

УДК 621.313.8

Нугуманов Раушан Римович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
электрических машин и электрооборудования,
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ
Nugumanov Raushan Rimovich,
candidate of technical sciences, associate professor
of the Electric Machines and Equipment,
Bashkir State Agrarian University

Зиганшин Тимур Ильшатович,
магистратура 2 года обучения
энергетического факультета,
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ
Ziganshin Timur Ilshatovich,
2nd year of master's degree
in the Faculty of Energy,
Bashkir State Agrarian University

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИВОДА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОТАЛИ
ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
IMPROVEMENT OF THE ELECTRIC TROLLEY TRANSFER DRIVE
BY USING A LINEAR ASYNCHRONOUS MOTOR**

Аннотация. В статье рассматривается замена традиционного привода механизма перемещения электротали (двигатель вращения – редуктор – колесо) на линейный асинхронный двигатель. Представлена математическая модель движения рабочего органа, включающая уравнение динамики, уравнение тягового усилия ЛАД на основе уравнения Клосса, а также зависимости для сил трения и инерции. Приведена конструктивная схема электротали с односторонним плоским линейным асинхронным двигателем, где индуктор закреплён на подвижной части, а вторичный элемент выполнен в виде алюминиевой шины, интегрированной в монорельс. Обоснованы преимущества предлагаемого решения для применения в агропромышленном комплексе: отсутствие механической передачи, снижение потерь на трение, бесшумность работы, возможность санитарной обработки и повышение надёжности.

Abstract. The article discusses the replacement of the traditional drive of the electric hoist travel mechanism (rotary motor – gearbox – wheel) with a linear asynchronous motor. A mathematical model of the working element motion is presented, including the dynamic equation, the equation of the LAM traction force based on the Kloss equation, as well as dependences for friction and inertia forces. A design diagram of an electric hoist with a one-sided flat linear asynchronous motor is given, where the inductor is mounted on the moving part and the secondary element is made in the form of an aluminum busbar integrated into the monorail. The advantages of the proposed solution for application in the agro-industrial complex are substantiated: absence of mechanical transmission, reduction of friction losses, quiet operation, possibility of sanitary treatment and increased reliability.

Ключевые слова: Электроталь, линейный асинхронный двигатель, математическая модель, уравнение Клосса, монорельс.

Keywords: Electric hoist, linear asynchronous motor, mathematical model, Kloss equation, monorail.



Введение. В современных промышленных цехах, на стройплощадках и складах для подъёма и перемещения тяжёлых грузов применяются электротали. Их конструкция включает механизм подъёма (двигатель – редуктор – барабан) и механизм перемещения. Традиционный привод перемещения выполняется по схеме «двигатель вращения – редуктор – ведущее колесо» [1,2]. Однако такой привод обладает недостатками: низкий КПД на малых скоростях (до 40%), наличие большого числа механических передач, повышенный износ, необходимость регулярного обслуживания [3]. Особенно остро эти проблемы проявляются при эксплуатации подъёмно-транспортных устройств в агропромышленном комплексе: в животноводческих комплексах (кормораздача, уборка навоза), на птицефабриках и в тепличных хозяйствах, где требуется высокая надёжность, бесшумность и работа в условиях повышенной влажности и запылённости. Традиционный редукторный привод в таких условиях быстро изнашивается, требует частого обслуживания и создаёт шум, негативно влияющий на продуктивность животных.

Цель исследования: обоснование замены традиционного привода перемещения электротали на линейный асинхронный двигатель с разработкой математической модели и конструктивной схемы для применения в агропромышленном комплексе.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель движения рабочего органа электротали с линейным асинхронным двигателем.
2. Получить уравнение тягового усилия ЛАД на основе уравнения Клосса.
3. Предложить конструктивную схему электротали с односторонним плоским линейным асинхронным двигателем.
4. Выполнить анализ сил, действующих на транспортирующий модуль, и обосновать преимущества применения устройства для АПК.

Предложена конструктивная схема электротали, в которой традиционный привод «мотор – редуктор – колесо» заменён на линейный асинхронный двигатель (рисунок 1).

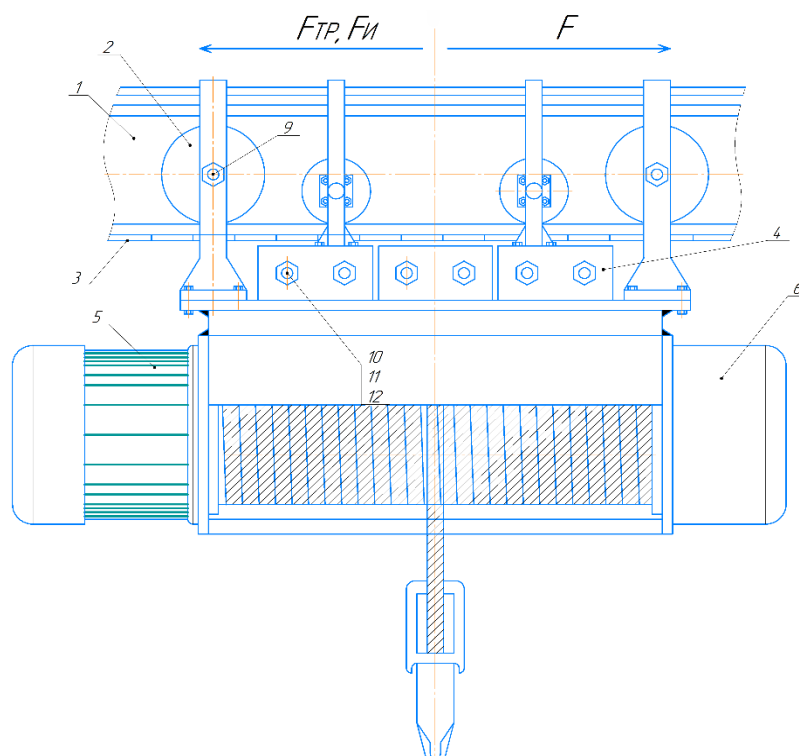


Рисунок 1. Конструктивная схема электротали с ЛАД



Предлагаемая конструкция электротали с ЛАД особенно востребована в АПК по следующим причинам. В животноводческих комплексах бесшумная работа ЛАД снижает стресс у животных, что положительно сказывается на надоях и привесах. Отсутствие редуктора и открытых зубчатых передач позволяет легко проводить санитарную обработку оборудования (влажная уборка, дезинфекция). В тепличных комплексах применение ЛАД исключает загрязнение воздуха продуктами износа механических передач (смазка, металлическая пыль), что важно для сохранения качества продукции. Кроме того, гладкий пуск и регулируемая скорость перемещения позволяют точно дозировать корма и удобрения, а также бережно транспортировать хрупкую продукцию (яйцо, овощи, фрукты) без повреждений.

Сравнение традиционного привода и привода с ЛАД (рисунок 1) позволяет выделить следующие преимущества:

- отсутствие механической передачи (редуктора, муфт, трансмиссионных валов);
- исключение потерь на трение в зубчатых зацеплениях (повышение общего КПД);
- снижение массы подвижной части;
- бесшумность работы, что критически важно для животноводческих ферм;
- снижение потребности в техническом обслуживании (нет изнашивающихся редукторов);
- возможность рекуперации энергии при торможении;

Принцип работы заключается в следующем. При подаче трёхфазного напряжения на обмотки индуктора создаётся бегущее магнитное поле. Это поле индуцирует токи в алюминиевой шине, закреплённой на монорельсе. Взаимодействие токов с магнитным полем создаёт тяговое усилие, под действием которого индуктор (вместе с тележкой и грузом) перемещается вдоль монорельса. Поддерживающие ролики обеспечивают вертикальное позиционирование и снижают трение. Отсутствие редуктора и механической связи между индуктором и вторичным элементом позволяет исключить потери на трение в зубчатых передачах, повышает надёжность и упрощает эксплуатацию.

Для описания движения электротали с линейным асинхронным двигателем составлено дифференциальное уравнение динамики на основе второго закона Ньютона. Уравнение, описывающее движение рабочего органа, может быть представлено в виде:

$$m \frac{dv}{dt} = F - (F_{mp} + F_u), \quad (1)$$

где m – масса тела, кг

$\frac{dv}{dt} = a$ – линейное ускорение, м/с²

F – сила, развиваемая ЛАД, Н;

F_{mp} – сопротивление сил трения, Н;

F_u – сила инерции, Н.

Для определения силы F , развиваемой ЛАД, использовано уравнение Клосса, составленное по схеме замещения двигателя:

$$F = \frac{F_k(2+g)s_k(v_1-\dot{x})v_1}{s_k^2v_1^2+(v_1-\dot{x})^2+s_k(v_1-\dot{x})gv_1}, \quad (2)$$

где $F_k = \frac{3 \cdot I_j^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot R_2'}{2 \cdot \tau \cdot f_1}$ – критическая сила ЛАД, Н;

ε_0 – добротность двигателя;

s_k – критическое скольжение ЛАД;

v_1 – синхронная скорость ЛАД, м/с;

\dot{x} – производная пути перемещения МТС;



$$g = \frac{2R_l}{\sqrt{R_l^2 + (X_l + X_2' + X_l X_2' / X_m)^2}} - \text{параметр двигателя, определяемый из схемы замещения}$$

ЛАД;

Сила сопротивления трению определяется с учётом конструкции ходовой части. Сопротивление сил трения находится по формуле:

$$F_{TP} = \frac{G}{D_k} (2k_{TP} + fd_{Ц}) K_p, \quad (3)$$

где G – максимальный вес перевозимого груза, Н;

k_{TP} – коэффициент трения качения колеса по монорельсу, мм;

f – коэффициент трения в цапфах оси колеса;

D_k – диаметр ходового колеса, мм;

$d_{Ц}$ – диаметр оси колеса (цапфы), мм;

K_p – коэффициент учитывающий дополнительные потери от трения в ребордах колес, токосъёмниках.

В период пуска возникают силы инерции. По основному закону динамики:

$$F_u = m \cdot a = m \cdot dv_m/dt,$$

где a – ускорение, м/с²;

m – масса перевозимого груза, кг;

v_m – мгновенное значение скорости передвижения, м/с.

Приведем математическую модель в среде объектно-визуального моделирования Matlab (Simulink).

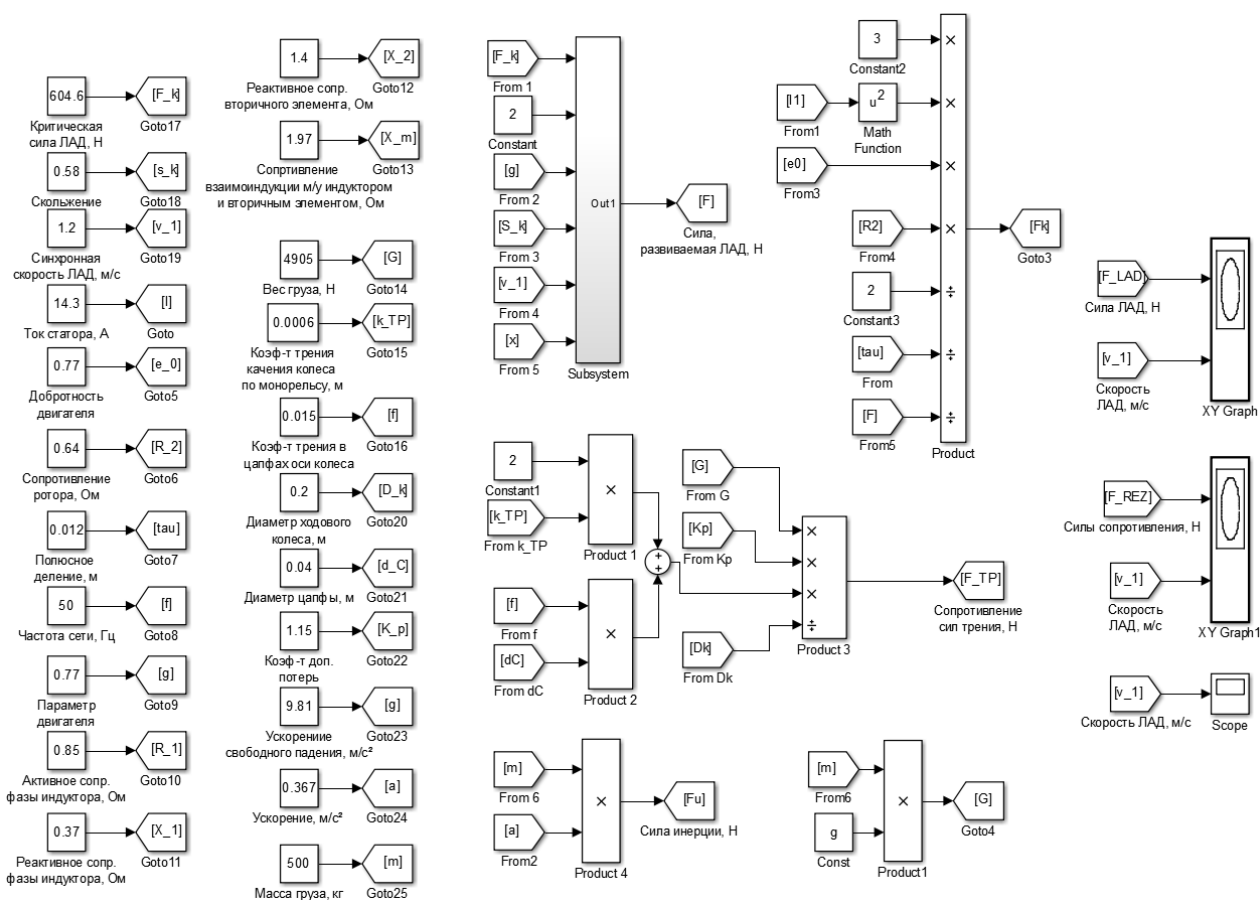


Рисунок 2. Вид математической модели электротали с ЛЭП в среде объектно-визуального моделирования Matlab (Simulink)



На основе данных уравнений могут быть построены механические характеристики ЛАД (зависимость силы от скорости), что позволяет выбрать рациональный режим пуска и торможения.

Совместное решение приведённых уравнений позволяет определить закон движения $x(t)$, скорость $v(t)$ и ускорение $a(t)$ для электротали с ЛАД, а также оценить время разгона и торможения.

Вывод. Разработана математическая модель движения электротали с линейным асинхронным двигателем, включающая уравнение динамики, уравнение тягового усилия на основе уравнения Клосса, а также зависимости для сил трения и инерции. Предложена конструктивная схема электротали с односторонним плоским линейным асинхронным двигателем, где индуктор закреплён на подвижной части, а вторичный элемент выполнен в виде алюминиевой шины, интегрированной в монорельс. Замена традиционного привода «двигатель вращения – редуктор – колесо» на ЛАД позволяет исключить механическую передачу, снизить потери на трение и повысить надёжность. Применение электротали с ЛАД в агропромышленном комплексе обеспечивает снижение шума, возможность регулярной санитарной обработки оборудования и бережное транспортирование хрупкой сельскохозяйственной продукции.

Список литературы:

1. Вайсон, А.А. Подъёмно-транспортные машины: учебник / А.А. Вайсон. – Москва: Машиностроение, 1989. – 536 с.
2. Чернышов, А.А. Линейные асинхронные двигатели для промышленного транспорта / А.А. Чернышов, В.И. Останин. – Москва: Энергоатомиздат, 2021. – 186 с.
3. Тали электрические канатные и краны с таями: справочник / А.И. Зерцалов, Л.Л. Боголюбов, А.С. Липатов. – Москва: «ИПФ ГАРТ», 2004. – 91 с.
4. Цупак, А.В. Электропривод подъёмно-транспортных машин в сельскохозяйственном производстве: учебное пособие / А.В. Цупак. – Санкт-Петербург: СПбГАУ, 1994. – 103 с.
5. Веселовский, О.Н. Линейные асинхронные двигатели: учебное пособие / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
6. Сарапулов, Ф.Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: учебное пособие / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, П.Н. Шымчак. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2001. – 236 с.
7. Аипов, Р.С. Линейные электрические машины и линейные асинхронные электроприводы технологических машин / Р.С. Аипов, А.В. Линенко. – Уфа: Издательство БГАУ, 2013. – 306 с.
8. Аипов, Р.С. Энергосбережение в водоснабжении применением электропривода с линейным асинхронным двигателем / Р.С. Аипов, И.Р. Кафиев // Отопление. Водоснабжение. Кондиционирование: Материалы III Международной научно-практической конференции. – Уфа: БГАУ, 2015. – С. 51-55.

