

УДК 621.867

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ШАХТНЫХ ВАГОНЕТОК С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНЫХ СИЛ

Шавлак В.Ф., канд. техн. наук, доц.,
Тарабаева И.В., ассистент,
Донецкий национальный технический университет

Установлены кинематические параметры процесса перемещения шахтной вагонетки с помощью линейных индукционных двигателей в зависимости от соотношения длин вагонетки и индуктора в начальный момент времени.

The authors have studied the kinematic parameters a mine-trolley travel process (the trolley runs with the help of linear induction engines) in terms of the trolley and inductor lengths ratio at the initial moment.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Шахтный транспорт является одной из основных составных частей технологического процесса предприятий угольной промышленности. По различным оценкам на него приходится от 40 до 70 % себестоимости угля. В существующих средствах обмена и откатки вагонеток передача тягового усилия исполнительному органу осуществляется трением, зацеплением или другим механическим способом. Такие механизмы имеют ряд существенных недостатков, обусловленных традиционной схемой привода и сохраняемых при любом усовершенствовании конструкции: возможность возникновения экстренных нагрузок; большой износ движущихся частей; снижение срока службы механизмов; большая металлоемкость оборудования.

Поэтому в настоящее время наряду с совершенствованием существующих механизмов ведутся поиски путей создания средств шахтного транспорта на базе современных достижений науки и техники.

Так принцип бегущего магнитного поля позволяет получить поступательное движение с помощью линейного индукционного привода, которое может сочетаться с механизмами обмена и откатки вагонетки.

Таким образом, использование линейных индукционных двигателей для перемещения шахтных вагонеток может считаться актуальным.

Анализ исследования публикаций. Вопросами разработки и внедрения линейных индукционных двигателей в горной и других отраслях промышленности занимаются в Украине и России, а также в США, Англии и Германии [1].

В настоящее время в литературе отсутствуют исследования посвященные кинематике перемещения транспортных средств с помощью магнитных сил.

Целью данной статьи является определение кинематических параметров взаимодействия линейных индукционных двигателей с подвижным составом рельсового транспорта.

Изложение материала и результаты.

Для достижения поставленной цели в данной работе рассмотрены теоретические вопросы взаимодействия линейных индукционных двигателей (ЛИД) непосредственно с подвижным составом шахтного рельсового транспорта.

При применении в качестве привода ЛИД [1] принципиально возможны три способа перемещения шахтных вагонеток:

- 1) бесконтактный - роль ротора выполняет движущаяся вагонетка;
- 2) контактный – вагонетка перемещается толкающей тележкой;
- 3) вагонетка перемещается на подвижной тележке (перестановочной платформе).

В данной работе рассмотрен бесконтактный способ. Бесконтактный способ может быть реализован в двух схемах:

- а) при боковой установке линейных индукционных двигателей относительно вагонетки;
- б) при нижнем относительно вагонетки расположении индуктора между рельсов.

Одной из основных задач теоретического исследования является определение законов движения (кинематических параметров) в процессе перемещения и торможения шахтных вагонеток с помощью магнитных сил.

Результаты теоретических исследований позволяют сделать вывод о характере перемещения и торможения и вагонеток с помощью ЛИД и о целесообразности применения их в качестве приводов средств перемещения шахтных вагонеток.

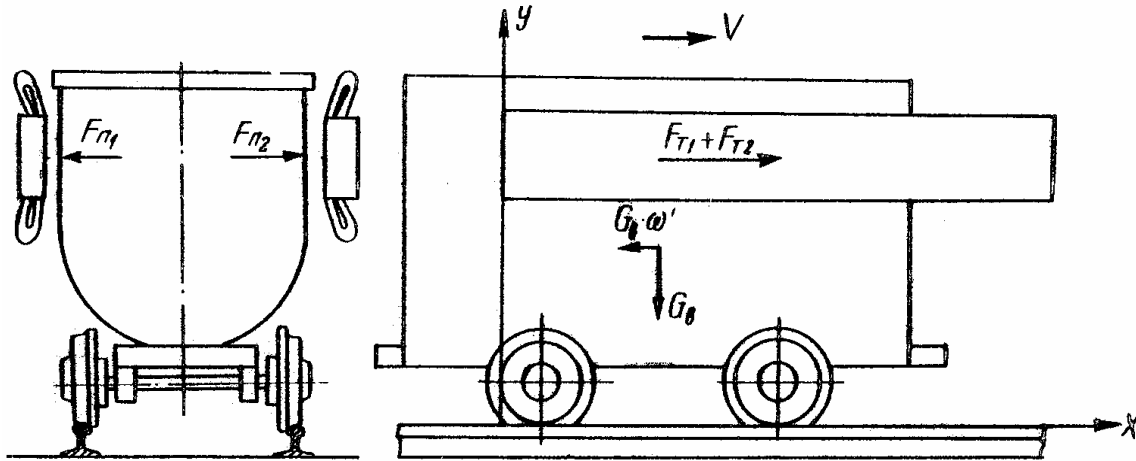


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на вагонетку при боковом расположении индукторов

На вагонетку, находящуюся в поле действия двух индукторов, в общем случае действуют следующие силы (рис. 1):

F_{T1} и F_{T2} - тяговые силы индукторов, Н;

F_{n1} и F_{n2} - силы притяжения кузова вагонетки к индуктору, Н;

G_B - сила тяжести вагонетки, Н;

F_u - сила инерции, направленная против движения при перемещении вагонетки и в сторону движения при ее торможении, Н;

$W_B = G_B \cdot \omega'$ - сила сопротивления движения вагонетки, направленная против движения, Н.

Движение вагонетки под воздействием электромагнитных сил можно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$F_T - \sum W = M_{np} \cdot \ddot{X}, \quad (1)$$

где $M_{np} = 1,075 \frac{G_B}{g}$ - приведенная масса вагонетки, кг;

$\sum W = G_B \omega'$ - суммарная сила сопротивления движению, Н;

$F_T = F_{T1} + F_{T2}$ - суммарная сила тяги, Н.

При решении уравнения движения вагонетки были приняты следующие допущения:

1) поступательно движущаяся вагонетка может рассматриваться как материальная точка с массой, равной массе всей вагонетки;

2) силы сопротивления движению вагонетки не зависят от скорости ее перемещения.

В случае симметричного расположения вагонетки относительно индукторов силы притяжения взаимно уничтожаются и не увеличивают силы сопротивления движению.

В реальных условиях вагонетка может располагаться несимметрично относительно индукторов и результирующая сила притяжения в ноль не обращается.

Однако в предельном случае величина силы сопротивления движению, обусловленная силами притяжения кузова к индуктору, не превышает 2-3% от силы тяги. При перемещении вагонетки в поле двух индукторов эта составляющая сил сопротивления изменяется 0 до максимума. В связи с этим в первом приближении можно пренебречь увеличением силы сопротивления движению за счет действия сил притяжения.

Электромагнитное тяговое усилие F_T , создаваемое приводом, представляет собой сложную функцию, зависящую от скорости движения V , положения вагонетки (ротора) относительно привода $l(x)$ и величины воздушного зазора δ . Причем изменение воздушного зазора имеет случайный характер и аналитически его трудно учесть. Для двухстороннего бокового расположения изменение воздушного зазора за счет ассиметричного расположения кузова вагонетки не приводит к значительным изменениям тягового усилия.

Как показали исследования, зависимость тягового усилия F_T от скорости V для привода с ферромагнитным ротором в зоне рабочих скоростей приблизительно линейная, что и может быть принято при расчетах. Зависимость тягового усилия от длины контактирующей части вагонетки выражается функцией $l(x)$ (рис. 2).

Уравнение движущей силы можно представить в следующем виде:

$$F_T = F_0(1 - k\dot{X}) \frac{l(x)}{L}, \quad (2)$$

где F_0 - пусковое тяговое усилие, Н;

\dot{X} - линейная скорость движения вагонетки, м/с;

$l(x)$ - длина контактирующей части вагонетки, м;

L - длина кузова вагонетки, м;

L_1 - длина линейного индукционного двигателя, м;

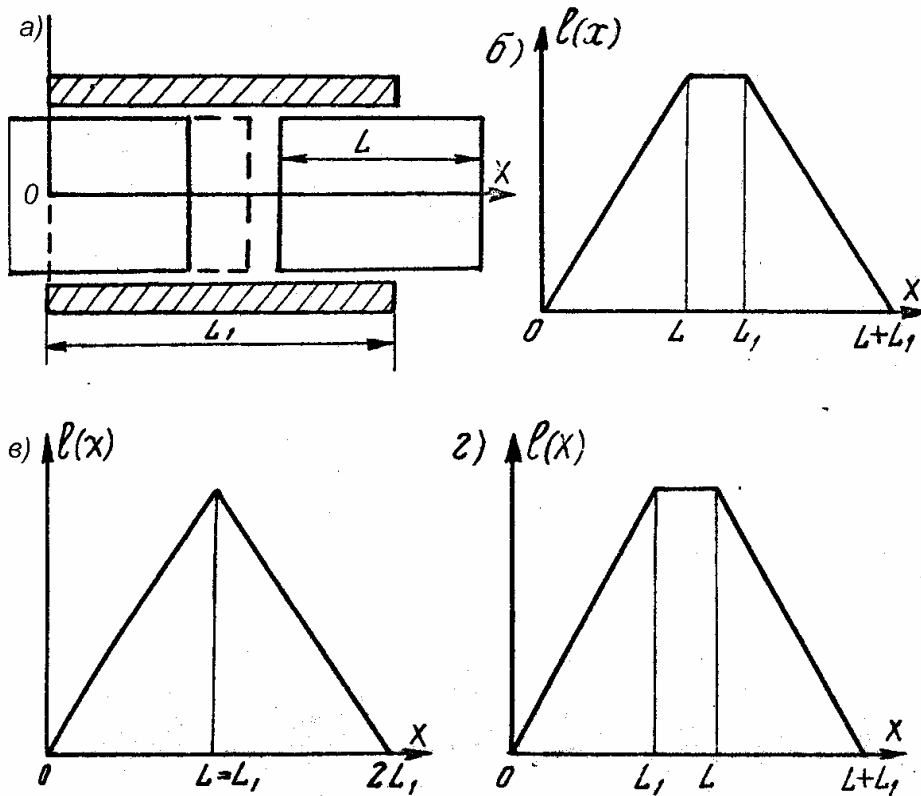


Рис. 2. Характеристики изменения функции $l(x)$

k - угловой коэффициент прямой, полученный при аппроксимации тяговой характеристики ЛИД прямой линией в зоне рабочих скоростей $0 \div 3$ м/с (рис. 3) взаимодействия вагонетки с приводом:

а) длина ЛИД L_1 больше длины кузова вагонетки L :

$$\begin{cases} x & \text{при } 0 \leq x \leq L; \\ L & \text{при } L < x \leq L_1; \\ L + L_1 - x & \text{при } L_1 < x \leq L + L_1; \end{cases} \quad (3)$$

б) длина ЛИД L_1 равна длины кузова вагонетки L :

$$\begin{cases} x & \text{при } 0 \leq x \leq L_1; \\ 2L_1 - x & \text{при } L_1 < x \leq 2L_1; \end{cases} \quad (4)$$

в) длина ЛИД L_1 меньше длины кузова вагонетки L :

$$\begin{cases} x & \text{при } 0 \leq x \leq L_1; \\ L_1 & \text{при } L_1 < x \leq L; \\ L + L_1 - x & \text{при } L < x \leq L + L_1. \end{cases} \quad (5)$$

В процессе работы установок с ЛИД могут возникать различные варианты взаимодействия вагонетки с приводом.

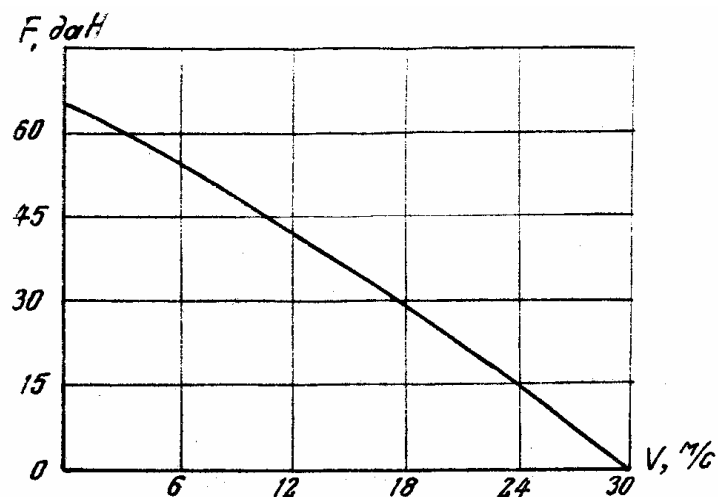


Рис. 3. Тяговая характеристика ЛИД с $\tau=300$ мм и ферромагнитным ротором

Таким образом, движение вагонетки под действием электромагнитных сил можно описать следующим уравнением:

$$M_{np} \cdot \ddot{X} + \sum W = F_0(1 - k\dot{X}) \frac{l(x)}{L}. \tag{6}$$

Из-за наличия в уравнении (6) члена $-F_0k\dot{X} \frac{l(x)}{L}$ оно является нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка, которое может решаться с использованием ПЭВМ. Для интегрирования нелинейного дифференциального уравнения второго порядка примем метод Эйлера.[2,3]

Рассмотрим перемещение загруженной вагонетки типа УВГ-0,8 в поле двух индукторов при их боковой установке.

В качестве привода приняты два ЛИД с полюсным шагом $\tau=0,3$ м, установленные с общим воздушным зазором $\delta = 60$ мм. Пусковое тяговое усилие $F_0=1300$ Н, длина ЛИД $L_1=1,3$ м, синхронная скорость $V_c=30,0$ м/с. Вагонетка массой $M=1000$ кг и длиной кузова $L=1,1$ м. В таблице 1 приведены принятые в задаче начальные условия.

Таблица 1. Начальные условия задачи.

| | | |
|---|------------------|----------------------|
| 1 | $X _{t=0} = 0,4$ | $\dot{X} _{t=0} = 0$ |
| 2 | $X _{t=0} = 0,6$ | $\dot{X} _{t=0} = 0$ |
| 3 | $X _{t=0} = 1,1$ | $\dot{X} _{t=0} = 0$ |
| 4 | $X _{t=0} = 1,3$ | $\dot{X} _{t=0} = 0$ |

Для решения уравнения (6) на основании метода Эйлера была составлена программа, позволяющая для заданных значений аргумента с шагом 0, 05 с. вычислить:

- 1) значение x , т.е. получить зависимость пути, пройденного вагонеткой, от времени;
- 2) зависимость скорости от времени;
- 3) зависимость ускорения от времени;
- 4) величину тягового усилия, действующую со стороны ЛИД на вагонетку.

Разработанная программа позволяет определить тяговые усилия привода, путь, скорость и ускорение вагонетки при ее перемещении и торможении для различной длины роторной части, взаимодействующей с ЛИД, и различных сопротивлений движению.

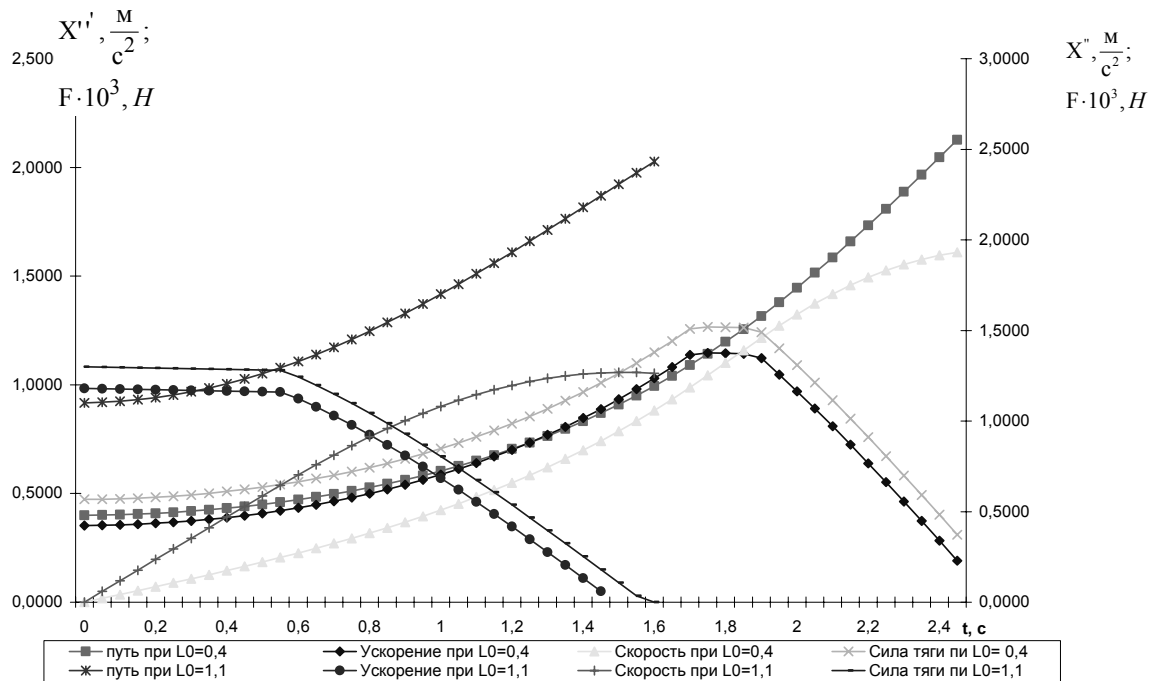


Рис. 4. Графики зависимости пути, скорости, ускорения и тягового усилия привода от времени

На рисунках 4 и 5 представлены графики зависимости пути, скорости, ускорения и тягового усилия привода от времени, построенные по результатам теоретических расчетов для различной длины роторной части, взаимодействующей в начальный момент с ЛИД.

Из приведенных графиков видно, что характер изменения тягового усилия и ускорения движения вагонетки зависит от соотношения длин взаимодействующей в начальный момент времени части вагонетки и индуктора. Если при входе в индукторы длина взаимодейст-

вующей части меньше длины кузова вагонетки, то тяговое усилие и ускорение по мере перемещения вагонетки возрастают, затем, когда вагонетка находится в поле индукторов, они практически остаются постоянными, а по мере ее выхода из них ускорение и тяговое усилие падают.

Если в начальный момент времени весь кузов вагонетки находится в поле индукторов, то до момента его выхода из индукторов тяговое усилие и ускорение остаются постоянными, а затем падают по мере выхода вагонетки.

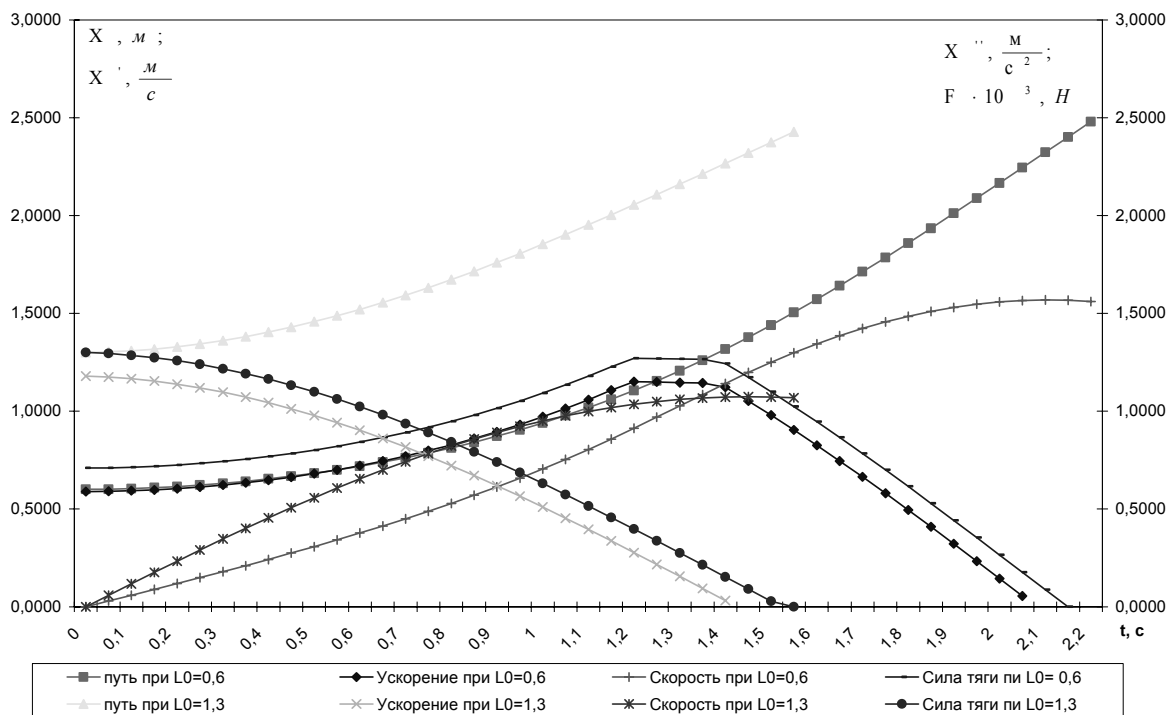


Рис. 5. Графики зависимости пути, скорости, ускорения и тягового усилия привода от времени

Если в начальный момент времени вагонетка находится на выходе из индукторов и длина взаимодействующей части меньше длины кузова, то ускорение и тяговое усилие привода падают по мере выхода вагонетки из индукторов.

Скорость перемещения вагонетки растет во всех случаях, начиная с момента пуска, и достигает своего максимума в момент, когда тяговое усилие становится равным силе сопротивления движению вагонетки. Кроме того, величина скорости движения вагонетки на выходе из индукторов зависит от длины взаимодействия в начальный момент времени, и тем она больше, чем меньше длина роторной взаимодействующей с ЛИД.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Проведенные теоретические исследования процесса перемещения вагонетки в поле двух индукторов позволили установить, что:

а) режим работы ЛИД привода является переходным, однако такой режим работы ЛИД не является опасным, так как превышение пускового тока над рабочим составляют не более 20-40%;

б) одиночная вагонетка разгоняется при перемещении ее в поле индукторов, достигая установившейся скорости в момент, когда тяговое усилие становится равным силе сопротивления движению вагонетки, причем величина скорости на выходе из индукторов зависит от соотношения длин кузова и индуктора, взаимодействующих в начальный момент времени;

в) тяговое (тормозное) усилие равномерно распределяется по длине кузова, что позволяет снизить нагрузки, действующие на отдельные элементы конструкции вагонетки, по сравнению с существующими вспомогательными механизмами.

При последующих исследованиях целесообразно рассмотреть кинематику перемещения составов вагонеток.

Список источников.

1. Исследование и создание транспортных средств со стационарными и подвижными линейными индукционными приводами. Отчет по теме №73-40, ДПИ, 1973, 105 с.
2. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З., Численные методы анализа. М., Физматгиз, 1962, 367 с.
3. Вербежицкий В. М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002, 840 с.

Дата поступления статьи в редакцию: 6.10.08