

Анализ виброцентробежных сепараторов с линейным электроприводом

*А.В. Линенко, д.т.н., профессор, М.Ф. Туктаров, к.т.н.,
Б.Р. Халилов, аспирант, Т.И. Камалов, к.т.н., ФГБОУ ВО
Башкирский ГАУ*

Одной из важнейших и ответственных задач предприятий системы сельского хозяйства является обеспечение полной сохранности убранного зерна. Для успешного решения этой задачи зерноперерабатывающие предприятия должны иметь хорошо оснащённую техническую базу, способную обеспечить качественное сепариро-

вание поступающего зерна без потерь и в течение короткого срока [1].

Основными мероприятиями в снижении энерго- и трудоёмкости этого процесса являются комплексная механизация и автоматизация с применением более рациональных технологических схем сепарирования. Однако низкая удельная производительность существующих сепарирующих машин затрудняет внедрение в производство указанных мероприятий. Возрастающие потребности производства требуют изыскания новых

наиболее эффективных способов сепарирования и создания высокопроизводительных машин, которые позволили бы значительно интенсифицировать технологические процессы [2].

Для успешной очистки зерновой смеси большое значение имеет правильный выбор зерноочистительной машины. Наиболее перспективными на зерноприёмных предприятиях зерноочистительными машинами являются виброцентробежные зерновые сепараторы (ВЦС), в которых под действием инерционных сил вращательного и колебательного движения происходит интенсивное сепарирование зерновой смеси. Рабочими органами ВЦС являются вращающиеся и колеблющиеся в вертикальной плоскости вертикальные цилиндрические решёта с центробежной подачей в них зернового материала [2, 3].

Решению задач сепарирования во вращающемся и колеблющемся вдоль оси решете посвящены работы Е.С. Гончарова [3], А.А. Несикова [1], Л.Н. Тищенко [2] и др. На основании проведённых научных исследований они предложили конструкции виброцентробежных сепараторов с осевыми колебаниями. Сообщение осевых колебаний вращающемуся решету позволяет значительно повысить производительность и эффективность процесса разделения по сравнению с разделением при применении плоских решёт, совершающих прямолинейные колебания [1, 4].

Однако существующие конструктивные схемы ВЦС несовершенны и имеют ряд существенных недостатков, основными из которых являются низкая надёжность вибрационного привода, отсутствие возможности регулирования параметров колебаний рабочего органа. Вследствие этого решёта ВЦС не имеют возможности обеспечить достаточную пропускную способность и не оказывают технологически оптимального воздействия на обрабатываемый зерновой материал, что в свою очередь приводит к снижению качества процессов сепарирования и потерям зерна [1, 5].

Одним из путей устранения вышеперечисленных недостатков является разработка вибрационного привода зерноочистительной машины на базе плоского линейного асинхронного электродвигателя (ЛАД). Такое техническое решение значительно упрощает конструкцию подшипниковых узлов и облегчает условия их работы [5].

Материал и методы исследования. На рисунке 1 показана кинематическая схема предлагаемой конструкции ВЦС с ЛАД.

Внутри корпуса 1 размещается рабочий орган 3 [5], состоящий из трёх ярусов решёт цилиндрической формы, которые с помощью электрических приводов получают вращательное и вертикальное вибрационное движение [6].

Электропривод вибрационного движения рабочего органа в вертикальной плоскости представляет собой плоский ЛАД, состоящий из нескольких

индукторов 2, жёстко закреплённых на основании, и кольца 7, являющегося вторичным элементом ЛАД, подпружиненного относительно основания с помощью роликов 8 и упругих элементов 9. Рабочий орган 3, связанный через шлицевое соединение 10 с горизонтально расположенным шкивом 11, получает вращение от шкива 13, который закреплён на валу электродвигателя 12. При вращении шкива 11 рабочий орган сепаратора приводится во вращение вокруг своей вертикальной оси. При подключении индукторов к сети вторичный элемент ЛАД приходит в поступательное движение в вертикальной плоскости одновременно с вращательным движением, которое передаётся через шлицевое соединение, при этом сжимаются упругие элементы 9. При отключении индукторов от сети

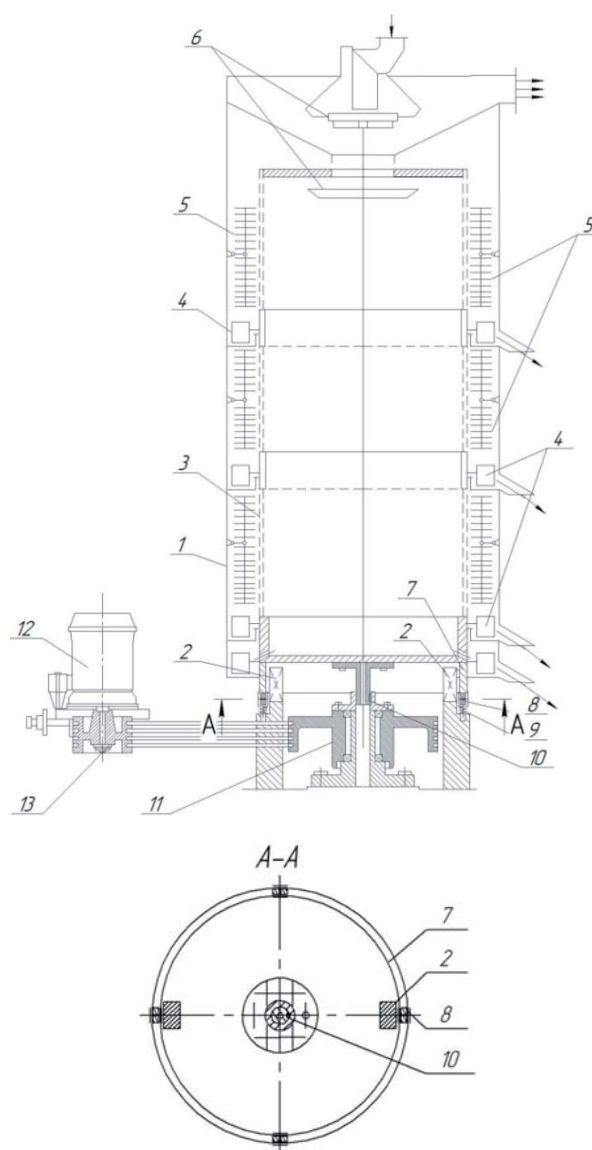


Рис. 1 – Кинематическая схема ВЦС с ЛАД:

- 1 – корпус; 2 – индукторы ЛАД; 3 – решёта цилиндрической формы; 4 – лопатки; 5 – цилиндрические дисковые очистители; 6 – разбрасыватель; 7 – кольцо; 8 – ролики; 9 – упругие элементы; 10 – шлицевое соединение; 11, 13 – шкивы; 12 – электродвигатель

за счёт энергии, накопленной в упругих элементах, кольцо возвращается в исходное состояние [5]. Блок управления в зависимости от вида, сорта и влажности зерновой смеси имеет возможность обеспечивать регулирование параметров колебаний рабочего органа [5, 7] в вертикальной плоскости по частоте и по амплитуде с помощью изменения длительности и частоты включения индукторов плоского ЛАД в сеть [7].

Поступающее зерно по лопаткам разбрасывателя 6 под воздействием центробежной силы прижимается к внутренней поверхности решёт и перемещается вниз вследствие вибрационного движения решёт. С помощью лопаток 4 получаемые фракции транспортируются в выходные зернопроводы. С целью автоматической очистки решёт от примесей и зерна на каждом ярусе установлены цилиндрические дисковые очистители 5 [2].

Создание вибрационного электропривода ВЦС с ЛАД за счёт непосредственного преобразования электрической энергии в вибрационное движение рабочего органа позволяет отказаться от механического преобразователя вида движения. По сравнению с существующими конструкциями ВЦС за счёт уменьшения установленной мощности вибрационного привода снижается расход электроэнергии, уменьшаются массогабаритные показатели [7]. Также возможность регулирования параметров колебаний рабочего органа в зависимости от сорта и влажности семян повышает эффективность сепарирования зерновой смеси, а самое главное, увеличиваются сроки межсервисных интервалов обслуживания вибрационного привода.

Дальнейшее повышение эффективности описанного технического решения возможно с помощью выполнения во вторичном элементе (кольце) плоского ЛАД симметричных сквозных отверстий (рис. 2).

Это позволит отказаться от сложного и дорогого блока управления, который в процессе работы ВЦС периодически подключает и отключает индукторы

плоского ЛАД от сети, что сопровождается большими пусковыми токами в обмотках индуктора и в свою очередь снижает надёжность вибрационного привода.

Выполнение симметричных сквозных отверстий на кольце 7, которое одновременно является ротором ЛАД, позволяет не отключать индукторы ЛАД от сети в процессе работы ВЦС, т.е. они подключены к сети постоянно. Кольцу 7 через шлицевое соединение (рис. 1) 10 сообщается вращательное движение от двигателя вращения 12. В момент вращения, когда часть кольца без отверстий располагается напротив индукторов ЛАД (рис. 2б), возникает электромагнитная сила, под действием которой кольцо приходит в поступательное движение, к примеру вниз в вертикальной плоскости. При этом упругие элементы 9, расположенные под кольцом, сжимаются. По мере вращения кольца 7 наступает момент, при котором симметрично расположенные отверстия 14 кольца находятся напротив индукторов ЛАД (рис. 2б), при этом электромагнитное поле пропадает, и за счёт энергии, накопленной в упругих элементах, кольцо возвращается в исходное состояние, продолжая при этом совершать вращательное движение. Далее в момент, когда напротив индукторов будут проходить части кольца без отверстий, кольцо снова придёт в поступательное движение, и далее описанный процесс повторится. Частота колебаний рабочего органа будет определяться количеством отверстий на кольце и его частотой вращения.

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволит осуществить вибрационное движение рабочего органа ВЦС от ЛАД без блока его периодического подключения и отключения от сети. Это в значительной степени снизит стоимость и материалоемкость всей конструкции и повысит её надёжность.

Следующее техническое решение позволит снизить установленную мощность вибрационного привода и динамические нагрузки на всю кон-

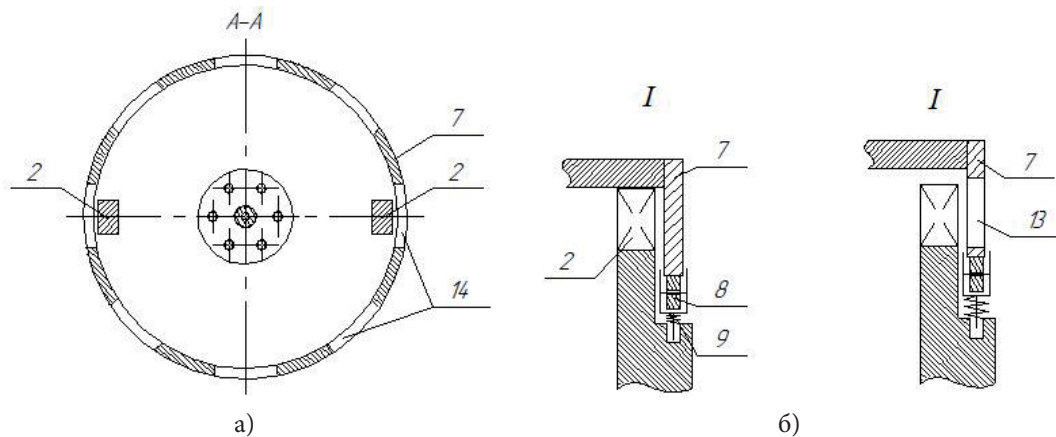


Рис. 2 – Общий вид вибрационного привода:

а) разрез вибрационного привода со сквозными отверстиями во вторичном элементе ЛАД; б) положения вторичного элемента во время работы ВЦС: 2 – индукторы ЛАД, 7 – кольцо, 8 – ролики, 9 – упругие элементы, 14 – сквозные отверстия

струкцию ВЦС. Для этого предлагается рабочий орган с ротором вдоль оси вращения разделить на подвижные относительно друг от друга секции (рис. 3).

В данном техническом решении электромагнитная сила передаётся от индукторов ЛАД не

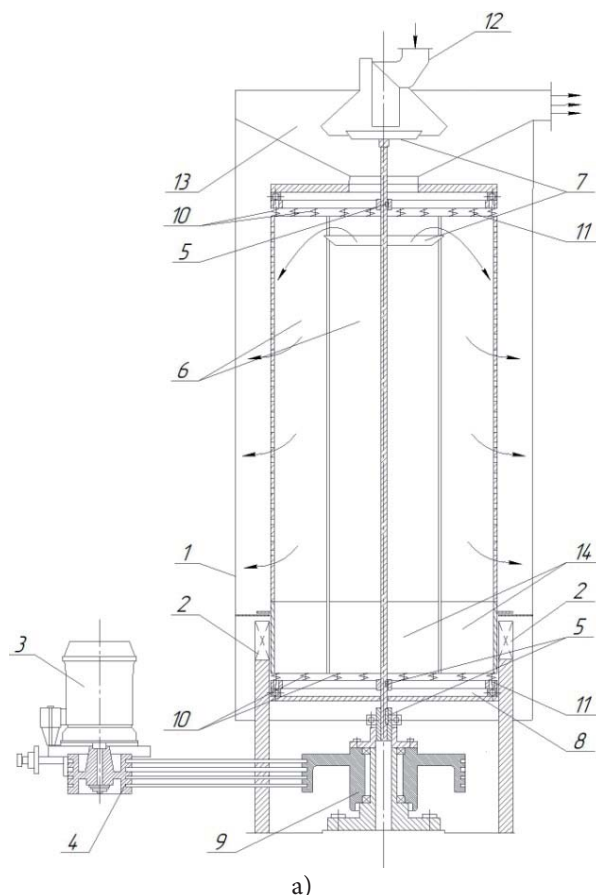


Рис. 3 – Кинематическая схема ВЦС с ЛАД:

а) общий вид ВЦС с ЛАД; б) положение секции в момент её нахождения в электромагнитном поле индукторов ЛАД; 1 – рабочий орган; 2 – индукторы ЛАД; 3 – электродвигатель; 4, 9 – шкив; 5 – шлицевое соединение; 6 – секции рабочего органа; 7 – разбрасыватели; 8 – диск; 10 – упругие элементы; 11 – направляющие; 12 – входной патрубок; 13 – вейлка; 14 – секции ротора

одновременно всему ротору, а только несколькими секциями, на которые разделены ротор (кольцо) и рабочие органы. По мере вращения ротора электромагнитная сила от индукторов будет по очереди передана каждой секции ротора, связанной со своей секцией рабочего органа, которая находится напротив индукторов ЛАД (рис. 3б). Индукторы ЛАД во время работы ВЦС подключены к сети постоянно.

Такое решение позволит снизить динамические нагрузки на упругие элементы, инерционные нагрузки на фундамент станины, установленную мощность ВЦС и повысить надёжность всей установки в целом.

По результатам проведённого исследования была разработана экспериментальная установка получения вращательного от двигателя вращения и вибрационного от ЛАД движений рабочего органа ВЦС.

На рисунке 4 представлены фотографии экспериментального ВЦС, реализованного согласно кинематической схеме, представленной на рисунке 1. Индукторы 1 жёстко закреплены на основании, решето 5 (рабочий орган) жёстко связано с вторичным элементом 2 ЛАД (рис. 4б). Решето с вторичным элементом установлено на роликах 3, которые в свою очередь подпружинены относительно основания на упругих элементах 4 (рис. 4а).

Для определения производительности Q ВЦС по продовольственному зерну был использован упрощённый вариант модели, в которой слой зерновой смеси разделяется на два однородных подслоя с разными коэффициентами динамической вязкости μ_1 и μ_2 .

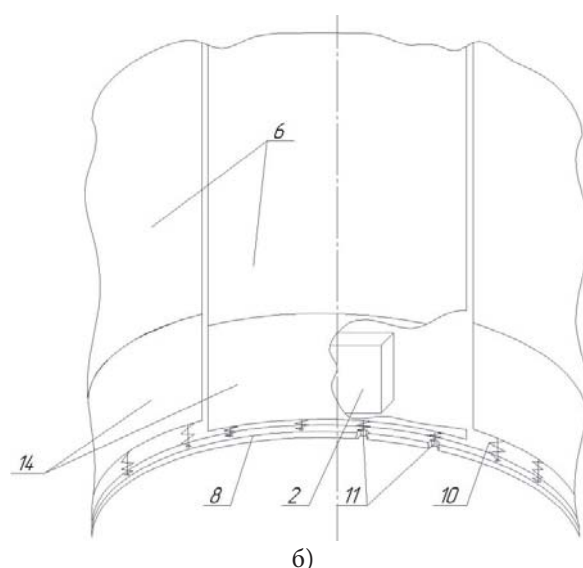


Рис. 4 – Общий вид:

а) индукторов ЛАД; б) рабочего органа с нижним уровнем решёт: 1 – индукторы ЛАД; 2 – вторичный элемент; 3 – ролики; 4 – упругие элементы; 5 – решето

$$Q = \pi \cdot \left[\left(R_1^2 - R_0^2 \right) \cdot \left[\frac{\rho g}{8} \cdot (R_1^2 - R_0^2) - \frac{\rho g}{\mu_1} \cdot R_0^2 + \frac{\frac{\rho g}{\mu_2} \cdot R^2 - \frac{\rho g}{2R} \cdot (R_1^2 - R_0^2) + \frac{\mu_2}{4} \cdot \left(\frac{R_1^2 - R_0^2}{2} - R_0^2 \cdot h \cdot \frac{R_1}{R} \right)}{\frac{\mu_2}{2}} \right] + \frac{\rho g}{2} \cdot R_0^2 \cdot \left(R_1 \cdot h \cdot \frac{R_1}{R} - R_0^2 \cdot h \cdot \frac{R_0}{R} \right) + (R_1^2 - R^2) \cdot \left[\frac{\rho g}{8} \cdot (R^2 - R_0^2) + \frac{\rho g}{4} \cdot R^2 - \frac{\rho g}{2R} \cdot (R^2 - R_0^2) - \frac{\rho g}{2} \cdot R_0^2 \right] - \frac{\rho g}{2} \cdot R_0^2 \cdot R_1^2 \cdot h \cdot \frac{R_1}{R} \right] \quad (1)$$

где R – радиус решета [м];
 $R_0 = R - h$ – радиус свободной поверхности слоя, м;
 ρ – плотность слоя зерновой смеси, кг/м³;
 h – толщина слоя зерновой смеси, м;
 μ_1, μ_2 – коэффициенты динамической вязкости подслоев зерновой смеси;
 h_1, h_2 – толщина подслоя зерновой смеси, граничащего со свободной поверхностью, и толщина подслоя, граничащего с поверхностью решета соответственно, м;
 g – ускорение свободного падения, м/с².

Как видно по формуле 1, производительность Q ВЦС по зерну в большей степени зависит от коэффициента динамической вязкости μ зерновой смеси. Для определения данного коэффициента нами была предложена формула (2), учитывающая влияние коэффициента жёсткости упругих элементов на коэффициент динамической вязкости зерновой смеси, а следовательно, на производительность ВЦС:

$$\mu = \frac{4 \cdot f \cdot p \cdot r_c^2}{\omega_{\text{кол}} \cdot \left(\left(-\frac{kp}{M \cdot a} \right)^2 - \left(\frac{3}{\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{r_c}{\omega_{\text{кол}} \cdot r_c \cdot \rho} \right)^2 \cdot f_c^2 \right)^{1/2}}, \quad (2)$$

где $p = h \cdot \rho \cdot R \cdot \omega^2$ – давление, связанное с действием центробежной силы у поверхности решета, Па;
 ρ – плотность слоя зерновой смеси, кг/м³;
 k – жёсткость упругих элементов, Н/м;
 M – масса колебательной системы, кг;
 a – ускорение рабочего органа, м/с²;
 $\omega_{\text{кол}}, \omega$ – частота колебаний, Гц и угловая скорость, рад/с вращения рабочего органа соответственно;
 r_c – радиус одной зерновой частицы, м;
 f_c – коэффициент сухого трения между зерновыми частицами.

Результаты исследования. К основным проблемам зерноочистительных машин, в том числе и ВЦС, сегодня относят недостаточную пропускную способность, что приводит к снижению качества процессов сепарирования и потерям зерна.

Одним из способов повышения эффективности процесса сепарирования является интенсификация этапа просеивания путём повышения интенсивности разрыхления зерновой смеси, которая до-

стигается увеличением скорости её движения по решету. Этого можно достичь путём увеличения амплитуды и уменьшения частоты колебаний рабочего органа (рис. 5).

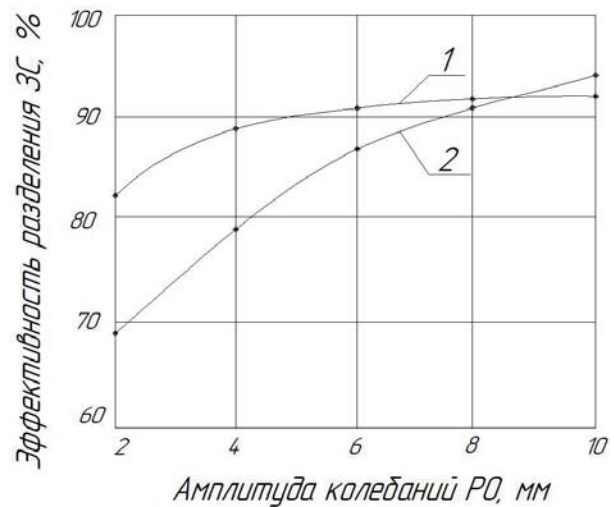


Рис. 5 – Зависимость эффективности разделения зерновой смеси от амплитуды и частоты колебаний рабочего органа:
 1 – при $\omega_{\text{кол}} = 7$ Гц; 2 – при $\omega_{\text{кол}} = 3$ Гц.

Как видно по рисунку 5, увеличение амплитуды колебаний рабочего органа ВЦС позволит повысить эффективность процесса сепарирования. Это достигается увеличением пробега зерновых частиц по решету, а следовательно, повышением вероятности их западания в отверстия решета.

Вывод. Рассмотрены пути совершенствования конструкции вибрационного привода виброцентробежных зерновых сепараторов применением в вибрационном приводе ВЦС плоского ЛАД. Данное решение даёт широкие возможности регулирования параметров колебаний рабочего органа, повышения энергетической и технологической эффективностей, открывает дальнейшие перспективы совершенствования зерновых сепараторов.

Литература

- Аипов Р.С., Линенко А.В. Линейные электрические машины и линейные асинхронные электроприводы технологических машин: учебное пособие. М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, Башк. гос. аграр. ун-т. Уфа : Башкирский ГАУ, 2013. 306 с.
- Гольдин А.С. Вибрация роторных машин: учеб. М.: Машиностроение, 1999. 344 с.
- Гончаров Е.С. О подобии кинематических режимов работы плоских и вертикальных цилиндрических виброцентробежных решёт // Труды ВНИИЗ. 1973. Вып. 78. С. 47–54.
- Линенко А.В., Халилов Б.Р., Камалов Т.И. Энергоэффективный вибрационный привод виброцентробежного зернового сепаратора с линейным электродвигателем // Достижения науки и инновации для аграрного производства: матер. национал. науч. конф. Уфа. 2016. С. 217–220.
- Несиков А.А. Исследование процесса очистки семян зерновых культур от длинных примесей в виброцентробежном сепараторе: дисс. канд. техн. наук. Челябинск, 1982. 207 с.
- Патент 2624702, Российская Федерация, Вибрационная центрифуга / А.В. Линенко, Ю.А. Линенко, Б.Р. Халилов, М.Ф. Туктаров; заяв. и патентооблад. Башкирский гос-ий аграрный ун-т; 09.03.2016 г. 4 с.: ил.
- Моделирование процессов зерновых сепараторов: монография / Л.Н. Тищенко, Д.И. Мазоренко, М.В. Пивень [и др.] // Харьков: ХНТУСХ, «Миськдрук», 2010. 360 с.