

## Совершенствование системы электропривода машин послеуборочной обработки зерна использованием линейных асинхронных электродвигателей

*В.В. Пугачёв, ст. преподаватель, В.В. Реймер, к.т.н., ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ*

Стремление повысить эффективность работы сельскохозяйственного оборудования является главной целью выполняемых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в различных отраслях агропромышленного комплекса. Применение вибрации как явления, направленного на интенсификацию различных технологических операций, позволит повысить как качественные, так и количественные показатели производственных процессов [1–3].

**Цель исследования** – повышение эффективности электропривода машин послеуборочной обработки зерна использованием линейных асинхронных электродвигателей.

Вибрация как явление в технике – искусственно создаваемый процесс, который появляется как следствие работы технологической машины, но в некоторых случаях она создаётся преднамеренно для изменения параметров функционирования производственного агрегата.

Разработка и внедрение в производство новых вибрационных зерноочистительных машин интенсифицирует один из трудоёмких процессов сельскохозяйственного производства – очистку и сортирование семян. Улучшение кинематических параметров вибрационных решёт способствует повышению их эффективности: под действием вибрации снижаются значения эффективных и истинных коэффициентов сухого трения между телами. В результате этого резко уменьшается сопротивление тел относительно смещения, благодаря чему лучше происходит сегрегация семян, самоочистка вибрационных решёт и пр. [4].

Несмотря на большое разнообразие вибрационных машин, предназначенных для выполнения различных технологических операций, все они состоят из одних и тех же узлов:

- рабочего органа, монтируемого на раме колеблющейся части;
- вибратора, который жёстко или шарнирно устанавливается в системе рабочего органа;
- упругой подвески рабочего органа;
- станины;
- привода и источника энергии.

Вибрационные машины относятся к механизмам с упругими элементами и звеньями. Рабочий орган связан со станиной при помощи упругих подвесок (витых пружин сжатия – растяжения, плоских пружин – рессор и др.). Упругая подвеска позволяет колеблющейся части машины совершать малые колебания в различных направлениях. Например,

подвеска, состоящая из плоских рессор, допускает колебания рабочего органа в направлении, перпендикулярном к оси рессор, а подвеска из цилиндрических витых пружин сжатия-растяжения в шести направлениях: вдоль осей неподвижной системы координат и вокруг них.

При вращении ротора вибратора инерционные силы неуравновешенных частей – масс дебалансов – выводят колеблющуюся часть машины из положения равновесия, и рабочий орган совершает движение. В зависимости от вида вибратора, расположения оси его вращения относительно главных центральных осей инерции колеблющейся части машины и вида подвески движение рабочего органа может быть простым или сложным пространственным [4].

Процесс вынужденного создания вибрации в работе технологической машины в настоящее время всегда сопровождается включением в её кинематическую схему промежуточного звена между источником механической энергии и рабочим органом. В зависимости от выполняемых функций производственного агрегата промежуточное звено (редуктор) в основном создаёт продольно-поперечные колебательные движения, которые передаются рабочему органу. Наличие редуктора приводит к усложнению конструкции агрегата, а также к проблемам регулирования амплитуды и частоты колебаний, повышению металло- и энергоёмкости машины, снижению её надёжности.

Способом повышения эффективности и интенсификации процессов очистки зерна является вариант получения колебательного движения без редуктора и построение электромашинного привода на основе электродвигателей поступательного движения или, по-другому, так называемых линейных асинхронных двигателей. Данные двигатели позволяют получить непосредственно поступательное движение, исключив механический преобразователь вращательного движения в поступательное [1].

Линейные асинхронные двигатели (ЛАД) обладают конструктивной простотой, технологичностью изготовления, дешёвизной, надёжностью и разнообразием конструктивных решений. Например, ЛАД на порядок дешевле двигателей постоянного тока равной мощности и в три раза надёжнее. Подвижной частью (вторичным элементом) ЛАД может выступать непосредственно прямоугольный или цилиндрический рабочий орган оборудования и как результат – органическое слияние двигателя и рабочего органа [8, 9].

Наиболее просто данный вид электрической машины можно представить, если мысленно разрезать по образующей цилиндра обычный асинхронный

двигатель и развернуть его в плоскость. Он представляет собой машину, состоящую из статора (индуктора) и вторичного элемента (ВЭ). Данный вид электрических машин непосредственно преобразует электрическую энергию в поступательное движение ВЭ. В зависимости от соотношения длин индуктора и ВЭ ЛАД бывают либо с длинным индуктором и коротким ВЭ, либо с длинным ВЭ и коротким индуктором (рис. 1). Такие конструкции обусловлены тем, что если длины индуктора и ВЭ будут одинаковыми, то по мере движения их относительно друг друга будет сокращаться активная зона машины и ухудшаться все её характеристики [10].

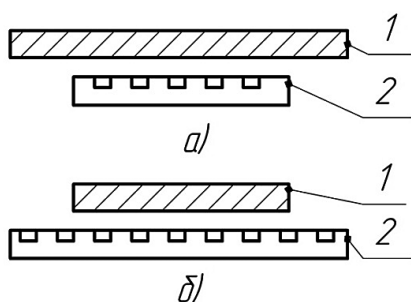


Рис. 1 – Конструктивная схема плоского ЛАД: а) – ЛАД с коротким индуктором; б) – ЛАД с коротким вторичным элементом; 1 – вторичный элемент; 2 – индуктор

По конструкции ЛАД бывают плоскими и цилиндрическими. Плоский ЛАД в свою очередь бывает односторонним и двусторонним. В двустороннем ЛАД вторичный элемент перемещается в зазоре между двумя индукторами, в одностороннем – магнитный поток индуктора замыкается через обратный (пассивный) магнитопровод (рис. 2).

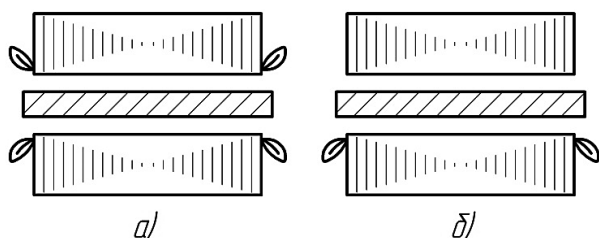


Рис. 2 – Двусторонний (а) и односторонний (б) ЛАД

Разновидностью ЛАД является цилиндрический (трубчатый) асинхронный двигатель (рис. 3). В нём цилиндрические катушки обмотки размещаются в индукторе и соединяются друг с другом таким образом, чтобы вдоль оси цилиндра возникло бегущее поле. Вторичный элемент в таком двигателе имеет вид штока, совершающего поступательное движение.

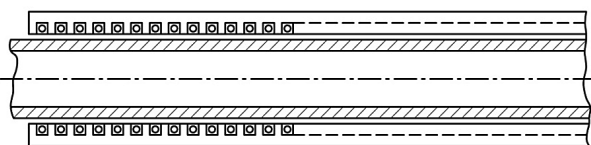


Рис. 3 – Цилиндрический ЛАД

Отличием ЛАД от вращающихся аналогов является наличие кроме основной силы тяги, совпадающей по направлению с бегущим магнитным полем, сил, направленных поперёк движения бегущего поля. Наличие этих сил приводит к появлению краевых эффектов, которые вводят дополнительные особенности использования ЛАД. Тем не менее использование ЛАД позволит упростить кинематическую схему машины по очистке зерна, а возможность регулирования частоты колебаний позволит автоматизировать процесс сепарации и повысить его качество [5].

Несмотря на представленные достоинства ЛАД, они не находят широкого применения в отраслях народного хозяйства. Это обусловлено тем, что данный вид электрических машин, в отличие от асинхронных двигателей, изготавливается под конкретную технологическую машину, и массовое их производство не налажено. Кроме того, неизученным остаётся вопрос исследования ЛАД как объекта управления [6].

**Материал и методы исследования.** При необходимости теоретического анализа и изучения уточнённых временных характеристик технологических машин возвратно-поступательного движения с ЛАД целесообразно построение математической модели на основе уравнений в динамике [7] и её реализация в среде визуального моделирования Simulink (MatLab). Применение кусочно-постоянных функций позволяет упростить, сократить громоздкие выражения и приспособить их к реализации в приложении Simulink.

На рисунке 4 показана расчётная схема вибрационного сепаратора со сложным движением деки, составленная для математического описания на основе динамики привода.

На основе расчётной схемы (рис. 4) составлены уравнения сил, действующих на индуктор, деку и сепарируемый материал, по которым построена математическая модель их движения.

В схеме приняты следующие системы координат:  $XOY$  – неподвижная относительно основания,  $X'O'Y'$  – неподвижная относительно деки.

Координаты сепарируемого материала, деки и индуктора в этих системах имеют вид:

$$\begin{aligned} x_m &= x'_m \cos \alpha, x_u = x'_u \cos \alpha, x_o = 0, x'_o = 0, \\ y_m &= y'_m + x'_m \sin \alpha, y_u = y'_u + x'_u \sin \alpha, y'_u = y'_d = y'_m = 0, \quad (1) \\ y_d &= \frac{y_A + y_B}{2}, x_A = \text{const}, \sin \alpha = \frac{y_B - y_A}{L}, \end{aligned}$$

где  $(x'_m; y'_m)$ ,  $(x'_d; y'_d)$ ,  $(x'_u; y'_u)$  – координаты сепарируемого материала, деки и индуктора, соответственно в системе координат  $X'O'Y'$ ;  $(x_m; y_m)$ ,  $(x_d; y_d)$ ,  $(x_u; y_u)$  – координаты сепарируемого материала, деки и индуктора, соответственно в системе координат  $XOY$ ;  $\alpha$  – угол между плоскостью деки и горизонталью;

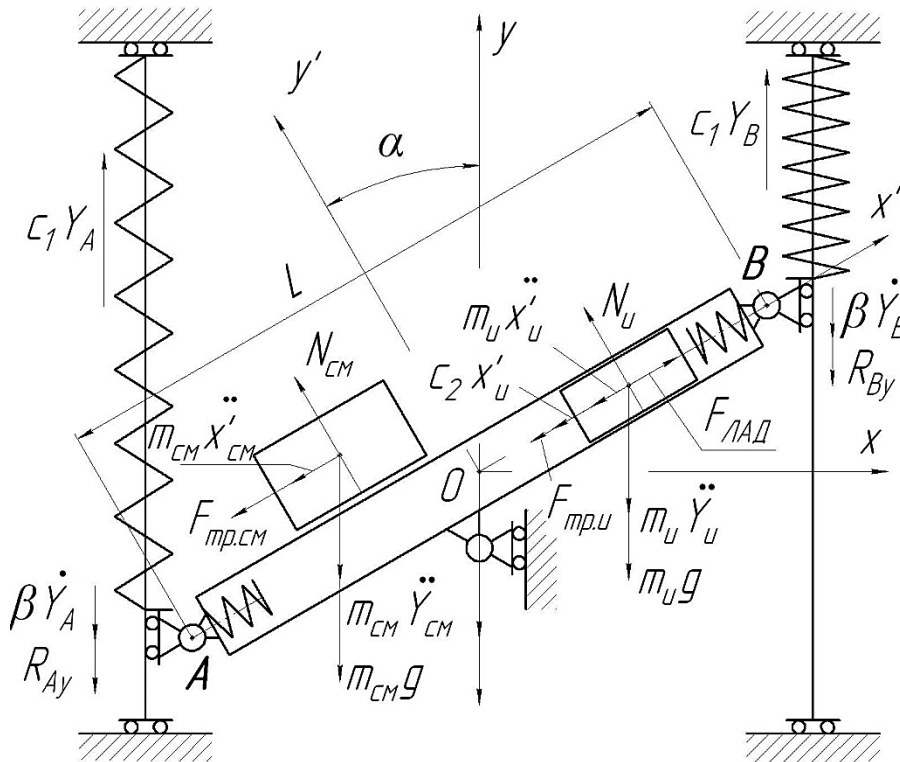


Рис. 4 – Расчётная схема вибрационного сепаратора со сложным движением деки

$L$  – расчётная длина деки, расстояние между точками А и В шарнирного соединения деки к упругим элементам 1;  
 $(x_A; y_A), (x_B; y_B)$  – координаты точек А и В.

На упругие элементы 1 по оси  $OY$  действуют следующие силы:

$$c_1(-y_A) - R_{Ay} - \beta \dot{y}_A = 0; \quad c_1(-y_B) - R_{By} - \beta \dot{y}_B = 0, \quad (2)$$

где  $c_1$  – коэффициент жёсткости упругих элементов 1;

$R_{Ay}, R_{By}$  – проекция на оси  $OY$  реакций упругих элементов 1 на воздействие деки в точках А и В;  
 $\beta$  – коэффициент вязкого трения деки в точках А и В об вертикальные направляющие с упругими элементами 1.

Уравнение сил, действующих на сепарируемый материал по оси  $O'X'$ , имеет вид:

$$-m_m \ddot{x}'_m - F_{тр.м} - m_m(g + \ddot{y}_m) \sin \alpha = 0, \quad (3)$$

где  $m_m$  – масса сепарируемого материала;  
 $F_{тр.м}$  – сила трения сепарируемого материала об поверхность решета;  
 $g$  – ускорение свободного падения.

Уравнение сил, действующих на сепарируемый материал по оси  $O'Y'$ , имеет вид:

$$N_m - m_m(g + \ddot{y}_m) \cos \alpha - m_m \ddot{x}'_m \sin \alpha = 0, \quad (4)$$

где  $N_m$  – реакция поверхности деки на давление сепарируемого материала

$$N_m = m_m(g + \ddot{y}_m) \cos \alpha + m_m \ddot{x}'_m \sin \alpha = 0. \quad (5)$$

Уравнение сил, действующих на индуктор по оси  $O'X'$  имеет вид:

$$F_{ЛАД} - m_u \ddot{x}'_u - F_{тр.и} - m_u(g + \ddot{y}_u) \sin \alpha - c_2 x'_u = 0, \quad (6)$$

где  $F_{ЛАД}$  – сила тяги ЛАД;  
 $m_u$  – масса индуктора ЛАД;  
 $F_{тр.и}$  – сила трения в подшипниках ЛАД;  
 $c_2$  – коэффициент жёсткости упругих элементов 2.

Уравнение сил, действующих на индуктор по оси  $O'Y'$ , имеет вид:

$$N_u - m_u(g + \ddot{y}_u) \cos \alpha - m_u \ddot{x}'_u \sin \alpha = 0, \quad (7)$$

где  $N_u$  – реакция поверхности вторичного элемента на давление индуктора

$$N_u = m_u(g + \ddot{y}_u) \cos \alpha + m_u \ddot{x}'_u \sin \alpha = 0. \quad (8)$$

На деку по оси  $OY$  действуют следующие силы:

$$R_{Ay} + R_{By} - m_b(g + \ddot{y}_b) - (N_m + N_u) \cos \alpha + (F_{тр.м} + F_{тр.и} - F_{ЛАД} + c_2 x'_u) \sin \alpha = 0. \quad (9)$$

Силы, действующие на деку, создают крутящие моменты, уравновешиваемые моментами инерции деки, сепарируемого материала и индуктора, и имеют вид:

$$R_{By} L \cos \alpha - N_u \left( \frac{L}{2} + x'_u \right) - \frac{m_b L}{2} (g + \ddot{y}_b) \cos \alpha - N_m \left( \frac{L}{2} + x'_m \right) - (J_m + J_\delta + J_u) \ddot{\alpha} = 0, \quad (10)$$

где  $J_m, J_\delta, J_u$  – моменты инерции соответственно сепарируемого материала, деки и индуктора.

Включение и отключение напряжения питания ЛАД осуществляется блоком управления. Для предварительного исследования созданной модели можно задать режим согласно выражению [1]:

$$U_1 = U_{исл} \times \text{sign}(\sin(2\pi f_{иск} t)), \quad (11)$$

где  $U_{ист}$  – напряжение источника питания, В;  
 $f_{вкл}$  – частота включений (колебаний), Гц.

На основе уравнений (1)–(10) составлены уравнения движения сепарируемого материала, деки и индуктора ЛАД. Математическая модель реализована в приложении Simulink (MatLab).

В результате запуска приведённой модели в режиме вынужденных колебаний с подачей напряжения ЛАД согласно выражению (11) с произвольной частотой получена траектория движения индуктора в системе  $XOY$  (рис. 5, 6) и сепарируемого материала (рис. 7).

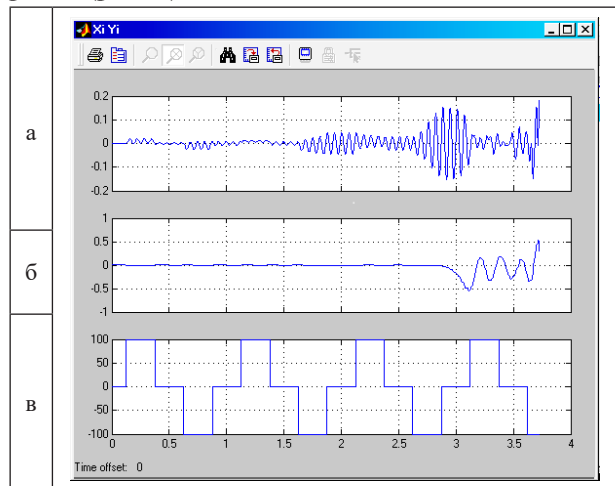


Рис. 5 – Координаты движение индуктора по оси  $OX$ –а; по оси  $OY$ –б; напряжение питания ЛАД–в

Вид временных характеристик (рис. 5) и траектории движения (рис. 6, 7) свидетельствуют о нестабильности работы привода при параметрах, заданных в эксперименте, в результате чего сепарируемый материал под центробежной силой удаляется от динамической нейтрали.

На устойчивость системы влияют многие другие параметры. Основные из них: массы индуктора, деки, сепарируемого материала; рабочая длина деки; коэффициенты жёсткости упругих элементов; скорость перемещения индуктора; длина вторичного элемента; усилие ЛАД; периоды (частота) включения и выключения ЛАД и т.д. т.п.

**Результаты исследования.** Реализация теоретического исследования на основе математического моделирования и машинной имитации позволили получить желаемые траектории перемещения сепарируемого материала и индуктора ЛАД (рис. 8). Приведённые на рисунках 6 и 7 траектории значительно отличаются от желаемых.

Основной причиной этому является высокая частота колебаний.

Кроме того, следует отметить, что в целях получения значимого угла наклона в модели приняты предельно малые значения моментов инерции индуктора, деки и сепарируемого материала, так как угол колебания отрицательно зависит от частоты переключения ЛАД и значений моментов инерции.

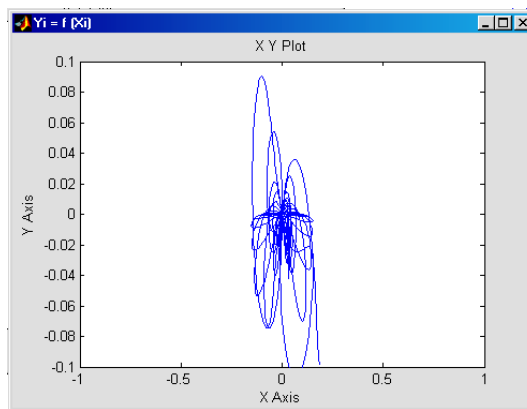


Рис. 6 – Траектория движения индуктора в системе  $XOY$

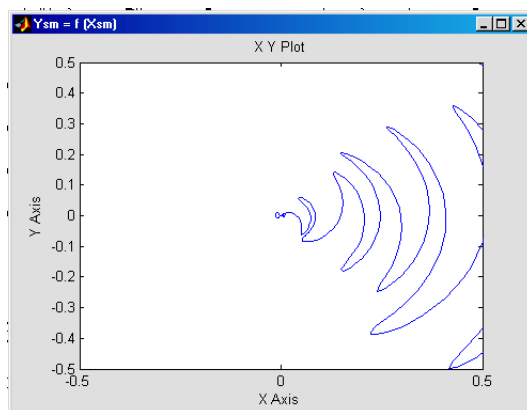


Рис. 7 – Траектория движения сепарируемого материала в системе  $XOY$

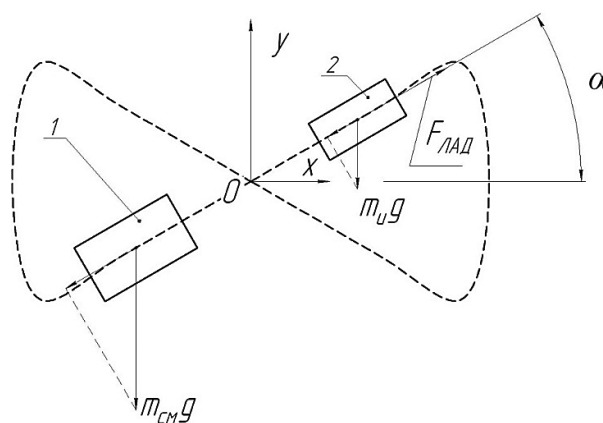


Рис. 8 – Желаемые траектории движения сепарируемого материала – 1 и индуктора ЛАД – 2 в системе  $XOY$

**Выводы.** Проведённое теоретическое исследование и машинная имитация на его основе позволяют утверждать, что повышение эффективности электропривода машин послеуборочной обработки зерна использованием линейных асинхронных электродвигателей возможно.

Сепарируемый материал движется под действием проекции силы тяжести, поэтому его максимальное ускорение не может превышать ускорение свободного падения  $g$ , тогда как основной движущей силой индуктора является усилие линейного

асинхронного двигателя (ЛАД). Поэтому движение сепарируемого материала по фазе значительно отстаёт от индуктора. Это говорит о том, что для получения устойчивого колебательного движения сепарируемого материала под действием силы тяжести следует исследовать привод в малых частотах колебаний.

### Литература

1. Аипов Р.С., Линенко А.В. Линейные электрические машины и линейные асинхронные электроприводы технологических машин. Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. 308 с.
2. Свечарник Д.В. Электрические машины непосредственного привода: безредукторный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1988. 208 с.
3. Гончаревич И.Ф., Урьев Н.Б., Талейсник М.А. Вибрационная техника в пищевой промышленности. М.: Издательство «Пищевая промышленность», 1977. 278 с.
4. Заика П.М. Вибрационные зерноочистительные машины. Теория и расчёт. М.: Издательство «Машиностроение», 1967. 144 с.
5. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
6. Аипов Р.С., Акчурин С.В., Пугачёв В.В. Математическая модель вибропривода с линейным асинхронным двигателем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. № 1. С. 58–63.
7. Аипов Р.С., Ашимова Л.И., Пугачёв В.В. Вибрационный сепаратор с линейным асинхронным электроприводом сложного колебательного движения деки // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2015. № 2 (34). С. 65–69.
8. Nasar S.A. Electromagnetic fields and forces in a linear induction motor, taking into account edge effects. «Proc. IEE» London, 1969, v. 116. № 4.
9. S. Yamamura, H. Masuda, H. Ito. Three-dimensional analysis of double sided linear induction motor with iron plate secondary – Trans. of Tokyo Section Meeting IEE Japan, № 254, Nov. 1977.
10. Boldea, I Linear Motion Electromagnetic Devices / I. Boldea. Taylor&Francis, 2001. 270 s.