

## СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ТЯГОВОГО УСИЛИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ МОТОРВАГОННОГО ПОЕЗДА

### Введение.

В случае приближения моторвагонного поезда к сложной части профиля железнодорожного пути машинист должен придать поезду максимальную скорость в пределах допустимого значения скорости движения на данном участке пути. Такой режим вождения поезда дает возможность преодолевать часть подъема за счет накопленной на предыдущих участках профиля пути кинетической энергии в процессе перехода ее в потенциальную энергию во время движения по подъему. Благодаря этому достигается экономия первичных энергоресурсов. Однако управление разгонной динамикой поезда имеет ряд специфических особенностей, определяемых условиями вождения, требованиями графика движения, необходимостью экономии энергоресурсов и многими другими. Поэтому определение способа управления моторвагонным подвижным составом для обеспечения рационального тягового усилия является актуальной задачей.

Условия работы моторизованного звена при вождении моторвагонных поездов характеризуются непрерывным изменением силы тяги и скорости движения. При этом мощность звена при различных скоростях непостоянна, она меняется в зависимости от реализуемой скорости. Эти обстоятельства позволяют реализовать весьма разнообразные режимы управления тяговым подвижным составом, зачастую отличные от принятых при тяговых расчетах. Режим работы подвижного состава определяет степень использования мощности и силы тяги, надежность и экономичность его в конкретных эксплуатационных условиях [1, 2]. Стремление к улучшению использования мощности и силы тяги сопровождается совершенствованием режимов вождения поездов, рациональным использованием топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов. Рациональный режим ведения поезда разрабатывают для заданного времени хода по перегонам. Эта задача должна решаться на основе кривой изменения скорости, полученной в результате тяговых расчетов и соответствующей заданному времени хода. Формирование рационального режима сводится к совершенствованию исходного режима, т.е. внесению в него изменений, направленных на сокращение расхода электроэнергии или топлива при сохранении заданного времени хода. Снизить расход топливно-энергетических ресурсов можно уменьшением механической энергии состава и потерь энергии при ее преобразовании. Значительное снижение механической работы можно получить при увеличении времени хода по перегонам; однако, как правило, это неприемлемо, поскольку влечет за собой сокращение пропускной способности участка. Уменьшить механическую работу можно, снижая среднюю скорость движения поезда и скорость входа его на уклоны с вредными спусками, а также неравномерность скорости движения, скорость начала торможения поезда. Следует помнить, что снижение средней скорости движения при заданном времени хода недопустимо. Уменьшение неравномерности скорости движения дает заметный эффект в экономии электроэнергии и топлива на равнинных участках пути с относительно редкими остановками поездов [3].

**Цель работы** – математическая постановка способа управления тяговым асинхронным двигателем для обеспечения рационального тягового усилия при движении моторвагонного поезда

### Основная часть.

Механическая мощность тягового асинхронного двигателя может быть рассчитана согласно известному выражению [4]:

$$P_{\text{мех.}} = M_e \cdot \omega, \quad (1)$$

где  $M_e$  - электромагнитный момент тяговой асинхронной машины;

$\omega$  - угловая частота вращения ротора тяговой машины.

С другой стороны механическую мощность, которую должны создать тяговые двигатели, можно определить согласно следующему известному выражению [5]:

$$P_{\text{мех.}} = \frac{A_T}{t_2 - t_1}, \quad (2)$$

где  $A_T$  - работа силы тяги моторвагонного поезда, которая выполняется за время от  $t_1$  до  $t_2$ , на участке маршрута с координатами от  $S_1$  до  $S_2$ , которую согласно [5] можно определить следующим известным образом:

$$A_T = \int_{S_1}^{S_2} \frac{F_K(S)dS}{\eta(S)}, \quad (3)$$

или следующим известным образом [6, 7]:

$$A_T = \frac{1}{\eta_c} \cdot \int_{S_1}^{S_2} F_K(S)dS, \quad (4)$$

где  $F_K$  - сила тяги;

$\eta(S)$  - текущее значение коэффициента полезного действия моторвагонного поезда;

$\eta_c$  - среднее значение коэффициента полезного действия моторвагонного поезда, которое можно определить согласно соотношениям и методике, приведенной в работе [5].

Представим выражение (1) в форме записи через величины  $i_{sd}, i_{sq}$  проекций статорных и  $i_{rq}, i_{rd}$  проекций роторных токов тягового асинхронного двигателя [8]:

$$P_{\text{мех.}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{Y_{\tau n}^{\partial}} (i_{sd} \cdot i_{rq} - i_{sq} \cdot i_{rd}) \cdot \omega, \quad (6)$$

где  $p$  - число пар полюсов тягового двигателя;

$Y_{\tau n}^{\partial}$  - величина, обратная динамической индуктивности тяговой машины.

Перепишем выражение (2) на основании соотношения (6):

$$\frac{A_T}{t_2 - t_1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{Y_{\tau n}^{\partial}} (i_{sd} \cdot i_{rq} - i_{sq} \cdot i_{rd}) \cdot \omega. \quad (7)$$

Работа силы тяги, которую необходимо выполнить при движении поезда по закону в форме кривой, которая соединяет точки маршрутной карты движения моторвагонного поезда с координатами  $(t_1, S_1)$  и  $(t_2, S_2)$  определяется по следующему выражению:

$$A_T = \int_{t_1}^{t_2} C \cdot C_a \cdot ch\left(\frac{t + C_1}{C}\right) dt, \quad (8)$$

или согласно выражению

$$A_T = C \cdot C_a \cdot \int_{t_1}^{t_2} ch\left(\frac{t + C_1}{C}\right) dt, \quad (9)$$

где  $C$  и  $C_1$  - константы, измеряемые в секундах, которые определяются параметрами маршрутной карты движения моторвагонного поезда (координатами начальной и конечной точки маршрутной карты), для нахождения которых необходимо решить систему уравнений [8]:

$$\begin{cases} S_1 = C \cdot v \cdot ch\left(\frac{t_1 + C_1}{C}\right); \\ S_2 = C \cdot v \cdot ch\left(\frac{t_2 + C_1}{C}\right), \end{cases} \quad (1)$$

$v$  - величина средней скорости движения по участку;

$C_a$  - величина удельной работы, измеряемая в Дж/с<sup>3</sup>.

Для проведения дальнейших расчетов учтем, что согласно [9]

$$ch(x) = \frac{1}{2} \cdot (e^x + e^{-x}), \quad (11)$$

а также [9]

$$ch(x) = 1 + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^{2n}}{(2n)!} + \dots \quad (12)$$

То есть можно записать, что

$$A_T = \frac{C}{2} \cdot C_a \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left( e^{\frac{t+C_1}{C}} + e^{-\frac{t+C_1}{C}} \right) dt = \frac{C}{2} \cdot C_a \cdot \int_{t_1}^{t_2} e^{\frac{t+C_1}{C}} dt + \frac{C}{2} \cdot C_a \cdot \int_{t_1}^{t_2} e^{-\frac{t+C_1}{C}} dt. \quad (13)$$

Тогда можно определить, что необходимая работа силы тяги, для перемещения поезда по закону в форме кривой, которая соединяет точки маршрутной карты движения моторвагонного поезда с координатами  $(t_1, S_1)$  и  $(t_2, S_2)$  составляет:

$$A_T = \frac{C^2}{2} \cdot C_a \cdot e^{\frac{t+C_1}{C}} \Big|_{t_1}^{t_2} - \frac{C^2}{2} \cdot C_a \cdot e^{-\frac{t+C_1}{C}} \Big|_{t_1}^{t_2}, \quad (14)$$

или в конечном виде полное значение необходимой работы составит:

$$A_T = \frac{C^2}{2} \cdot C_a \cdot e^{\frac{C_1}{C}} \cdot \left( e^{\frac{t_1}{C}} - e^{\frac{t_2}{C}} \right) - \frac{C^2}{2} \cdot C_a \cdot e^{-\frac{C_1}{C}} \cdot \left( e^{-\frac{t_1}{C}} - e^{-\frac{t_2}{C}} \right). \quad (15)$$

Реализация рационального управления модулем вектора потокосцепления тягового асинхронного двигателя, для обеспечения движения поезда по закону в форме кривой, которая соединяет точки маршрутной карты моторвагонного поезда с координатами  $(t_1, S_1)$  и  $(t_2, S_2)$ , осуществляется системой автовождения. Данная система на основе сигналов датчиков, установленных в элементах тяговой электропередачи и расчетов на основе полученных законов и маршрутной карты движения генерирует частоту задания тока для тягового автономного инвертора напряжения.

Пусть на каждом этапе движения вдоль маршрутной карты моторвагонного поезда с координатами от  $(t_1, S_1)$  до  $(t_2, S_2)$  система автовождения осуществляет отсчет времени  $t_j$ , причем  $t_j \in [0; (t_2 - t_1)]$ .

Пусть в зависимости от шага итерационного процесса будем иметь  $\mu$  циклов итерации для прохождения всего отрезка времени движения моторвагонного поезда  $[0; (t_2 - t_1)]$ . Количество циклов итерации возможно находить по известным оптимальным алгоритмам поиска с минимизацией ошибки [10].

На каждом шаге итерационного процесса система автовождения должна рассчитать необходимую работу, которую нужно выполнить для данного шага, причем в совокупности на интервале  $[0; (t_2 - t_1)]$  для  $\mu$  циклов итерации суммарная выполненная работа должна отвечать значению, полученному согласно выражению (15).

На каждом итерационном цикле должна выполняться работа, которая равна значению выражения:

$$A_j = \frac{t_j}{t_2 - t_1} \cdot (A_T - A_{j-1}). \quad (16)$$

То есть в общем виде на каждом промежутке времени выполняется мгновенная тяговая работа, которая является функцией времени и которая в совокупности по количеству промежутков итерации дает общую полную работу, равную значению, полученному согласно выражению (15):

$$A(t) = A_j. \quad (17)$$

Фактически, мгновенная тяговая работа есть произведение мгновенной силы тяги на элементарный вектор перемещения поезда в единицу времени.

С другой стороны, поскольку работа на конечном пути определяется как предел суммы элементарных мгновенных работ  $\overline{F_K} \cdot d\bar{r}$  [11], то она фактически выражается следующим интегралом:

$$A = \int_{S_1}^{S_2} \overline{F_K} \cdot d\bar{r}, \quad (18)$$

где  $\bar{r}$  - вектор перемещения, на величину которого перемещается поезд под действием силы  $\overline{F_K}$ .

Известно, что механическую мощность тягового асинхронного двигателя можно рассчитывать на основании выражения [12]

$$P_{\text{мех.}} = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot \psi_r \cdot i_r \cdot \sin \gamma, \quad (19)$$

где  $\psi_r$ ,  $i_r$  - модуль обобщенных векторов роторного потокосцепления и тока тягового асинхронного двигателя соответственно;

$\gamma$  - угол между векторами обобщенных векторов роторного потокосцепления и тока тяговой асинхронной машины.

Тогда имеем следующее выражение:

$$\frac{A(t)}{t_2 - t_1} = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot \psi_r \cdot i_r \cdot \sin \gamma, \quad (20)$$

откуда получаем:

$$\psi_r(t) = \frac{2 \cdot A(t)}{3 \cdot \omega \cdot i_r \cdot (t_2 - t_1) \cdot \sin \gamma}. \quad (21)$$

Приведенное выражение (21) позволяет реализовывать закон рационального управления модулем вектора потокосцепления тягового асинхронного двигателя во времени, для обеспечения движения вдоль маршрутной карты моторвагонного поезда с координатами  $(t_1, S_1)$  и  $(t_2, S_2)$ .

Таким образом, математически рассчитан способ управления тяговым асинхронным двигателем, который обеспечивает создание рационального тягового усилия.

Поскольку согласно содержания маршрутной карты движения на координаты точек начала и конца маршрутной карты движения  $(t_1; S_1)$  и  $(t_2; S_2)$  накладывается следующая система ограничений:

$$\begin{cases} t_1 < t_2; \\ S_1 < S_2, \end{cases} \quad \begin{matrix} (2 \\ 2) \end{matrix}$$

то при условии постоянных значений координат точек начала и конца маршрутной карты движения возможными являются следующие варианты прохождения кривой  $S = S(t)$ , которые показаны на рис. 1:

- выпуклая форма кривой  $S = S(t)$  - кривая 1;
- кривая  $S = S(t)$  представляет собой прямую линию - кривая 2;
- вогнутая форма кривой  $S = S(t)$  - кривая 3.

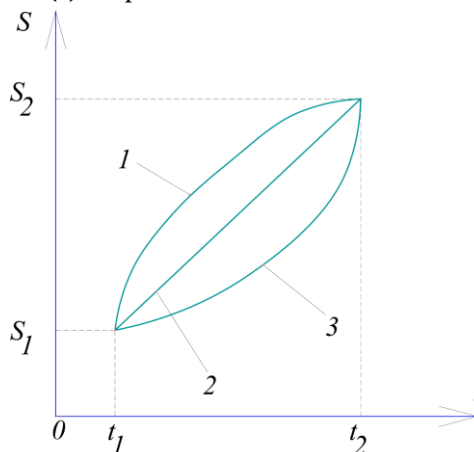


**Рис. 1. Варианты прохождения кривой  $S = S(t)$  на фиксированном участке маршрутной карты движения**

Как известно, в каждой точке, производная функции равняется тангенсу угла наклона линии, которая является касательной к графику данной функции [2]. Выберем произвольную точку на маршрутной карте движения рис. 1 и проведем к ней касательные (рис. 2).

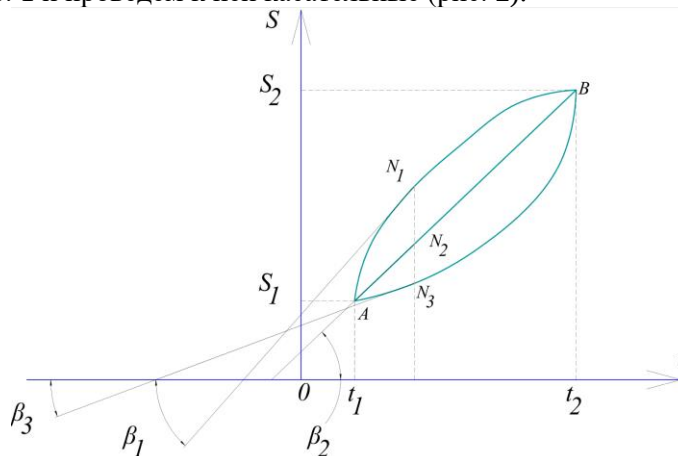


**Рис. 2. Первый вариант размещения касательных к графикам  $S = S(t)$**

В данном варианте размещение точек касания взято на одном уровне времени для первого характерного участка кривой  $S = S(t)$ . Как видно в данном случае имеет место следующее соотношение:

$$\operatorname{tg} \beta_3 < \operatorname{tg} \beta_2 < \operatorname{tg} \beta_1, \quad (23)$$

что свидетельствует о том, что именно такой вариант распределения кривой  $S = S(t)$  на участке  $AN_i$  (индекс  $i$  является номером позиции точки  $N$  для каждой кривой соответственно) позволяет минимизировать значение производной от данной функции на участке такой характерной формы.

Рассмотрим второй возможный случай характерной формы участка маршрутной карты движения – такой, при котором определенный участок по форме приближается к прямой линии. Выберем произвольную точку на маршрутной карте движения рис. 1 и проведем к ней касательные (рис. 3).

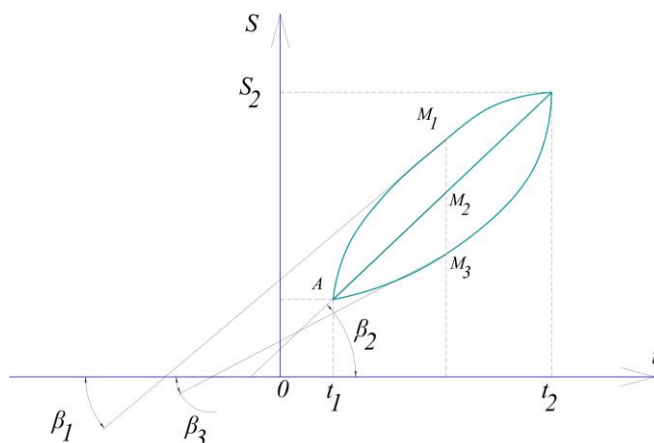


Рис. 3. Второй вариант размещения касательных к графикам  $S = S(t)$

В данном варианте размещения точек соприкосновения взято на одном уровне времени для второго характерного участка кривой  $S = S(t)$ . Как видно в данном случае имеет место следующее соотношение:

$$\operatorname{tg} \beta_3 < \operatorname{tg} \beta_2 \approx \operatorname{tg} \beta_1, \quad (24)$$

что свидетельствует о том, что именно такой вариант распределения кривой  $S = S(t)$  на участке в окрестности точки  $M_i$  (индекс  $i$  является номером позиции точки  $M$  для каждой кривой соответственно), который представляет собой прямую линию, позволяет минимизировать значение производной от данной функции на участке прямой формы. В ситуации, в которой можно в окрестности точки  $M_i$  считать участки функций  $S = S(t)$  приближенными к параллельным линиям, будет иметь место следующее соотношение:

$$\operatorname{tg} \beta_3 \approx \operatorname{tg} \beta_2 \approx \operatorname{tg} \beta_1. \quad (25)$$

Рассмотрим следующий возможный случай характерной формы участка маршрутной карты движения. Выберем произвольную точку на маршрутной карте движения рис. 1 и проведем к ней касательные (рис. 4).

В данном варианте размещения точек соприкосновения взято на одном уровне времени для третьего характерного участка кривой  $S = S(t)$ . Как видно в данном случае имеет место следующее соотношение:

$$\operatorname{tg} \beta_1 < \operatorname{tg} \beta_2 < \operatorname{tg} \beta_3. \quad (26)$$

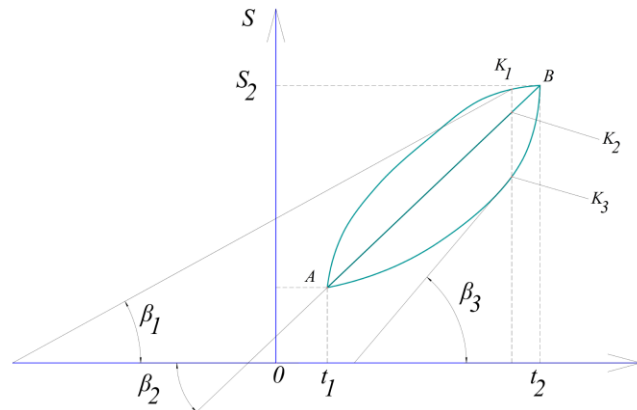


Рис. 4. Вариант размещения касательных к графикам  $S = S(t)$

Согласно соотношению (26) на данном участке значения производных от функции  $S = S(t)$  в окрестности точки  $K_i$  (индекс  $i$  является номером позиции точки  $K$  для каждой кривой соответственно) не позволяет минимизировать значение производной от данной функции на участке такой формы (для третьей кривой). Данный вариант нуждается в отдельном объяснении.

Учитывая особенности кривой  $S = S(t)$  как геометрической интерпретации кривой движения поезда невозможными являются варианты построения маршрутной карты движения, в которых выполняются соотношения, которые можно представить следующей совокупностью:

$$\begin{cases} t_k < t_{k+1}; \\ S_{k+1} < S_k. \end{cases} \quad (2) \quad (7)$$

$$\begin{cases} t_k > t_{k+1}; \\ S_{k+1} < S_k, \end{cases}$$

где  $k$  - произвольный номер участка кривой  $S = S(t)$ , причем

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^m S_k = AB \quad (2) \quad (8)$$

Тогда введем ограничение на значение соответствующих координат, которое зададим следующей системой:

$$\begin{cases} t_k < t_{k+1}; \\ S_k < S_{k+1}, \end{cases} \quad (2) \quad (9)$$

при этом считая, что выражение (28) является справедливым.

Система ограничений (29) фактически означает «необратимость» времени и исключает ситуацию, в которой поезд проезжает мимо станцию, к которой он направлялся, а потом возвращается на нее.

С математической точки зрения мы исключили из рассмотрения случай, в котором  $\tan \beta_i < 0$ , поскольку в таком случае  $\beta_i \geq \frac{\pi}{2}$ .

На рис. 5 рассмотрим кривую 3, согласно случаю, проанализированному на рис. 4.

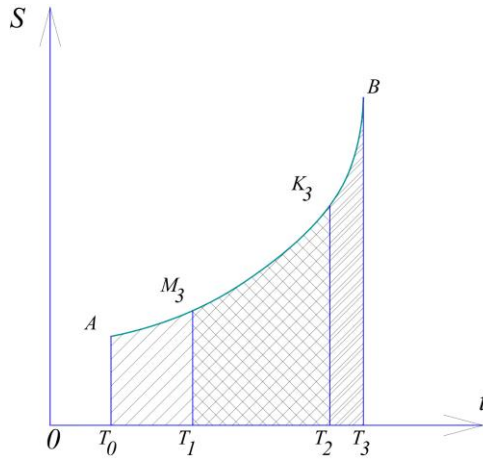


**Рис. 5. Схема к объяснению площадей под графиком  $S = S(t)$  в разных случаях наклона данной кривой относительно оси абсцисс**

Для площадей  $\Pi$  заштрихованных на рис. 5 фигур (под соответствующими участками маршрутной карты движения) выполняется соотношения

$$\Pi_{AM_3T_1T_0} + \Pi_{M_3K_3T_2T_1} > \Pi_{K_3BT_3T_2}. \quad (3.0)$$

Увеличение длины соответствующей дуги  $K_3B$ , в следствие чего резко изменится наклон кривой  $S = S(t)$  и выражение (10) может при определенных соотношениях потерять справедливость является невозможным, поскольку фактически это будет означать значительное увеличение скорости движения поезда, которая является ограниченной величиной на определенном участке. Кроме того, величина максимального угла наклона касательной к графику кривой  $S = S(t)$  определяется предельными значениями рывка и ускорения и потому имеет фиксированное для данного поезда на определенном участке дистанции движения (перегона) значение.

Длиной дуги  $AB$  называется такая граница, к которой стремится длина вписанной в эту дугу ломаной, когда длина ее самого большого звена стремится к нулю. То есть имеет место соотношения:

$$L_{AB} = \lim_{\max \Delta L_k \rightarrow 0} \sum_{k=1}^m \Delta L_k. \quad (3.1)$$

Исходя из того, что сигнал управления моторвагонным поездом является непрерывной функцией, то есть сила тяги непрерывная функция во времени, то на определенном отрезке времени, при условии постоянных значений координат точек начала и конца маршрутной карты движения –  $(t_1; S_1)$  и  $(t_2; S_2)$  соответственно, функция  $S = S(t)$  и ее производная также являются непрерывными функциями. Пусть

$$\Delta S_k = S(t_k) - S(t_{k-1}). \quad (3.2)$$

Тогда, учитывая что время не может принимать отрицательных значений имеем:

$$\Delta S_k = \sqrt{(\Delta S_k)^2 + (\Delta t_k)^2} = \Delta t_k \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta S_k}{\Delta t_k}\right)^2}. \quad (3.3)$$

Используя теорему Лагранжа получим:

$$\frac{\Delta S_k}{\Delta t_k} = \frac{S(t_k) - S(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} = S'(\tau_k), \quad (3)$$

причем

$$t_{k-1} < \tau_k < t_k. \quad (3)$$

Тогда на основе выражений (33), (34) имеем:

$$\Delta S_k = \Delta t_k \cdot \sqrt{1 + \left(S'(\tau_k)\right)^2}. \quad (3)$$

Итак, придем к выводу что длина вписанной ломаной равна

$$L_m = \sum_{k=1}^m \left[ \Delta t_k \cdot \sqrt{1 + \left(S'(\tau_k)\right)^2} \right]. \quad (3)$$

Исходя из непрерывности производной функции  $S = S(t)$  получаем что функция  $\sqrt{1 + \left(S'(\tau_k)\right)^2}$  также непрерывная. Тогда существует граница интегральной суммы, которая равная определенному интегралу:

$$L_{AB} = \lim_{\max \Delta L_k \rightarrow 0} \sum_{k=1}^m \left[ \Delta t_k \cdot \sqrt{1 + \left(S'(\tau_k)\right)^2} \right], \quad (3)$$

или

$$L_{AB} = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dS}{dt}\right)^2} dt. \quad (3)$$

Таким образом мы получили длину дуги маршрутной карты движения поезда на основе значений координат точек начала и конца маршрутной карты движения –  $(t_1; S_1)$  и  $(t_2; S_2)$  соответственно. Данное выражение входит в состав выражения для нахождения площади фигуры, которую образует дуга  $S = S(t)$  при своем обращении вокруг оси абсцисс, как множитель. Итак, минимизация площади, которую образует дуга  $S = S(t)$  при своем обращении вокруг оси абсцисс приводит также к уменьшению длины дуги  $S = S(t)$  и уменьшению выполняемой работы.

#### Выводы.

1. Определен общий закон управления динамикой моторвагонного поезда, обеспечивающий создание рационального тягового усилия.
2. Показана математическая суть критерия минимизации площади под маршрутной кривой движения поезда, как одного из возможных вариантов критерия энергоэффективности.

#### Библиографический список

1. **Цукало, П.В.** Экономия электроэнергии на электроподвижном составе / П. В. Цукало. – М. : Транспорт, 1983. – 174 С.
2. **Черепашенец, Р.Г.** Вождение поездов / Р. Г. Черепашенец, В. А. Бирюков, В. Т. Понкрашов, А. Н. Судаловский; под ред. Р. Г. Черепашенца. – М. : Транспорт, 1994. – 304 С.

3. Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов / Под ред. С. И. Осипова. – М. : Транспорт, 1984. – 280 С.
4. **Пивняк, Г. Г.** Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Пивняк Г. Г., Волков А. В. – Днепропетровск, 2006. – 421 с.
5. **Гетьман, Г. К.** Теория электрической тяги : монография : в 2 т. / Г. К. Гетьман – Д. : Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 2. – 363 с.
6. **Кузьмич, В. Д.** Теория локомотивной тяги : Учебник для вузов железнодорожного транспорта / Кузьмич В. Д., Руднев В. С., Френкель С. Я. – М. : Маршрут, 2005. – 448 с.
7. **Осипов, С. И.** Основы тяги поездов / Осипов С. И., Осипов С. С. – М. : УМК МПС России, 2000. – 592 с.
8. **Кулагин, Д. А.** Інформаційні управляючі системи і технології. Колективна монографія / [Кулагин Д. А. та ін.] – Бердянськ : БУМіБ, 2014. – 218 с.
9. **Корн, Г.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 832 с.
10. **Годунов, С.К.** Разностные схемы: Введение в теорию : Учебное пособие для университетов и вузов по специальности «Прикладная математика» / С. К. Годунов, В. С. Рябенский. – 2-е изд., перераб. и доп., 1977. – 440 с.
11. **Френкель, С.Я.** Техника тяговых расчетов : Учебно-методическое пособие / С. Я. Френкель. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 72 с.
12. **Гетьман, Г. К.** Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта : монография / Г. К. Гетьман. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта – Днепропетровск : Издательство ДНУЗТ, 2008. – 444 с.

### Bibliography

1. **Cukalo, P. V.** Energy saving in electric rolling composition / P. V. Cukalo. – М : Transport, 1983. – 174 p.
2. **Cherepashenec, R. G.** Driving trains / R. G. Cherepashenec, V. A. Birjukov, V. T. Ponkrashov, A. N. Sudalovskij; pod red. R. G. Cherepashenca. – М : Transport, 1994. – 304 p.
3. Rational modes of driving trains and tests locomotives / S. I. Osipov. – М : Transport, 1984. – 280 C.
4. **Pivnjak, G. G.** Modern frequency-controlled asynchronous electric drive with pulse-width modulation / Pivnjak G. G., Volkov A. V. – Dnepropetrovsk, 2006. – 421 p.
5. **Get'man, G. K.** Theory of electric traction : monograph / G. K. Get'man – D. : Izd-vo Makoveckij, 2011. – Т. 2. – 363 p.
6. **Kuz'mich, V. D.** Theory of locomotive traction : the Textbook for high schools of railway transport / Kuz'mich V. D., Rudnev V. S., Frenkel' S. Ja. – М. : Marshrut, 2005. – 448 p.
7. **Osipov, S. I.** Fundamentals of traction of trains / Osipov S. I., Osipov S. S. – М. : UMK MPS Rossii, 2000. – 592 p.
8. **Kulagin, D. A.** Information control systems and technologies. Collective monograph / [Kulagin D. A. and others] - Berdyansk : BUMB, 2014. - 218 p.
9. **Korn, G.** Handbook of mathematics for scientific workers and engineers) / G. Korn, T. Korn. – М. : Nauka, 1974. – 832 p.
10. **Godunov, S. K.** Difference schemes: an Introduction to theory : textbook for universities and universities of Applied mathematics / S. K. Godunov, V. S. Rjaben'kij. – 2-e izd., pererab. i dop., 1977. – 440 p.
11. **Frenkel', S. Ja.** Equipment for traction calculations : Educational-methodical manual / S. Ja. Frenkel'. – Gomel' : BelGUT, 2007. – 72 p.
12. **Get'man, G. K.** Scientific basis of definition of rational power range of traction rolling stock : monograph / G. K. Get'man. – Dnepropetrovskij nacional'nyj universitet zheleznodorozhnogo transporta – Dnepropetrovsk : Izdatel'stvo DNUZT, 2008. – 444 p.

УДК 621.313.33:629.423.24

## **СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ТЯГОВОГО УСИЛИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ МОТОРВАГОННОГО ПОЕЗДА**

**Кулагин Дмитрий Александрович**

Запорожский национальный технический университет,  
69063, Украина, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64,  
кафедра «Электроснабжения промышленных предприятий»,  
доцент, канд. техн. наук, докторант,  
телефоны: служебный +38-061-769-82-81, мобильный +38-066-236-52-71  
e-mail: nemix123@rambler.ru

В статье рассмотрен вопрос управления разгонной динамикой моторвагонного поезда. В результате применения методов вариационного исчисления определен общий закон управления, обеспечивающий создание рационального тягового усилия, который обеспечивает: использование максимальной возможной силы тяги, реализация высоких значений коэффициента сцепления и рациональное использование запасов кинетической энергии для преодоления подъемов, правильный выбор скорости движения, регулирование силы тяги с применением ослабления возбуждения тяговых двигателей. На основании данного закона проведен расчет необходимой тяговой работы и тягового усилия моторвагонного поезда.

*Ключевые слова:* тяговый асинхронный двигатель, усилие тяги, моторвагонный поезд, модуль вектора потокосцепления, закон управления, работа, параметры движения.

## **THE CONTROL METHOD OF ASYNCHRONOUS TRACTION MOTOR FOR RATIONAL TRACTION WHEN DRIVING EMU-TRAIN**

**Kulagin Dmitry Aleksandrovich**

Zaporizhzhya national technical University,  
69063, Ukraine, , Zaporozhye, street Zhukovsky, 64,  
Department «Power Supply of industrial enterprises»,  
associate Professor, Cand. the technology. Sciences, doctoral student,  
telephone: office +38-061-769-82-81, mobile +38-066-236-52-71,  
e-mail: nemix123@rambler.ru

The article discusses management of the accelerating dynamics of EMU-train. As a result of application of the methods of the calculus of variations defined common control law providing for the establishment of a rational traction, which provides: the maximum possible traction control, implementation of high values of the coefficient of adhesion and rational use of stocks of kinetic energy to overcome rises, the correct choice of the speed regulation of tractive effort with the use of weakening of traction motor excitation. On the basis of this law, the calculation of the necessary traction work and traction EMU-train.

*Keywords:* asynchronous traction motor traction force-powered train, the modulus of the vector of magnetic, control law, work, parameters of motion.