мкм}$ и инфракрасное излучение с более длинными волнами. Максимум интенсивности солнечного излучения приходится на длину волны $0,5 \text{ мкм}$. В процессе прохождения солнечных лучей сквозь атмосферу Земли часть солнечного излучения рассеивается и поглощается молекулами озона, воздуха, водяного пара и частицами пыли. В результате прямое солнечное излучение ослабляется и появляется диффузное, рассеянное излучение. Часть энергии, поглощенной и рассеянной в атмосфере, излучается в космическое пространство. Основной поток солнечной энергии достигает поверхности Земли в виде рассеянного, диффузного излучения. Доля диффузного излучения в общем потоке поступающей солнечной радиации зависит от географических и климатологических факторов и изменяется в течение года.

Преобразование энергии Солнца. Преобразование энергии в фотоэлектрических преобразователях происходит за счет фотовольтаического эффекта, имеющего место в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. Кремниевые солнечные элементы – нелинейные устройства. Их действие нельзя описать линейной зависимостью типа закона Ома. Для этой цели используются вольтамперные характеристики. Эффективность преобразования зависит от температуры. При нагреве элемента на один градус свыше 25°C вырабатываемое им напряжение снижается на $0,002 \text{ В}$. При интенсивном солнечном освещении элементы нагреваются до $60\text{--}70^\circ\text{C}$, при этом напряжение на каждом из них падает на $0,07\text{--}0,09 \text{ В}$. Это основная причина снижения коэффициента полезного действия солнечных элементов, который колеблется в пределах $10\text{--}16 \%$. Общепринятые стандартные условия для паспортизации элементов следующие: освещенность – 1000 Вт/м^2 ; температура -25°C ; спектр АМ 1,5 (солнечный спектр на широте 45°). Технические и связанные с ними экономические характеристики фотоэлектрической станции в основном определяются солнечными батареями: материалами, из которых они изготовлены и технологией изготовления. В себестоимости фотоэлектрической станции доля себестоимости батарей достигает 60% и более. Основные структурные компоненты солнечной батареи – солнечные элементы. По двум признакам – материалу и технологии изготовления – они делятся на кремниевые (объемные, тонкопленочные) солнечные элементы и солнечные элементы на основе соединений A_2B_2 , CdS/CdTe , A_3B_5 и др. В зависимости от вида структуры применяемого материала солнечные элементы подразделяют на кристаллические, поликристаллические и аморфные. Наибольшее применение в настоящее время получили солнечные элементы на основе монокристаллического кремния. Это обусловлено наличием хорошо отработанной технологии получения кремния и выращивания $p\text{--}n$ переходов, высоким коэффициентом полезного действия, повышенной стабильностью и надежностью. Основные характеристики преобразователей описываются аналитическими зависимостями. Величина установившейся фотоЭДС при освещении перехода излучением постоянной интенсивности описывается уравнением вольтамперной характеристики [4]:

$$U = (kT / q) \ln(1 + (I_p - I) / I_s)$$

Энергобережения та энергоефективність

где: I – ток на нагрузке, I_p – фототок, I_s – ток насыщения, T – температура Кельвина, q – элементарный заряд, k – постоянная Больцмана.

Фототок описывается равенством

$$I_p = SN_0Q,$$

где S – площадь фотоэлемента, N_0 – количество созданных светом электронно-дырочных пар, $Q < 1$ – коэффициент, показывающий, какая доля этих пар собирается p - n - переходом.

Уравнение вольтамперной характеристики справедливо при освещении фотоэлемента светом произвольного спектрального состава. Изменение спектра отражается изменением значения фототока. Максимальная мощность, снимаемая с 1 см^2 фотоэлектрического преобразователя равна

$$P = I_p U,$$

или

$$P = \chi I_c U_{xx},$$

где χ – коэффициент формы вольтамперной характеристики, I_c – ток короткого замыкания, U_{xx} – напряжение холостого хода.

Коэффициент полезного действия элементов на основе c - Si достигает 26%. Коммерческие образцы солнечных элементов на основе c - Si имеют эффективность 14-17%, а на поликристаллической основе – 12-14%. В сфере тонкопленочных солнечных элементов наибольшее развитие получили технологии аморфного кремния; $CdS/CdTe$; CIS ($CuInSe_2$). Аморфный гидрогенизированный кремний (a - $Si:H$) – один из основных материалов солнечной энергетики[5]. Солнечные батареи из a - $Si:H$ обладают рядом преимуществ: большим значением напряжения холостого хода, возможностью нанесения на большие площади, возможностью использования в качестве подложек различных материалов (стекла, нержавеющей стали, полиамида), низкой стоимостью. Наивысшая эффективность солнечных элементов на основе a - $Si:H$ (13%) получена на элементе с тройным p - i - n . Основные задачи в области технологии a - $Si:H$ – это повышение стабильности параметров при создании многопереходных солнечных элементов и повышение их эффективности, табл.3 [6].

Таблица 2. Техничко-экономические характеристики солнечных элементов

Материал	1995		2000		2010	
	Эффективность	Цена	Эффективность	Цена	Эффективность	Цена
Монокристаллический кремний	15	2,40	18	2,00	22	1,50
Поликристаллический кремний	14	2,25	16	1,95	20	1,45
Аморфный кремний	7 - 9	2,00	10	1,20	14	0.75

Выпускаются солнечные батареи на основе $CdS/CdTe$, имеющие коэффициент полезного действия, равный 8% и обладающие высокой стабильностью. Эффективность отдельных экспериментальных образцов достигает 15-16%.

Заключение. Возобновляемые источники энергии являются актуальным и перспективным направлением исследования. Активно развиваются преобразователи солнечной энергии в направлении повышения эффективности преобразования энергии излучения Солнца и снижения удельной стоимости. Актуальным является использование комбинированных источников, например ветроустановок и солнечных батарей. Основной проблемой, которая сдерживает развитие солнечной энергетики, является низкая плотность энергии излучения Солнца. Один из путей преодоления этой проблемы – использование концентраторов солнечной энергии.

Список использованных источников

1. Капица П.Л. Глобальные проблемы и энергия. Лекция, прочитанная в Стокгольском университете. // П.Л. Капица. Теория, эксперимент, практика. Статьи, выступления. – М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит. , 1981. – С. 430-445.

2. Капица П.Л. Энергия и физика. Доклад на научной сессии, посвященной 250-летию Академии Наук СССР. // П.Л. Капица. Теория, эксперимент, практика. Статьи, выступления. – М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит. , 1981. – С. 97-109..
3. Марк Томас. Развитие возобновляемой энергетики в Европейском Союзе. http://intersolar.ru/home_r.shtml
4. Карабинов С.М Основные направления развития технологической базы фотовольтаических энергетических систем http://www.transgasindustry.com/ren_e_s/solar_e/2/solar1.shtml
5. Yang J., Banerjee A., Lord K., Guha S. Correlation of Component Cells with High Efficiency Amorphous Silicon Alloy Triple-Junction Solar Cells and Modules. - Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
6. Maycock. International Photovoltaic Markets, Developments and Trends Forecast to 2010. - 1st WCPEC, Hawaii, 1994.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

УДК 621.333:629.424

*В.Г. Кузнецов, д-р техн. наук, О.И. Саблин, канд. техн. наук, П.В. Губский, Е.Г. Кольхаев
(Украина, г. Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)*

АНАЛИЗ РЕЗЕРВОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ НА ПОЕЗДАХ ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Анотація. Мета. Теоретична і експериментальна оцінка резервів енергозбереження при використанні режиму рекуперації енергії в умовах Дніпропетровського метрополітену. **Методи досліджень.** Оцінка резервів енергозбереження виконана експериментально за рівнем генерованої енергії у режимі реостатного гальмування по відношенню до витрати енергії на тягу. **Результати.** В умовах Дніпропетровського метрополітену існує резерв енергозбереження при використанні рекуперації електроенергії, що становить відповідно 14...34 % в прямому (на еквівалентному підйомі 8 ‰) і 38...52 % у зворотному (на відповідному узвозі) напрямках. **Наукова новизна і практична цінність.** Встановлені кількісні та якісні показники режимів рекуперації енергії поїздів метрополітену можуть бути використані при виборі раціональних заходів щодо ефективного використання енергії гальмування поїздів.

Ключові слова: метрополітен, тягове навантаження, електроспоживання, рекуперація, резерв енергозбереження.

Аннотация. Цель. Теоретическая и экспериментальная оценка резервов энергосбережения при использовании режима рекуперации энергии в условиях Днепропетровского метрополитена. **Методы исследований.** Оценка резервов энергосбережения выполнена экспериментально по уровню генерированной энергии в режиме реостатного торможения по отношению к расходу энергии на тягу. **Результаты.** В условиях Днепропетровского метрополитена существует резерв энергосбережения при использовании рекуперации электроэнергии, составляющий соответственно 14...34 % в прямом (на эквивалентном подъеме 8 ‰) и 38...52 % в обратном (на соответствующем спуске) направлениях. **Научная новизна и практическая ценность.** Установленные количественные и качественные показатели режимов рекуперации энергии поездов метрополитена могут быть использованы при выборе рациональных мероприятий по эффективному использованию энергии торможения поездов.

Ключові слова: метрополітен, тягове навантаження, електроспоживання, рекуперація, резерв енергозбереження.

Abstract. Goal. Theoretical and experimental evaluation of reserves of energy saving when using energy recovery in terms of Dnipropetrovsk metro. **Research methods.** Evaluation of reserves of energy saving is carried out experimentally on the level of energy generated in the dynamic braking mode to the energy consumption for traction. **Results.** In terms of the Dnipropetrovsk metro, there is a reserve of energy saving when using the regeneration energy gap of, respectively, 14...34 % direct (in equivalent t-EME 8 ‰) and 38...52 % return (in the appropriate descending) directions. **Scientific novelty and practical value.** Established quantitative and qualitative indicators of energy recovery of metro trains can be used for selecting rational actions on the efficient use of braking energy of trains.

Keywords: underground, railway traction load, power consumption, heat recovery, the reserve of energy saving.

Введение