

Вдосконалений метод складання графіка руху поїздів, який відрізняється від існуючого застосуванням евристичного алгоритму для визначення раціональної послідовності відправлення і інтервалів між поїздами. Використання даного методу дає можливість мінімізувати втрати електроенергії в тяговій мережі

Ключові слова: графік руху поїздів, втрати електроенергії, евристичний алгоритм, тягова мережа

Усовершенствован метод составления графика движения поездов, который отличается от существующего применением эвристического алгоритма для определения рациональной последовательности отправления и интервалов между поездами. Использование данного метода дает возможность минимизировать потери электроэнергии в тяговой сети

Ключевые слова: график движения поездов, потери электроэнергии, эвристический алгоритм, тяговая сеть

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД СОСТАВЛЕНИЯ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

К. А. Калашников

Аспирант

Кафедра «Электроснабжение железных дорог»
Днепропетровский университет железнодорожного транспорта им. ак. В. Лазаряна
ул. ак. Лазаряна 2,
г. Днепропетровск, Украина, 49010
E-mail: 555kostya555@mail.ru

1. Введение

Организация перевозочного процесса на железнодорожном транспорте обеспечивается на основе движения поездов по графику, который позволяет планировать поездную работу как количественно, так и по времени [1]. В графике движения поездов (ГДП) предусмотрена технологическая увязка работы участков, станций, узлов, локомотивного парка, его совершенствование способствует уменьшению эксплуатационных расходов железных дорог [2, 3].

Задача уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет усовершенствования ГДП в настоящее время актуальна, т.к. является частью проблемы энергосбережения в системах тягового электроснабжения (СТЭ) постоянного тока [4, 5].

2. Анализ литературы

В работах [6-10] даны рекомендации по управлению эксплуатационной работой для электрифицированных линий, которые заключаются в регулировании следующих параметров ГДП:

- последовательности отправления поездов различных категорий;
- интервалов между поездами;
- взаимного расположения поездов на двухпутных участках.

В работе [11] установлена возможность регулирования вышеперечисленных параметров ГДП с целью уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети. Однако в данной работе оптимизация проведена от-

носительно простым методом перебора возможных вариантов ГДП и процесс оптимизации занимает много времени, что недопустимо в условиях оперативного управления движением поездов. Возникает необходимость применения такого метода оптимизации, который позволяет быстрее осуществлять выбор большого количества возможных ГДП.

3. Цель статьи

Усовершенствование метода составления ГДП, позволяющего уменьшить потери электроэнергии в тяговой сети.

4. Основной материал

Усовершенствован метод составления ГДП, который отличается от существующего применением эвристического алгоритма оптимизации последовательности отправления и интервалов между поездами. Использование данного метода дает возможность минимизировать потери электроэнергии в тяговой сети.

Пусть необходимо пропустить по участку n поездов различных категорий. Для каждого варианта последовательности пропуска поездов определяются потери электроэнергии ΔW [12]. Возникает задача определения такой последовательности пропуска поездов, при которой достигается минимум функции потерь электроэнергии в тяговой сети:

$$C = f(\Delta W) \rightarrow \min . \quad (1)$$

В работе [13] введено понятие функции последовательности, которое заключается в том, что некоторой последовательности $[w_1, w_2, \dots, w_n]$ по определенному правилу F сопоставляется действительное число.

Так, например, если w_i – i -я категория поезда и $i=1,4$, то количество вариантов последовательностей пропуска поездов составит $n!=24$, и каждому варианту пропуска поездов сопоставляется определенная потеря электроэнергии в тяговой сети:

$$\begin{aligned} [w_1, w_2, w_3, w_4] &\rightarrow \Delta W_1 \\ [w_2, w_1, w_3, w_4] &\rightarrow \Delta W_2 \\ &\dots \\ [w_4, w_3, w_2, w_1] &\rightarrow \Delta W_{24} \end{aligned} \quad (2)$$

Для решения поставленной задачи предлагается применить эвристический алгоритм, основой которого является элементарная операция вариации последовательности (списка).

Пусть задан список $L=[w_1, \dots, w_n]$, тогда элементарную операцию можно записать в виде:

$$L \otimes (i, j), \quad (3)$$

где элементы w_i, w_j меняются местами.

Например, для списка, состоящего из 4 различных элементов $L=[w_1, w_2, w_3, w_4]$, используя вариацию списка $(i, j)=(1,3)$, получаем новый список:

$$[w_1, w_2, w_3, w_4] \otimes (1,3) = [w_3, w_2, w_1, w_4]. \quad (4)$$

В соотношении (3) i можем принимать значения в общем случае от 1 до $n-1$, j – от 2 до n . Тогда элементарных вариаций будет $\frac{n(n-1)}{2}$.

В табл. 1 показана сводная информация о количестве элементарных операций и общем числе вариаций списка для двух вариантов списков.

Таблица 1

Количество элементарных операций и общее число вариаций списка для двух вариантов списков

	$n = 4$	$n = 10$
Общее количество элементарных вариаций	$\frac{n(n-1)}{2} \Big _{n=4} = 6$	$\frac{n(n-1)}{2} \Big _{n=10} = 45$
Общее количество вариаций последовательности	$n! = 24$	$n! = 3628800$

Как видно из табл. 2, в случае $n \approx 4+5$ минимум можно найти непосредственным перебором, но когда $n = 10$, то всего вариантов будет $N = 3628800$, тогда для решения данной задачи появляется необходимость применения эвристического алгоритма поиска минимума функции последовательности.

Содержание эвристического алгоритма:

1. Задаем первоначальную последовательность $L=[w_1, \dots, w_n]$. Для нее определяем значение целевой функции $F(L) = \Delta W$. Заносим эти данные в ячейки:

$$\begin{aligned} f_{\min} &= F(L), \\ L_{\min} &= L. \end{aligned} \quad (5)$$

2. При помощи операции (5) получаем из списка $L=[w_1, \dots, w_n]$ набор последовательностей L_1 . Например, для списка $L=[w_1, w_2, w_3, w_4]$ получаем набор L_1 , состоящий из 6 списков:

$$\begin{aligned} 1, & [2, 1, 3, 4] \\ 2, & [3, 2, 1, 4] \\ 3, & [4, 2, 3, 1] \\ 5, & [1, 4, 3, 2] \\ 6, & [1, 2, 4, 3] \end{aligned} \quad (6)$$

3. Из полученного набора определяем список L_1^* , при котором функция $F(L) = \Delta W$ принимает минимальное значение. Если $F(L_1^*) < f_{\min}$, то записываем полученные данные в специальные ячейки:

$$\begin{aligned} f_{\min} &= F(L_1^*), \\ L_{\min} &= L_1^*. \end{aligned} \quad (7)$$

и переходим к п. 4.

В обратном случае переходим к п.6.

4. Подвергаем список L_1^* элементарной вариации (3) и получаем новый набор L_2 . В нем также находим список L_2^* с минимальным значением целевой функции F .
5. Выполняем сравнение: если $F(L_2^*) < f_{\min}$, то заменяем f_{\min} на $F(L_2^*)$, а L_{\min} на L_2^* и возвращаемся к п. 1. В обратном случае переходим к п. 5.
6. Когда будет выполняться условие $F(L_n^*) > f_{\min}$ заканчиваем вычисления. В качестве ответа выдаются значения f_{\min} и L_{\min} .

Графически процесс поиска минимума функции последовательности изображен на рис. 1. Причем, $F(L_m^j) = \min_{1 \leq i \leq m} F(L_i)$.

$$F(L) > F(L_1^i) > F(L_2^j) > \dots > F(L_m^j). \quad (8)$$

Данный алгоритм носит эвристический характер, применение процедуры поиска минимума с его использованием позволяет находить локальные минимумы функции. Для определения глобального минимума функции предлагается использовать данный алгоритм не менее трех раз, изменяя начальные условия - начиная с первого элемента списка вариантов, со среднего и последнего.

В качестве примера реализации усовершенствованного метода составления ГДП выполнено моделирование пропуска 6-ти 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 $I(S)$, $S \in [S_n, S_k]$;
3. скорости движения поездов $V(S)$, $S \in [S_n, S_k]$;
4. удельное сопротивление контактной сети $r = 0,07$ Ом/км;
5. сечение проводов контактной сети – 412 мм²;
6. схема питания контактной сети- параллельная.

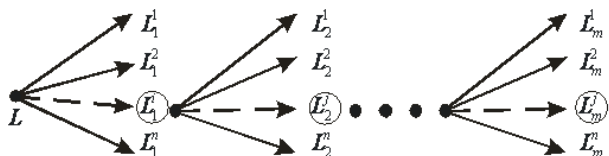


Рис. 1. Процесс поиска минимума функции последовательности

Характеристики поездов представлены в табл. 2. При выполнении расчетов принято допущение, что режим напряжения для электроподвижного состава каждого поезда в пакете не нарушается.

Таблица 2

Характеристики поездов различных категорий

№ категории поезда	Характеристики		
	Тип поезда	Масса	Марка электровоза
1	Грузовой	1400	ВЛ-8
2	Грузовой	3000	ДЭ-1
3	Грузовой	5000	ВЛ-8

Определим потери электроэнергии в тяговой сети при различных комбинациях отправления поездов 3-х различных категорий (весом 1400, 3000 и 5000 т) в четном и нечетном направлениях с постоянным интервалом между поездами равным 10 мин, ограничивая задачу фиксированным временем пропускa заданного количества поездов по участку (1 час). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Потери электроэнергии при различной последовательности отправления поездов

№ п/п	Последовательность отправления поездов по 1-му пути	Потери, тыс.кВт·ч	Последовательность отправления поездов по 2-му пути	Потери, тыс.кВт·ч
1	1 2 3	528,2	1 2 3	515,4
2	1 3 2	662,2	1 3 2	512,9
3	2 1 3	515,4	2 1 3	531,5
4	2 3 1	623,2	2 3 1	528,6
5	3 1 2	602,9	3 1 2	525,8
6	3 2 1	625,5	3 2 1	520,3

Рациональная последовательность отправления нечетных поездов соответствует варианту №3 (т.е. вна-

чале необходимо отправить поезд, массой 3000 т, затем - 1400 т, и, наконец - 5000 т), потери электроэнергии в тяговой сети составили – 515,4 тыс. кВт·ч. Для четных поездов оптимальная последовательность отправления соответствует варианту №2, потери электроэнергии в тяговой сети составили - 512,9 тыс. кВт·ч.

Далее 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. 2).

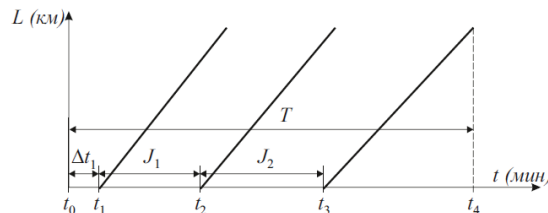


Рис. 2. Расчетная схема параметров графика движения поездов

Время пропускa пакета T в общем виде определяется выражением:

$$T = \Delta t_1 + J_1 + J_2 + (t_4 - t_3), \tag{9}$$

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:

$$\Delta t_1 + J_1 + J_2 = T - (t_4 - t_3) = \text{const}. \tag{10}$$

Для обеспечения такого режима моделирования необходимо поддерживать постоянную сумму интервалов между поездами при их различных комбинациях. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таким образом, на основе эвристического алгоритма определены рациональные интервалы между нечетными поездами - $J_1 = 20$; $J_2 = 10$, при соблюдении данных интервалов потери электроэнергии в тяговой сети минимальные, составляют 457,1 тыс. кВт·ч; интервалы между четными поездами $J_1 = 13$; $J_2 = 17$ при этом потери электроэнергии в тяговой сети составляют 457,6 тыс. кВт·ч.

Общие потери электроэнергии в тяговой сети при пропуске 6-ти поездов составили: $\text{max} = 1193,7$ тыс. кВт·ч, $\text{min} = 914,7$ тыс. кВт·ч. Вариация потерь при различных вариантах ГДП достигает 23,4%.

В результате оптимальный ГДП по критерию минимума потерь электроэнергии в тяговой сети, учитывающий последовательность отправления поездов различных категорий, интервалы между поездами и взаимное расположение поездов на двухпутных участках будет иметь вид, представленный на рис. 3.

Таблица 4

Потери электроэнергии с различными интервалами между поездами

№ п/п	Интервалы по 1-му пути, мин	Потери, тыс.кВт·ч	Интервалы по 2-му пути, мин	Потери, тыс.кВт·ч
1	$J_1 = 10$; $J_2 = 20$	469,2	$J_1 = 10$; $J_2 = 20$	467,9
2	$J_1 = 11$; $J_2 = 19$	467,9	$J_1 = 11$; $J_2 = 19$	463,3
3	$J_1 = 12$; $J_2 = 18$	467,2	$J_1 = 12$; $J_2 = 18$	459,3

65	$\Delta t = 9$; $J_1 = 11$; $J_2 = 10$	476,5	$\Delta t = 9$; $J_1 = 11$; $J_2 = 10$	473,4
66	$\Delta t = 10$; $J_1 = 10$; $J_2 = 10$	480,4	$\Delta t = 10$; $J_1 = 10$; $J_2 = 10$	470,8

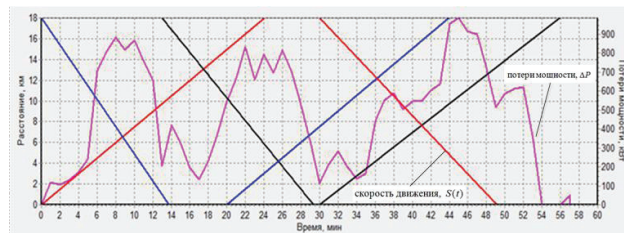


Рис. 3. ГДП, минимизирующий потери электроэнергии в тяговой сети на двухпутном участке (зависимости $S(t)$ и $\Delta P(t)$ характеризуют скорости движения поездов и потери электроэнергии)

5. Выводы

1. В работе усовершенствован метод составления ГДП, который отличается от существующего применением эвристического алгоритма для определения рациональной последовательности отправления и интервалов между поездами. Использование данного метода дает возможность минимизировать потери электроэнергии в тяговой сети.
2. Определена рациональная последовательность отправления поездов в четном и нечетном направлениях, интервалы между нечетными поездами - $J_1 = 20$; $J_2 = 10$. При соблюдении данных интервалов потери электроэнергии в тяговой сети минимальные, составляют 457,1 тыс. кВт·ч ; интервалы между четными поездами $J_1 = 13$; $J_2 = 17$ при этом потери электроэнергии в тяговой сети составляют 457,6 тыс. кВт·ч .
3. Общие потери электроэнергии в тяговой сети при пропуске 6-ти поездов составили: $\max = 1193,7$ тыс. кВт·ч , $\min = 914,7$ тыс. кВт·ч . Вариация потерь при различных вариантах ГДП достигает 23,4%.

Литература

1. Каретников, А. Д. График движения поездов [Текст] / А. Д. Каретников, Н. А. Воробьев. – М.: Транспорт, 1979. – 301 с.
2. Rothwell G. Electricity Economics: Regulation and Deregulation [Текст] / G. Rothwell, T. Gomez. – N. Y. : Wiley-IEEE Press, 2003. – 304 p.
3. He W. The significance and technical-economic benefits of developing railway electrification in China [Текст] / W. He // Main Line Railway Electrification, 1989., Intern. Conf. on. – 1989. – P. 27-30.
4. Кузнецов, В.Г. Развитие теоретических основ энергосбережения в системах электропитания тяги поездов постоянного тока: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 [Текст] / Кузнецов Валерий Геннадьевич; [ДНУЗТ]. – Д., 2012. – 35 с.
5. Kuzniecowa, W. G. Problem zasilania energii w systemach zasilania trakcji elektrycznej [Текст] / W. G. Kuzniecowa // Infrastruktura transportu. – 2012. – № 3.–P. 38-40.
6. Баранов, А.М. Организация движения поездов на линиях с электровозной тягой [Текст] / А.М. Баранов, К.А. Бернгард. - М.: Трансжелдориздат, 1957.-75 с.
7. Gonzalez, D. Optimal design of a D. C. railway power supply system [Текст] / D. Gonzalez, F. Manzanedo // Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. IEEE Canada. – 6-10-2008. – P. 1-6.
8. Miyatake, M. Numerical analyses of minimum energy operation of multiple trains under DC power feeding circuit [Текст] / M. Miyatake, H. Ko // Power Electronics and Applications, 2007 European Conf. on. – 2-9-2007. – P. 1-10.
9. White, R. D. AC/DC railway electrification and protection [Текст] / R. D. White // Electric Traction Systems, 2008 IET Professional Development course on. – 3-11-2008. – P. 258-305.

10. Gang, Z. A DC traction power supply converter system with very low harmonics for railway vehicles [Текст] / Z. Gang, L. Zhigang, W. Lei, D. Lijun // Vehicle Power and Propulsion Conf., 2008. VPPC '08. IEEE. – 3-9-2008. – P. 1-6.
11. Кузнецов, В.Г. Оптимизация потерь электроэнергии в контактной сети железнодорожного транспорта [Текст] / В.Г. Кузнецов, К.А. Калашников, Д.А. Босый // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України.–2012.–С.-18-21.
12. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К.Г.Марквардт. – М:Транспорт, 1982.– 528 с.
13. Босов, А. А. Функции множества и их применение [Текст]: учеб. пособие / А. А. Босов. - Днепродзержинск: Изд. дом «Андрей», 2007. -182 с.

Проведена оцінка теплового стану асинхронного двигуна з резисторно-ступінчастим регулюванням у під синхронному діапазоні частоти обертання ротора у тривалому ($S1$) та повторно-короткочасному ($S3$) режимах роботи. Виконано порівняльний аналіз допустимих струмових навантажень АД, розрахованих методами еквівалентних теплових схем та середніх втрат

Ключові слова: асинхронний двигун, тепловий стан, регулювання, струмове навантаження

Проведена оценка теплового состояния асинхронного двигателя с резисторно – ступенчатый регулированием в под синхронном диапазоне частоты вращения ротора в продолжительном ($S1$) и повторно-кратковременном ($S3$) режимах работы. Выполнен сравнительный анализ допустимых токовых нагрузок АД, рассчитанных методами эквивалентных тепловых схем и средних потерь

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тепловое состояние, регулирование, токовая нагрузка

УДК. 621.313.333

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ Пониженной ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА

М. И. Коцур

Кандидат технических наук, старший преподаватель
Кафедра электрических и электронных аппаратов
Запорожский национальный
технический университет
ул. Жуковского 64, г. Запорожье, Украина, 69063
E-mail:kotsur_m@ukr.net

1. Введение

При эксплуатации крановых электроприводов на базе асинхронных двигателей (АД), имеет место изменение условий охлаждения в повторно-кратковременных режимах работы, в широком диапазоне изменения частоты вращения ротора. Асинхронные двигатели крановых и металлургических серий в основном изготавливаются с не вентилированным исполнением. Эффективность охлаждения АД пропорциональна скорости вращения двигателя, поэтому при значительном и продолжительном снижении частоты вращения ротора охлаждение АД существенно ухудшается, что существенным образом влияет на его тепловое состояние [8-13].

В связи с этим при расчете режимов работы по каталожным данным необходимо учитывать поправку на изменение условий охлаждения.

2. Анализ последних предшествующих исследований и публикаций

Анализ научных работ показал, что в многочисленных работах отечественных и зарубежных авторов

оценка теплового состояния АД в основном определяется методами расчета средних потерь и эквивалентных тепловых схем (ЭТС). При этом отсутствуют сведения о коррекции токовой нагрузки АД, учитывающей изменение теплоотдачи узлов АД при изменении частоты вращения ротора и анализ оценки их эффективности и точности расчета при использовании этих методов.

3. Постановка задачи

Целью данной работы является оценка теплового состояния АД при пониженных частотах вращения ротора и проведение сравнительного анализа допустимых токовых нагрузок, рассчитанных методами средних потерь и ЭТС.

4. Изложение основного материала

Для расчета и анализа теплового состояния АД использовалась электротепловая модель АД, которая позволяет учесть особенности преобразования энер-