

В. Г. КУЗНЕЦОВ (ДНУЖТ), К. А. КАЛАШНИКОВ (ПРИДНЕПРОВСКАЯ Ж.Д.)

Кафедра Электроснабжение железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: vkuz@i.ua

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ПРИНЦИПОВ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Введение

Украина относится к энергодефицитным странам, удовлетворяя свои потребности в топливно-энергетических ресурсах (ТЭР) за счет собственной их добычи менее чем на 50 % [1]. В связи с этим необходимо повышение энергоэффективности работы всех отраслей экономики и, в частности, железнодорожного транспорта [2, 3]. Поскольку энергетическая составляющая себестоимости перевозок составляет около 20 %, энергосбережение является одной из главных задач политики Укрзалізничці (УЗ). Руководством УЗ проводится большая работа по экономии ТЭР, успешно выполняются Программа повышения энергоэффективности и Программа уменьшения потребления энергоресурсов бюджетными организациями путем рационального использования в сферах транспорта на 2010-2014 гг. Одним из направлений энергосбережения на электрифицированных линиях является уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока, которые составляют около 7 % от величины потребления на тягу поездов.

Целью статьи является разработка научных принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора оптимальной дислокации поездов между тяговыми подстанциями, оптимальной последовательности отправления и интервалов между поездами.

Анализ литературы

Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети может быть достигнуто путем: применения систем тягового электроснабжения (СТЭ) повышенного напряжения, применения накопителей электроэнергии, управления режимами СТЭ на базе информационных технологий, усовершенствования методов учета и контроля потерь электроэнергии, разработки энергоэффективных графиков движения поездов (ГДП), регулирования транспортного потока [4].

В работе [5] установлена возможность регулирования показателей транспортного потока в

целях уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональных: последовательности отправления поездов, дислокации и интервалов между тяговыми нагрузками.

В настоящее время управление транспортным потоком осуществляется по графику движения, который не учитывает влияние показателей транспортного потока на энергетические характеристики СТЭ. В результате неравномерный характер движения поездов различного веса по расчетному ГДП приводит к повышению потерь электроэнергии в тяговой сети.

Основной материал

Решение задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети состоит в поиске такого ГДП, при котором осуществляется пропуск заданных размеров движения с наименьшими энергозатратами. Суть задачи заключается в определении потерь электроэнергии в тяговой сети путем расчета схем для ряда моментов времени, в каждом из которых количество, конфигурация и величина нагрузки определяются ГДП.

Для выбора наиболее выгодного расположения тяговых нагрузок на ГДП по величине потерь электроэнергии в тяговой сети следует рассмотреть ряд реально возможных вариантов графиков при заданных категориях поездов. Варианты графиков рассматриваются между смежными ТП в пределах периода следования расчетного поезда. Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок представлен на рис. 1.

С помощью разработанных моделей СТЭ и транспортного потока на прикладном ПО были проведены многовариантные расчеты, которые показали, что при одном и том же транспортном потоке можно найти такое сочетание тяговых нагрузок, при которых потери мощности в тяговой сети будут минимальными.

Выбор рациональной последовательности отправления поездов различных категорий

Выполним моделирование пропуска 6 поездов (3 поезда четного и 3 поезда нечетного направления) для двухпутного участка постоянного тока Приднепровской железной дороги со следующими исходными данными:

- 1) расстояние между тяговыми подстанциями – 18 км;
- 2) токи, потребляемые поездами $I(L)$, $L \in L_H, L_K$;

- 3) скорости движения поездов $V(L)$, $L \in L_H, L_K$;
- 4) удельное сопротивление тяговой сети $r = 0,07$ Ом/км;

5) сечение проводов КС – 412 мм².

Схема участка приведена на рис. 2.

Характеристики поездов представлены в табл. 1.

1. При выполнении расчетов принято допущение, что режим напряжения для ЭПС каждого поезда в пакете не нарушается, задача ограничивается фиксированным временем пропуска заданного количества поездов по участку (1 час).

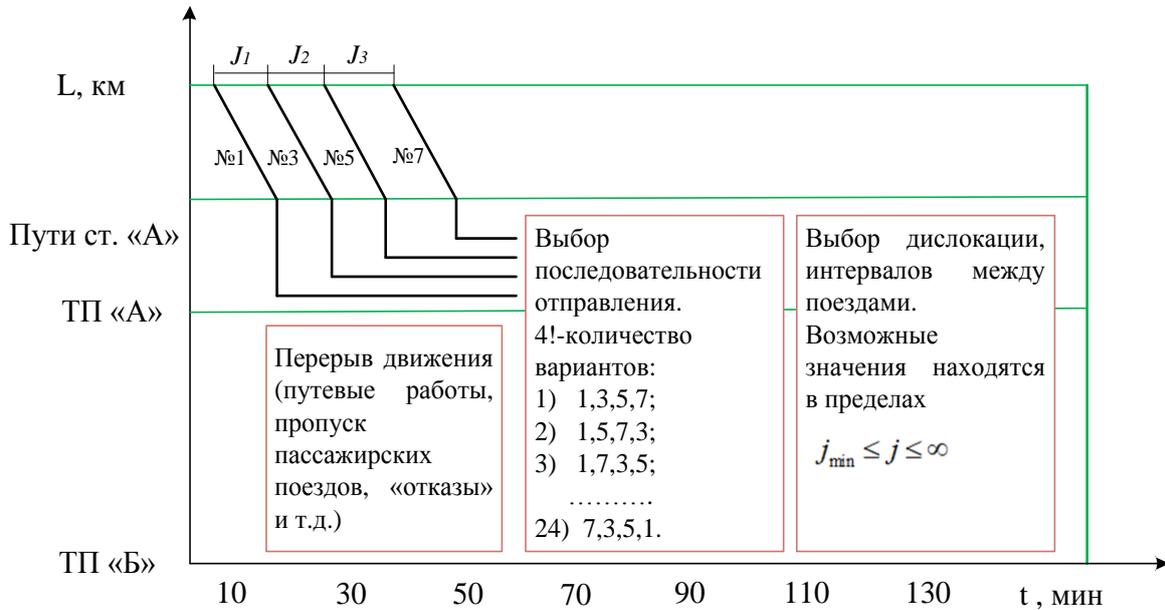


Рис. 1. Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок

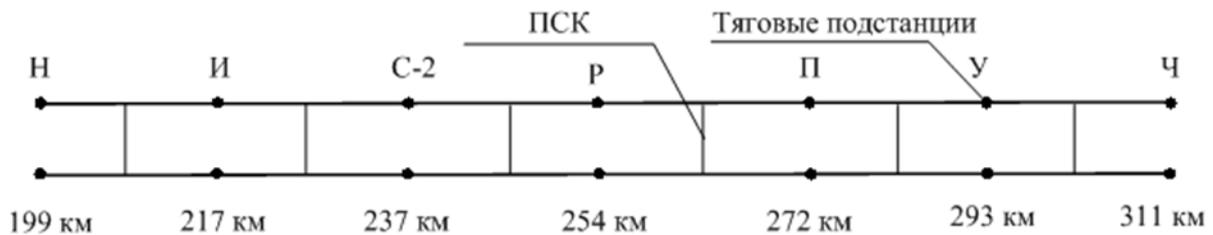


Рис. 2. Схема электрифицированного участка Приднепровской ж.д.

Таблица 1

Характеристики поездов различных категорий

№ категории поезда	Характеристики		
	Тип поезда	Масса	Серия электропоезда
1	Грузовой	1 400	ВЛ-8
2	Грузовой	3 000	ДЭ-1
3	Грузовой	5 000	ВЛ-8

Определим потери электроэнергии в тяговой сети с учетом последовательности отправления

поездов 3 различных категорий (массой 1 400, 3 000 и 5 000 т) в четном и нечетном направлениях со средним интервалом между поездами равным 10 мин. Присвоим нечетным поездам № 1,3,5; четным № 2,4,6, причем 1-й категории соответствуют номера поездов № 1, № 2, 2-й категории – № 2, № 4, 3-й категории – № 3, № 6 (в условиях данной задачи количество перестановок соответствует $6! = 720$). Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Потери электроэнергии при различной последовательности отправления поездов

№ п/п	Последовательность отправления поездов	Потери электроэнергии при схеме питания контактной сети, тыс. кВт·ч		
		двухсторонней	узловой	параллельной
1	1,3,5,2,4,6	629,5	552,1	528,5
2	1,5,3,2,4,6	746,3	698,0	662,0
3	3,1,5,2,4,6	621,9	539,2	516,1

716	3,1,5,2,6,4	607,5	541,6	512,7
717	3,1,5,4,2,6	623,4	553,9	529,9

По результатам расчетов, представленных в табл.2, минимальные потери электроэнергии при различной последовательности отправления поездов: двухсторонняя схема – 607,5 тыс. кВт·ч (вариант № 716), узловая схема – 539,2 тыс. кВт·ч (вариант №3), параллельная схема – 512,7 тыс. кВт·ч (вариант № 716).

Пределы изменения величины потерь электроэнергии в зависимости от последовательности отправления поездов различных категорий для различных схем питания составляют 20-23 % (двухсторонняя – 20 %, узловая и параллельная – 23 %).

Выбор рациональных интервалов между поездами

Выполним моделирование пропуска 6-ти поездов (3 поезда четного и 3 поезда нечетного направления) и определим потери электроэнергии в тяговой сети с различными интервалами между поездами с учетом взаимного расположения поездов в четном и нечетном направлениях.

Формализуем задачу, введя обозначения на ГДП в общем виде (рис. 3).

Время пропуска пакета T в общем виде определяется выражением

$$T = \Delta t_1 + J_1 + J_2 + t_4 - t_3 \quad (1)$$

где Δt_1 – задержка времени отправления первого поезда в пакете, мин;

J_1, J_2 – межпоездные интервалы, мин;

$t_4 - t_3$ – время хода последнего поезда в пакете, мин.

Учитывая принятое ограничение, получаем уравнение, определяющее независимые параметры ГДП,

$$\Delta t_1 + J_1 + J_2 = T - t_4 - t_3 = \text{const} \quad (2)$$

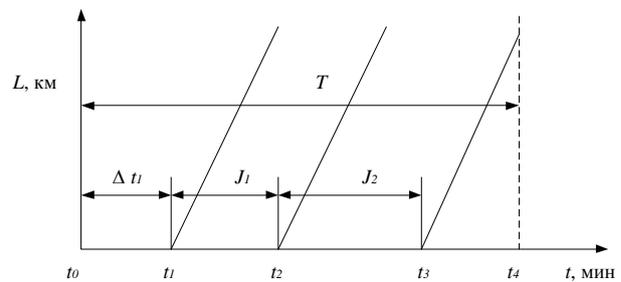


Рис. 3. Расчетная схема параметров графика движения поездов

Для обеспечения такого режима моделирования необходимо поддерживать постоянную сумму интервалов между поездами при их различных комбинациях (в условиях данной задачи количество вариантов соответствует $6! = 5,4434494 \cdot 10^{92}$). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таким образом, на основе эвристического алгоритма определены рациональные интервалы между поездами при различных схемах питания.

Таблица 3

Потери электроэнергии для различных интервалов между поездами

№ п/п	Интервалы между поездами		Потери электроэнергии при схеме питания контактной сети		
	По 1-му пути	По 2-му пути	двухсторонней	узловой	параллельной
1	$J_1 = 10; J_2 = 20$	$J_1 = 10; J_2 = 10$	626,4	582,7	518,1
2	$J_1 = 11; J_2 = 19$	$J_1 = 10; J_2 = 10$	622,2	575,4	511,5
3	$J_1 = 12; J_2 = 18$	$J_1 = 10; J_2 = 10$	618,2	568,3	505,1
4	$J_1 = 13; J_2 = 17$	$J_1 = 10; J_2 = 10$	615,5	562,0	499,5
5	$J_1 = 14; J_2 = 16$	$J_1 = 10; J_2 = 10$	613,7	556,6	494,9

Для нечетных поездов: двухсторонняя схема – $J_1=16$; $J_2=14$, узловая и параллельная – $\Delta t=10$, $J_1=10$, $J_2=10$; для четных поездов: двухсторонняя схема – $J_1=14$; $J_2=16$, узловая – $J_1=18$; $J_2=12$, параллельная – $J_1=20$, $J_2=10$. При соблюдении данных интервалов потери электроэнергии в тяговой сети минимальные и составляют: двухсторонняя схема – 580,8 тыс. кВт·ч, узловая – 508,8 тыс. кВт·ч, параллельная – 480,6 тыс. кВт·ч. Пределы изменения величины потерь электроэнергии в зависимости от интервалов между поездами и взаимного расположения поездов для различных схем питания составляет 23–27 % (двухсторонняя – 23 %, узловая и параллельная – 27 %).

Выбор рациональной дислокации тяговых нагрузок на участке Приднепровской железной дороги

Выполним моделирование пропуска 6 поездов (3 поезда четного и 3 поезда нечетного

направления) и определим потери электроэнергии в тяговой сети с учетом дислокации поездов между ТП. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таким образом, на основе метода деформируемого многогранника определены потери электроэнергии в тяговой сети с учетом дислокации тяговых нагрузок между ТП. Результаты расчета минимальных потерь электроэнергии с учетом дислокации тяговых нагрузок соответствуют значениям потерь электроэнергии с учетом интервалов между поездами: двухсторонняя схема – 580,8 тыс. кВт·ч, узловая – 508,8 тыс. кВт·ч, параллельная – 480,6 тыс. кВт·ч.

Пределы изменения величины потерь электроэнергии в зависимости от дислокации тяговых нагрузок для различных схем питания составляют 23–27 % (двухсторонняя – 23 %, узловая и параллельная – 27 %). ГДП, минимизирующие потери электроэнергии в тяговой сети представлены на рис. 4.

Таблица 4

Потери мощности с учетом дислокации поездов между ТП при двухсторонней схеме питания

Дислокация и оптимальные расстояния между поездами, км			Потери мощности в тяговой сети, кВт
Дислокация 1-го поезда x_1	Дислокация 2-го поезда x_2	Дислокация 3-го поезда x_3	
0,1	1,1	2,3	656,7
0,2	1,2	2,3	657,5
0,3	1,3	2,3	1 067,0
...
15,6	16,6	17,6	851
15,7	16,7	17,7	846

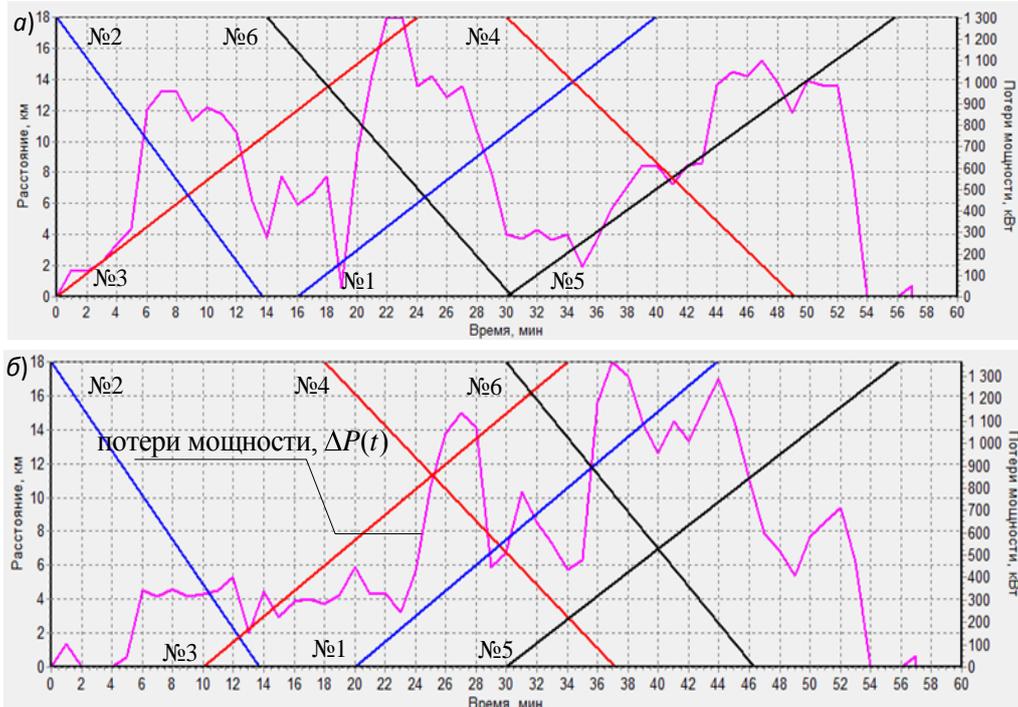


Рис. 4. ГДП, обеспечивающие минимум потерь электроэнергии, для двухсторонней (а) и узловой (б) схем питания

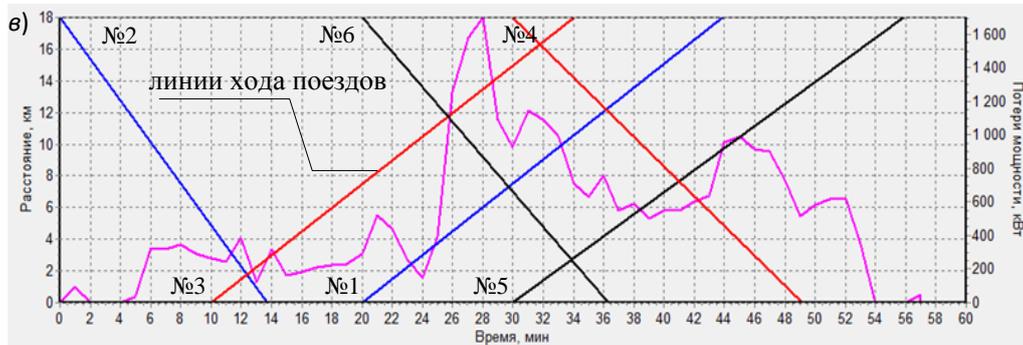


Рис. 4. ГДП, забезпечуючі мінімум втрат електроенергії, для паралельної схеми живлення (в)

Выводы

Таким образом, можно сформулировать научные принципы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети:

1) принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальной дислокации поездов между ТП – на каждом шаге времени выбираем такую дислокацию поездов, при которой потери мощности в тяговой сети минимальны;

2) принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальной последовательности отправления поездов – из возможных вариантов отправления поездов различных категорий необходимо выбрать такую последовательность, которой соответствует минимальное значение потерь электроэнергии в тяговой сети;

3) принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальных интервалов между поездами – из множества возможных значений интервалов между поездами необходимо выбрать такие, при которых значение потерь электроэнергии в тяговой сети будет минимальным.

3) принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальных интервалов между поездами – из множества возможных значений интервалов между поездами необходимо выбрать такие, при которых значение потерь электроэнергии в тяговой сети будет минимальным.

REFERENCES

1. Концепція Державної програми реформування залізничного транспорту України. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України № 651-р від 27 грудня 2006 р. – К. : Укрзалізниця, 2006 р.

1. Kontseptsiya Derzhavnoyi prohramy reformuvannya zaliznychnoho transportu Ukrainy. [The concept of the State Program of the railway reform of Ukraine]. Approved by Cabinet of Ministers of Ukraine № 651-r of December 27, 2006, Kiev, Ukrzaliznytsya, 2006.

2. Програма підвищення енергоефективності та Програма зменшення споживання енергоресурсів бюджетними установами шляхом їх раціонального використання у сферах транспорту та зв'язку на 2010 – 2014 роки / Міністерство транспорту України, Державна адміністрація залізничного транспорту України. – К., 2009. – 48 с.

2. Prohrama pidvyshchennya enerhoefektyvnosti ta Prohrama zmeshennya spozhyvannya enerhoresursiv byudzhethnymy ustanovamy shlyakhom yikh ratsional'noho vykorystannya u sferakh transportu ta zv'yazku na 2010 – 2014 roky [The program of energy efficiency and energy consumption reduction program in budget institutions by their management in the areas of transport and communications in 2010 – 2014] Ministerstvo transportu Ukrainy, Derzhavna administratsiya zaliznychnoho transportu Ukrainy, K., 2009, 48 p.

3. Стратегія розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. № 1555-р. – К.: КМУ, 2009.

3. Stratehiya rozvytku zaliznychnoho transportu na period do 2020 roku vid 16 hrudnya 2009 r. № 1555-r. [Strategy development of rail transport in the period to 2020. Approved by Cabinet of Ministers of Ukraine of December 16, 2009 p. № 1555-p.] Kiev, KМУ, 2009.

4. Кузнецов В. Г. Развитие теоретических основ энергозбереження в системах электропостачання тяги поїздів постійного струму : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / В. Г. Кузнецов; [ДНУЗТ]. – Д., 2012. – 35 с.

4. Kuznetsov V. H. Rozvytok teoretichnykh osnov enerhozberezhennya v systemakh elektropostachannya tyahy poyizdiv postynoho strumu : avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.09 [Development of theoretical foundations of energy saving in DC power supply system: thesis Dr. Sc.: 05.22.09] D., 2012, 35 p.

5. Калашников К. О. Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / К. О. Калашников; [ДНУЗТ]. – Д., 2014. – 23 с.

5. Kalashnykov K. O. Zmeshennya vtrat elektroenerhiyi v tyahoviy merezhi postynoho strumu shlyakhom vyboru ratsional'noyi dyslokatsiyi tyahovykh navantazhen': avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.09 [Reduction of energy losses in the DC traction lines by the rational deployment of traction loads] D., 2014, 23 p.

Поступила в печать 23.09.2014.

Ключевые слова: потери электроэнергии, контактная сеть, интервалы между поездами, последовательность отправления поездов, энергосбережение, тяговые подстанции, дислокация поездов.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

© Кузнецов В. Г., Калашников К. А., 2014

Украина относится к энергодефицитным странам, которая удовлетворяет свои потребности в топливно-энергетических ресурсах за счет собственной их добычи менее чем на 50 %. Поскольку энергетическая составляющая себестоимости перевозок составляет около 20 %, энергосбережение является одной из главных задач политики Укрзалізничці. Уменьшение потерь электроэнергии в тяговых сетях является одним из направлений экономии энергетических ресурсов на электрифицированных участках. Целью статьи является разработка научных принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора оптимальной дислокации поездов между тяговыми подстанциями, оптимальной последовательности отправления и интервалов между поездами. Методы: В статье использованы метод деформированного многогранника, эвристических алгоритмов, методы статистической обработки экспериментальных данных. Научная новизна: предложены научные принципы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счёт оптимальной дислокации поездов на участке, за счёт выбора оптимального интервала на участке на основе метода деформированного многогранника, за счёт выбора оптимальной последовательности отправления поездов. Практическая значимость: разработанные научные принципы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети могут быть использованы для планирования энергосберегающих мероприятий на участках электроснабжения.

УДК 621.331

В. Г. КУЗНЕЦОВ (ДНУЗТ), К. О. КАЛАШНИКОВ (ПРИДНІПРОВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ)

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: vkuz@i.ua

РОЗРОБКА НАУКОВИХ ПРИНЦИПІВ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ШЛЯХОМ РЕГУЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

Україна належить до енергодефіцитних країн, яка задовольняє свої потреби в паливно-енергетичних ресурсах за рахунок власного їх видобутку менш ніж на 50%. Оскільки енергетична складова собівартості перевезень становить близько 20%, енергозбереження є однією з головних завдань політики Укрзалізничці. Зменшення втрат електроенергії в тягових мережах є одним з напрямків економії енергетичних ресурсів на електрифікованих ділянках. Метою статті є розробка наукових принципів зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору оптимальної дислокації поїздів між тяговими підстанціями, оптимальної послідовності відправлення і інтервалів між поїздами. Методи: У статті використані метод деформованого багатогранника, евристичних алгоритмів, методи статистичної обробки експериментальних даних. Наукова новизна: запропоновано наукові принципи зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі за рахунок оптимальної дислокації поїздів на ділянці, за рахунок вибору оптимального інтервалу на ділянці на основі методу деформованого багатогранника, за рахунок вибору оптимальної послідовності відправлення поїздів. Практична значимість: розроблені наукові принципи зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі можуть бути використані для планування енергозберігаючих заходів на ділянках електропостачання.

Ключові слова: втрати електроенергії, контактна мережа, інтервали між поїздами, послідовність відправлення поїздів, енергозбереження, тягові підстанції, дислокація поїздів.

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

UDC 621.331

V. G. KUZNETSOV (DNURT), K. A. KALASHNIKOV (PRIDNEPROVSKA RAILWAY)

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan Street, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-19-11, e-mail: vkuz@i.ua

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC PRINCIPLES REDUCTION IN ENERGY LOSSES IN THE TRACTION DC NETWORK BY CONTROLLING TRAFFIC FLOWS

Introduction: Ukraine belongs to the energy deficient country that meets the needs for fuel and energy resources by own production at a level less than 50%. Since the energy component of the cost of transportation is about 20%, energy efficiency is one of the main policy objectives of Ukrzaliznitsa. Reduction of energy losses in traction lines is one of the main energy savings methods on electrified lines. The purpose of this paper is to develop scientific principles of reducing power losses in traction lines by selecting the optimal deployment of trains between traction substations, the optimal sequence of trains and the intervals between trains. Methods: we used the method of deformed polyhedron, heuristic algorithms, statistical treatment of experimental data. Scientific novelty: it's proposed the scientific principles for reduction of energy losses in traction lines by optimal deployment of trains in the area, due to the selection of the optimal interval at the site on the basis of the deformed polyhedron due to the choice of the optimal sequence of trains departure. Practical significance: The scientific principles of reducing energy losses in traction lines can be used for the planning of energy saving measures in power supply systems.

Keywords: power losses, the contact line, the intervals between trains, the sequence of departure of trains, energy, traction substations, the deployment of trains.

Internal reviewer *Kostin M O.*

External reviewer *Lezhnuk P. D.*