

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. В. Линенко

ЛИНЕЙНЫЕ
АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ
СЛОЖНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН АПК

Учебное пособие

Уфа
Башкирский ГАУ
2015

УДК 621.313(07)
ББК 31.261(я7)
Л59

Одобрено и рекомендовано к изданию
редакционно-издательским советом ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

Рецензенты:

зав. кафедрой электрических машин и эксплуатации
электрооборудования в сельском хозяйстве ФГБОУ ВО ЧГАА,
д-р техн. наук, профессор **В. А. Буторин**,

д-р техн. наук, профессор кафедры «Машины, аппараты,
приборы и технологии сервиса» ФГБОУ ВО УГУЭС **Р. Б. Яруллин**

Линенко А. В.

Л59 **Линейные асинхронные электроприводы сложного колебательного движения для технологических машин АПК** : учебное пособие / А. В. Линенко. – Уфа : Башкирский ГАУ, 2015. – 184 с.

ISBN 978-5-7456-0450-8

В учебном пособии рассматриваются вопросы применения линейных асинхронных электроприводов для сложного колебательного движения рабочих органов технологических машин с целью повышения их технико-экономических показателей. Показаны принципы построения линейных асинхронных электроприводов сложного колебательного движения (ЛАЭСКД). Приводится методика расчета усилий, развиваемых линейными асинхронными двигателями, а также математический аппарат для расчета ЛАЭСКД рабочих органов технологических машин АПК. Уделено внимание теоретическому и экспериментальному исследованию ЛАЭСКД рабочих органов зерноочистительных, шелушильных, сортировальных машин и инерционных конвейеров.

Предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», бакалавров и магистров по направлению Агроинженерия профиль «Электрооборудование и электро-технологии», и может быть полезна аспирантам и инженерно-техническим работникам, специализирующимся в области электрооборудования предприятий агропромышленного комплекса.

УДК 621.313(07)
ББК 31.261(я7)

ISBN 978-5-7456-0450-8

© ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 2015
© Линенко А. В., 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
Глава 1 Перспективы применения линейных асинхронных электроприводов для сложного колебательного движения рабочих органов технологических машин АПК	8
1.1 Состояние технологии и технических средств в АПК для послеуборочной переработки продукции растениеводства	8
1.1.1 Очистка зернового материала	8
1.1.2 Шелушение зерна с хрупким ядром	19
1.1.3 Инерционное транспортирование влажного сахара	28
1.2 Обоснование применения в технологическом оборудовании линейного асинхронного электропривода сложного колебательного движения (ЛАЭСЖД)	35
1.2.1 Общие сведения о ЛАД в приводе колебательного движения.....	36
1.2.2 Принципы построения ЛАЭСЖД.....	41
1.3 Выводы по главе	46
Глава 2 Математический аппарат для расчета ЛАЭСЖД рабочих органов технологических машин АПК	47
2.1 Теоретическое описание ЛАЭСЖД.....	47
2.1.1 Расчет развиваемых усилий ЛАД	47
2.1.2 Накопители механической энергии	54
2.2 Математические модели ЛАЭСЖД технологического оборудования АПК	55
2.2.1 Математическая модель ЛАЭСЖД решетного стана зерноочистительной установки	56
2.2.2 Математическая модель колебательно-вращательного электропривода вальцедековой машины.....	64
2.2.3 Математическая модель инерционного конвейера со звеном предварительного разгона ЛАЭСЖД.....	68
2.3 Выводы по главе	80
Глава 3 Исследования ЛАЭСЖД технологических машин математическим моделированием.....	81
3.1 Анализ сил, развиваемых ЛАД для получения сложных колебаний.....	81
3.2 Исследование ЛАЭСЖД решетного стана зерноочистительной машины.....	83
3.2.1 Математическая модель электропривода решетного стана в среде объектно-визуального моделирования Matlab (Simulink).....	84
3.2.2 Исследование характеристик ЛАД в приводе зерноочистительной машины.....	86

3.2.3	Влияние координат включения и выключения индуктора ЛАД, коэффициента жесткости упругих элементов на параметры колебательного процесса	89
3.2.4	Влияние параметров зернового материала на траекторию движения решетного стана	91
3.2.5	Ускорение и средняя скорость решетного стана в зависимости от коэффициента жесткости упругих элементов и полюсного деления ЛАД.....	92
3.2.6	Энергетические показатели электропривода решетного стана.....	94
3.3	Исследование КВЭП вальцедековой шелушильной машины	96
3.3.1	Математическая модель КВЭП вальцедековой шелушильной машины в среде объектно-визуального моделирования Matlab (Simulink)	96
3.3.2	Анализ пуска ЛАД КВЭП вальцедековой машины, работающей в режиме вынужденных колебаний.....	100
3.3.3	Анализ влияния параметров КВЭП и конструктивно-технологических параметров вальцедековой шелушильной машины на скоростной режим деки машины	101
3.3.4	Амплитудно-частотные характеристики КВЭП вальцедековой машины	104
3.4	Исследование ЛАЭСКД инерционного конвейера со звеном предварительного разгона	106
3.4.1	Вид математической модели ЛАЭСКД инерционного конвейера со звеном предварительного разгона в среде Matlab (Simulink)	107
3.4.2	Параметры ЛАД для инерционного конвейера	108
3.4.3	Влияние на эффективность работы инерционного конвейера длины участка разгона ЛАЭСКД.....	109
3.4.4	Влияние напряжения ЛАД и конструктивных параметров ЛАЭСКД на энергоемкость разгона инерционного конвейера	110
3.5	Выводы по главе	113
Глава 4	Разработка и экспериментальные исследования конструкций ЛАЭСКД рабочих органов технологических машин	115
4.1	Конструкции технологических машин для послеуборочной переработки продукции растениеводства с ЛАЭСКД.....	115
4.1.1	Зерноочистительная установка с продольно-поперечными колебаниями решетного стана	115
4.1.2	Вальцедековая машина с КВЭП.....	119
4.1.3	Инерционный конвейер со звеном предварительного разгона ЛАЭСКД	122
4.2	Блок управления ЛАЭСКД	129

4.3	Контрольно-измерительные приборы, оборудование и датчики.....	133
4.4	Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований	144
4.5	Выводы по главе	147
Глава 5	Результаты производственных испытаний технологических машин с ЛАЭСЖД.....	148
5.1	Определение технологических характеристик машин	148
5.2	Рекомендации по установке ЛАЭСЖД на зерноочистительные машины	151
5.3	Методика проектирования инерционного конвейера со звеном предварительного разгона ЛАЭСЖД	152
5.4	Результаты производственных испытаний	154
5.4.1	Оценка эффективности выделения сорных примесей и травмированности зернового материала.....	155
5.4.2	Определение эффективности шелушения зерна вальцедековой машиной с КВЭП.....	157
5.4.3	Определение эффективности работы инерционного конвейера	160
5.5	Выводы по главе	161
	Заключение.....	162
	Список литературы.....	163
	Приложение	181

ВВЕДЕНИЕ

Производство высококачественной продукции остается ключевой проблемой развития агропромышленного комплекса. Качество и количество получаемой продукции напрямую зависят от применяемых технологий и технических средств. Повышение эффективности одной взятой технологической машины может положительно сказываться на дальнейших технологических операциях хранения и переработки сельскохозяйственной продукции. Так, например, путем снижения на очистительных машинах засоренности зерна на 1 % можно повысить на 2 % массовую емкость зернохранилищ, снизить расходы на сушку зерна. Отбор примерно 10 % мелкой фракции зерна перед переработкой позволяет использовать его в комбикормах, одновременно увеличивая выход высоких сортов муки на 15–20 % [73, 74]. С другой стороны, нечеткость разделения на очистительных и сортировальных машинах приводит к нарушению оптимальных режимов работы всех последующих машин, повышению энергоемкости процесса и снижению качества конечной продукции.

В сельскохозяйственном производстве от 40 до 50 % электрических двигателей вращения используется для получения колебательного движения, при этом необходимы преобразователи вида движения, которые усложняют привод. Поэтому создание высокоэффективных приводов рабочих органов непосредственно от ротора электродвигателя, реализующих колебательное движение, является приоритетным направлением развития сельскохозяйственной техники. Это позволяет существенно упростить конструкцию и снизить массоемкость машин, а главное – открывает перспективу оптимального управления технологическим оборудованием, а в дальнейшем и всей технологической линией [73].

В этом направлении успешно находят применение линейные асинхронные двигатели (ЛАД), которые непосредственно электрическую энергию преобразуют в поступательное движение рабочего органа. Оснащение ЛАД упругими элементами позволяет реализовать энергетически эффективный электропривод колебательного движения, причем разгон рабочего органа в одну сторону осуществляется под действием электромагнитного поля ЛАД, а в обратном направлении за счет запасенной энергии в упругом элементе. ЛАД в приводе колебательного движения рабочих органов нашли применение в: инерционных конвейерах для транспортировки сыпучих материалов; бункерах-питателях, обеспечивающих бесперебойный и регулируемый выпуск сыпучего материала; сортировальных и других установках. В указанных установках замена традиционного привода от двигателя вращения на линейный асинхронный электропривод (ЛЭП) позволило повысить энергетические и эксплуатационные характеристики этих установок [4, 6, 18].

Однако сказанное не исчерпывает всех возможностей ЛАД в приводе технологических машин. Благодаря своим конструктивным особенностям ЛАД позволяют обеспечить колебательное движение рабочего органа и сложной формы: возвратно-поступательно-вращательное; возвратно-поступательное с поперечной составляющей колебаний; возвратно-поступательное с вертикальной составляющей колебаний; возвратно-поступательное с поперечной и вер-

тикальной составляющими колебаний, эллипсоидное [3, 17, 142, 147, 150, 152, 153, 154].

Реализация сложного колебательного движения рабочих органов для технологических машин линейным электроприводом с возможностью глубокого регулирования параметров колебаний позволит повысить технико-экономические показатели существующего оборудования, такого, как очистительные, сортировальные и шелушильные машины, инерционные конвейеры, а также позволит по-новому взглянуть на выполнение ряда технологических операций с разработкой новых технологических машин.

Возможно получение сложных колебаний и традиционным электроприводом путем применения дополнительных механических преобразователей и узлов. При этом наличие жестких кинематических связей в приводе ограничивает регулирование параметров колебаний, а десятки трущихся и изнашивающихся поверхностей снижают КПД и надежность машины, возрастает металлоемкость и стоимость оборудования. Поэтому сложные колебания рабочих органов с возможностью регулирования параметров колебаний как по частоте, так и по амплитуде, в настоящее время не применяются.

Реализация электропривода рабочих органов линейными двигателями, в которых вторичный элемент может являться самим рабочим органом, совершающим сложное и регулируемое в широком диапазоне колебательное движение (амплитуда колебаний до 0,7 м; частота до 5 Гц), открывает новую область для совершенствования технологического оборудования различного назначения, особенно в послеуборочной обработке зерна.

Применением в приводе машин различного целевого назначения линейных электрических двигателей занимались известные ученые, среди которых необходимо отметить: Вольдека А.И., Тийсмуса Х.А. (индукционные насосы) [61,62,230]; Веселовского О.Н., Луковникова В.И., Петленко Б.И., Сарапулова Ф.Н., Коняева А.Ю., Сапсалева А.В., Мамедова Ф.А., Денисова В.Н., Свечарника Д.В., Соколова М.М., Аипова Р.С. (производственно-технологическое оборудование) [4, 6, 53, 54, 90, 125, 127, 158, 159, 186, 191, 193, 213, 217, 221]; Винокурова А.И., Елифанова А.П., Лейтуейта Е.Р., Насар С.А., Болдеа И., Скобелева В.Е., Ямамура С. (высокоскоростной транспорт) [103, 104, 167, 248, 262, 263, 267, 268, 269] и др.

Целью настоящего учебного пособия является изложение основных принципов построения и методик инженерного расчета линейных асинхронных электроприводов сложного колебательного движения (ЛАЭСЖД), оценка целесообразности их применения в приводе технологических машин.

Автор выражает благодарность за совместную работу д.т.н., профессору Р.С. Аипову, к.т.н. Я.Д. Осипову, к.т.н. М.Ф. Туктарову, к.т.н. С.В. Акчурину.

Учебное пособие предназначено для самостоятельной работы студентов очной и заочной форм обучения специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» и бакалавров по направлению 35.03.06 «Агроинженерия» (профиль Электрооборудование и электротехнологии) при изучении дисциплин «Электрические машины», «Электропривод», может быть полезна аспирантам и инженерно-техническим работникам, специализирующимся в области электрооборудования предприятий агропромышленного комплекса.

ГЛАВА 1

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ СЛОЖНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН АПК

1.1 Состояние технологии и технических средств в АПК для послеуборочной переработки продукции растениеводства

Все оборудование зерноперерабатывающих производств, в том числе вибрационное, должно удовлетворять требованиям, вытекающим из особых условий эксплуатации: герметичность и полная взрывобезопасность вследствие взрывоопасности среды с органической пылью; повышенная надежность и долговечность вследствие круглосуточной безостановочной работы; простота управления и наладки вследствие низкой квалификации обслуживающего персонала.

В этом разделе рассмотрено современное состояние вопроса послеуборочной переработки и транспортировки продукции растениеводства, в технологическом оборудовании которого имеется потенциал совершенствования.

1.1.1 Очистка зернового материала

За последнее десятилетие эта отрасль в РФ значительно снизила свои показатели: почти в 2 раза сократились валовые сборы зерна, многократно уменьшилась обеспеченность хозяйств комплектными средствами механизации обработки зерна и семян, резко ухудшилось качество обработки зернового материала, возросли его потери на этапе послеуборочной обработки и хранения (до 10...20 % от валового сбора) [236].

Зерновой ворох, поступающий на послеуборочную обработку, представляет собой смесь полноценного, щуплого и поврежденного зерна основной культуры, семян различных культурных и сорных растений, а также примесей частиц растений, соломы, колосьев, половы, песка, комочков земли и других органических и минеральных примесей. В задачу очистки входит удаление из основной культуры всех примесей, в том числе щуплого и битого зерна. При этом содержание семян основной культуры в ворохе может составлять менее 85 %, органических примесей 40...70 %, влажность зерна озимых культур может достигать 25...30 %, яровых культур – 30...35 % [169, 228].

Очистка зерна сельскохозяйственных культур основана на использовании различий в каких-либо свойствах или признаках (физико-механических, биологических, электрических и др.) компонентов (фракций) зерновых смесей. К таким свойствам, которые называют технологическими, относятся: аэродинамические, основные геометрические размеры (длина, ширина и толщина), состояние и форма поверхности, плотность, цвет и др. [169].

Сыпучесть зернового материала характеризуется способностью зерен перемещаться одно относительно другого при его движении. Параметром сыпу-

чести является угол естественного откоса, т. е. угол, который имеет место между образующей конуса и его основанием при свободном истечении зерна из какой-либо емкости на поверхность.

Вышеперечисленные свойства зернового компонента необходимо учитывать при исследованиях и конструировании зерноочистительных машин.

По назначению различают машины для предварительной, первичной и вторичной очистки зерна, а также специальные машины для очистки зерна от трудноотделимых примесей. Применяются и универсальные зерноочистительные машины для выполнения нескольких технологических операций – предварительно-первичной, первично-вторичной, предварительно-первично-вторичной очистки. Доля универсальных зерноочистительных машин из года в год увеличивается. Это позволяет уменьшить номенклатуру зерноочистительных машин [93, 228].

В настоящее время промышленностью выпускаются следующие машины для очистки зерна, которые представлены на рисунке 1.1 [236].

По способу разделения компонентов зернового вороха машины подразделяют на:

- пневмосепараторы, очищающие зерновой ворох по аэродинамическим свойствам;
- воздушно-решетные, выделяющие примеси, отличающиеся от основной культуры аэродинамическими свойствами, толщиной и шириной;
- триеры, выделяющие длинные и короткие примеси;
- горки, разделяющие компоненты по форме и состоянию поверхности (коэффициенту трения);
- магнитные, использующие свойства поверхности семян удерживать металлический порошок.

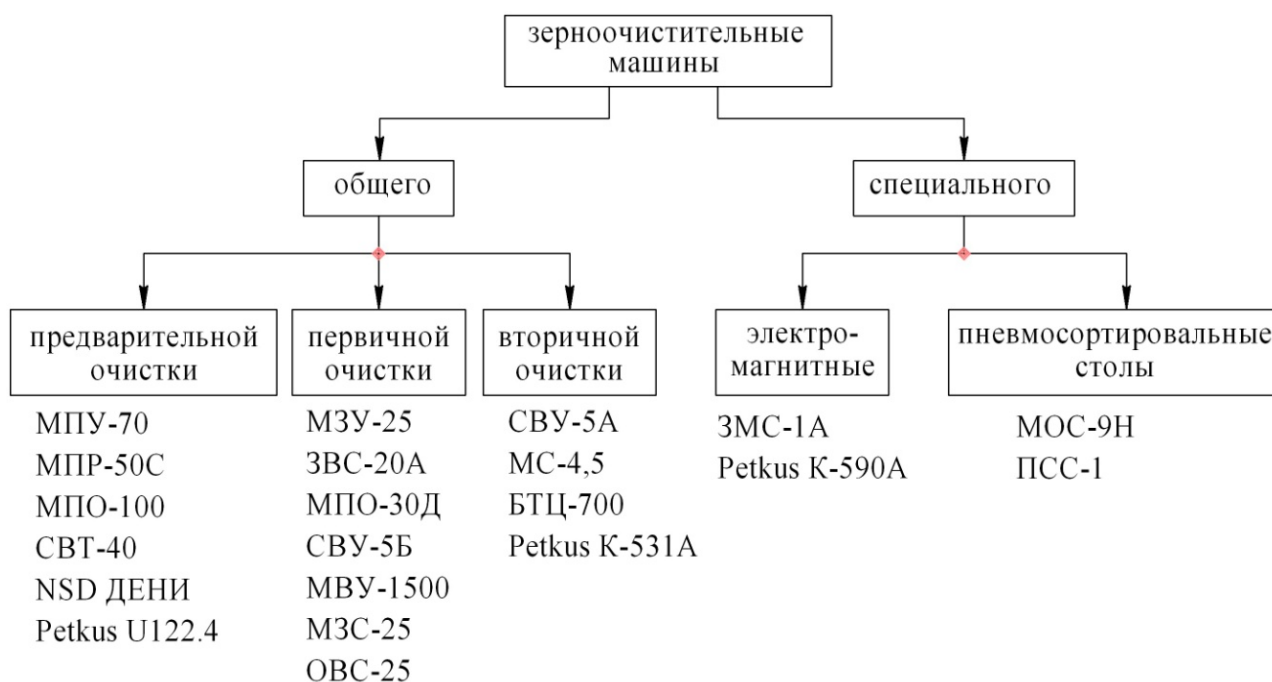


Рисунок 1.1

Классификация зерноочистительных машин по назначению

Производительность зерноочистительных машин зависит от состава и влажности исходного вороха. В качестве исходного материала для определения номинальной производительности используют пшеницу. При предварительной и первичной очистке пшеницы допускается содержание примесей до 10 % (в том числе сорных до 3 %) при влажности менее 20 % (сорных менее 16 %), а при вторичной очистке – сорных примесей до 3 % при влажности до 16 % [228].

Машины предварительной очистки должны подготавливать зерновой материал к обработке в шахтных сушилках или к временному хранению при активном вентилировании. При первичной очистке зернового вороха полнота разделения должна быть не менее 60 %, а суммарные потери свободного полноценного зерна – не более 1,5 %.

При анализе конструкций и работы решетных машин для первичной очистки зернового материала выявлены недостатки – большая металлоемкость, сложность регулирования технологического процесса, зависящая от подбора необходимых решет. Также решетные машины имеют небольшую производительность в отличие от пневматических систем, но при этом их преимуществом является возможность калибрования по ширине и толщине зерна.

Машины для вторичной очистки зерна должны доводить семена по чистоте до требований к посевным качествам семян, за исключением случаев засоренности исходного вороха примесями, для выделения которых требуются специальные машины. Полнота разделения должна быть не менее 80 %, суммарные потери полноценного зерна во все отходные фракции – не более 1 %, а зерна второго сорта – до 30 %. Общее дробление зерна допускается до 1 % [228].

При определении качества очистки используются следующие нормативные материалы:

- правила приемки и отбор проб;
- определение влажности – по ГОСТ 13586.5 [79];
- определение сорной и зерновой примесей, мелких зерен [78];
- определение запаха и цвета – по ГОСТ 10967 [77];
- определение природы – по ГОСТ 10840 [76].

Рассмотрим принцип работы и технические характеристики существующих решетных зерноочистительных машин для первичной очистки зернового вороха, сделаем анализ их достоинств и недостатков.

Процесс разделения зерновой смеси решетом, заключающийся в выделении мелких зерен путем просеивания их через отверстия решета, возможен только при наличии относительного движения зерна по поверхности решета. Это движение может быть достигнуто либо наклонным положением неподвижного решета, либо приведением решета в движение.

Движение решет осуществляется по-разному: известны цилиндрические и конические решета, вращающиеся вокруг горизонтальной или вертикальной оси, плоские решета с круговым поступательным движением в горизонтальной плоскости (рассева в мукомольной и крупяной промышленности) и плоские решета с поступательно-возвратным движением. Последние имеют наибольшее распространение в зерноочистительных машинах [121, 122].

Решета приводятся в колебательное движение эксцентриком, сидящем на валу, (который, в свою очередь, устанавливается на раме машины), или же инерционным колебателем. Последний посредством ременных и цепных передач присоединяется к приводному электродвигателю. Движение определяется движущим механизмом (эксцентриком), с которым решето связано шатуном. Такое решето можно рассматривать как ползун кривошипно-шатунного механизма.

В решетных зерноочистительных машинах сельскохозяйственного производства используются определенные схемы работы решетных полотен (рисунок 1.2) [135].

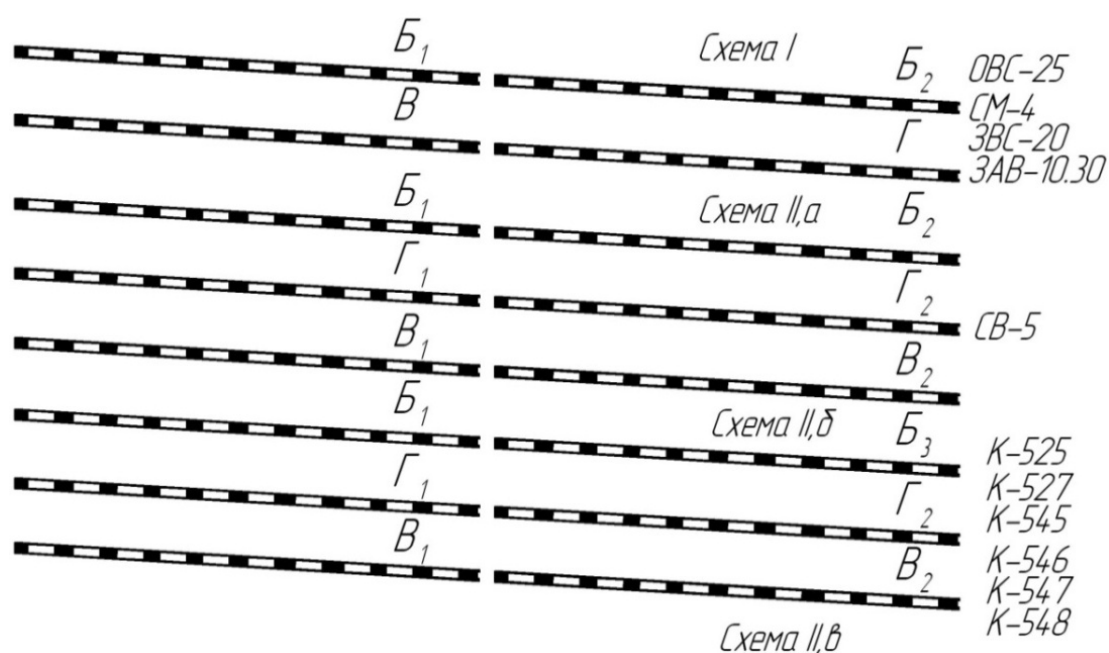


Рисунок 1.2

Технологические схемы расположения решет в решетных станах зерноочистительных машин

Наибольшее распространение получила универсальная четырехрешетная двухъярусная схема (схема I), которую используют как для очистки, так и для сортирования зерна в машинах ОВС-25, СМ-4, ЗАВ-10.30.000, ЗВС-20 и др.

Во всех указанных машинах применяется плоские решета с колебательным поступательно-возвратным движением. Для таких колебаний наиболее рациональными при сепарации зерновых смесей являются решета с продолговатыми отверстиями [229].

Для анализа существующих конструкций зерноочистительных машин, а также конструкций приводов решетных станков был произведен их анализ [183, 185, 186].

Рассмотрим конструкции существующих зерноочистительных машин, наиболее востребованных при очистке зерна в сельском хозяйстве РФ.

Машина первичной очистки зерна ЗВС-20А предназначена для работы в составе технологического оборудования зерноочистительных агрегатов, комплексов и специальных линий во всех сельскохозяйственных зонах (рисунок 1.3). Первичная очистка зернового материала осуществляется воздушным пото-

ком и решетками. Машина выделяет из зернового материала колосовых, крупяных, зернобобовых культур, кукурузы, подсолнечника и сорго, крупные, мелкие и легкие примеси [236]. Техническая характеристика ЗВС-20А представлена в таблице 1.1.

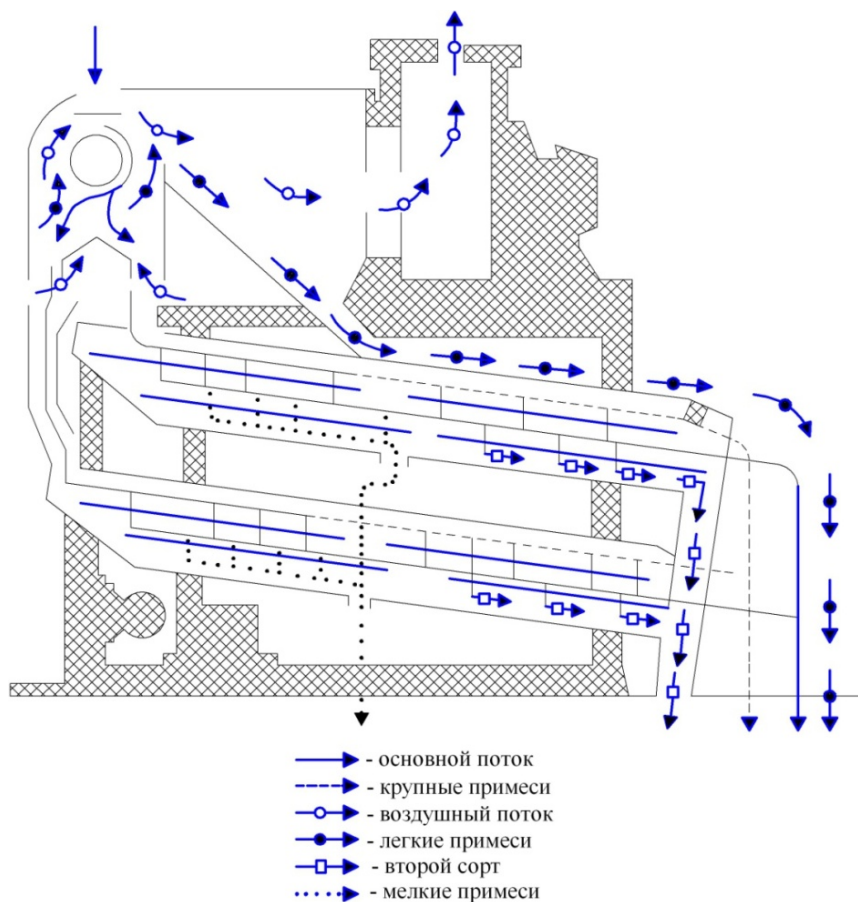


Рисунок 1.3
Технологическая схема работы ЗВС-20А

Таблиц 1.1 Техническая характеристика машины
для первичной очистки зерна ЗВС-20А

Наименование	Ед. изм.	Значение
Номинальная производительность за 1 час основного времени на пшенице с объемной массой 760 г/л, влажностью до 16 %, содержанием примесей до 10 %, в том числе сорных – до 3 %	т/ч	25
Масса, не более	кг	1805
Установленная мощность, не более	кВт	7,7
Габаритные размеры в рабочем положении, не более (длина, ширина, высота)	мм	3070×2030×2750

Очистка зернового материала осуществляется следующим образом: зерновой материал, подлежащий первичной очистке, поступает в приемную часть питающего устройства, откуда шнеком распределяется по ширине воздушной камеры, где из общей массы выбираются легкие примеси, которые поднимаются воздушным потоком и осаждаются в отстойной камере машины первичной очистки ЗВС-20А, и далее выводятся наружу. После воздушной очистки зерна

материал, распределенный на две равные части, поступает на верхний и нижний решетчатые станы, которые работают параллельно. В каждом решетчатом стане ЗВС-20А имеется две плоскости решет, на которых и происходит основная часть первичной очистки: на первой плоскости отделяются крупные примеси (те, что превышают размер ячейки решета), на второй решетчатой плоскости удаляются мелкие примеси и колотое зерно (примеси, которые проходят сквозь ячейки решета). Таким образом, мы получаем чистый продукт, который сходит с нижней решетчатой плоскости каждого стана [236].

Очиститель вороха ОВС-25С предназначен для предварительной и первичной очистки зернового вороха колосовых, крупяных, зернобобовых культур, кукурузы, сорго, подсолнечника, семян рапса от примесей (рисунок 1.4). Используется стационарно в специально подготовленных комплексах во всех сельскохозяйственных зонах страны [228, 236].

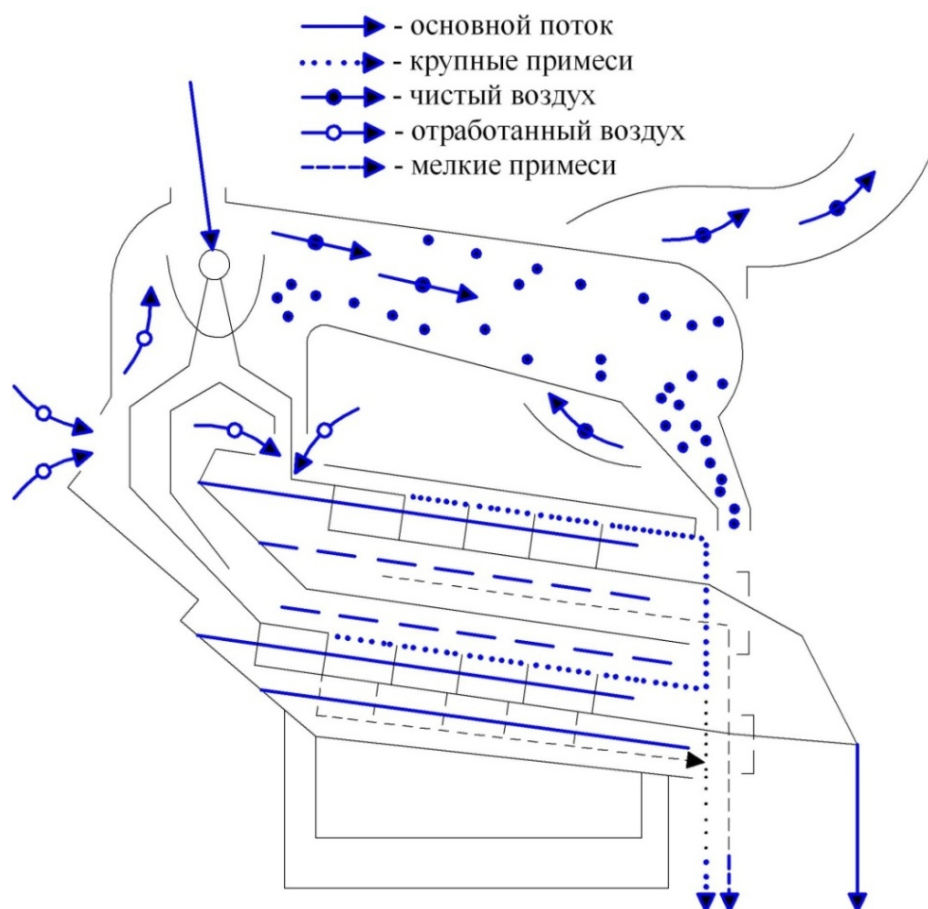


Рисунок 1.4
Технологическая схема работы ОВС-25С

Основные рабочие органы очистителя вороха стационарного ОВС-25С: приемная камера, воздушно-очистительная часть, решетчатые станы, шнек фуражных отходов – смонтированы на раме.

Зерновой материал подается норией в распределительный шнек питающего устройства машины. Питающее устройство распределяет зерно по ширине камеры. Распределитель делит материал на две равные части и направляет его в воздушные каналы. Воздушный поток через вентилятор уносит легкие примеси

в централизованную воздушную систему агрегата. Более крупные примеси из воздушного потока улавливает отстойная камера.

Зерновой материал, прошедший очистку воздухом и разделенный на две равные части, попадает на верхний и нижний станы. Процесс очистки на верхнем и нижнем станах совершенно одинаков. Чистое зерно попадает на задний приемник. Из приемника чистое зерно шнеком подается в нижнюю головку передаточного транспортера. Техническая характеристика ОВС-25С представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Техническая характеристика машины ОВС-25С

Наименование	Ед. изм.	Значение
Номинальная производительность за 1 час основного времени на пшенице с объемной массой 760 г/л и влажностью до 16 %	т/ч	12
Масса, не более	кг	1090
Установленная мощность, не более	кВт	4
Габаритные размеры в рабочем положении, не более (длина, ширина, высота)	мм	3130×1790×2150

Машина первичной очистки зернового вороха Petkus K-531A фирмы «Petkus Wutha» (Германия). Petkus K-531A представляет собой высокопроизводительную машину для обработки семенного материала и предназначен для первичной очистки вороха зерновых, бобовых и масличных сельскохозяйственных культур с доведением их до продовольственной и семенной кондиции (рисунок 1.5) [169]. Техническая характеристика машины приведена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 Техническая характеристика машины для первичной очистки зерна Petkus K-531A

Наименование	Ед. изм.	Значение
Номинальная производительность на очистке зерна пшеницы чистотой 96 %, влажностью до 15 %	т/ч	2,5
Масса, не более	кг	1300
Установленная мощность, не более	кВт	4
Габаритные размеры в рабочем положении, не более (длина, ширина, высота)	мм	5060×2100×2210

Машина K-531A состоит из рамы, приемного бункера, воздушно-очистительной части, решетного стана, триеров и привода (рисунок 1.5). Приемный бункер 1 имеет рифленый питающий валик 2 и заслонку 3, регулирующую подачу материала на очистку. Воздушно-очистительная часть унифицирована с машиной K-218/1.

Решетный стан состоит из двух решет – верхнего 10 и нижнего 9, которые очищаются: верхнее – подбивальщиком 11, нижнее – щетками 8, которые приводятся в движение кривошипом 7. Колебания решетному стану и лотку триерных цилиндров передаются от эксцентрикового вала 6. На концах триерных цилиндров 4 установлено лопастное колесо 5 для выгрузки очищенного материала или коротких примесей.

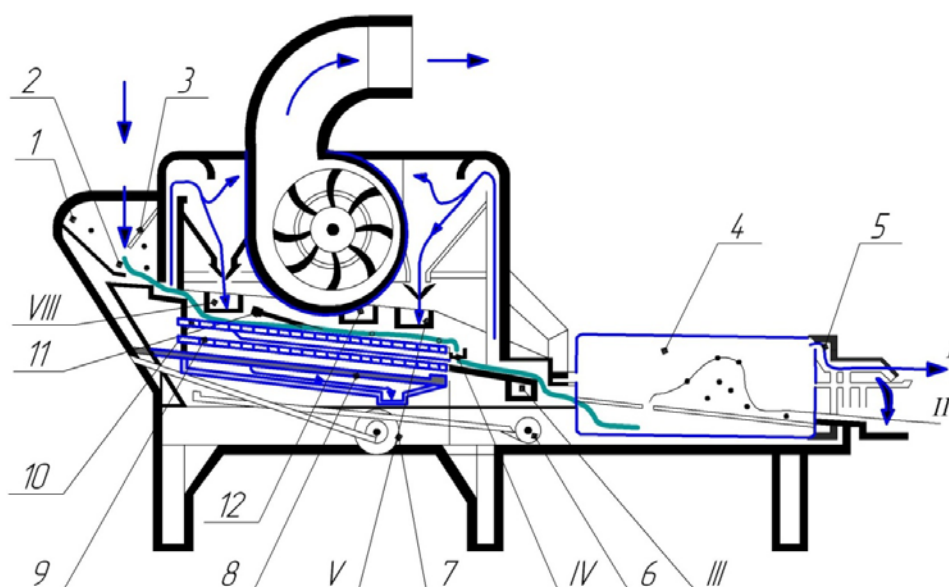


Рисунок 1.5

Технологическая схема работы Petkus K-531A: 1 – приёмный бункер; 2 – питающий валик; 3 – заслонка; 4 – триерный цилиндр; 5 – лопастное колесо; 6 – эксцентриковый вал; 7 – кривошип механизма очистки решет; 8 – щетка; 9 – нижнее решето; 10 – верхнее решето; 11 – подбивальщики; I–VIII – выходы

Наряду с высокопроизводительными решетными зерноочистительными установками выпускаются машины малой производительности, применяемые для качественной очистки зерна. Данные установки находят широкое применение в малых хозяйствах (крестьянско-фермерских), т. к. обладают высокой эффективностью работы и малой стоимостью, но при этом они имеют типичные для данного типа машин недостатки, анализ которых приведен ниже.

Для примера рассмотрим **семеочиститель универсальный МВР-2 (СУ-0,1)**, применяемый для очистки зерна зерновых, зернобобовых, овощных, масличных, технических культур, а также семян трав от легких примесей различного размера. Их разделение происходит на решетках при помощи двукратной обработки воздушным потоком (рисунок 1.6). Техническая характеристика приведена в таблице 1.4.

Очиститель семян включает следующие элементы: рамка с мешкодержателем, воздушная часть, осадочная камера, вентилятор, эксцентриковый вал с шатунами, решетный стан, вибропитатель, электропривод с частотным регулированием, пульт управления с отдельной установкой.

Технологический процесс построен следующим образом. Материал вибропитателем подается в загрузочный бункер, где плохо текущий разрыхляется, далее поступает в канал первой аспирации, где тяжелые фракции оседают, а основной материал воздушным потоком поднимается вверх, распределяется по ширине камеры и при огибании вертикальной стенки осажается над питающим валиком. Воздушный поток, изменив направление, по каналу первой аспирации уносит выделенные легкие примеси и пыль в осадочную камеру. Основной материал питающим валиком вбрасывается в канал второй аспирации, там выделяются легкие, щуплые и пустые семена, соломистые примеси, которые уносятся в осадочную камеру. Запыленный воздух направляется в циклон.

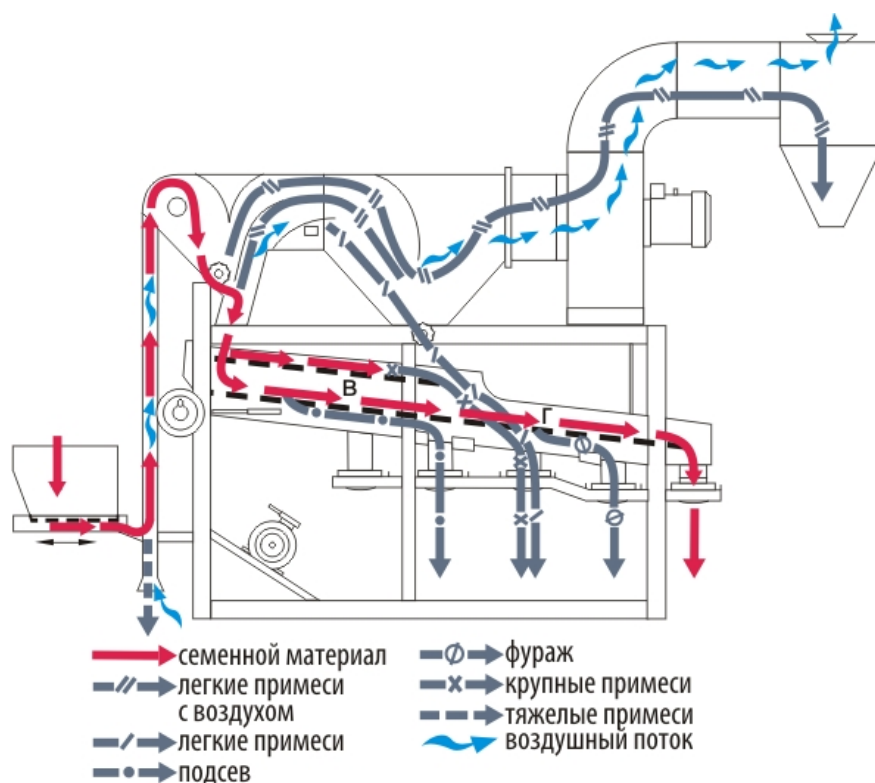


Рисунок 1.6

Технологическая схема работы семеочистителя МВР-2 (СУ-0,1)

Таблица 1.4 Техническая характеристика семяочистителя МВР-2 (СУ-0,1)

Наименование		Ед. изм.	Значение
Номинальная производительность на очистке:	– пшеница	т/ч	0,5
	– ячмень		0,4
	– клевер		0,1
	– люцерна		0,1
Масса, не более		кг	640
Установленная мощность, не более		кВт	3,22
Габаритные размеры в рабочем положении, не более (длина, ширина, высота):		мм	3054×1550×2075

Таким образом, анализ применяемых решетных зерноочистительных машин выявил следующие недостатки:

– наличие жестких (или же шарнирно закрепленных) кинематических связей в приводе решетного стана, обусловленных необходимостью применения преобразователей вращательного движения вала приводного электродвигателя в колебательное движение решет зерноочистительной установки;

– большое число передаточных механизмов, трущиеся и изнашивающиеся поверхности, значительно увеличивающие массу и габариты установки, удорожающие её конструкцию, а также снижающие её эффективность работы (в том числе, энергоэффективность);

– низкая ориентирующая способность зернового материала на решетных станах зерноочистительных машин с прямолинейными колебаниями. Решетные станы работают как транспортер и не способствуют благоприятному расположению частиц зерновой смеси относительно ячеек решет;

– значительные динамические нагрузки, которые вызывают вибрацию рам машин, искажают кинематические параметры, что, в конечном счете, нарушает технологический процесс и снижает надежность зерноочистительных машин.

В работах авторов Лапшина И.П., Евтягина В.Ф. [99, 135] для увеличения ориентирующей активности решет с продолговатыми отверстиями предлагается использовать продольно-поперечные колебания. Было отмечено положительное влияние наложенных колебаний решета на сепарацию зернового материала. Такие колебания увеличивают суммарную траекторию движения зерна по решетке. При этом происходит увеличение взаимодействия частиц с продольными кромками отверстий, в результате чего увеличивается ориентированность проходных частиц.

Основываясь на данных исследованиях ГСКБ «Зерноочистка», кроме традиционных моделей зерноочистительных машин с прямолинейными колебаниями, освоила серийный выпуск решетного очистителя (решетной приставки) РП-50 с круговым колебательным движением решетного стана (рисунок 1.7), предназначенного для предварительной очистки вороха зерновых, зернобобовых технических и масличных культур от мелкой сорной и зерновой примесей. РП-50 является рабочим элементом (приставкой) к стационарной зерноочистительной машине МПР-50, используемой на зерноочистительных агрегатах (ЗАВ, КЗС), элеваторах, хлебоприемных предприятиях во всех климатических зонах. Основными рабочими органами машины первичной очистки МПР-50 являются приемная камера, воздушно-очистительная часть и решетная часть РП-50. Круговые колебания решет происходят с амплитудой 10 мм и частотой колебаний 363 мин.^{-1} , угол наклона решетного стана – 7° [162]. Техническая характеристика приставки РП-50 представлена в таблице 1.5.

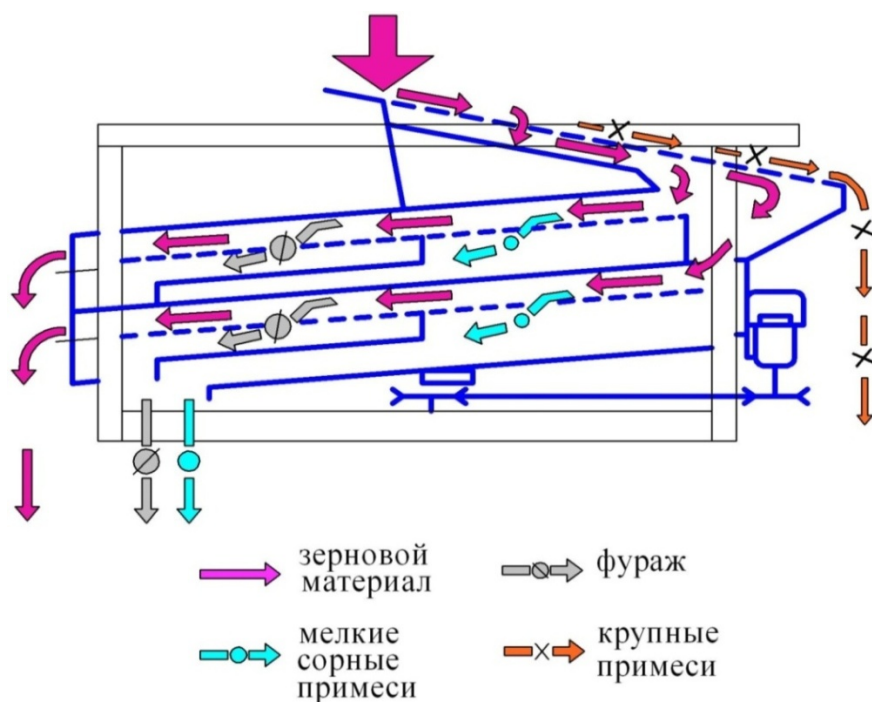


Рисунок 1.7

Технологическая схема работы решетной приставки РП-50

Решетная приставка РП-50 состоит из следующих рабочих элементов: рамы, двухъярусного решетного стана с шариковой очисткой на четырех канатных подвесках, привода дебаланса, сообщающего круговые движения стану, электропривода.

Процесс зерноочистки идентичен аналогичным зерноочистительным решетным машинам. Ворох семян поступает на два яруса решет, работающих параллельно, где выделяется сорная и зерновая примеси (проход), которые выводятся из стана. Основной материал и часть крупной примеси (сход) поступает в бункер для дальнейшей обработки. Шариковая очистка снижает энергоемкость и затраты на обслуживание.

Таблица 1.5 Техническая характеристика решетной приставки РП-50

Наименование	Ед. изм.	Значение
Номинальная производительность на очистке вороха зерна пшеницы при влажности 20%, прошедшего воздушную обработку	т/ч	50
Масса, не более	кг	810
Установленная мощность, не более	кВт	1,1
Габаритные размеры в рабочем положении, не более (длина, ширина, высота)	мм	2700×1850×1100

Определенный интерес среди производителей зерноочистительных машин представляют собой некоторые модели фирм Швейцарии, Японии, Франции и ряда других стран, выпускающих решетные машины классической модели – с прямолинейными колебаниями плоских решет. При этом в последних моделях зерноочистительных машин фирмы отказываются от этой схемы и выпускают машины новой оригинальной конструкции, в которых все большее распространение получают машины с круговыми колебаниями плоских решет [135, 238, 239].

К таким машинам относится установка МТМА-Граностар «Бюлер» фирмы (Швейцария), в которой круговые колебания решет происходят с амплитудой 25...30 мм и частотой колебаний 200...250 мин.⁻¹ По данным фирмы круговые колебания позволяют увеличить удельную нагрузку на 1 м² площади решет в 1,5...2,0 раза без ущерба для качества очистки [238].

В последних моделях зерноочистительных машин фирмы «Petkus» произведена замена прямолинейных колебаний решетных станов на круговые [135].

В зерноочистительной машине фирмы «Жирокласс» (Франция) плоские решета совершают круговые колебания с амплитудой 30...45 мм и частотой колебаний 125...160 мин.⁻¹ [135]. В зерноочистительной машине фирмы «Миаг» (Германия) решетный стан совершает вибрационное перемещение от вращающегося вала с дебалансами. Траектория движений точек решета приближается к эллипсу с большей осью 3...4 мм и малой осью 2...3 мм с частотой колебаний 800...1400 мин.⁻¹ Большой разброс частоты колебаний объясняется тем, что кинематические параметры работы решетного стана еще недостаточно изучены [135].

Анализ эффективности работы установок с круговыми колебаниями решетного стана показал, что они, в свою очередь, обладают следующими недостатками:

- сложность конструкции привода решетного стана;
- значительные динамические нагрузки, вызывающие вибрацию рам установки;
- невозможность создания чётко выраженных продольно-поперечных колебаний. Как было отмечено ранее, теоретически доказано, что для увеличения ориентирующей активности решет необходимо использовать продольно-поперечные колебания. В настоящее время данный вид движения трудно реализуем в известных приводах зерноочистительных машин, поэтому фирмы-производители используют вместо продольно-поперечных колебаний похожие по форме круговые (эллипсные) колебания.

1.1.2 Шелушение зерна с хрупким ядром

В технологическом процессе переработки крупяных культур с зерна удаляют цветочные пленки, плодовые и семенные оболочки. В зависимости от структурно-механических, физико-химических свойств и особенностей зерна, его биологических особенностей шелушение проводят в машинах различных конструкций.

Основная задача процесса шелушения – максимальное разрушение наружных покровов зерновки при воздействии на них рабочих органов машин. Напряжение, испытываемое зерновкой при разрушении наружных покровов, не должно превышать предела упругости находящегося в нем ядра, так как разрушение ядра приводит к ухудшению технологической эффективности работы машины и к потерям продукта. Удаление оставшихся после шелушения плодовых и частично семенных оболочек и зародыша производится на специальных шлифовальных и полировальных машинах. Конструкция, материал и форма рабочих органов машины определяют принцип ее действия при шелушении и шлифовании [241]:

1) Нагружение зерновок, в результате которого происходят деформации сжатия и сдвига, вызывающие скалывание и разрушение цветочных оболочек проса, риса, овса и плодовых оболочек гречихи путем воздействия на зерновку двух рабочих поверхностей: подвижной и неподвижной. Сюда относят вальцедековые станки, шелушительные поставы и т. д.;

2) Нарушение связи ядра с оболочкой путем скалывания, способствующего разрушению наружных покровов проса, риса, гречихи в результате воздействия вращающихся навстречу друг другу с различными скоростями валков, которые имеют эластичные рабочие поверхности (шелушители типа ЗРД с обрешеченными валками);

3) Нарушение связи ядра с оболочкой путем трения, вызывающего истирание (соскабливание) оболочек в результате многократного интенсивного воздействия абразивной и перфорированной поверхностей рабочих органов машин, а также взаимного трения частиц. К таким машинам относят шлифовальные и полировальные поставы. На этих машинах перерабатывают пшеницу, ячмень, семена гороха.

Технологический процесс на крупяных заводах предусматривает шелушение проса двухкратным пропуском через двухдековые станки, 2ДШС-3А.

При производстве крупы из гречихи зерно, рассортированное на шесть фракций, шелушат в станках 2ДШС-3Б. При производстве крупы из овса в поставках раздельно шелушат две фракции: сход с сита с отверстиями размером $2,3 \times 20$ мм и сход с сита с отверстиями $1,8 \times 20$ мм. Для этого можно применять обоечные машины. При шлифовании крупы используют шлифовальные поставы.

Зерно риса шелушат в двухвалковых шелушителях типа ЗРД с обрезиненными валками, применяют также шелушительные поставы, но предварительно делят рис на две фракции по крупности.

При шлифовании риса используют шлифовальные поставы, в которых четырехкратно последовательно обрабатывают совместно целый и дробленый рис с последующим выделением дробленого риса и дополнительным шлифованием. Стекловидные сорта риса подвергают двукратному полированию в поставках.

Для шелушения ячменя при производстве перловой крупы используют неоднократную последовательную обработку в наждачных обоечных машинах или шелушительно-шлифовальных машинах А1-ЗШН-3.

Для предварительного шелушения пшеницы при производстве пшеничной крупы применяют двухкратную обработку в обоечных машинах.

Основными показателями эффективности шелушения в крупяном производстве служат коэффициенты шелушения и целостности ядра, (кроме ячменя, кукурузы и пшеницы) [100]. Коэффициент шелушения определяется по формуле:

$$K_{III} = \frac{K_1 - K_2}{K_1} \cdot 100 = \left(1 - \frac{K_2}{K_1}\right) \cdot 100, \quad (1.1)$$

где K_1, K_2 – количество нешелушеного зерна в смеси до и после шелушения, %.

Коэффициент целостности ядра находится по формуле

$$K_{II} = \frac{B}{B + D + M}, \quad (1.2)$$

где B – выход целого ядра на данной системе шелушения за вычетом количества шелушенного зерна в исходной смеси, %;

D – выход дробленого ядра на данной системе шелушения за вычетом количества дробленого ядра в исходной смеси, %;

M – выход мучки на данной системе шелушения за вычетом количества мучки в исходной смеси, %.

Комплексный критерий эффективности шелушения определяется как произведение этих коэффициентов

$$E_{III} = K_{III} \cdot K_{II}. \quad (1.3)$$

Для эффективного шелушения диаметр резиновых валков должен быть не менее 170 мм. С учетом износа резины при шелушении следует принимать начальный диаметр валков 200...220 мм. Дальнейшее увеличение диаметра валков заметного прироста коэффициента шелушения не дает. Максимальную эффективность шелушения проса получают при рабочих зазорах $\delta = 0,25 \dots 0,4$ мм, а риса – при $\delta = 0,6 \dots 0,75$ мм.

В зависимости от характера и формы рабочих органов машин, а также принципа и способа их воздействия на частицу (зерновку, семя, плод, ядро) при шелушении, шлифовании и полировании машины классифицируются по следующим признакам [89]:

1) Многократный удар, вызывающий раскалывание наружных покровов зерновки овса, ячменя (обочные машины с деревянными или стальными вращающимися бичами и неподвижным деревянным, абразивным или стальным цилиндром и центробежный шелушитель) (рисунок 1.8,а);

2) Сжатие и трение, вызывающие скалывание и разрушение цветочных оболочек у проса, риса, овса, плодовых у гречихи в результате воздействия на зерновку двух рабочих поверхностей, из которых одна подвижная, а другая неподвижная – эластичная, либо абразивная (вальцедековые станки, шелушительные постава) (рисунок 1.8,б);

3) Сдвиг, способствующий разрушению наружных покровов проса, риса, гречихи, семян подсолнечника и хлопчатника, конопли, кунжута и др. в результате воздействия вращающихся навстречу друг другу с различными скоростями валков с эластичными либо жесткими рабочими поверхностями (шелушители с резиновыми либо металлическими валками или струи воздушного потока со сверхзвуковой скоростью (аэрошелушительная машина) (рисунок 1.8,в);

4) Трение, вызывающее истирание (соскабливание) оболочек в результате многократного интенсивного воздействия на зерновку пшеницы, ячменя, семян гороха, кунжута и т. д. абразивной и перфорированной поверхностями рабочих органов машин, а также трения частиц друг о друга (голландры непрерывного и периодического действия, шлифовальные и полировальные постава) (рисунок 1.8,г).

Для вальцедековых машин характерным является наличие вращающегося валка и деки, позволяющей формировать величину рабочего зазора и его форму (клиновидная, серповидная). В таких машинах используется основной способ шелушения – «сжатие и сдвиг».

Принцип работы вальцедековых шелушительных машин основан на взаимодействии зерна с вращающимся валком и отодвинутой на некоторое расстояние от валка жестко закрепленной декой [68]. Вращающийся валок захватывает зерно и увлекает его в рабочую зону, образованную валком и декой, где к зерну прикладываются усилия сжатия (при входе в рабочий зазор и при выходе из него). При вращении валка зерно, касаясь его поверхности оболочкой, получает сдвигающее воздействие, которое тем сильнее, чем активнее связь оболочки с неподвижной декой. Для этого рабочий зазор должен быть равен или несколько больше диаметра ядра, но меньше диаметра зерна. Невыполнение этого условия приводит к значительному измельчению ядра или появлению нешелушенных зерен (недоруша). Величина зазора устанавливается во время работы или перенастройки оборудования. Форма зазора определяется конструктивными особенностями деки и устанавливается в зависимости от вида зерна.

Заводами в основном выпускаются шелушительные станки, позволяющие устанавливать как абразивные деки, так и эластичные, что делает эти станки более универсальным. Один из вариантов крепления деки приведен на рисунке 1.9.

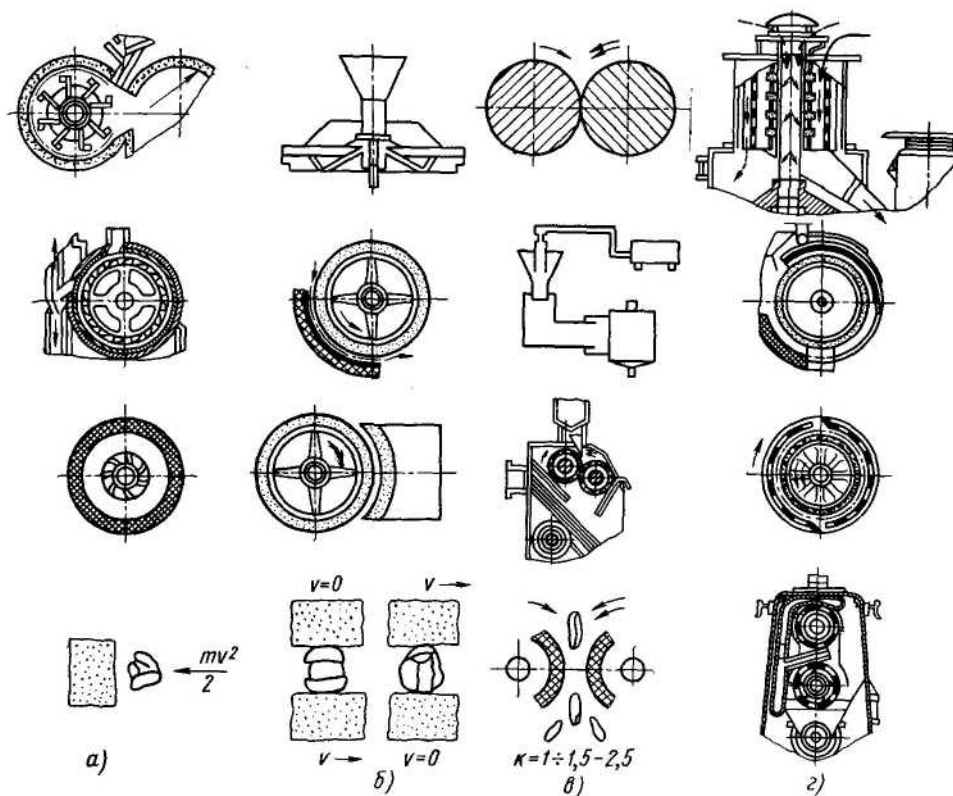


Рисунок 1.8

Классификация шелушительно-шлифовальных машин по принципу воздействия рабочих органов на зерновку (семя): а – многократный удар; б – сжатие и трение; в – сдвиг; г – трение

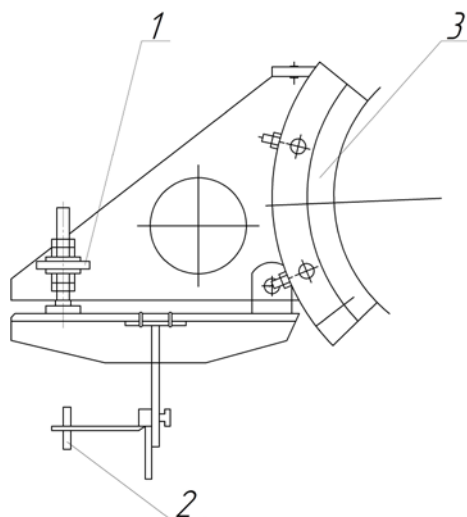


Рисунок 1.9

Вариант установки деки

Изменяя угол наклона деки 3 штурвалом 1 и перемещая ее по горизонтали штурвалом 2, можно легко сформировать как клиновидный, так и серповидный рабочий зазор.

Станок для шелушения гречки П-09 (рисунок 1.10), разработчик ОРТП «Агропромзагмонтаж», г. Ульяновск. В качестве рабочих органов использованы стандартные абразивные диски диаметром 250 мм, набранные вплотную на вал и прилегающие к абразивным дискам деки. Главный привод, кроме враще-

ния вала с дисками, приводит в движение рассев. Удаление мелких фракций мучки и оболочки осуществляется вентилятором. В комплект станка не входит оборудование для калибровки и очистки зерна от посторонних примесей. Технические характеристики станка П-09 представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 Техническая характеристика станка П-09

Показатели	Значения
Производительность, кг/ч	65
Потребляемая мощность, кВт	3,5
Габаритные размеры, мм	2190×1750×600
Масса, кг	80

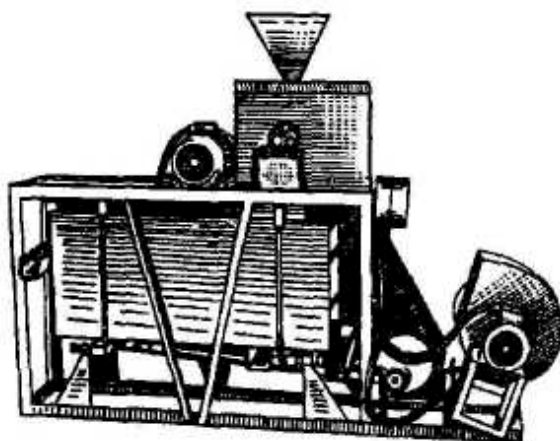


Рисунок 1.10
Станок для шелушения гречихи П-09

В состав агрегатного завода А1-АКЗ-0,5 (разработчик – НПО Агромаш) г. Нижний Новгород, входят однодековые шелушильные машины. Основными рабочими органами этих машин являются дека и барабан, состоящий из шести абразивных дисков (рисунок 1.11).

Станина 9 представляет собой сварной каркас, закрытый со всех сторон стальными листами. В верхней части станины с передней и задней стороны установлены съемные крышки, обеспечивающие доступ для осмотра рабочего барабана и деки.

Привод барабана осуществляется электродвигателем через клиноременную передачу. На крышке станины закреплен стеклянный приемный патрубок, под которым установлен наклонный лоток с клапаном. Под абразивным барабаном установлен сборник, к нижнему фланцу которого прикреплена аспирационная колонка.

Шелушильная машина работает следующим образом. Обрабатываемый продукт поступает самотеком через приемный патрубок на наклонный лоток, к нижней кромке которого под действием силы тяжести груза, установленного с возможностью перемещения на рычаге, поднимается клапан. Преодолевая сопротивление клапана зерно равномерным слоем высыпается в щелевой зазор между вращающимся барабаном и неподвижной декой, где осуществляется его шелушение. Затем продукты шелушения по сборнику поступают в аспирацион-

ную колонку, продуваются воздухом, в результате чего цветочные пленки и пыль уносятся воздушным потоком, а крупа и нешелушенные зерна направляются самотеком в рассев. Техническая характеристика завода А1-АКЗ-0,5 представлена в таблице 1.7.

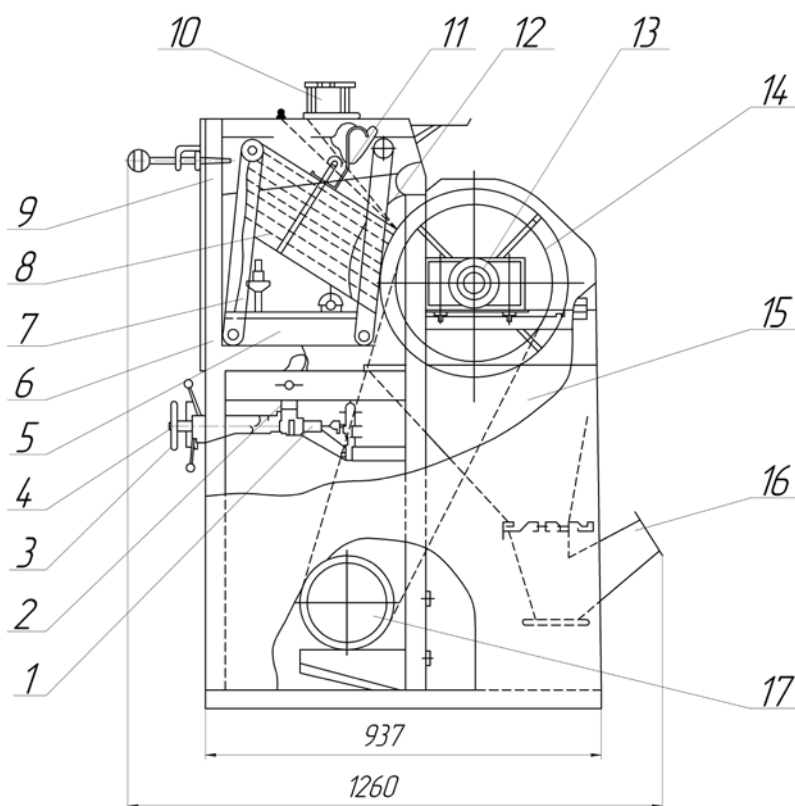


Рисунок 1.11

Однодековая шелушильная машина:

- 1 – винт, 2 – шарнирный рычаг, 3 – маховик, 4 – контргайка, 5 – каретка, 6 – ограничитель хода, 7 – подвеска, 8 – дека, 9 – станина, 10 – приемный патрубок, 11 – клапан, 12 – наклонный лоток, 13 – ось барабана, 14 – барабан, 15 – сборник, 16 – аспирационная колонка, 17 – электродвигатель

Таблица 1.7 Техническая характеристика завода А1-АКЗ-0,5

Показатели		Значения
Установленная мощность, кВт		3
Диаметр абразивного барабана, мм		450
Частота вращения барабана, об/мин		580
Габаритные размеры [мм], не более:	– длина	1280
	– ширина	660
	– высота	1560
Масса, кг		530

В процессе эксплуатации этих машин были отмечены следующие недостатки – достаточно сложная система замены дек и невозможность регулирования скорости вращения вальца в зависимости от вида и фракции обрабатываемого материала.

Разработчиками фирмы «СИМО», Украина, созданы вальцедековые станки СГР-400 и СГР-600 [237] (рисунок 1.12). Они состоят из корпуса с прием-

ным устройством и магнитной колонкой. Цилиндрический питающий валок вместе с регулируемой заслонкой обеспечивают необходимую равномерность загрузки станка. В центре корпуса станков размещены абразивный валок и дека, укрепленная с помощью шарнирно-рычажных механизмов, позволяющих регулировать угол наклона деки и величину зазора между подвижной декой и вращающимся валком. Станки оснащены аспирационным каналом для частичного отбора легких продуктов шелушения.

Станки СГР обладают максимальной эффективностью шелушения среди серийно производимых вальцедековых шелушительных машин – до 0,8 при шелушении гречихи. Техническая характеристика вальцедековых станков СГР представлена в таблице 1.8.

Таблица 1.8 Техническая характеристика вальцедековых станков СГР-400 и СГР-600

Тип станка		СГР-400	СГР-600
Производительность, т/ч		1,2...2,2	1,8...3,3
Установленная мощность, кВт		5,5	7,5
Длина валка, мм		400	600
Диаметр валка, мм		600	600
Частота вращения барабана, об/мин		400	400
Масса, кг		900	1200
Габаритные размеры [мм], не более:	– длина	1400	1400
	– ширина	680	880
	– высота	1360	1360

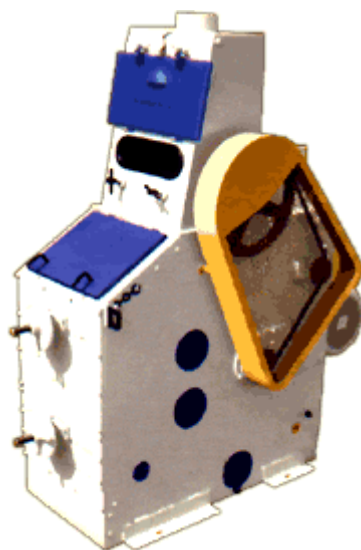


Рисунок 1.12
Вальцедековый станок СГР-400

Таким образом, анализ применяемых вальцедековых станков для шелушения зерна с хрупким ядром показал наличие следующих недостатков:

- эффективность шелушения не достигает 0,8, а зачастую значительно меньше;
- отсутствует или затруднена возможность регулирования частоты вращения вальца без остановки и разборки машины.

В существующем технологическом оборудовании (шелушильных машинах) для обработки зерна крупяных культур с хрупким ядром для обрушивания оболочки применяется деформация сжатия и сдвига в одном направлении (вращение вальца относительно неподвижной деки). Но в целях уменьшения выхода недорущенного зерна и, тем самым, повышения качества шелушения перспективно воздействие сил сжатия и сдвига в двух взаимно перпендикулярных направлениях [73, 237]. Этого можно добиться, придав вальцу, дополнительно к вращению, возможность перемещения вдоль своей оси.

Следующее устройство использует для шелушения круп с хрупким ядром принцип комбинации колебательного и вращательного движения вальца относительно неподвижной деки [237]. Устройство включает в себя деку и валец с приводом дополнительных к вращению перемещений, содержащим ролик, ось которого жестко связана со станиной и выполненную на торце вальца синусоидальную направляющую для взаимодействия с роликом. В предлагаемом способе при обработке зерна, попавшего в рабочее пространство (между двух поверхностей), на него действуют силы сдвига не в одном направлении, а в двух взаимно перпендикулярных направлениях, причем в одном из них направление приложения сил за период прохода зерна между рабочими поверхностями меняется на обратное несколько раз.

Для осуществления способа в устройстве для шелушения зерна, рабочие поверхности деки и вальца футерованы эластичным материалом, а привод вальца включает ролик, ось которого жестко связана со станиной, и выполненную на торце вальца синусоидальную направляющую для взаимодействия с роликом и придания вальцу таким образом продольных возвратно-поступательных перемещений.

Осуществляться такой способ может в вальцедековом шелушильном станке наложением на вращательное движение вальца:

- возвратно-поступательного осевого смещения вальца при неподвижной деке;
- возвратно-поступательного, параллельного оси вальца движения деки при отсутствии осевой свободы вальца;
- совместного встречного возвратно-поступательного движения.

Один из вариантов устройства для осуществления способа схематически изображен на рисунке 1.13.

В подшипниках 9 станины 8 установлен валец 7, футерованный эластичной обечайкой 6. С торца вальца закреплена круговая синусоидальная направляющая 4, в ее пазу размещен ролик 2, ось 5 которого жестко связана со станиной. Дека 3 футерованная эластичным материалом типа резины 1, неподвижно закреплена на станине через регулирующее рабочий зазор устройство 10.

На кинематической схеме (рисунок 1.13) стрелками показаны дополнительные осевые перемещения вальца при его вращении, обусловленные синусоидальной направляющей вальца 7 и роликом 2, закрепленным на станине 8.

Недостатком рассматриваемого привода является наличие большого количества поверхностей трения, которое снижает надежность привода, повышает эксплуатационные затраты, а также отсутствие возможности независимого

регулирования параметров колебательного и вращательного движения, что необходимо, например, при настройке машины для шелушения зерна различного сорта.

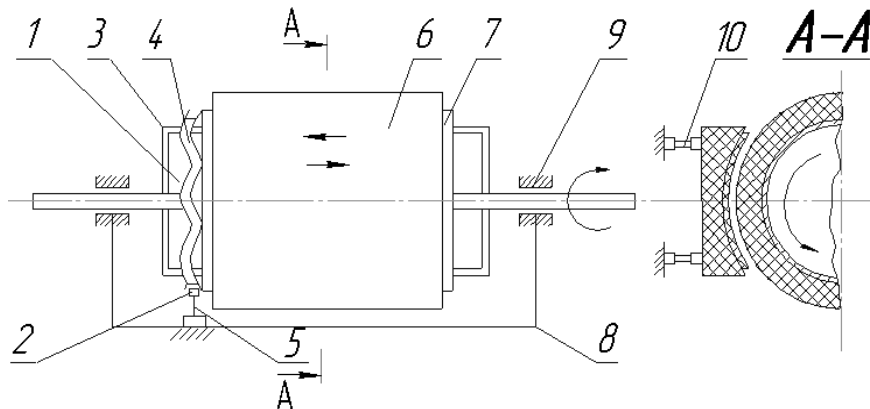


Рисунок 1.13
Устройство для шелушения зерна

В следующем техническом решении дека выполнена в виде статора дуго-статорного асинхронного электродвигателя, снабженного блоком управления, а валец – в виде его ротора, причем продольные обмотки ротора расположены под углом к его оси, а перемещения вальца на оси ограничены дополнительно введенными упругими элементами (рисунок 1.14) [184].

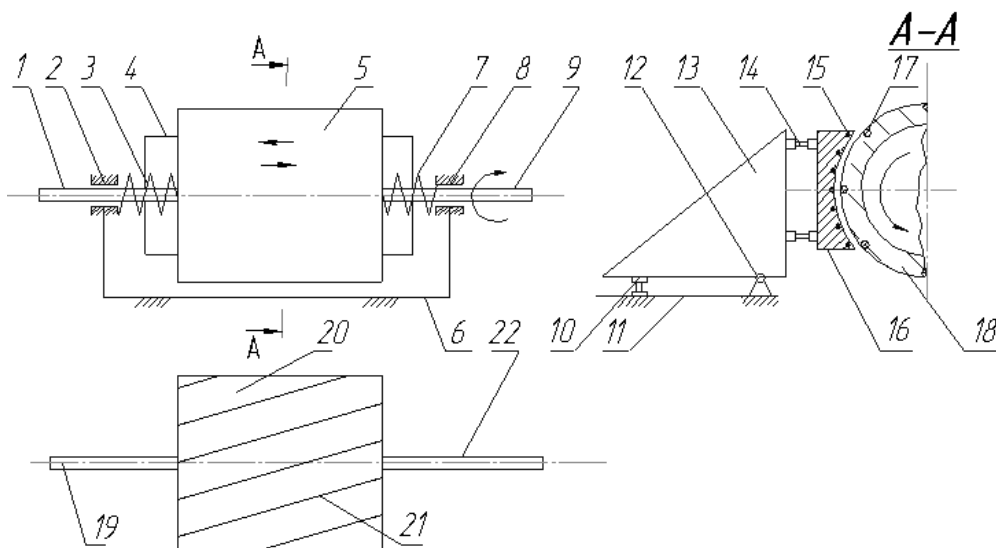


Рисунок 1.14
Колебательно-вращательный электропривод машины для шелушения зерна на базе дуго-статорного электродвигателя

Существенное отличие устройства от аналогичных машин заключается в том, что оно представляет собой объединение в одном техническом решении вальцедекового шелушильного станка и дуго-статорного асинхронного электродвигателя, что позволяет упростить конструкцию и кроме шелушения производить, при необходимости, на этой же машине электромагнитную стимуляцию семян в целях повышения всхожести зерна перед посевом. Кроме того, такое техническое решение позволяет регулировать колебания вальца относительно

неподвижной деки по частоте и амплитуде, в результате чего обеспечивается возможность выбора оптимальных параметров для шелушения.

На станине 6 устройства в подшипниках 8 расположены оси 9 вальца 5. Между торцами вальца 5 и подшипниками 8 расположены упругие элементы 3 и 7 в виде цилиндрических винтовых пружин, жестко соединенных с подшипниками 8 и вальцом 5. Обрабатываемое зерно (на рисунке не показано) имеет возможность поступать в пространство между вальцом 5 и декой 4 (рисунок 1.14). Валец 5 выполнен в виде ротора дугостаторного асинхронного электродвигателя с обмотками 17, а дека 16 – в виде его статора с обмотками 15. Короткозамкнутая обмотка ротора 20 выполнена в виде «беличьей клетки» с продольными стержнями 21 (рисунок 1.14), расположенными под углом β его оси 19 и 22. С помощью винтов 10 держатель 13, на котором крепится дека 16, может вращаться на шарнире 12, регулируя форму зазора между декой 16 и вальцом 18 в зависимости от вида обрабатываемого зерна. Величина зазора между декой и вальцом может изменяться при помощи винтов крепления деки 12. Дека 4 выполняется длиннее вальца 5, так, чтобы при любом положении вальца 5 относительно деки 4 обрабатываемое зерно взаимодействовало с поверхностями рабочей зоны шелушения. Угол обхвата деки принимается $40...70^\circ$. Станция управления и соединяющий с ней устройство токопроводящий кабель трехфазной системы питания на чертеже не показаны.

Частота включения электродвигателя ($f_{вкл}$) регулируется блоком управления в необходимых пределах в зависимости от вида обрабатываемого зерна и может быть больше или меньше частоты собственных колебаний вальца 5 (f_0), которая определяется жесткостью (C) упругих элементов 3 и 7 и массой вальца 5 (M):

$$f_0 = \sqrt{\frac{C}{M}}. \quad (1.4)$$

При $f_{вкл} = f_0$ устройство будет работать в режиме резонанса, что улучшает его динамические и энергетические показатели [4].

Попытки создания машин с воздействием на зерновку в зоне шелушения в двух взаимно перпендикулярных направлениях позволили незначительно повысить качество шелушения, но ни одна конструкция не позволяет производить независимое регулирование параметров как колебательного, так и вращательного движения без остановки технологического процесса. Кроме того, для реализации поступательного (колебательного) перемещения рабочих органов предлагаются преобразователи вида движения различного рода, что снижает КПД привода, ухудшает эксплуатационные характеристики и увеличивает массу и габариты агрегатов.

1.1.3 Инерционное транспортирование влажного сахара

Среднее время простоев сахарных заводов из-за поломки оборудования в России составило 48 часов за сезон, в ЕС 2,5 часа (при количестве рабочих дней завода – 60 суток в год) [224]. Приведенные показатели в большей степени отражают состояние технологического оборудования, произведенного еще в СССР.

Как показывает статистика, причиной большинства простоев сахарного завода являются отказ транспортирующего оборудования, которое одновременно является крупнейшим потребителем электроэнергии (около 30 % установленной мощности завода) [260, 261]. Следовательно, снижение энергопотребления и сокращение времени простоев всего завода тесно связано с совершенствованием оборудования, задействованного в указанных технологических процессах.

Рассмотрим работу участка технологической линии сахарного завода наиболее подверженного отказам [212].

Сахар-песок, выделенный из раствора путем кристаллизации в центрифугах, представляет собой кристаллический материал с влажностью 0,5...1,5 % и температурой 55 °С. Влажный сахар выгружается из центрифуг (рисунок 1.15) утфеля первой кристаллизации в стальной желоб вибрационного конвейера, установленного на наклонных пружинах или катках.

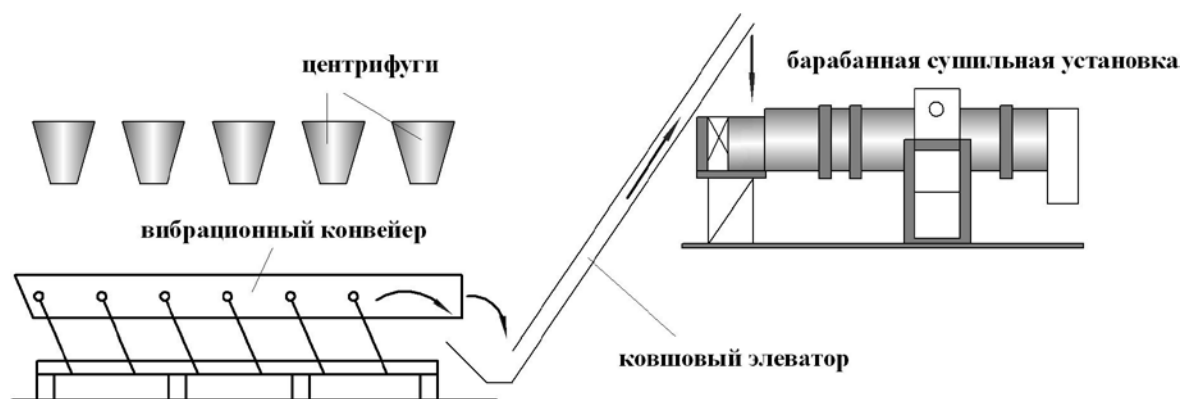


Рисунок 1.15
Участок технологической линии сахарного завода

Затем в горизонтальном направлении перемещается в приемный бункер ковшового элеватора, который подает его в сушильную установку. Далее высушенный до влажности 0,03...0,14 % и охлажденный до температуры помещения 22...25 °С сахар-песок подается на хранение. [2, 212, 224].

На сахарных заводах России, Украины и Республики Беларусь массово применяемым типом конвейеров является вибрационный конвейер (трясун) Ш53-ПТА-3 (рисунок 1.16) и его модификации [91, 78, 91]. Конструкция Ш53-ПТА-3 была разработана в 60-ые гг. научно-исследовательским институтом «Укргипросахпром» и классифицируется как опорный вибрационный конвейер с эксцентриковым приводом. В настоящее время конвейер производится ЗАО «НПО Импульс» (Россия) и ОАО «Купянский машзавод» (Украина). Технические характеристики конвейера приведены в таблице 1.9. За рубежом разработкой и производством подобных конвейеров занимаются фирмы Udhe, AEG, Humboldt, K. Schenck, Klockner-Humboldt-Deutz, Vibra-Schulteis (все ФРГ), L. Binder (Австрия), General Kinematics (США) (рисунки 1.17, 1.18) [261].

Конвейер Ш53-ПТА-3 (рисунок 1.19) состоит из горизонтально расположенного желоба 1, опорной рамы 2, эксцентрикового механизма 3 с шатуном и маховиком, рессорных стоек 4 одинаковой длины, асинхронного двигателя 5.

Желоб установлен на наклонные рессоры, с помощью которых он крепится к опорной раме и разделен на три части: центральная унифицированная часть (длина 2500 мм с эксцентриковым механизмом), передний участок, хвостовая часть. Последние два участка изготавливаются переменными для возможности сборки конвейера нужной длины от 7000 до 14000 мм с интервалами 500 мм. Каждый участок желоба снабжен двумя съемными монтажными балками. Рессоры крепятся к желобу и основанию болтовыми соединениями в целях быстрой замены. Наклон рессор к горизонтали составляет 70° . Привод состоит из асинхронного электродвигателя и клиноременной передачи, вращающей эксцентриковый механизм. При работе конвейера центрифуги разгружаются на него поочередно с интервалом 40...60 с. [2].



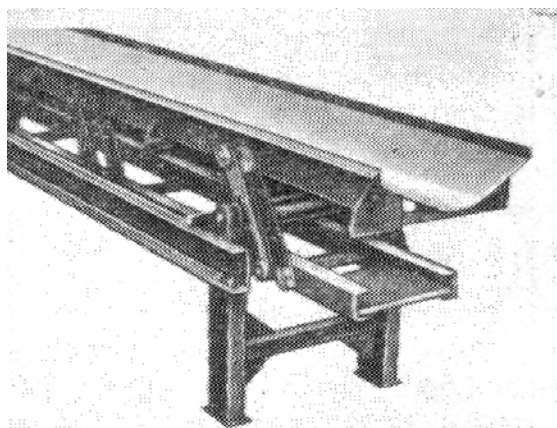
Рисунок 1.16

Транспортер влажного сахара Ш53-ПТА-3 машиностроительный завод «Славутский» (Украина)

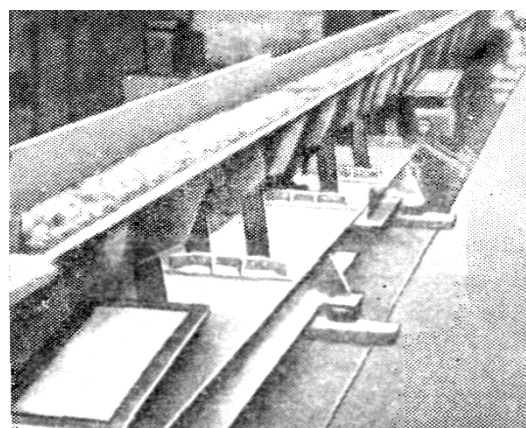


Рисунок 1.17

Вибрационный конвейер фирмы Vibra-Schulteis



а



б

Рисунок 1.18

Вибрационный конвейер с эксцентриковым приводом: а – фирмы L. Binder; б – фирмы AEG

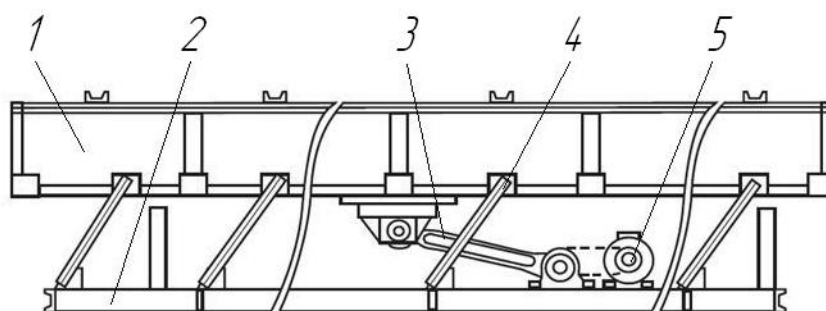


Рисунок 1.19
Конструкция вибрационного конвейера Ш53-ПТА-3

Конструкции и приводы зарубежных транспортирующих машин аналогичны конструкции Ш53-ПТА-3 (таблица 1.9), поэтому принцип действия конвейера можно рассмотреть на примере отечественного образца.

Вид конвейера, его конструкционные особенности и характер движения транспортируемого груза, применяемого на рассматриваемом участке технологической линии сахарного завода, обусловлены критериями, включающими в себя совокупность технологических факторов производства, а также механические, теплофизические, органолептические и химические свойства сахара.

Таблица 1.9 Технические характеристики
вибрационного конвейера Ш53-ПТА-3

Производительность техническая по свекле, т/сут	3000	
Производительность техническая по сахару, т/сут (т/ч)	450 (18,8)	
Длина желоба, мм	8500	
Ширина желоба, мм:	– в верхней части	1000
	– в зоне транспортирования	500
Частота вращения эксцентрикового вала, об/мин	260	
Эксцентриситет вала, мм	15 ± 0,1	
Угол наклона рессор к горизонтали, градусы	70	
Установленная мощность асинхронного двигателя, кВт	7,5	
Габаритные размеры, мм:	– длина	8560
	– ширина	1700
	– высота	1115
Масса, кг	1512	

На основе анализа литературы [205] выделены основные критерии, служащие определяющими при выборе транспортирующей машины влажного сахара (таблица 1.10). Там же дана сравнительная оценка соответствия перечисленным требованиям и других видов конвейеров сыпучих грузов.

Хотя вибрационные конвейеры обладают в данных условиях работы рядом преимуществ, их эксплуатация в рассматриваемом участке технологической линии сопряжена с существенными проблемами. Основной из них является налипание (адгезия) груза на желоб [212, 261]. Объясняется тем, что частицы сахара по своему составу неоднородны.

В процессе транспортирования более мелкая фракция, так называемая сахарная пудра, оседает на дно желоба, имеет место паразитный эффект се-

грегации. Сегрегация происходит из-за более высокой насыпной плотности сахарной пудры, по сравнению с сахаром-песком, что при интенсивном перетряхивании способствует разделению сахара на фракции.

Таблица 1.10 Сравнительный анализ конвейеров сыпучих грузов

Требования	Соответствие конвейера требованию			
	Ленточный	Скребок- ковый	Вибра- цион- ные	Скре- перный
Необходимость перетряхивания, для предотвращения слеживания и образования комков	–	+	+	+
Большая удельная нагрузка на грузонесущий орган (до 200...250 кг/м ²)	–	+	+	+
Недопустимость механических воздействий на кристаллы сахара	+	–	+	–
Необходимость равномерной подачи на ковшовый элеватор, при этом являясь своеобразной накопительной емкости	–	+	+	–

Вода, небольшое количество которой имеется во влажном сахаре, также постепенно скапливается на дне желоба. Совокупность перечисленных процессов приводит к образованию липкой дисперсной массы, контактирующей с поверхностью желоба. Влажность дисперсной массы превышает среднюю влажность сахара при выходе из центрифуг и может достигать 10 %. В этой ситуации существенной составляющей силы трения становится адгезионная составляющая, которая сопоставима с силой сухого трения и при некоторых влажностях даже может превосходить ее. При этом дисперсная масса не транспортируется, а скорость движения основной массы сахара-песка по дисперсной фракции резко снижается за счет того, что коэффициент внутреннего трения сахара намного больше коэффициента внешнего трения по стали. При проектировании вибрационных конвейеров обычно учитывают только сухое трение. В реальных же условиях явление адгезии может увеличить силу трения в 2...2,5 раза. По данным эксплуатационных служб для нормальной работы линии раз в двое суток осуществляется остановка конвейера и очистка желоба вручную, занимающая от 7 до 10 мин. времени. Это приводит к простоям всего предприятия и большим потерям от недовыпуска продукции.

Предшественником вибрационного конвейера в сахарном производстве является инерционный конвейер ТБС-1. Отличие в том, что его транспортирующий желоб совершает неравномерные движения вперед и назад параллельно направлению транспортирования груза. Транспортёр ТБС-1 выпускался с желобами длиной от 7 до 14 м, рассчитан для заводов мощностью 2500–3000 т свеклы в сутки. Приемником является транспортёр на наклонных пружинах ВТ-60–72 для заводов мощностью 6000 т свеклы в сутки. Этот транспортёр имел ширину желоба 1600 мм, длину желоба 16000 мм, электродвигатель мощностью 10 кВт.

В инерционных конвейерах системы Маркуса транспортируемый груз, находящийся на желобе, мало подвержен процессу сегрегации благодаря отсут-

ствию вертикальных вибраций и низкой частоты колебаний ($40 \dots 85 \text{ мин.}^{-1}$). Амплитуда колебаний конвейера такого типа ограничивается только геометрией привода и размерами приемного устройства, поэтому конвейер может работать с большим отношением ускорений во время прямого и обратного хода. В отличие от вибрационных эффективное транспортирование инерционных конвейеров мало зависит от гранулометрического состава груза, объемной массы, газопроницаемости, взаимодействия между частицами и высоты слоя.

Таким образом, применение инерционного конвейера системы Маркуса для транспортирования влажного сахара позволяет решить первую из вышперечисленных проблем.

Основные параметры конвейера Маркуса:

- амплитуда колебаний желоба $50 \dots 150 \text{ мм}$;
- частота колебаний $40 \dots 85 \text{ мин.}^{-1}$;
- средняя скорость движения груза $0,15 \dots 0,2 \text{ м/с}$;

Основным элементом привода инерционного конвейера системы Маркуса, обеспечивающим необходимый закон движения желоба, являлся механизм преобразования вращательного движения вала, приводимого от асинхронного электродвигателя, в неравномерное возвратно-поступательное движение желоба. Имеются разные варианты кинематических схем таких механизмов. Так же как и в случае с вибрационными конвейерами наличие маховика ухудшает условия пуска электродвигателя, а сложные кинематические схемы с еще большим количеством шарнирных соединений, работающих в тяжелых условиях, снижают срок работы подшипников [4, 6]. Во многом эти недостатки, несмотря на перечисленные в начале главы, послужили причиной снятия с технологических линий сахарных заводов инерционных конвейеров системы Маркуса, которые успешно применялись до 60-ых годов прошлого века [224] (рисунок 1.20).

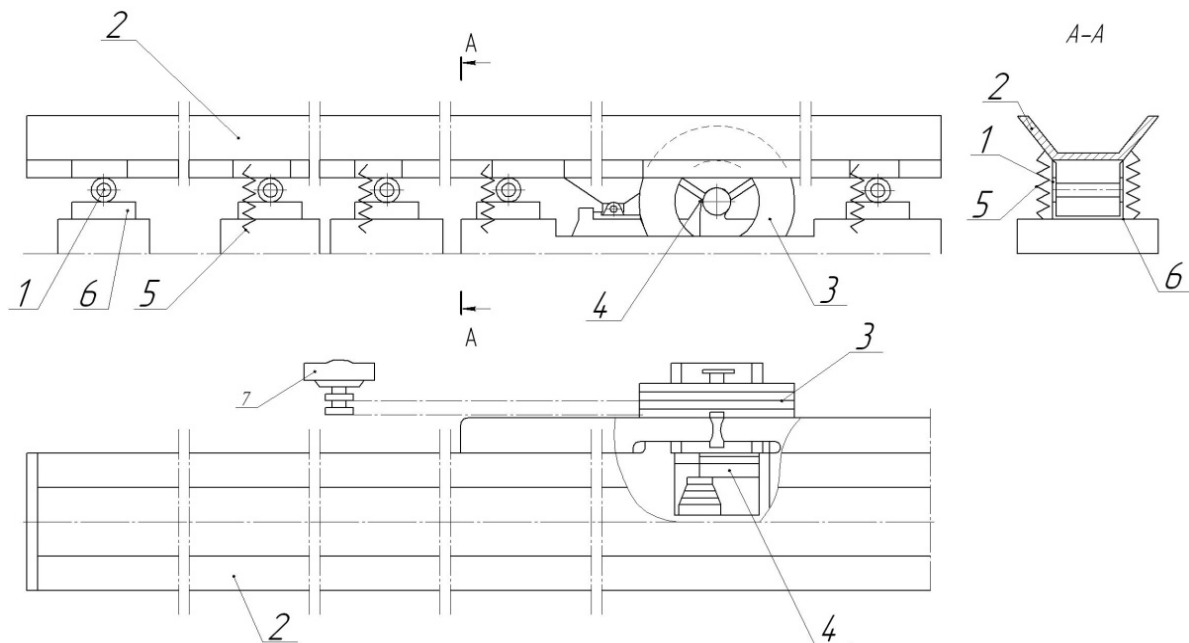


Рисунок 1.20
Транспортер ТБС-1 системы Маркуса

Кроме сахарного производства такие конвейеры широко применялись в горнорудной, строительной, металлургической, металлообрабатывающих и пищевой промышленности [98]. На рисунке 1.20 представлен инерционный конвейер системы Маркуса ТБС-1 (транспортёр белого сахара).

Стальной желоб 2 транспортера установлен на катках 1. Катки катятся по направляющим 6. Транспортёр приводится в движение от электродвигателя 7 мощностью 7,5 кВт через шкив 3 с помощью клиноременной передачи. В таблице 1.11 представлена техническая характеристика транспортера ТБС-1 системы Маркуса.

Таблица 1.11 Технические характеристики транспортера ТБС-1

Производительность техническая по свекле, т/сут	3000	
Производительность техническая по сахару, т/сут	900	
Длина желоба, мм	11000	
Ширина желоба, мм	1000	
Установленная мощность асинхронного двигателя, кВт	7,5	
Габаритные размеры, мм:	– длина	11000
	– ширина	1000
	– высота	770

Возвратно-поступательное движение желоба осуществляется с помощью шатунно-кривошипного механизма 4. За время одного оборота вала его кривошип меняет скорость желоба по величине и направлению. За время первой четверти оборота скорость желоба достигает максимальной величины, благодаря чему находящийся в желобе сахар начинает двигаться и приобретает скорость несколько меньшую, чем скорость желоба вследствие трения. За время второй четверти оборота вала скорость желоба уменьшается, но сахар продолжает по инерции двигаться с нарастающей скоростью. Во время третьей четверти оборота скорость сахара уменьшается, так как желоб двигается в обратном направлении. В четвертой четверти оборота скорость сахара уменьшается до нуля. Таким образом, сахар в желобе движется скачками. При этом, вследствие небольшого перетряхивания, происходит некоторое подсыхание сахара.

Таким образом, в технологическом процессе сахарного производства вибрационные конвейеры являются наиболее рациональным типом конвейеров, обеспечивающих транспортирование горячего влажного сахара. Это обусловлено совокупностью технологических факторов производства, а также механическими, теплофизическими и химическими свойствами транспортируемого груза. Однако эксплуатация вибрационных конвейеров осложняется особенностями привода и режимом работы с подбрасыванием груза. Последний приводит к сегрегации сахара, налипанию мелкодисперсной фракции на поверхность грузонесущего желоба и остановке конвейера для его очистки. Наличие в конвейере механического преобразователя вращательного движения электродвигателя в колебательное, а также рессор, работающих под большими динамическими нагрузками, обуславливает частые поломки конвейера. Это ведет к простоям сахарного завода, достигающим 1...2 % среднегодового рабочего времени и экономическим потерям от недовыпуска продукции.

1.2 Обоснование применения в технологическом оборудовании линейного асинхронного электропривода сложного колебательного движения (ЛАЭСЖД)

Для согласования вращательного движения вала электродвигателя с колебательным движением рабочего органа применяются механические преобразователи вида движения: кривошипно-шатунный, кулисный, кулачковый и различные их вариации и сочетания. Каждый такой механический преобразователь имеет десятки трущихся поверхностей. Из-за их износа, а в ряде случаев и повреждения деталей и узлов привода, возникают простои технологического оборудования.

Другим недостатком редукторного электропривода является ограниченная возможность создания управляемого привода для воспроизведения колебаний большой амплитуды (0,05–0,1 м) и низкой частоты (2–5 Гц). Эта область кинематических параметров оказывается оптимальной для многих технологических операций [73].

В этом аспекте разработчики технологических машин недостаточное внимание уделяют применению в колебательном приводе линейных асинхронных двигателей (ЛАД). Причина сложившегося обстоятельства заключается в том, что ЛАД и асинхронные двигатели (АД) с вращающимися роторами имеют различные КПД. В зависимости от конструктивного исполнения при одинаковой мощности отношение КПД АД (η_1) и КПД ЛАД ($\eta_{\text{ЛАД}}$) лежит в пределах 1,4÷1,8.

В то же время ЛАД обеспечивает получение непосредственно прямолинейного движения. Совмещение в концевых звеньях упругих накопителей механической энергии с ЛАД позволяет реализовать энергетически эффективное колебательное движение, т. к. при этом производится разгон рабочего органа технологической машины в обратном направлении в цикле колебательного движения за счет запасенной энергии [2]. Таким образом, можно создать электропривод с автоколебаниями непосредственно от ротора электродвигателя. В этом случае сравнение КПД колебательного привода с ЛАД и с АД дает противоположный результат, отношение $\eta_{\text{ЛАД}}$ и η_1 лежит в пределах 1,4...1,6.

Немаловажно и то, что ЛАД отличается конструктивной простотой, технологичностью изготовления, легкостью монтажа и демонтажа, дешевизной, надежностью и допускает разнообразие конструктивных решений. Вследствие отсутствия на вторичном элементе ЛАД обмотки его подвижной частью может быть непосредственно плоский или цилиндрический рабочий орган оборудования. В результате достигается дополнительное упрощение, блочно-модульное построение привода и его многоцелевое применение. Неоспоримое преимущество приводов с ЛАД заключается и в том, что имеет место регулирование параметров колебаний как по амплитуде, так и по частоте [6].

Необходимо отметить, что ЛАД позволяют обеспечить колебательное движение рабочего органа и сложной формы (возвратно-поступательно-вращательное, возвратно-поступательное с наложением поперечной и вертикальной составляющих, эллипсоидное). Простая реализация сложного колеба-

тельного движения для рабочих органов технологического оборудования зерноперерабатывающих и других предприятий АПК является эффективным средством совершенствования последнего, соответствующим новейшим тенденциям развития техники [142]. Получение такого вида движения рабочих органов с помощью ЛЭП является неизученным вопросом, которому и посвящена работа.

1.2.1 Общие сведения о ЛАД в приводе колебательного движения

В настоящее время ЛАД имеют более широкое применение в производстве, чем другие виды линейных двигателей, причем предпочтение отдается линейным асинхронным трехфазным двигателям, которые можно разделить на две большие группы: цилиндрические и плоские. На рисунке 1.21 дана структура разновидностей ЛАД [114].

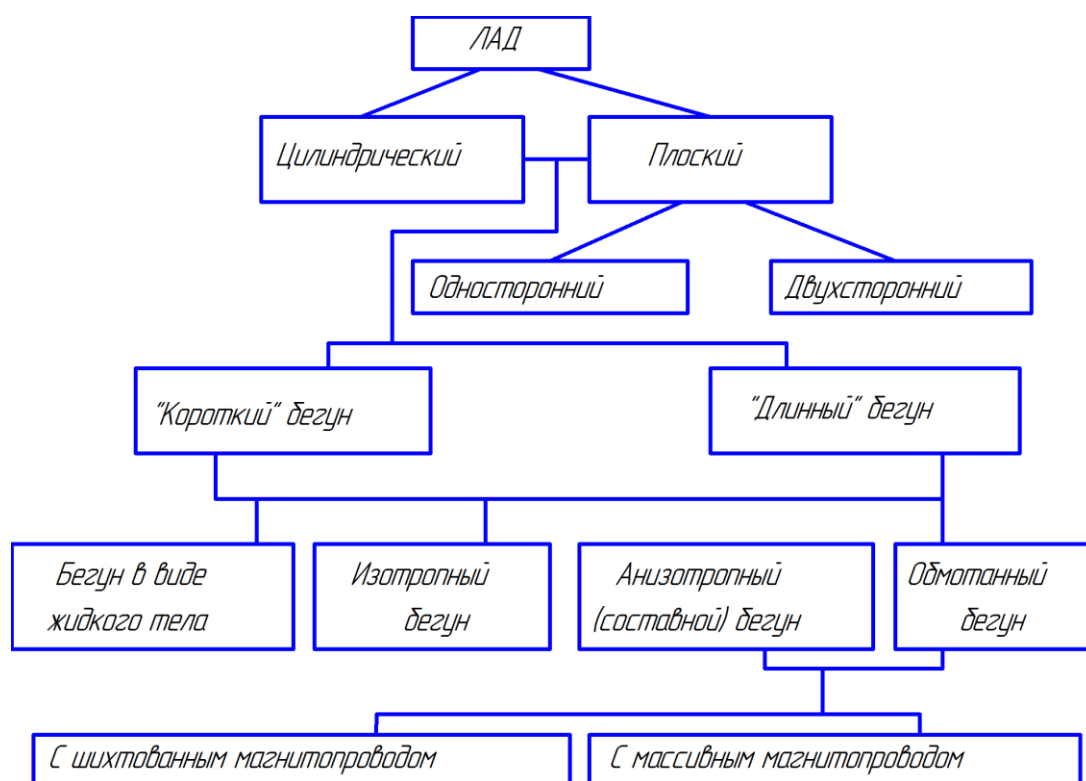


Рисунок 1.21
Разновидности ЛАД поступательного движения

Цилиндрический ЛАД имеет одну разновидность (рисунок 1.22), а плоский ЛАД имеет две конструктивные разновидности: двухсторонний (рисунок 1.23, а) и односторонний (рисунок 1.23, б). В двухстороннем ЛАД вторичный элемент (бегун) 1 перемещается в зазоре между двумя противоположно расположенными индукторами 2 (рисунок 1.23, а).

Бегун ЛАД выполняется: из медной или алюминиевой шины (рисунок 1.24,а); из медной или алюминиевой шины, наложенной на ферромагнитную полосу (рисунок 1.24,б); из медной или алюминиевой шины с выштампованными прорезями или окнами (рисунок 1.24,в), остающимися пустыми или заполненными ферромагнитным материалом.

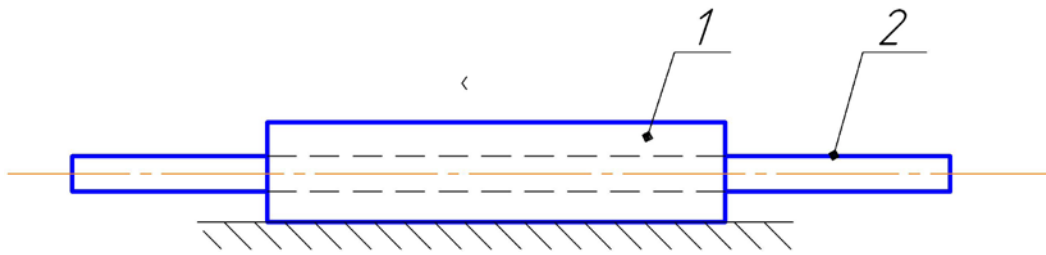


Рисунок 1.22
Конструкция цилиндрического ЛАД: 1 – индуктор; 2 – бегун

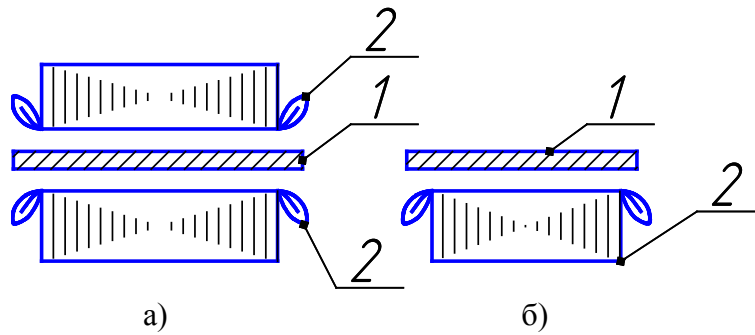


Рисунок 1.23
Конструктивные разновидности ЛАД:
а – двухсторонний, б – односторонний: 1 – бегун; 2 – индуктор

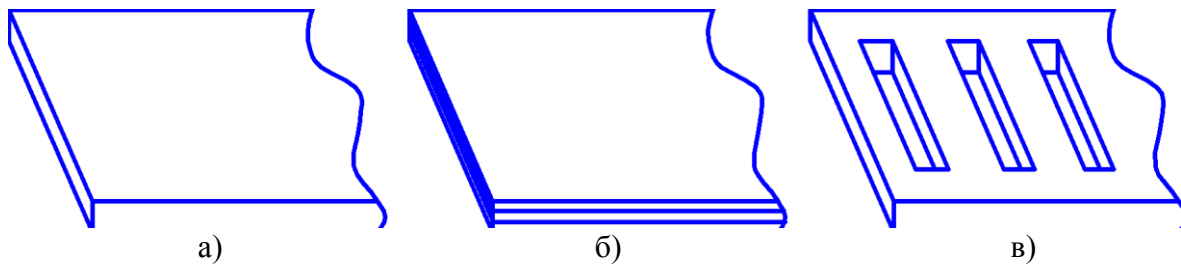


Рисунок 1.24
Конструкция вторичной части ЛАД:
а – проводящая шина; б – составная полоса; в – проводящая полоса с прорезями

При конструкторских решениях в процессе создания технологических машин не исключается принципиальная возможность слияния вторичной цепи ЛАД с соответствующим плоским или цилиндрическим рабочим органом оборудования. При этом электропривод машины упрощается.

Анализ известных принципов построения и способов практической реализации колебательного привода на базе ЛАД и двигателей вращения позволяет разделить ЛЭП по способам управления на две группы [4, 6, 158]:

1. Замкнутого типа;
2. Разомкнутого типа.

В приводах замкнутого типа реализуются автоколебания. В этом случае должна иметь место позиционная связь между положением вторичного элемента и фазой включения напряжения питания ЛАД. Автоколебания происходят и в ЛЭП, выполненном из двух ЛАД, в которых создаются электромагнитные усилия, направленные навстречу друг другу. В зависимости от положения вторичного элемента – общего для двух ЛАД, попеременно в ходе колебаний через

переключатель отключается один, включается другой двигатель. Рассматриваемые колебательные приводы просты, не требуют специальных схем управления, позволяют получить значительные линейные перемещения. Однако фиксированное размещение датчиков положения приводит к трудностям самовозбуждения колебаний. Этот недостаток окупается простотой реализации схемных решений.

Приводы разомкнутого типа в ЛЭП с вынужденным реверсом обеспечивают устойчивую работу в переходных режимах и значительных изменениях нагрузки, однако схемные решения управления сложнее, чем в первом случае. Эти способы управления дополняют друг друга и могут быть применены в колебательном приводе. Таким образом, можно предложить следующие функциональные схемы колебательных ЛЭП (рисунок 1.25).

Схема (рисунок 1.25,а) реализует автоколебания. Периодически при достижении вторичным элементом заданной координаты x по сигналу датчика положения (ДП) схема управления (СУ) через тиристорный коммутатор (ТК) включает один ЛАД, выключает другой. Функциональная схема (рисунок 1.25,б) обеспечивает режим вынужденных колебаний ЛЭП. СУ задает режим колебаний, управляя через ТК периодическим подключением ЛАД к сети с реверсом фаз.

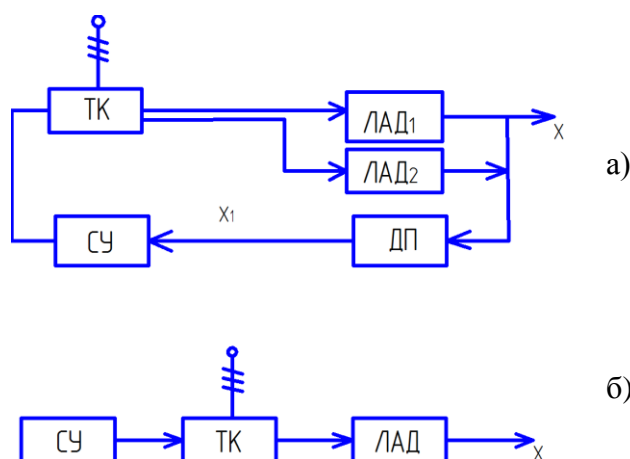


Рисунок 1.25

Функциональные схемы колебательных ЛЭП:

а) автоколебательный режим работы; б) режим вынужденных колебаний

Обеспечение необходимой диаграммы колебательного движения рабочего органа оборудования обуславливает необходимость применения в схемах ЛЭП режима противовключения ЛАД с целью гашения кинетической энергии рабочего органа, накопленной при прямом ходе. Большая часть этой энергии выделяется в виде тепла во вторичном элементе ЛАД, что может быть оправдано только при необходимости технологического нагрева рабочего органа оборудования теплом вторичного элемента. Часто в цикле авто- или вынужденных колебаний ЛЭП из-за необходимого изменения ускорения вторичного элемента при изменении направления движения нужно, чтобы тяговые показатели ЛАД периодически менялись при переключении. В двухдвигательном, например, автоколебательном ЛЭП (рисунок 1.25,а) для этого необходимо, чтобы ЛАД раз-

личались развиваемыми усилиями. В колебательном ЛЭП с одним ЛАД (рисунок 1.25,б) возможен способ перехода на другое напряжение питания при переключении фаз.

При выборе схемных решений колебательного ЛЭП необходимо учесть еще особенность привода с ЛАД, которая заключается в большом воздушном зазоре двигателя. С одной стороны, большой воздушный зазор повышает надежность работы асинхронного двигателя при частых пусках и ударной нагрузке из-за уменьшения пусковых токов, с другой стороны, повышает ток холостого хода индуктора [6]. Большие токи холостого хода индуктора допустимы только при повторно-кратковременном режиме работы двигателя и неприемлемы для длительного режима работы, так как эти токи вызывают нагрев обмоток индуктора и понижают коэффициент мощности сети.

Вышесказанное обуславливает необходимость упрощения автоколебательных ЛЭП и ЛЭП, работающих в режиме вынужденных колебаний. Упрощение привода может быть достигнуто в случае, если кинетическая энергия, накопленная при прямом ходе вторичного элемента, будет запасаться при торможении в каком-нибудь накопителе. При этом появляется возможность производить разгон вторичного элемента в обратном направлении за счет запасенной энергии. Отсутствие потребления энергии при гашении кинетической энергии и ее использование при разгоне позволяет уменьшить потребляемую из сети энергию. Функциональная схема такого энергетически эффективного электропривода может иметь вид, показанный на рисунке 1.26. Она содержит, кроме ЛАД, накопитель потенциальной энергии – упругий элемент (УЭ), который вместе с накопителем кинетической энергии – массой (вторичный элемент) – образует колебательную пару. Полное преобразование кинетической энергии в потенциальную и наоборот происходит при частоте собственных колебаний привода.

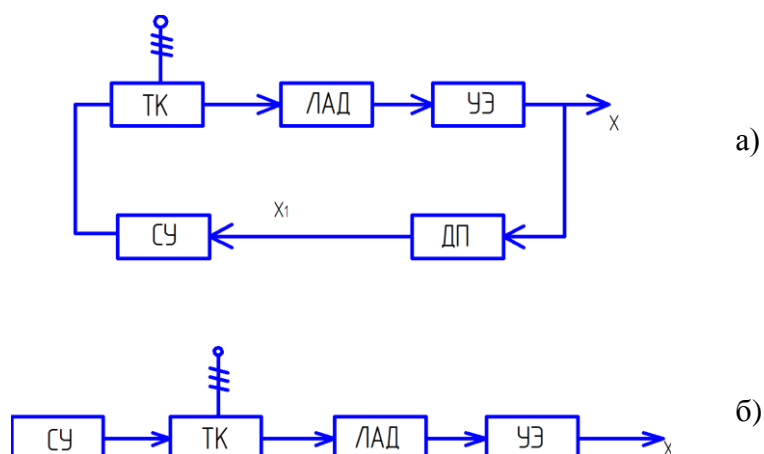


Рисунок 1.26

Функциональные схемы колебательного ЛЭП с упругими элементами:
а) автоколебательный режим работы; б) режим вынужденных колебаний

Эффективными накопителями кинетической энергии могут быть различные упругие элементы. Из них наибольшее значение имеют цилиндрические винтовые пружины, обеспечивающие стабильность настройки, сравнительно

небольшие габаритные размеры и массы, простые в сборке и выносимые при применении. Ясно, что замена двигателя, причем большей мощности, упругим элементом приведет к существенному выигрышу в приводе не только по стоимости, но и по эксплуатационным затратам. Эти причины оправдывают возможность реализации функциональных схем колебательного ЛЭП, приведенных на рисунке 1.26.

Функциональным схемам (рисунок 1.26) может удовлетворять большое количество кинематических схем ЛЭП (рисунок 1.27), отличающихся количеством двигателей, упругих элементов, датчиков положения, программой работы системы управления [3]. Разнообразие кинематических схем может быть отнесено к одной из моделей. Модель 1 (рисунок 1.28,а) соответствует структурной схеме (рисунок 1.26,а). Схема управления по команде датчика положения (ДП) включает двигатель.

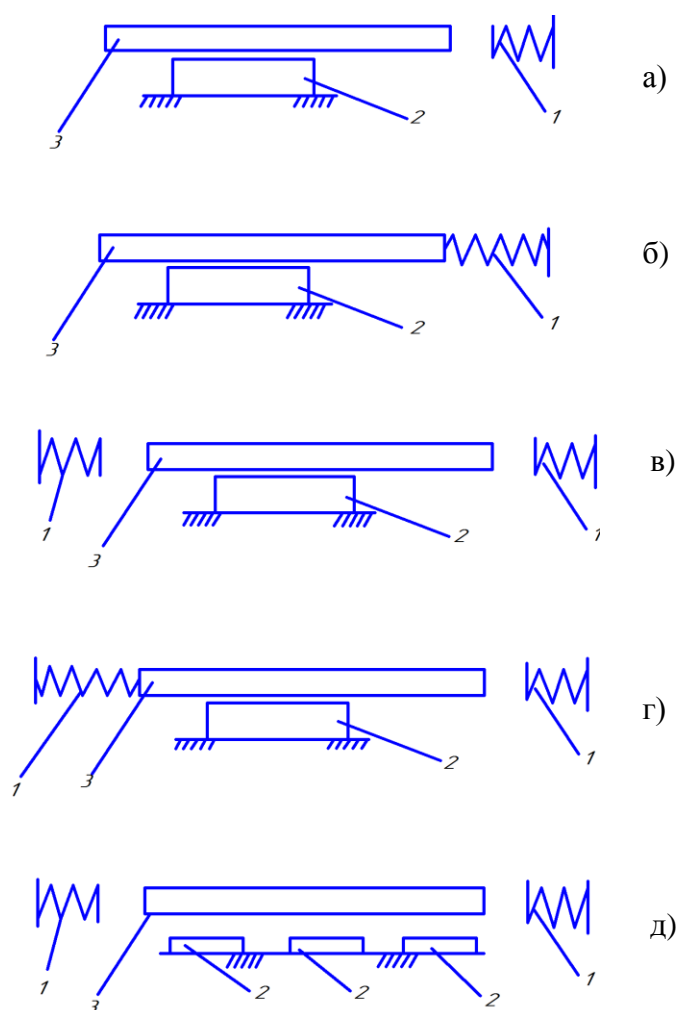


Рисунок 1.27

Кинематические схемы колебательных ЛЭП с упругими элементами (схемы управления не приведены): 1 – упругий элемент; 2 – индуктор ЛАД; 3 – вторичный элемент ЛАД

ЛАД привода в цикле колебательного движения вторичного элемента работает в режиме противовключения с последующим переходом в двигательный режим. Модель 1 (рисунок 1.28) без датчика положения, реализованная по

функциональной схеме (рисунок 1.26,б), может работать в режиме вынужденных колебаний. Двигатель ЛЭП включается в работу согласно частоте включений, задаваемой схемой управления (СУ) и не зависит от частоты собственных колебаний кинематической схемы. Модель 2 (рисунок 1.28,б) удовлетворяет функциональной схеме (рисунок 1.26,а). Датчик положения настроен так, что после возврата УЭ потенциальной энергии дается команда СУ на включение ЛАД. В цикле колебаний ВЭ двигатель может включиться только в одну или в разные стороны. В моделях 1 и 2 ЛЭП упругие элементы могут быть жестко соединены со вторичным элементом.

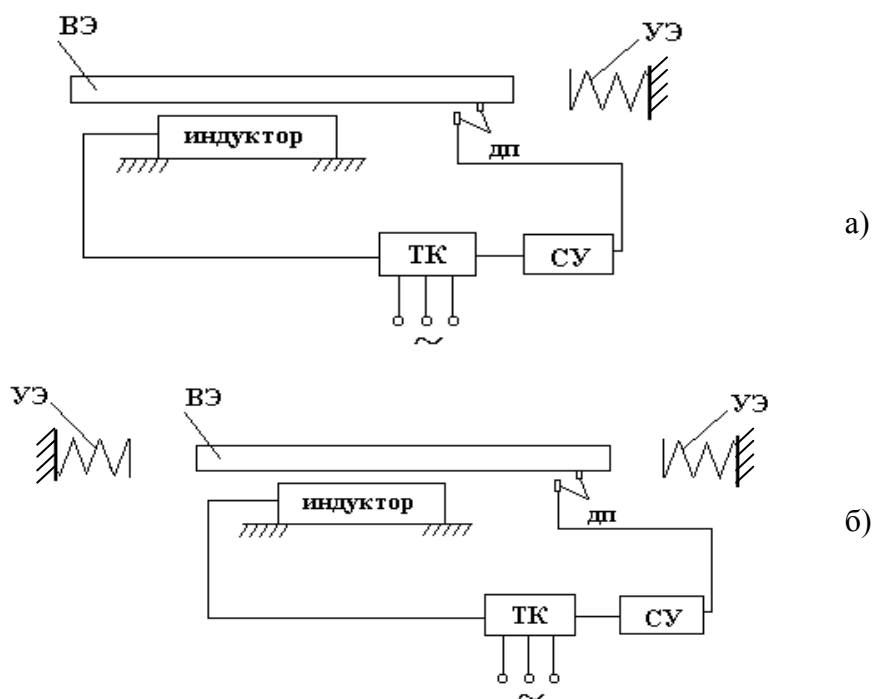


Рисунок 1.28

Модели колебательных ЛЭП:

а) с одним упругим элементом, б) с двумя упругими элементами

1.2.2 Принципы построения ЛАЭСЖД

Возможность осуществления безредукторного привода рабочих органов колебательного движения непосредственно от ЛАД позволяет существенно повысить технико-экономические показатели технологического оборудования АПК. Однако, незадействованным и неисследованным свойством, присущим ЛАД является возможность осуществлять привод рабочих органов колебательного движения сложной формы: возвратно-поступательно-вращательное; возвратно-поступательное с поперечной составляющей колебаний; возвратно-поступательное с вертикальной составляющей колебаний; возвратно-поступательное с поперечной и вертикальной составляющими колебаний, эллипсоидное. Получение такого рода колебаний традиционным электроприводом, путем применения механических преобразователей и узлов затруднительно. При этом наличие жестких кинематических связей в приводе ограничивает регулирование параметров колебаний, что снижает КПД и надежность машины, возрастает

металлоемкость и стоимость, поэтому сложные колебания рабочих органов с возможностью регулирования параметров колебаний как по частоте, так и по амплитуде, в настоящее время не применяются.

Электромагнитное усилие, развиваемое плоским ЛАД можно разложить на три составляющие: – продольная F_x – сила тяги, создающая поступательное линейное движение; – нормальная F_y – сила притяжения, которая перпендикулярна к направлению продольной силы; – поперечная F_z – сила, стремящаяся вытолкнуть вторичный элемент из рабочего зазора (при симметричном расположении вторичного элемента относительно индуктора значением данной силы пренебрегают) [54]. В цилиндрическом ЛАД электромагнитное усилие направлено вдоль оси OX , т. е. развивается только продольная сила тяги F_x .

Возможные варианты схем, позволяющие реализовать сложное колебательное движение рабочих органов в зависимости от использования развиваемой силы ЛАД представлены на рисунке 1.29 [7, 17, 142, 147]. ЛАД, реализующий движение вторичного элемента в двух направлениях – используются силы тяги F_x и сила притяжения F_y (плоский ЛАД, рисунок 1.29,а). ЛАД, реализующий поступательно-вращательное движение вторичного элемента – используется сила тяги F_x и момент вращения M (цилиндрический ЛАД, рисунок 1.29,б); в) ЛАД, реализующий движение вторичного элемента в трех направлениях – используются силы F_x , F_y и поперечная сила F_z (плоский ЛАД, рисунок 1.29,в).

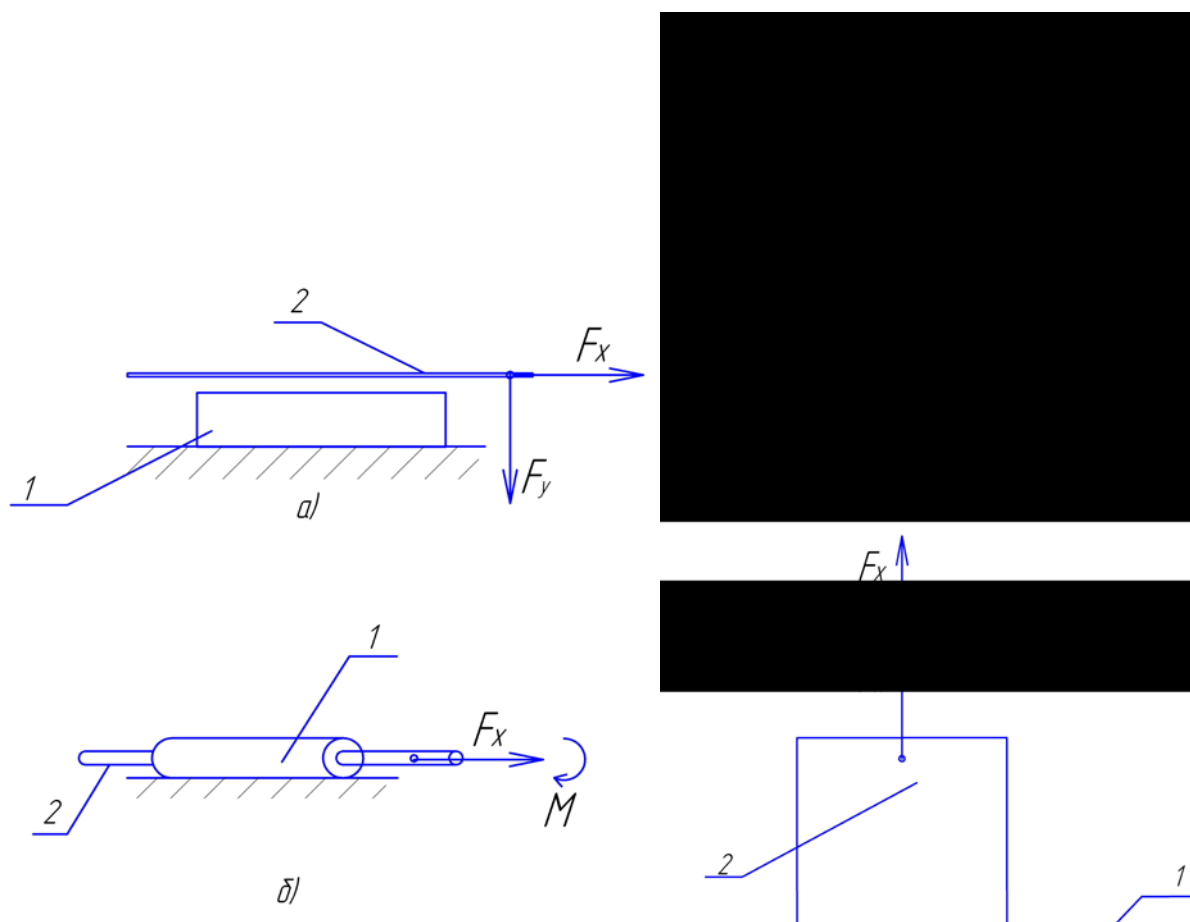


Рисунок 1.29

Схемы, реализующие сложное движение вторичного элемента ЛАД:

1 – индуктор; 2 – вторичный элемент

Все представленные схемы можно объединить одним признаком – плоскопараллельным движением вторичного элемента, а соответственно и рабочего органа относительно индуктора.

Создание высокоэффективных приводов на базе линейных двигателей, реализующих колебательное движение различной формы, является важным резервом повышения технико-экономических показателей технологического оборудования АПК. В работе приняты четыре модели линейного асинхронного электропривода, реализующие различные виды сложного колебательного движения рабочих органов.

Первая модель ЛЭП реализует продольную силу тяги F_x и притяжения F_y , создается плоским двигателем (рисунок 1.30). Последний, при включении одновременно развивает силу тяги F_x , направленную по оси OX и силу притяжения F_y (ось OY), направленную перпендикулярно (в поперечном направлении) к силе тяги F_x . Тем самым, при работе ЛАД в режиме «вкл-выкл», когда вторичный элемент подпружинен в направлениях развиваемых ЛАД сил, рабочий орган будет совершать сложные продольно-поперечные колебания. Данный вид сложных колебаний рабочего органа эффективно применить в приводе решетчатых станков зерноочистительных машин. Наложение на продольное колебательное движение решетчатого стана зерноочистительной машины, обусловленного силой F_x , колебательного движения под действием силы F_y позволяет повысить ориентирующую способность зернового материала, находящегося на решетчатом стане, относительно сепарирующих ячеек решет и увеличить суммарную траекторию движения зерна по решетке [30, 31, 32, 150, 233, 234].

Существует возможность совершенствования традиционно применяемых для шелушения зерна культур с хрупким ядром вальцедековых шелушильных машин типа 2ДШС, СГР в направлении повышения эффективности шелушения.

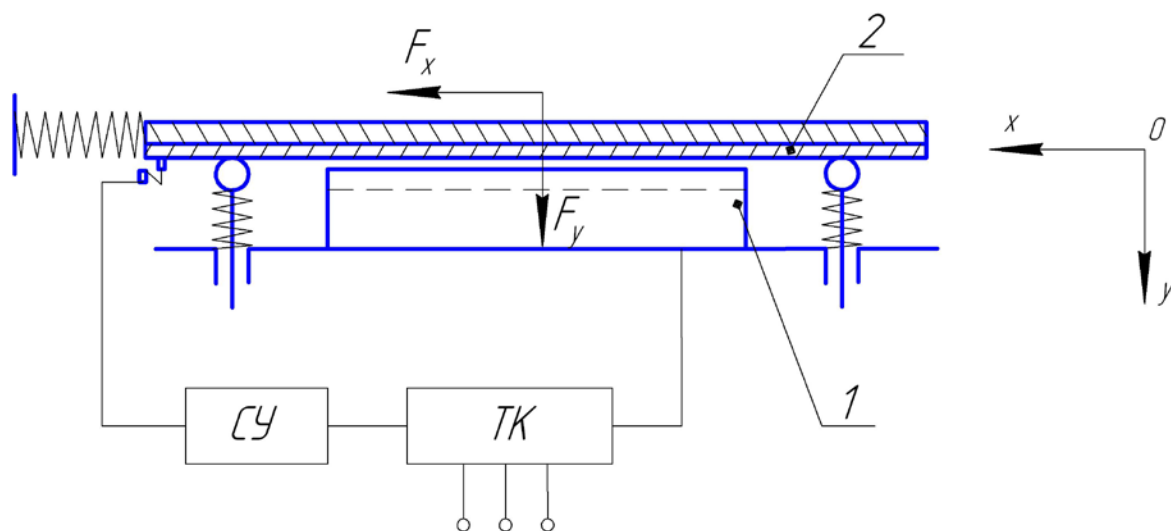


Рисунок 1.30

Кинематическая схема ЛЭП с двумя развиваемыми усилиями (модель 1):

1 – индуктор; 2 – вторичный элемент

За счет придания вальцу машины, наряду с вращательным, колебательного движения вдоль оси вращения повышается коэффициент шелушения, кото-

рый также повышается за счет регулирования параметров колебательно-вращательного движения в широком диапазоне [12, 170]. Существующие способы получения такого рода движения и приводы, их реализующие, обладают рядом недостатков: громоздкость, наличие большого числа трущихся и изнашивающихся поверхностей. Кроме того, подобные электроприводы обычно работают при неизменных параметрах колебаний рабочего органа, что снижает эффективность их использования.

Вторая модель ЛЭП, применимая в электроприводе вальцедековых шелушильных машин, реализует продольную силу тяги F_x и момент вращения M [153, 154]. Создается цилиндрическим ЛАД со скошенными пазами или совместно цилиндрическим ЛАД и двигателем вращения (рисунок 1.31). Цилиндрический ЛАД реализует поступательное движение F_x , а двигатель вращения через шлицевое соединение придает вторичному элементу вращательное движение. Таким образом, при работе ЛАД в паре с упругим элементом в режиме «включен-выключен» рабочий орган будет совершать сложное возвратно-поступательно-вращательное движение. Данный вид сложных колебаний рабочего органа эффективно применить в приводе вальцедековых шелушильных машин. ЛЭП установки для шелушения зерна, позволяющий регулировать колебания вальца относительно неподвижной деки по частоте и амплитуде, в результате чего обеспечивается возможность выбора оптимальных параметров для шелушения, может быть реализован по второй модели (рисунок 1.31).

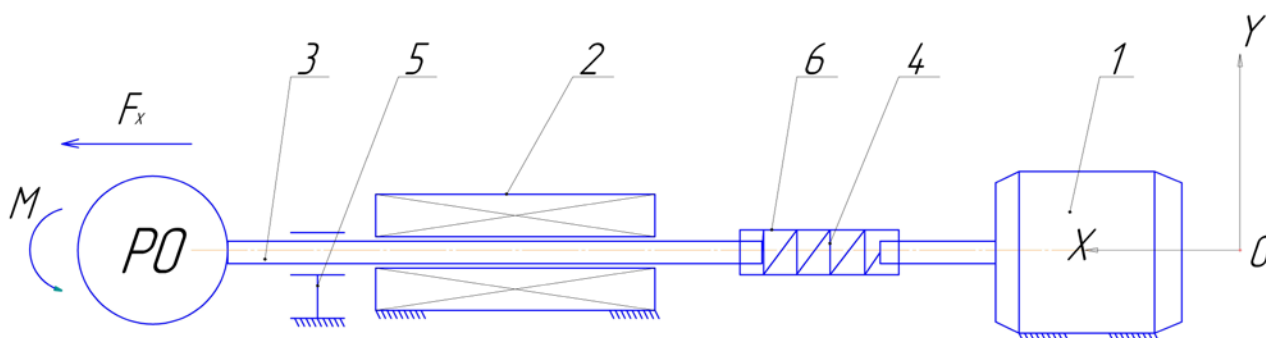


Рисунок 1.31

Кинематическая схема возвратно-поступательно-вращательного ЛЭП (модель 2):

- 1 – АД; 2 – ЛАД; 3 – вторичный элемент ЛАД; 4 – упругий элемент (УЭ);
5 – подшипники скольжения; 6 – шлицевое соединение

На рисунке 1.32 представлена третья модель линейного асинхронного электропривода, реализующего сложное колебательное движение в трех направлениях: продольная сила тяги F_x , нормальная F_y и сила F_z [187]. Сила F_z проявляется при несимметричном расположении вторичного элемента относительно индуктора ЛАД и стремится «вытолкнуть» вторичный элемент из рабочего зазора. Данный вид движения рабочего органа в трех направлениях непосредственно от ЛАД может быть эффективен в таких установках как: зерноочистительные установки; ситовые машины; рассева и т. д.

Как частный случай, можно выделить четвертую модель линейного асинхронного электропривода со сложным движением вторичного элемента, когда

вторичный элемент и рабочий орган при работе совершают плоскопараллельное движение относительно друг друга. Это возможно, если вторичный элемент или индуктор установить подвижно и подпружинено относительно рабочего органа [188]. Таким образом, в приводе возникает звено предварительного разгона, которое можно применить для плавного пуска и одновременного накопления «пусковой» энергии, при этом появляется возможность повышения эффективности работы инерционного конвейера с линейным асинхронным электроприводом. На рисунке 1.33 показаны способы реализации звена предварительного разгона ЛЭП – четвертая модель линейного асинхронного электропривода сложного колебательного движения.

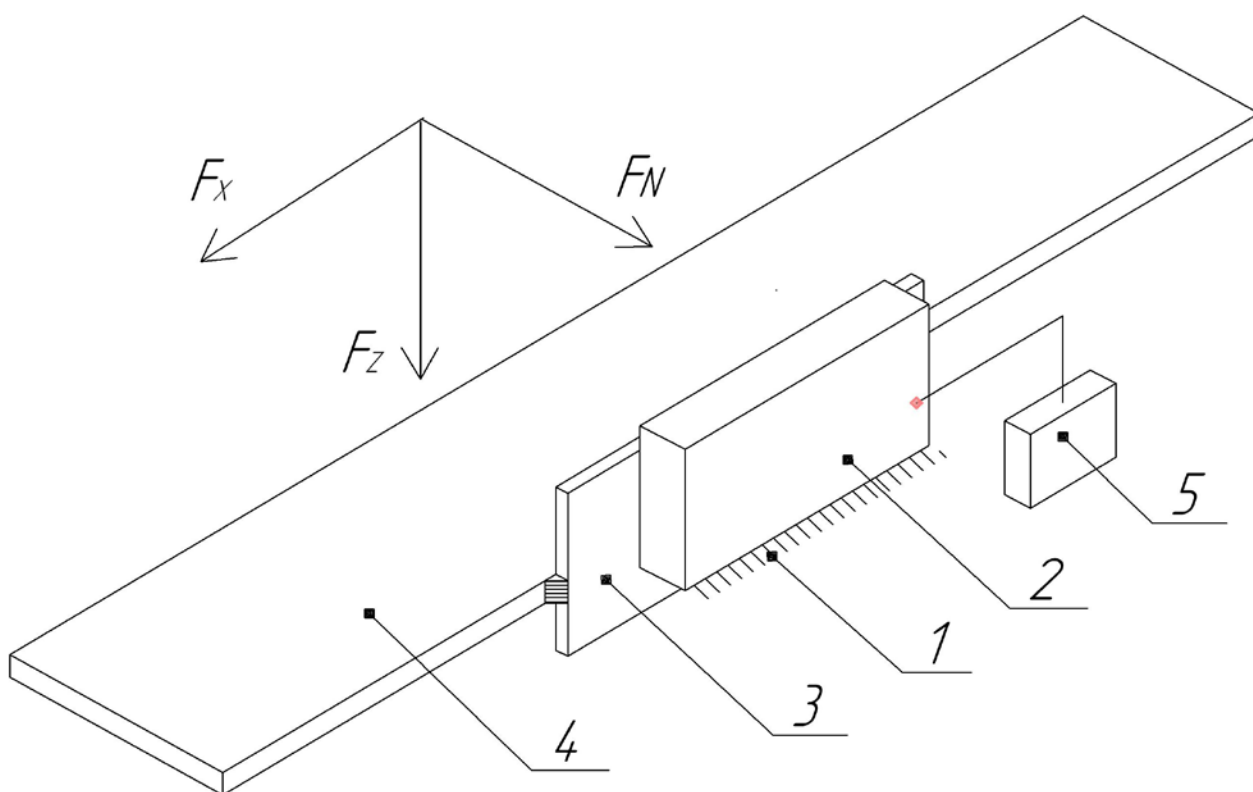


Рисунок 1.32

Кинематическая схемы ЛЭП с тремя развиваемыми усилиями (модель 3):

1 – основание; 2 – индуктор; 3 – вторичный элемент; 4 – рабочий орган; 5 – блок управления

Звено предварительного разгона – вторичный элемент (или индуктор), обеспечивает снижение длительности пусковых токов и динамических нагрузок, а также препятствует проскальзыванию груза в обратном направлении. Это осуществляется за счет того, что при включении ЛАД вся сила прикладывается не сразу к транспортирующему лотку, а постепенно через вторичный элемент (индуктор), который подпружинен относительно лотка. Применение линейного асинхронного электропривода в инерционном конвейере влажного сахара, картофеля и т. д. позволяет исключить промежуточные передаточные механизмы, тем самым снизить ресурс- и энергозатраты, а звено предварительного разгона линейного электропривода обеспечит плавный пуск, и тем самым, дополнительное повышение эффективности транспортирования и повышение энергоэффективности.

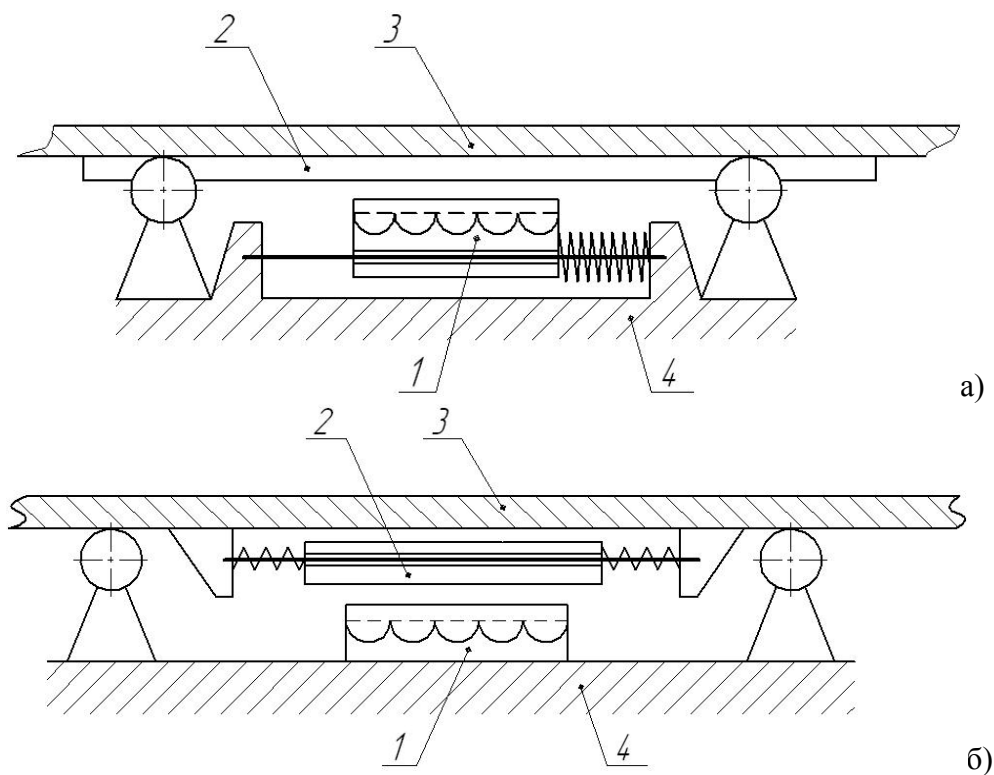


Рисунок 1.33

Кинематические схемы ЛЭП со звеном предварительного разгона (модель 4):
а – индуктора, *б* – вторичного элемента, 1 – индуктор; 2 – вторичный элемент;
 3 – транспортирующий лоток; 4 – основание

1.3 Выводы по главе

Анализ состояния технологии и технических средств в АПК для сортирования, очистки, шелушения и инерционного транспортирования приводит к следующим заключениям:

1. Электродвигатели вращения в приводе колебательного движения приводят к усложнению конструкции привода, снижению эффективности технологического процесса и эксплуатационных характеристик привода, ограничению возможности управления параметрами колебаний.

2. ЛЭП сложного колебательного движения позволяет по новому взглянуть на технологический процесс послеуборочной обработки с/х продукции, благодаря свойству ЛАД одновременно совершать движение и развивать усилия в нескольких направлениях.

3. Линейный асинхронный электропривод, за счет непосредственного преобразования электрической энергии в сложное колебательное движение рабочего органа, позволит улучшить технологические, энергетические и эксплуатационные характеристики машины, включая протекание переходных процессов в ЛАД.

4. Технологические машины с линейным асинхронным электроприводом, реализующим колебательное движение в нескольких направлениях, являются новыми, следовательно, малоизученными техническими решениями, что является сдерживающим фактором их применение в АПК.

ГЛАВА 2

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ РАСЧЕТА ЛАЭСЖД РАБОЧИХ ОРГАНОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН АПК

В реализации сложного колебательного движения рабочих органов технологических машин участвуют: ЛАД, накопители механической энергии, система управления. При этом необходимо учитывать присутствующие силы вязкого и сухого трения. Каждый из этих составляющих колебательной системы достаточно изучен и исследован, но совместно они не применялись для получения сложного колебательного движения рабочих органов технологического оборудования. Поэтому в этой главе приводится математический аппарат, позволяющий описывать совместную работу ЛАД, упругих элементов, системы управления, который позволил бы провести всесторонние исследования ЛАЭСЖД.

2.1 Теоретическое описание ЛАЭСЖД

2.1.1 Расчет развиваемых усилий ЛАД

Исследованием и применением в приводе машин различного целевого назначения линейных электрических двигателей занимались известные ученые, среди которых необходимо отметить: Вольдека А.И., Тийсмуса Х.А. Веселовского О.Н., Луковникова В.И., Петленко Б.И., Сарапулова Ф.Н., Свечарника Д.В., Соколова М.М., Коняев А.Ю., Сапсалева А.В., Епифанов А.П., Винокурова А.И., Епифанова А.П., Лейтуейта Е.Р., Насар С.А., Скобелева В.Е., Аипова Р.С., Ямамура С. и др.

Основное отличие ЛАД от асинхронных двигателей вращения заключается в разомкнутости магнитопровода, приводящей к появлению краевых эффектов и, как следствие, к большому ряду допущений. Такими допущениями являются общепринятые, связанные с понятием идеальной электрической машины [120, 219, 231], и допущения, характерные для ЛАД [193, 221].

Продольный краевой эффект особенно большое влияние оказывает на параметры высокоскоростных ЛАД [248]. При этом в режиме нормальной работы, характеризующимся малым значением скольжения, он существенно снижает движущую силу и коэффициент мощности ЛАД. Значительно уменьшается и КПД. Тем не менее при разгоне, когда значение скольжения лежит в интервале 0,2–1,0, краевой эффект не оказывает существенного влияния [248]. С другой стороны в многополюсных низкоскоростных двигателях при обычных для них диапазонах скольжения коэффициент продольного краевого эффекта настолько мало отличается от единицы, что в расчетах его можно не учитывать. Более или менее заметно краевой эффект начинает проявляться при скольжениях, меньше 0,4 и при числе пар полюсов меньше 3–4. Кроме того, величина воздушного зазора в ЛАД существенно больше, чем в обычном вращающемся асинхронном двигателе. Поэтому магнитная индукция в ЛАД снижается, активное сопротивление цепи намагничивания становится пренебрежимо малым, и его можно не учитывать [54].

Исследование рабочих процессов в ЛАД возможно по схемам замещения или на основе результатов решения задачи о структуре электромагнитного поля в различных частях двигателя [51, 58, 194, 231]. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки. Расчет электромагнитного поля дает большую информацию о характере и свойствах ЛАД, чем расчет по схемам замещения. Недостаток полевого метода – большая трудоемкость расчетов. Решение полевых задач при питании двигателя от источника напряжения приводит даже при немагнитной вторичной цепи к исключительно сложным выражениям для компонент электромагнитного поля [243, 244]. Другой особенностью, затрудняющей применение полевых методов для исследования ЛАД, является то, что известные решения уравнений электромагнитного поля в них проводятся при заданной токовой нагрузке в первичной части, которая обычно считается неизменной. Вместе с тем на стадии разработки привода с ЛАД линейная токовая нагрузка еще не известна, а допущения ее постоянства справедливы лишь в частном случае, когда комплексное сопротивление первичной цепи много больше эквивалентного сопротивления вторичной цепи и ветви намагничивания. Этот случай встречается редко, обычно при очень больших или «открытых» воздушных зазорах.

Электромагнитную силу ЛАД можно разложить на три составляющие [54]: продольную (F_x) – силу тяги; поперечную (F_z) – силу, стремящую вытолкнуть вторичный элемент из рабочего зазора; нормальную (F_y) – силу притяжения.

Без учета краевых эффектов схема замещения ЛАД может иметь вид, как в машинах вращения (рисунок 2.1) [269].

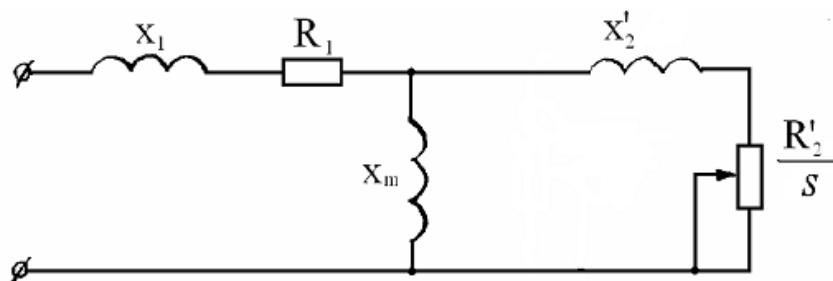


Рисунок 2.1
Схема замещения ЛАД

В этой схеме величины:

I_1 – ток индуктора;

R_1 и x_1 – активное и индуктивное сопротивление обмотки индуктора;

x_m – индуктивное сопротивление взаимоиндукции, определяющее реактивную мощность, необходимую для проведения потока взаимоиндукции через магнитный зазор;

R_2' , x_2' – приведённое активное и индуктивное эквивалентное сопротивление вторичного элемента;

S – скольжение.

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции x_m и активное сопротивление вторичного элемента R_2' определяются:

$$X_m = \frac{12\mu_0 \omega_1 a k_{w1}^2 W_1^2 \tau}{\pi^2 p g}, \quad (2.1)$$

$$R_2' = \frac{X_m}{G} = \frac{12 a k_{w1}^2 W_1^2}{d p \sigma \tau}. \quad (2.2)$$

Для листового вторичного элемента обмотки $x'_2 \sim 0$ [167].

Активное и индуктивное сопротивления обмотки индуктора:

$$R_1 = \frac{1}{\sigma_c} \frac{(4a + 2l_c)}{I_1} J_c W_1, \quad (2.3)$$

$$X_1 = \frac{2\mu_0 \omega_1}{p} \left[\left(\lambda_s \left(1 + \frac{3}{2p} \right) + \lambda_d \right) \cdot \frac{2a}{q} + \lambda_c l_c \right] W_1^2, \quad (2.4)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха;
 ω_1 – угловая скорость электрическая, с.⁻¹;
 a – эквивалентная половина ширины пакета стали первичной части, м;
 k_{w1} – обмоточный коэффициент индуктора;
 W_1 – число витков фазы;
 τ – полюсное деление, м;
 p – число пар полюсов;
 g – воздушный зазор, м;
 G – фактор качества;
 d – толщина пластины вторичного элемента, м;
 σ – электропроводность вторичного элемента, МОм·м;
 σ_c – электропроводность меди, МОм·м;
 a – половина ширины пакета стали первичной части, м;
 l_c – длина витка катушки, м;
 J_c – предполагаемая плотность тока, А/м²;
 I_1 – ток индуктора, А;
 $\lambda_s, \lambda_d, \lambda_e$ – коэффициенты, учитывающие специфику первичной обмотки.

Фактор качества G характеризует способность ЛАД преобразовывать электрическую энергию в механическую. Без учёта индуктивности рассеяния вторичного элемента фактор качества G определяется выражением [167]:

$$G = \frac{\mu_0 s \omega_1 \sigma_e \tau^2 d}{\pi^2 k_\delta k_\mu g_e}, \quad (2.5)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м;
 $\omega_1 = 2\pi f_1$ – угловая частота;
 k_δ – коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера);
 k_μ – коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи машины;

Таким образом, учитывая особенности ЛАД параметрами схемы замещения, сила тяга F_x может быть определена как:

$$F_x = \frac{3I_2'^2 R_2'}{2s f_1} = \frac{3I_1'^2 R_2'}{2s f_1 \left[\left(\frac{1}{sG} \right)^2 + 1 \right]}, \quad (2.6)$$

где I_2' – приведенный ток вторичного элемента, А.

Пренебрегая потерями в магнитопроводе, КПД и коэффициент мощности определяются как:

$$\eta_1 = \frac{F_x 2\tau f_1 (1-s)}{F_x 2\tau f_1 + 3I_1^2 R_1}, \quad (2.7)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{F_x 2\tau f_1 + 3I_1^2 R_1}{3V_1 I_1}. \quad (2.8)$$

Нормальная сила ЛАД с односторонним индуктором и составным вторичным элементом состоит из двух частей:

Сила притяжения F_{ya} между индуктором и магнитопроводом:

$$F_{ya} = \frac{a\mu_0 J_m^2 \tau^2 2p_1 \tau}{\pi^2 g^2 (1+sG^2)}, \quad (2.9)$$

где J_m – амплитуда линейной нагрузки токового слоя (первичной части), А/м.

Сила отталкивания F_{yr} между индуктором и вторичным элементом:

$$F_{yr} = -2a^2 \tau s \omega_1 dp_1 \frac{(\mu_0 J_m)^2 \tau^2 s G^2}{\pi^2 g^2 (1+sG^2)}, \quad (2.10)$$

В результате имеем следующую формулу для определения нормальной силы ЛАД:

$$F_y = F_{ya} + F_{yr} = 2a \frac{p_1 \tau^3}{\pi^2} \frac{\mu_0 J_m^2}{g^2 (1+s^2 G^2)} \left[1 - \left(\frac{\pi}{\tau} g s G \right)^2 \right]. \quad (2.11)$$

Рассмотренная схема замещения, составленная по одномерной модели предполагает наличие бесконечно широкой машины, когда токи во вторичной изотропной полосе имеют только z-составляющую. В реальных условиях токи, протекающие в противоположных направлениях в зонах соседних полюсов, должны замыкаться по некоторым продольным путям, т. е. иметь также x-составляющие (рисунок 2.2, а и б) [54]. Эти продольные составляющие вторичного тока создают «размагничивающее» действие в зоне индуктора, ослабляя индукцию магнитного поля. Характерные провалы седлообразный вид распределения индукции показаны на рисунке 2.2, в, на котором видно, что размагничивающее действие поперечного краевого эффекта тем ярче, чем больше скольжение ($s_2 > s_1$) и чем дальше от края к центру индуктора.

Благодаря этим краевым эффектам возникает поперечная сила на вторичной части, если ее несколько сместить асимметрично. Эта сила, которая стремится вытолкнуть вторичную часть из воздушного зазора, вызвана взаимодействием J_{2x} и H_y в активной части.

Обозначая поперечную (боковую) силу F_z , [167]:

$$F_z = \mu_0 dp \tau \operatorname{Re} \int_{-a}^a J_{2x} H_{yr} dz, \quad (2.12)$$

где J_{2x} – плотность тока в обмотке вторичной части, А/м²;

H_{yr} – напряженность магнитного поля, А/м.

Для ослабления влияния продольных составляющих тока вторичный элемент обычно изготавливают более широким, чем индуктор на размер вылета (с–b) с каждой стороны, и тогда продольные составляющие замыкаются в значительной своей части за пределами индуктора [54].

Увеличение «вылета» (с–b) больше чем на 40 % по сравнению с полюсным делением не оказывает заметного влияния на эквивалентную проводимость вторичного элемента и, следовательно, не имеет практического смысла.

При симметричном расположении вторичного элемента в воздушном зазоре поперечной силой можно пренебречь.

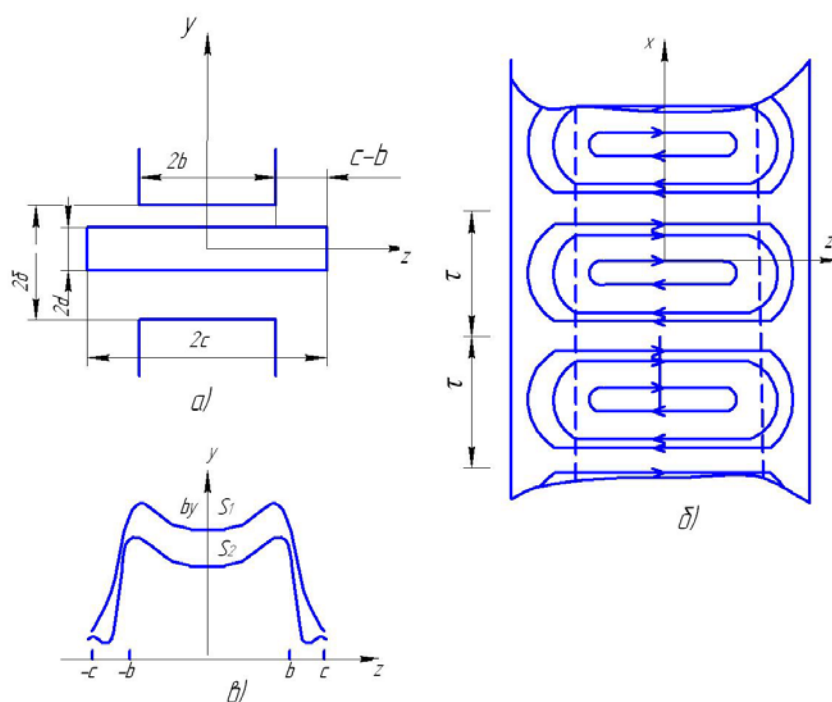


Рисунок 2.2

Иллюстрация поперечного краевого эффекта

Создавать системы электропривода сложного колебательного движения, которые в большей мере отвечали требованиям производственных машин необходимо с учетом электромагнитных переходных процессов в ЛАД. Вопросам исследования электромагнитных переходных процессов в ЛАД и электроприводах возвратно-поступательного движения в литературе уделялось сравнительно мало внимания. Теория электромагнитных переходных процессов разрабатывалась применительно к электрическим машинам вращательного движения и трансформаторам. В ее создании важное значение сыграли работы Р. Рюденберга, Р. Парка, А.А. Горева, Г. Стенлея, Г. Крона, Трещева И.И., Е.Я. Казовского, А.А. Янко-Триницкого, К.П. Ковача, И. Раца и др.

В настоящей работе для исследования динамики ЛАД выбран метод, заключающийся в описании двигателя дифференциальными уравнениями, составленными на основе схемы замещения, по следующим обстоятельствам. Во-первых, при исследовании низкоскоростных ЛАД приходится идти на компромисс, связанный с противоречивыми обстоятельствами. С одной стороны, общий алгоритм не должен быть связан с конкретным типом ЛАД, с другой стороны, полное решение возможно только с учетом упрощающих допущений, зависящих от конструктивных особенностей устройства, поэтому отпадают трудности, связанные с определением параметров схемы замещения. Во-вторых, число исследуемых параметров схемы замещения меньше, чем при решении полевой задачи, что уменьшает время исследования и позволяет более просто проследить взаимосвязь электромагнитных и электромеханических процессов от параметров двигателя. В-третьих, существенно уменьшается объем вычисли-

тельной работы и, как следствие, появляется возможность исследовать большее количество вариантов.

При моделировании ЛАД принимаются следующие общепринятые допущения: магнитная цепь машины не насыщена, явление гистерезиса и потерь в стали не учитываются, магнитное поле обмотки считается распределенным синусоидально по длине рабочего зазора двигателя, принимается, что рабочий зазор равномерен, обмотки ЛАД и система напряжений симметричны, температура двигателя постоянна, вторичный элемент полностью занимает активную зону по длине индуктора, индуктивные сопротивления рассеяния не зависят от положения вторичного элемента.

Общность физических явлений позволяет при выводе уравнения ЛАД взять за основу известную систему дифференциальных уравнений Парка – Горева для двигателя вращательного движения [240]. Исследование ЛАД по уравнениям Парка – Горева проводилось и другими авторами [132, 221, 240].

Для записи уравнений ЛАД важным является выбор системы координатных осей. Первая система координатных осей является неподвижной относительно вторичного элемента. В этой системе координат контуры вторичного элемента остаются неизменными, а контуры индуктора преобразуются к координатным осям, перемещающимся вместе с вторичным элементом. Эта система обычно применяется для исследования несимметрии вторичной цепи. Вторая система координатных осей является неподвижной относительно индуктора. Применяется для исследования несимметрии обмотки индуктора. Третья система осей – O, X, Y , движущаяся в пространстве с синхронной скоростью, предпочтительна для исследования как установившихся, так и переходных режимов асинхронных машин, имеющих электрическую и магнитную симметрию [221, 231, 240]. В этой системе координат преобразуются контуры индуктора и вторичного элемента. Уравнения Парка – Горева, записанные для ЛАД в системе координатных осей O, X, Y , имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{x1}}{dt} &= U_{x1} - \frac{\pi}{\tau} V_0 \frac{R_1 X_r}{X_s X_r - X_m^2} \psi_{x1} + \frac{\pi}{\tau} V_0 \frac{R_1 X_m}{X_s X_r - X_m^2} \psi_{x2} + \frac{\pi}{\tau} V_0 \psi_{y1} \\ \frac{d\psi_{y1}}{dt} &= U_{y1} - \frac{\pi}{\tau} V_0 \frac{R_1 X_r}{X_s X_r - X_m^2} \psi_{y1} + \frac{\pi}{\tau} V_0 \frac{R_1 X_m}{X_s X_r - X_m^2} \psi_{y2} + \frac{\pi}{\tau} V_0 \psi_{x1} \\ \frac{d\psi_{x2}}{dt} &= \frac{\pi}{\tau} V_0 \frac{R'_2 X_s}{X_s X_r - X_m^2} \psi_{x2} + \frac{\pi}{\tau} V_0 \frac{R'_2 X_m}{X_s X_r - X_m^2} \psi_{x1} + \frac{\pi}{\tau} (V_0 - V) \psi_{y2} \\ \frac{d\psi_{y2}}{dt} &= \frac{\pi}{\tau} V_0 \frac{R'_2 X_s}{X_s X_r - X_m^2} \psi_{y2} + \frac{\pi}{\tau} V_0 \frac{R'_2 X_m}{X_s X_r - X_m^2} \psi_{y1} + \frac{\pi}{\tau} (V_0 - V) \psi_{x2} \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{(F_x - F_c)}{m}; \end{aligned} \right\}, \quad (2.13)$$

где U_{X1}, U_{Y1} – напряжение индуктора по осям OX, OY ,

τ – полюсное деление обмотки ЛАД,

$X_s = X_1 + X_m, X_r = X'_2 + X_m$ – значения сопротивлений, вводимых в модель,

V_0 – синхронная скорость двигателя,

$\psi_{X1}, \psi_{Y1}, \psi_{X2}, \psi_{Y2}$ – потокосцепления по осям OX, OY соответственно индуктора и вторичного элемента,

V – скорость вторичного элемента.

Электромагнитные силы в ЛАД могут быть определены так же, как и электромагнитный момент во вращающихся машинах, по изменению сконцентрированной в воздушном зазоре энергии магнитного поля при бесконечно малом перемещении вторичного элемента в направлении действия сил в условии постоянства потокосцеплений.

Сила тяги с учетом переходных процессов определяется по дифференциальным уравнениям (2.13) и имеет следующий вид:

$$F_x = \frac{3}{2} \frac{\pi \omega_0}{\tau} \frac{X_m}{X_s X_r - X_m^2} (\psi_{x2} \psi_{y1} - \psi_{x1} \psi_{y2}). \quad (2.14)$$

Силы взаимодействия между первичной и вторичной частями ЛАД, действующие перпендикулярно к силе тяги F_x , называются нормальными. Как отмечалось, в ЛАД существует два вида нормальных сил. Одна – это сила притяжения, возникающая между двумя поверхностями стали, такими, как сердечник первичной части и магнитопровод вторичной части одностороннего ЛАД. Другая – это сила отталкивания, обусловленная взаимодействием токов первичной и вторичной частей, появляется, когда магнитопровод одностороннего ЛАД не шихтован, из-за вихревых токов, наведенных в массивном магнитопроводе.

Результирующая нормальная сила развиваемая ЛАД с учетом переходных процессов определяется следующим образом:

$$F_Y = \frac{\pi \omega_0}{2 \delta \tau} \left[\frac{(\psi_{y2} i_{x2} - \psi_{x2} i_{y2}) i_{x2}}{(i_{x2} i_{y1} - i_{y2} i_{x1}) i_{x1}} (i_{x2} + i_{x1})^2 + \frac{(\psi_{y1} i_{x1} + \psi_{x1} i_{y1})}{(i_{x1} i_{y2} - i_{y1} i_{x2})} (i_{y2} + i_{y1})^2 \right], \quad (2.15)$$

где i_{x1}, i_{y1} – составляющие тока индуктора по осям X и Y;

i_{x2}, i_{y2} – составляющие тока вторичного элемента по осям X и Y;

δ – воздушный зазор, м.

Составляющие токов по осям X и Y определяются через потокосцепления из следующих выражений [113, 119, 215, 219]:

$$\left. \begin{aligned} i_{x1} &= \left[\frac{X_r}{X_s \cdot X_r - X_m^2} \right] \cdot \psi_{x1} - \left[\frac{X_m}{X_s \cdot X_r - X_m^2} \right] \cdot \psi_{x2} \\ i_{y1} &= \left[\frac{X_r}{X_s \cdot X_r - X_m^2} \right] \cdot \psi_{y1} - \left[\frac{X_m}{X_s \cdot X_r - X_m^2} \right] \cdot \psi_{y2} \\ i_{x2} &= \left[\frac{X_s}{X_s \cdot X_r - X_m^2} \right] \cdot \psi_{x2} - \left[\frac{X_m}{X_s \cdot X_r - X_m^2} \right] \cdot \psi_{x1} \\ i_{y2} &= \left[\frac{X_s}{X_s \cdot X_r - X_m^2} \right] \cdot \psi_{y2} - \left[\frac{X_m}{X_s \cdot X_r - X_m^2} \right] \cdot \psi_{y1} \end{aligned} \right\}. \quad (2.16)$$

По значениям токов идеализированной двухфазной машины (2.16) находятся токи статора реальной трехфазной машины (2.17) при использовании формул обратных преобразований.

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i_{x1} \cdot \cos \omega_0 t - i_{y1} \sin \omega_0 t \\ i_B &= i_{x1} \cdot \cos(\omega_0 t - 120) - i_{y1} \sin(\omega_0 t - 120) \\ i_C &= i_{x1} \cdot \cos(\omega_0 t + 120) - i_{y1} \sin(\omega_0 t + 120) \end{aligned} \right\}. \quad (2.17)$$

При совершении вторичным элементом сложного движения относительно индуктора ЛАД меняются параметры схемы замещения двигателя. При этом представленный математический аппарат позволяет рассчитать силу тяги F_x и нормальную силу F_y ЛАД как без учета, так и с учетом электромеханических переходных процессов. Если необходимо реализовать сложное движение вторичного элемента с продольной силой тяги F_z , стремящуюся вытолкнуть вторичный элемент из воздушного зазора, то возникает вопрос, связанный с расчетом параметров схемы замещения ЛАД, т. к. вторичный элемент располагается ассиметрично индуктору. Кроме того, при низких скоростях продольные краевые эффекты, которыми обусловлена сила F_z , не играют существенной роли в ЛАД [167]. Поэтому в дальнейшем продольная сила F_z в динамике рассматриваться не будет.

2.1.2 Накопители механической энергии

Необходимыми элементами разрабатываемых приводов, кроме ЛАД и системы управления, являются упругие накопители механической энергии. Они предназначены для остановки рабочего органа с одновременным преобразованием его кинетической энергии в потенциальную с последующим ее возвратом в колебательную систему в виде разгона рабочего органа в обратном направлении. В качестве упругих накопителей могут быть использованы различные устройства, среди которых наибольшее значение имеют цилиндрические винтовые пружины, обеспечивающие стабильность настройки, сравнительно небольшие габаритные размеры и массы, простые в сборке и выносливые при применении [3, 6].

Под воздействием определённой нагрузки пружина значительно меняет свою первоначальную форму, однако изменения остаются упругими, и после снятия нагрузки она возвращается в базовое состояние. Деформация пружины в заданных пределах нагрузок, соответствующих упругости материала пружины, с определённой степенью точности соответствует закону Гука.

Изготовление пружин является процессом специализированным и состоит из нескольких производственно-технологических этапов: расчёт пружин, проектирование пружин, навивка пружин (образование закрученной формы) и термообработка пружин.

На этапе расчёта пружин определяются габариты пружины и её основные эксплуатационные характеристики, в частности, способность выдерживать заданные нагрузки. Этот этап очень важен и допускает лишь небольшие расчётные погрешности, превышение которых может привести к отбраковке всей изготовленной партии изделий.

Рабочий режим пружины можно охарактеризовать такими динамическими параметрами, как цикличность и скорость нагрузки. В комплектации с рабочим чертежом идёт диаграмма рабочего процесса, на которой представлена зависимость стрелы поджатия от испытываемых нагрузок.

Одним из основных параметров пружины является её жёсткость, представляющая собой отношение усилия к стреле поджатия. Пружины разделяют

на классы, виды и разряды. В таблице 2.1 приведен класс пружин согласно ГОСТ 13764-86, на основе которого и производится расчет цилиндрических пружин сжатия и растяжения.

Класс пружин характеризует режим нагружения и выносливости, а также определяет основные требования к материалам и технологии изготовления. Разряды пружин отражают сведения о диапазонах сил, марках применяемых пружинных сталей, а также нормативах по допускаемым напряжениям. Отсутствие соударения витков у пружин сжатия определяется условием $v_{max}/v_k \leq 1$, где v_{max} – наибольшая скорость перемещения подвижного конца пружины при нагружении или при разгрузке, м/с; v_k – критическая скорость пружин сжатия, м/с (соответствует возникновению соударения витков пружины от сил инерции).

Таблица 2.1 Классы пружин (ГОСТ 13764-86)

Класс пружин	Вид пружин	Нагружение	Выносливость N_p (установленная безотказная наработка), циклы, не менее	Инерционное соударение витков
I	Сжатия и растяжения	Циклическое	$1 \cdot 10^7$	Отсутствует
II		Циклическое и статическое	$1 \cdot 10^5$	
III	Сжатия	Циклическое	$2 \cdot 10^3$	Допускается

При определении размеров пружин необходимо учитывать, что при $v_{max} > v_k$, помимо касательных напряжений кручения, возникают контактные напряжения от соударения витков, движущихся по инерции после замедления и остановок сопрягаемых с пружинами деталей. Если соударение витков отсутствует, то лучшую выносливость имеют пружины с низкими напряжениями, т. е. пружины класса I по табл. 2.1, промежуточную – циклические пружины класса II и худшую – пружины класса III. При наличии интенсивного соударения витков выносливость располагается в обратном порядке. В таком же порядке располагается и стойкость, т. е. уменьшение остаточных деформаций или осадок пружин в процессе работы.

Средствами регулирования выносливости и стойкости циклических пружин в рамках каждого класса при неизменных заданных значениях рабочего хода служат изменения разности между максимальным касательным напряжением при кручении и касательным напряжением при рабочей деформации.

При моделировании ЛАЭСЖД рабочих органов упругие элементы представляются жесткостью пружин.

2.2 Математические модели ЛАЭСЖД технологического оборудования АПК

Для определения эффективности работы технологических машин с ЛАЭСЖД необходимо разработать их математические модели, позволяющие получить временные зависимости сил, действующих на рабочий орган и обрабатываемый материал, их ускорения, скорости, перемещения, а также временные зависимости параметров привода с ЛАД. Полученные математические мо-

дели дадут возможность исследовать взаимосвязи в электроприводе рабочих органов, что позволит производить оптимальное проектирование технологических машин для достижения максимальной эффективности работы привода при минимальных энерго- и ресурсозатратах.

2.2.1 Математическая модель ЛАЭСЖД решетного стана зерноочистительной установки

Для понимания процесса очистки зернового материала от сорных примесей рассмотрим теорию его инерционного движения по поверхности решетного стана. Эффективность очистки зернового материала зависит от многих параметров, но при этом определяющим является закон колебаний решетного стана. В зерноочистительной машине направленное движение зерен очищаемой культуры происходит, когда временная зависимость ускорения решетного стана наиболее схожа с одним из теоретических законов колебаний [114] (рисунок 2.3). Наиболее эффективным из этих законов является закон колебаний с кусочно-постоянным ускорением, предложенный В.А. Троицким. Сравнивая полученные характеристики с графиком ускорения зерноочистительной машины традиционного привода, можно сделать вывод о том, что они отличаются от существующего закона колебаний с синусоидальной формой движения рабочего органа. Поэтому для обеспечения наиболее эффективного закона движения решетного стана необходимо, чтобы ЛЭП работал в режиме автоколебаний, при этом достигается наиболее близкий по форме закон ударно-вибрационных колебаний (рисунок 2.3,в) [114].

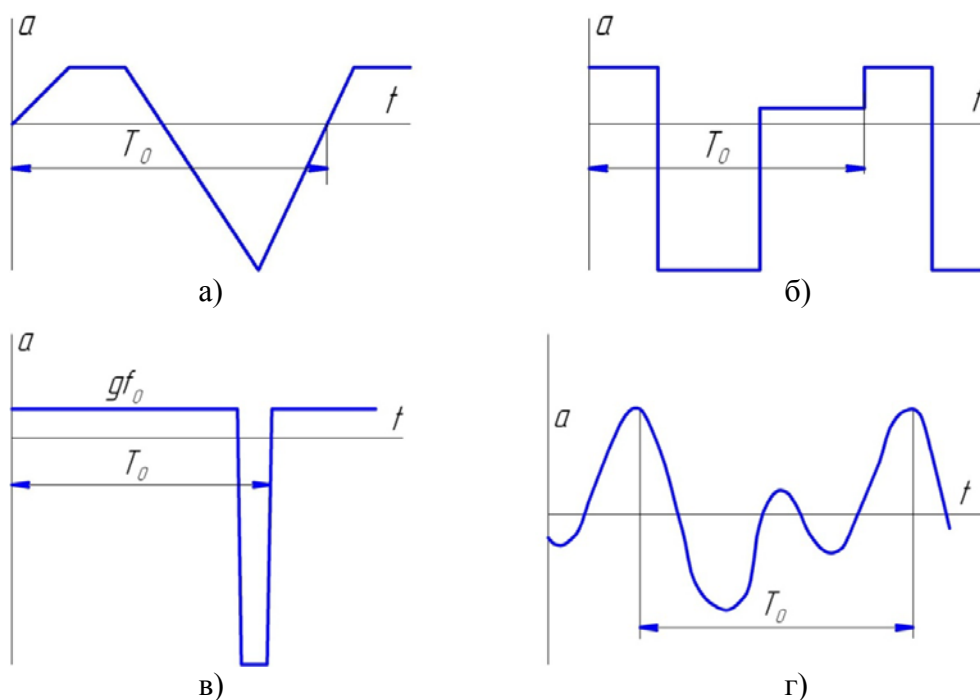


Рисунок 2.3

Оптимальные законы колебаний инерционных конвейеров:

а – колебания с кусочно-линейным ускорением; б – колебания с кусочно-постоянным ускорением; в – ударно-вибрационные колебания; г – бигармонические колебания

Закон колебаний описывается следующей системой уравнений:

$$a_{pc} = \begin{cases} gf_{k0} & \text{при } 0 < t < t_1 = \frac{T_0}{k_f + 1} \\ -a_{pc \max} & \text{при } t_1 < t < T_0 \end{cases}, \quad (2.18)$$

где a_{pc} – ускорение решетного стана;
 g – ускорение свободного падения;
 f_{k0} – коэффициент трения покоя зерна;
 T_0 – период колебаний;
 $a_{pc \max}$ – максимальное ускорение решетного стана;
 $k_f = a_{pc \max} / (gf_{k0})$ – эффективный коэффициент перегрузки.

Следует отметить, что полученную форму движения решетного стана невозможно описать традиционной синусоидальной формой.

На основе вышеизложенного предлагается кинематическая схема привода решетного стана зерноочистительной установки с автоколебательным ЛАЭСД (рисунок 2.4), соответствующая следующим требованиям: простота конструкции и удобство в эксплуатации, устойчивость режимов работы и возможность регулирования кинематических и технологических параметров, возможность визуального наблюдения процесса сепарации [150, 151, 152].

Схема работает следующим образом. Блок управления (на рисунке 2.4 не показан) подключает индуктор 7 плоского ЛАД к источнику напряжения, при этом на индукторе создается бегущее электромагнитное поле. Взаимодействие бегущего электромагнитного поля индуктора 7 с бегуном 5 заставляет последний, а, следовательно, и решетный стан, двигаться в направлениях сил F_x и F_y . Решетный стан 1 (рисунок 2.4), подвешенный на шарнирно закрепленных упругих подвесках 6 одинаковой длины под углом α к горизонтали по оси OX , при включении ЛАД под действием силы F_y (поперечное направление) притягивается к индуктору 7, а под действием силы F_x (продольное направление) приходит в поступательное движение в сторону бегущего электромагнитного поля.

При этом упругие элементы 3 и 4 деформируются (цилиндрические винтовые пружины). В какой-то момент времени происходит отключение индуктора ЛАД от источника питания. Под действием потенциальной энергии, накопленной в упругих элементах 3 и 4, решетный стан 1 движется в обратном направлении. При этом за счет резкого торможения решетного стана 1 происходит инерционное перемещение зернового материала. Таким образом, решетный стан совершает возвратно-поступательное движение с продольно-поперечными колебаниями. Частицы зерновой смеси, не прошедшие сквозь решето, поступают на лоток проходовой фракции, а частицы, прошедшие сквозь ячейки решета, попадают на лотки сходовой фракции. Подача зернового материала осуществляется из бункера.

Для исключения соприкосновения бегуна 5 с неподвижным индуктором 7 ЛАД под действием силы F_y на основании 2 зерноочистительной машины установлены подпружиненные упорные ролики (на рисунке не показаны), ограничивающие ход решетного стана по направлению силы F_y (сила сопротивления роликов, противодействующая силе F_y , незначительна, поэтому в дальнейшем её значением пренебрегаем). Необходимая форма траектории и скорость дви-

жения зернового материала обеспечивается правильным подбором жесткости упругих элементов 3 и 4, положением оптических датчиков включения и отключения, а также мощностью ЛАД.

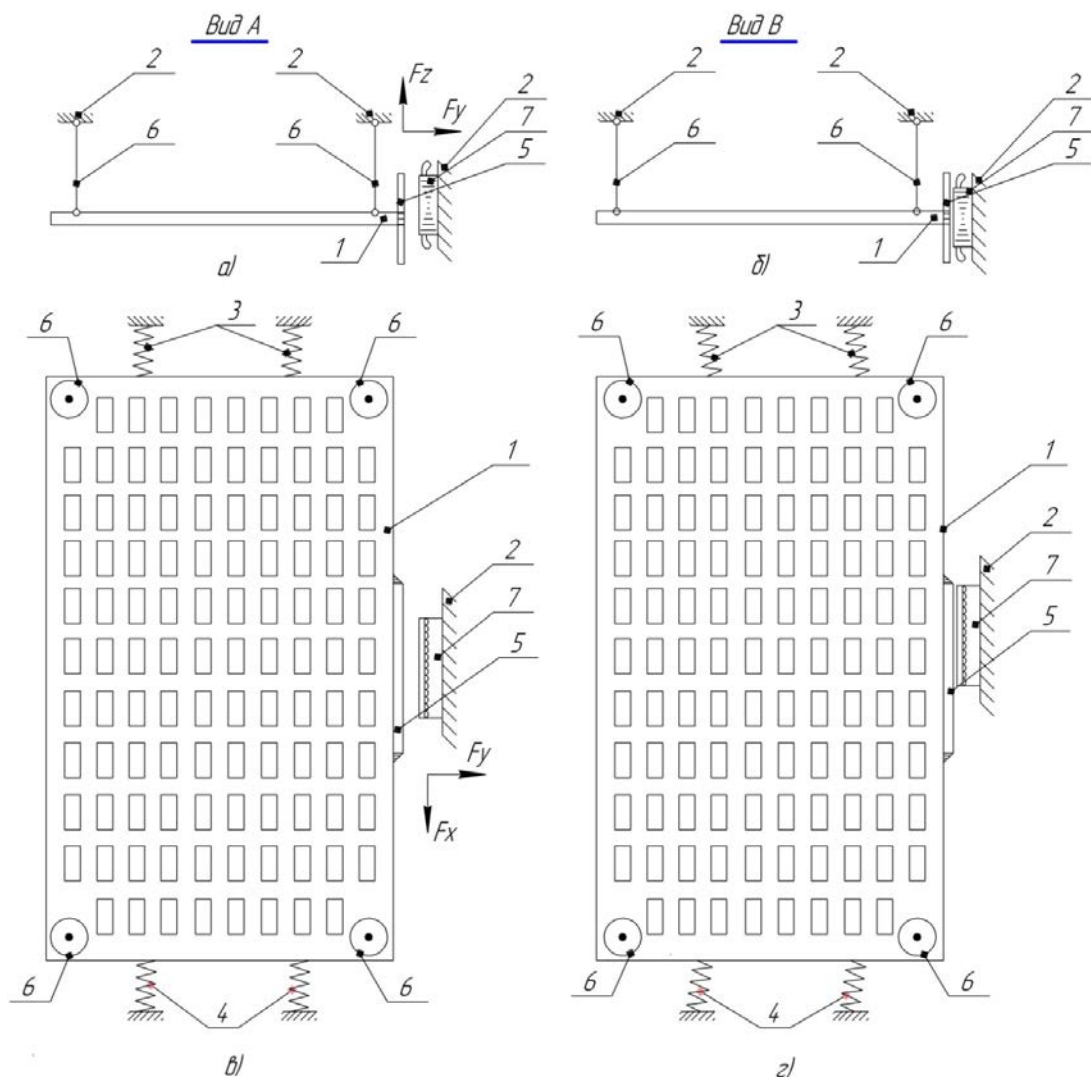


Рисунок 2.4

Кинематическая схема ЛАЭСКД решетного стана:

- вид А – положение решетного стана до подключения ЛАД к источнику питания;
- вид В – одно из возможных положений решетного стана после подключения ЛАД к источнику питания; а, б – главный вид (вид спереди); в, г – вид сверху; 1 – решетный стан;
- 2 – основание; 3, 4 – упругие элементы; 5 – вторичный элемент плоского ЛАД;
- 6 – упругие подвески; 7 – индуктор плоского ЛАД

Рисунок 2.4 наглядно иллюстрирует отсутствие механической связи между индуктором 7 ЛАД, жестко установленном на основании 2, и бегуном 5 ЛАД, жестко закрепленном на решетном стане 1.

Предложенная схема обладает следующими преимуществами:

- исключается механический преобразователь вращательного движения вала электродвигателя в возвратно-поступательное движение рабочего органа, что упрощает конструкцию привода решетного стана;
- сокращается время технического обслуживания и уменьшается количество текущих ремонтов;

- значительно уменьшаются динамические нагрузки, вызывающие вибрацию рамы машины;
- снижается общий уровень шума при работе установки;
- появляются новые возможности в работе зерноочистительной машины, которые повышают эффективность последней за счет создания вместо традиционных продольных и круговых колебаний чётко выраженных продольно-поперечных колебаний решетного стана.

Моделирование процесса движения зерна по колеблющейся поверхности решетного стана проводится при допущениях, общепринятых при решении аналогичных задач: частица зерновой смеси является материальной точкой, между поверхностью решетного стана и зерновой смесью присутствует только сила сухого трения, подчиняющаяся закону Кулона, масса зерновой смеси, находящейся на поверхности решетного стана, в течение времени моделирования остается постоянной.

На рисунке 2.5 представлена схема сил, действующих на решетный стан и зерновой материал. Система координат XOY неподвижна относительно индуктора ЛАД зерноочистительной машины. При подаче блоком управления напряжения питания на индуктор ЛАД возникает сила тяги ЛАД F_x , создающая поступательное линейное перемещение решетного стана по оси OX , и нормальная сила F_y – сила притяжения, перпендикулярная к направлению продольной силы F_x и направленная по оси OY .

Силе F_x противодействуют:

- сила деформированных упругих элементов $F_{k,x}$, одним концом закрепленные на решетном стане, а другим – на основании зерноочистительной машины (взаимодействие рабочего органа с упругими элементами начинается уже в момент пуска ЛАД);
- сила инерции решетного стана $F_{pc,x}$;
- сила трения зерна о поверхность решетного стана $F_{тр.з.х}$;
- сила сопротивления подвесок $F_{подв.х}$.

Силе F_y противодействуют силы, аналогичные с силами, перечисленными выше, но направленные по оси OY .

При достижении решетным станом оптического датчика 10 с координатами $S_{выкл}$ происходит отключение питания индуктора ЛАД. Решетный стан останавливается и изменяет направление движения на обратное. В этот момент зерновой материал совершает инерционное движение по поверхности решетного стана.

При достижении решетным станом координаты $S_{вкл}$ блок питания вновь подключает ЛАД к сети и процесс повторяется. Принято, что зерновой материал находится в геометрическом центре решетного стана и все силы действуют на центры масс решетного стана и зернового материала, в итоге, степени свободы равны двум.

Индуктор ЛАД подключен к сети через блок управления, обеспечивающий коммутацию напряжения обмотки статора по сигналам бесконтактных датчиков положения решетного стана, отслеживающих его координаты и направление движения по оси OX .

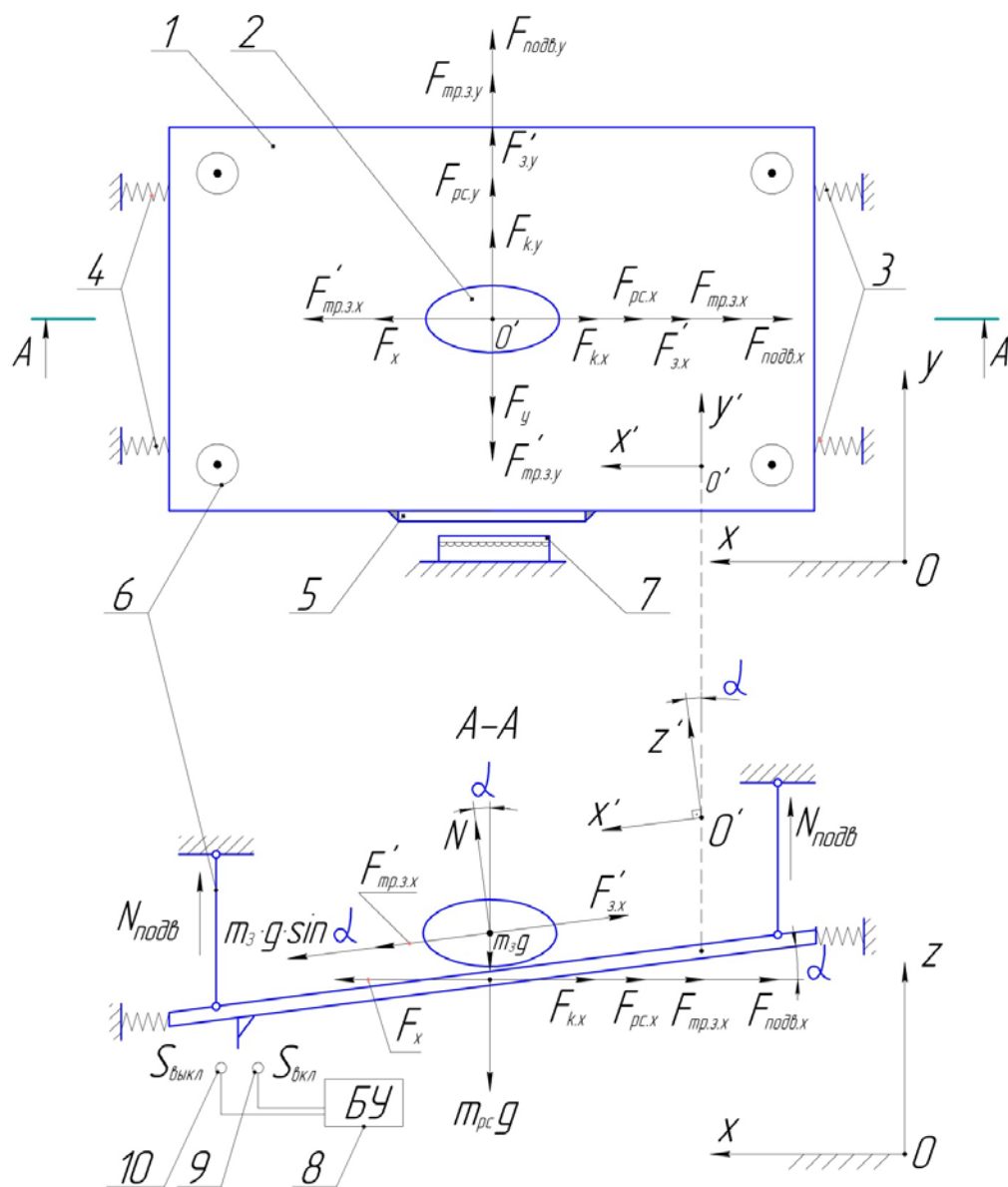


Рисунок 2.5

Схема сил, действующих на решетный стан и зерновой материал:
 1 – решетный стан; 2 – зерновой материал; 3, 4 – упругий элемент; 5 – вторичный элемент ЛАД; 6 – упругая подвеска; 7 – индуктор ЛАД; 8 – блок управления;
 9 – датчик включения ЛАД; 10 – датчик выключения ЛАД

Для математического описания движения решетного стана и зернового материала приняты системы координат XOY , неподвижная относительно индуктора ЛАД, и $X^1O^1Y^1$, неподвижная относительно решетного стана. Причем координаты перемещения зернового материала в этих системах имеют следующую зависимость:

$$y'_z = y_z - y_{p.c.}, \quad x'_z = (x_z - x_{p.c.}) \cdot \cos \alpha, \quad (2.19)$$

где y'_z, x'_z – координаты перемещения зернового материала относительно решетного стана, по осям OY^1 и O^1X^1 , соответственно, м;

y_z, x_z – координаты перемещения зернового материала относительно индуктора, по осям OY и OX , соответственно, м;

$y_{p.c.}, x_{p.c.}$ – координаты перемещения решетного стана относительно индуктора, по осям OY и OX , соответственно, м.

При подаче блоком управления напряжения питания на индуктор ЛАД возникает сила F_y – сила притяжения, перпендикулярная поверхности индуктора ЛАД и направленная по оси OY , и сила тяги ЛАД F_x , создающая поступательное линейное перемещение решетчатого стана по оси OX . Т. к. сила F_y в разы больше силы F_x и амплитуда поперечного движения в 10...12 раз меньше, чем амплитуда продольного перемещения, можно считать, что поперечное и продольное перемещение решетчатого стана происходят поочередно, а не одновременно.

Принцип работы автоколебательного ЛАЭСКД зерноочистительной машины описывается математической моделью, составленной на основе уравнений (2.19...2.50).

Основными уравнениями при математическом моделировании являются [30]:

$$\left. \begin{aligned} a_{pc} &= \frac{F_x - F_{kx} - F_{тр.з.х}^1 \cdot \cos \alpha - F_{подв.х}}{m_{pc}} \\ V_{pc} &= \int_0^T a_{pc} dt, \quad x_{pc} = \int_0^T V_{pc} dt \\ F_{тр.з.х}^1 &= N_3 \cdot f_3 = m_3 (g \cdot \cos \alpha + a_{3.х} \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot f_3 \\ V_{3.х}^1 &= \int_0^T a_{3.х}^1 dt, \quad x_{3.х}^1 = \int_0^T V_{3.х}^1 dt \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

где a_{pc} , V_{pc} , x_{pc} – соответственно ускорения, скорости и координаты перемещения решетчатого стана по оси OX , м/с^2 , м/с , м ;

$a_{3.х}^1$, $V_{3.х}^1$, $x_{3.х}^1$ – соответственно ускорения, скорости и координаты перемещения зернового материала по оси O^1X^1 м/с^2 , м/с , м ;

T – время моделирования, с;

$m = m_{pc} + m_3$ – масса решетчатого стана вместе с зерновым материалом, кг;

m_3 – масса зернового материала, кг;

m_{pc} – масса решетчатого стана, кг;

F_x – сила тяги ЛАД, Н;

$F_{k.х}$ – сила деформированных упругих элементов, Н/м;

$F_{pc.х}$ – сила инерции решетчатого стана, Н;

$F_{тр.з.х}$ – сила трения зерна о поверхность решетчатого стана, Н;

$F_{подв.х}$ – сила сопротивления подвесок, Н.

Основная система (2.20) включает в себя уравнение динамики линейного колебательного асинхронного электропривода, уравнение движения материальной точки по колеблющейся поверхности, а также интегралы ускорений и скоростей зернового материала и решетчатого стана.

Индуктор ЛАД подключен к сети через блок управления, обеспечивающий коммутацию напряжения обмотки статора по сигналам бесконтактных датчиков положения решетчатого стана, отслеживающих его координаты и направление движения по оси OX . Включение и выключение индуктора осуществляется по релейному закону в функции координаты вторичного элемента (решетчатого стана).

Поэтому подаваемое напряжение обмотки индуктора U_u :

Если $V_{pc.x} \geq 0$ и $S_{выкл} \geq X_{pc.x} \geq S_{вкл}$, то $U_u = U_{ист}$, иначе $U_u = 0$;

$$U_u = U_{ист} \cdot \theta(V_{pc.x}) \cdot \theta(X_{pc.x} - S_{вкл}) \cdot \theta(S_{выкл} - X_{pc.x}), \quad (2.21)$$

где $U_{ист}$ – напряжения источника питания, В;

$S_{вкл}, S_{выкл}$ – координаты датчика включения выключения на оси OX , м;

$\theta(x)$ – функция Хевисайта.

На решетный стан по оси OX действуют силы:

$$\sum F = 0; F_x - F_{k.x} - F_{тр.з.х}^1 \cdot \cos \alpha - F_{подв.х} - F_{pc.x} = 0, \quad (2.22)$$

где $F_x = f(U_u, V_{жс}, X_m, X_1, R_1, X'_2, R'_2)$ – продольная сила, развиваемая ЛАД, подчиняющаяся уравнению электромеханического преобразования энергии и зависящая от значений подаваемого напряжения, скорости вторичного элемента и параметров схемы замещения, Н;

$F_{k.x}$ – суммарная сила сопротивления упругих элементов, подчиняющаяся закону Гука, Н,

$$F_{k.x} = k_x x_{p.c}, \quad (2.23)$$

где k_x – коэффициент жесткости упругих элементов, Н/м;

$F_{подв.х}$ – сила сопротивления вертикальных подвесок, Н. Применяв сокращение $\sum F_i = F_x - F_{k.x} - F'_{тр.з.х}$, можно ее описать следующим образом:

$$F_{подв.х} = \begin{cases} F_{тр.ск} \cdot \operatorname{sgn}|V_{pc}|, & \text{если } |V_{pc}| > 0; \\ \sum F_i, & \text{если } |\sum F_i| < F_{тр.ск}; \\ F_{тр.ск} \cdot \operatorname{sgn}(\sum F_i), & \text{если } |\sum F_i| > F_{тр.ск}, \end{cases} \quad (2.24)$$

где $F_{тр.ск} = (N_3 + m_{p.c} \cdot g) \cdot f_{подв}$ – сила трения скольжения, Н;

$F^1_{тр.з.х}$ – сила трения зернового материала об поверхность решетного стана по оси $O'X'$, подчиняющаяся закону Кулона, Н:

$$F^1_{тр.з.х} = N_3 \cdot f_3, \quad (2.25)$$

где $f_3, f_{подв}$ – коэффициенты трения зернового материала о поверхность решетного стана и шарниров подвесок, соответственно;

N_3 – реакция решетного стана на давление зернового материала, Н,

$F_{pc.x}$ – сила инерции решетного стана по оси OX , Н:

$$F_{pc.x} = m_{pc} \cdot a_{pc.x}. \quad (2.26)$$

$$F_{pc.x} = F_x - F_{k.x} - F^1_{тр.з.х} \cdot \cos \alpha - F_{подв}, \quad (2.27)$$

где $a_{pc.x}$ – ускорение решетного стана по оси OX , м/с².

Силу инерции решетного стана $F_{pc.x}$ с применением кусочно-постоянных функций можно выразить следующем образом:

$$F_{pc.x} = \operatorname{sgn}|V_{pc.x}| \times (\sum F_i - F_{подв.х} \cdot \operatorname{sgn}(V_{pc.x})) + (1 - \operatorname{sgn}|V_{pc.x}|) \times \\ \times (\sum F_i - F_{подв.х}) \times \theta(\sum F_i - F_{подв.х}) \times \operatorname{sgn}(\sum F_i). \quad (2.28)$$

Силы действующие на зерновой материал по оси $O'X'$:

$$\sum F^1_x = 0 : F^1_{тр.з.х} + m_3 g \cdot \sin \alpha - F^1_{3.x} = 0, \quad (2.29)$$

где $F^1_{3.x}$ – сила инерции зернового материала по оси $O'X'$, Н: $F^1_{3.x} = F_{3.x} \cdot \sin \alpha$,

F_{3x} – сила инерции зернового материала по оси OX , Н:

$$F_{3x} = m_3 a_{3x}, \quad (2.30)$$

$$F_{тр.з.х}^1 = N_3 \cdot f_3 = m_3 (g \cdot \cos \alpha + a_{3x} \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot f_3.$$

По оси OY на решетный стан действуют аналогичные силы:

$$\sum F = 0; F_{тр.з.у'} + F_{подв.у} + F_{рс.у} - F_{к.у} = 0. \quad (2.31)$$

Сила сопротивления подвесок с учетом ограничения хода решетного стана в направлении индуктора:

$$F_{подв.у} = \begin{cases} F_{сопр.у} \cdot \operatorname{sgn}|V_{рс.у}|, & \text{если } |V_{рс.у}| > 0; \\ \sum F_{i.у}, & \text{если } |\sum F_{i.у}| < F_{сопр.у}; \\ F_{сопр.у} \cdot \operatorname{sgn}(\sum F_{i.у}), & \text{если } |\sum F_{i.у}| > F_{сопр.у}, \end{cases} \quad (2.32)$$

где $F_{сопр.у}$ – сила сопротивления подвесок и упорных роликов, Н,

$$F_{сопр.у} = F_{тр.ск} + F_{рол}, \quad (2.33)$$

$F_{рол}$ – сила сопротивления упорных роликов, Н,

$$F_{рол} = \begin{cases} 0, & \text{если } (\delta - \delta_{раб}) > 0, \\ \infty \cdot \operatorname{sgn}|U_c|, & \text{если } (\delta - \delta_{раб}) \leq 0, \end{cases} \quad (2.34)$$

где δ – толщина воздушного зазора между индуктором и вторичным элементом, м, $\delta = \delta_{нач} - /Y_{рс}/$;

$\delta_{нач}$ – толщина начального воздушного зазора, м;

$\delta_{раб}$ – толщина рабочего воздушного зазора.

Для определения электрических и энергетических показателей ЛАД в модели использованы следующие формулы:

– ток индуктора по оси $O\alpha$:

$$I_{\alpha 1} = \frac{X_s}{X_s X_r - X_m^2} \varphi_{\alpha 1} - \frac{X_m}{X_s X_r - X_m^2} \varphi_{\alpha 2}; \quad (2.35)$$

– ток индуктора по оси $O\beta$:

$$I_{\beta 1} = \frac{X_s}{X_s X_r - X_m^2} \varphi_{\beta 1} - \frac{X_m}{X_s X_r - X_m^2} \varphi_{\beta 2}; \quad (2.36)$$

– активная мощность, потребляемая из сети:

$$P_1 = I_{\alpha 1} U_{\alpha 1} + I_{\beta 1} U_{\beta 1}; \quad (2.37)$$

– реактивная мощность:

$$Q_1 = I_{\beta 1} U_{\alpha 1} + I_{\alpha 1} U_{\beta 1}; \quad (2.38)$$

– полная мощность:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}; \quad (2.39)$$

– электромагнитная мощность в воздушном зазоре:

$$P_{эл} = FV_0; \quad (2.40)$$

– мощность, выделяемая в виде тепла в индукторе:

$$P_{инд} = P_1 - P_{эл}; \quad (2.41)$$

– механическая мощность на решетном стане:

$$P_{мех} = FV_{рс}. \quad (2.42)$$

Для определения эффективности работы зерноочистительной машины необходимо определить в модели интегральные показатели:

- средняя активная электрическая мощность, потребляемая ЛАД из сети:

$$P_{1cp} = \frac{\int_0^T P_1 dt}{T}, \quad (2.43)$$

где T – время моделирования, с.;

- средняя реактивная электрическая мощность:

$$Q_{1cp} = \frac{\int_0^T Q_1 dt}{T}; \quad (2.44)$$

- средняя полная электрическая мощность:

$$S_{cp} = \sqrt{P_{1cp}^2 + Q_{1cp}^2}; \quad (2.45)$$

- средний $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi = P_{1cp} / S_{cp}; \quad (2.46)$$

- средняя скорость движения зернового материала:

$$V_{cp} = x_{xy} / T; \quad (2.47)$$

– средняя механическая мощность, затрачиваемая на движение зернового материала по поверхности решетного стана:

$$P_{mp} = m_{кг} g f_{к} V_{cp}; \quad (2.48)$$

- средняя производительность зерноочистительной машины, [т/ч]:

$$Q = 3600 \cdot \frac{Q_0}{T} = 3600 \cdot m_q, \quad (2.49)$$

где Q_0 – количество поступающего зернового материала на решетный стан, кг/с;

m_q – подача зернового материала, кг/с.

Коэффициент удельной энергоэффективности $\mathcal{E}_{ле}$ (кВт · ч/т), характеризующийся отношением количества потребленной активной мощности P (кВт) к средней производительности Q (т/ч) [247]:

$$\mathcal{E}_{ле} = \frac{P}{Q}. \quad (2.50)$$

При расчете данного коэффициента необходимо учитывать, что сравнивать необходимо решетные зерноочистительные машины с соразмерными площадями решетных станов, т. к. с увеличением рабочей поверхности решет производительность прямопропорционально возрастает.

2.2.2 Математическая модель колебательно-вращательного электропривода вальцедековой машины

Кинематическая схема ЛАЭСЖД вальцедековой машины представлена на рисунке 2.6. Привод установки для шелушения зерна позволяет регулировать колебания вальца относительно неподвижной деки по частоте и амплитуде, в результате чего обеспечивается возможность выбора оптимальных параметров для шелушения [170, 171]. Электропривод устроен следующим образом (рису-

нок 2.6). Вал вальцедекового станка жестко соединен с вторичным элементом цилиндрического ЛАД, вторичный элемент которого соединен шлицевым соединением с асинхронным электродвигателем вращения.

Цилиндрический ЛАД позволяет получить непосредственно энергетически эффективное поступательное движение рабочего органа без применения преобразователей вида движения с одновременным наложением вращательного движения на вторичный элемент двигателем вращения.

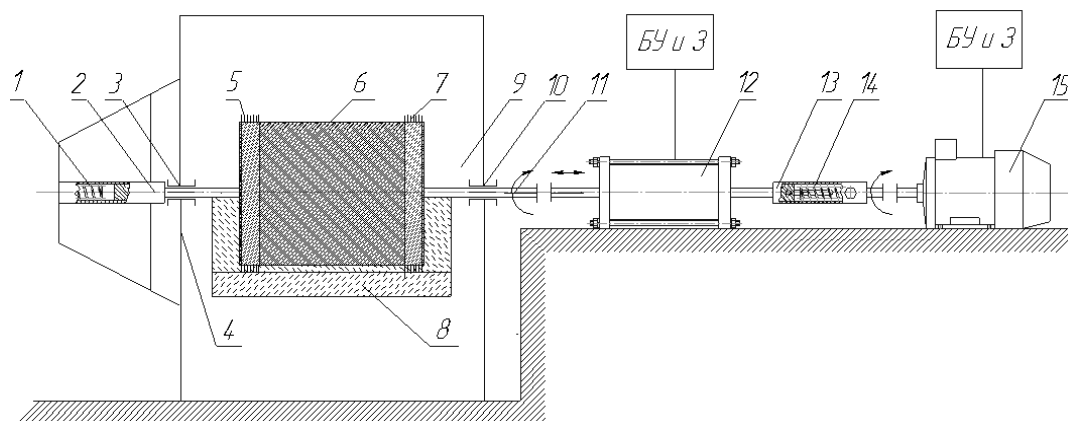


Рисунок 2.6

Кинематическая схема ЛАЭСКД вальцедековой шелушильной машины с неподвижной декой:

- 1, 14 – упругие элементы (цилиндрические винтовые пружины сжатия); 2 – стакан;
3, 10 – подшипники; 4 – боковая крышка; 5, 7 – щетки; 6 – валец; 8 – дека; 9 – корпус
вальцедековой шелушильной машины; 11 – вал; 12 – линейный асинхронный
электродвигатель; 13 – шлицевое соединение; 15 – асинхронный электродвигатель
вращения; БУ и З – блок управления и защиты

При использовании импульсного управления ЛАД в колебательном режиме появляется возможность производить разгон рабочего органа оборудования в обратном направлении за счет запасаемой потенциальной энергии в упругом элементе при прямом ходе вторичного элемента ЛАД [4, 6, 154]. Отсутствие потребления энергии при гашении кинетической энергии рабочего органа позволяет уменьшить потребляемую энергию из сети.

Данная конструкция предполагает наличие дополнительного механического преобразователя для передачи момента вращения от асинхронного электродвигателя (АД) вальцу, совершающему одновременно поступательное перемещение: втулки со шлицевым соединением внутри. Этот механический преобразователь (рисунок 2.7 а) отличается громоздкостью и достаточной сложностью в изготовлении. Но в определенных случаях этот вариант может оказаться предпочтительнее, это определяется величиной деки, способом ее крепления, наличием и сложностью регулировок рабочего зазора между декой и вальцом.

Второй вариант кинематической схемы (рисунок 2.7 б) позволяет упростить конструкцию привода, придав деке колебательное движения от ЛАД, валец же при этом вращается, будучи жестко соединенным с АД. Как и в первоначальной конструкции на зерно в зоне шелушения воздействуют силы сжатия и сдвига в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, при этом конструкция машины несколько упрощается.

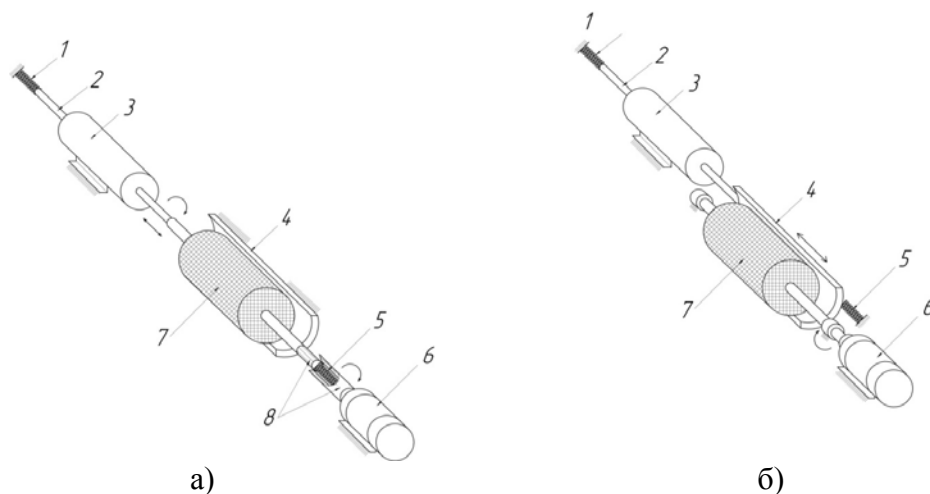


Рисунок 2.7

Варианты компоновки колебательно-вращательного ЭП вальцедековой шелушильной машины (схематично): а – с неподвижной декой; б – с подвижной декой и вращающимся валцом; 1, 5 – упругие элементы (на рисунке 1, а – пружины сжатия, на рисунке 1, б – пружины растяжения), 2 – вторичный элемент (бегун) ЛАД, 3 – индуктор ЛАД, 4 – дека вальцедековой машины, 6 – АД, 7 – валец вальцедековой машины; 8 – шлицевое соединение

С учетом сложности и нелинейности ЛАЭСКД вальцедековой машины, а также цикличности работы ЛАД в режиме частых переходных процессов, детальный анализ работы привода с учетом влияния отдельных его элементов на параметры колебаний можно произвести, только разработав его электромеханическую математическую модель.

Базовая кинематическая схема ЛАЭСКД вальцедековой машины представлена на рисунке 2.8.

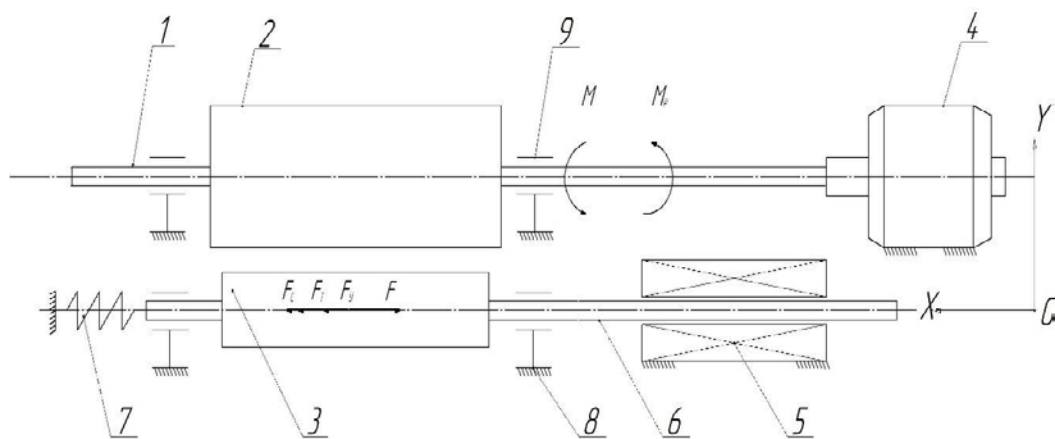


Рисунок 2.8

Кинематическая схема ЛАЭСКД вальцедековой машины:

1 – вал; 2 – валец; 3 – дека; 4 – АД; 5 – ЛАД; 6 – вторичный элемент ЛАД; 7 – упругий элемент; 8 – подшипники скольжения; 9 – подшипники качения

В приводе ЛАД работает в режиме вынужденных колебаний и включается в работу согласно частоте задаваемой схемой управления.

При подаче блоком импульсного управления (на рисунке 2.8 не показан) напряжения питания на обмотки индуктора ЛАД, возникает сила тяги F , разго-

няющая деку 3 вправо, растягивая упругий элемент 7. Силе F противодействует сила трения F_m в подшипниках скольжения, сила сопротивления упругого элемента F_y , сила в рабочем зазоре F_{Cl} , дека движется вправо. По истечению времени подачи питания на обмотки индуктора ЛАД отключаются от питающей сети, дека останавливается и начинает под действием предварительно растянутого упругого элемента движение влево, возвращаясь в исходное положение. Теперь сила упругости F_y действует сонаправленно с движением деки, ей противодействует сила трения F_m и сила сопротивления зерна F_{Cl} . По истечении времени паузы блок управления вновь подключает обмотки индуктора ЛАД к питающей сети, колебательное движение повторяется. Все это время АД вращает валец.

Математическая модель реализуется в соответствии с уравнениями динамики колебательно-вращательного электропривода имеющими следующий вид:

– для поступательного движения деки:

$$ma = F - F_T - F_y - F_{Cl}, \quad (2.51)$$

– для вращательного движения вальца:

$$J \frac{\partial \omega}{\partial t} = M - M_c - M_T, \quad (2.52)$$

где m – масса деки и вторичного элемента ЛАД, кг;

a – ускорение деки и вторичного элемента ЛАД, м/с²;

F – сила, развиваемая ЛАД, Н;

F_T – сила трения в подшипниках скольжения, Н;

F_y – сила упругости, Н;

F_{Cl} – сила сопротивления деки от потока зерна в рабочем зазоре, Н;

$J \frac{\partial \omega}{\partial t}$ – динамический момент, кг·м²/с²;

M – момент развиваемый АД, Н·м;

M_c – момент сопротивления от потока зерна в рабочем зазоре, Н·м;

M_T – момент трения в подшипниках, Н·м.

Для определения силы сопротивления движению деки от потока зерна в зазоре воспользуемся формулами для цилиндрического шелушителя [227]. С целью упрощения задачи предположим, что скорость потока индуцируется цилиндром некоторого приведенного радиуса r :

$$r = \sqrt{R \cdot R_1}, \quad (2.53)$$

где R – внутренний радиус деки, м;

R_1 – радиус вальца, м.

С учетом того, что момент сил сопротивления F_c для вальца распределенных по поверхности вальца относительно оси симметрии не зависит от радиуса вальца, но зависит от динамической вязкости среды λ (определяется влажностью, сортом, наличием гидротермической обработки зерна, номером фракции), окружной скорости поверхности вальца и радиусов цилиндров r и R , длины участка вальца, перекрываемого декой L (длина деки), коэффициента заполнения зоны шелушения k_z , выражение для силы сопротивления деки от потока зерна в зазоре примет вид:

$$F_c = \frac{M_c}{r} = \frac{\pi\lambda\nu R a k_z L}{r^2 - R^2}; \quad (2.54)$$

где ν – скорость деки, м/с;
 λ – динамическая вязкость потока зерна, Па·с;
 k_z – коэффициент заполнения зоны шелушения;
 L – длина деки, м;

Математическая модель описывает работу цилиндрического ЛАД, упругого элемента, движение деки машины; импульсное включение ЛАД; сопротивление зерна в рабочем зазоре.

В качестве опор для вторичного элемента ЛАД используются подшипники скольжения с коэффициентом трения 0,08 (медь-баббит при наличии смазки).

Сила трения в подшипниках скольжения

$$F_T = f \cdot m \cdot g, \quad (2.55)$$

где f – коэффициент трения;
 g – ускорение свободного падения, м/с².

В качестве накопителей механической энергии в приводе используются цилиндрические винтовые пружины, реализуемые по линейному закону Гука.

$$F_y = c \cdot x, \quad (2.56)$$

где c – коэффициент упругости;
 x – линейное растяжение, м.

Математическая модель КВЭП вальцедековой машины, составленная по уравнениям (2.51) и (2.52) с учетом уравнений (2.54), (2.55), (2.56), (2.6) и с учетом того, что момент и сила, развиваемые АД вращения и ЛАД определяются по описанным выше дифференциальным уравнениям Парка – Горева (2.13), примет вид:

$$\begin{aligned} m a &= \frac{3}{2} \frac{\pi \omega_0}{\tau} \frac{x_m}{x_m x_r - x_m^2} (\phi_{x2} \cdot \phi_{y1} - \phi_{x1} \phi_{y2}) - m g f - c x - \frac{\pi \lambda \nu R a k_z}{r^2 - R^2}, \\ J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3}{2} \frac{\pi \omega_0}{\tau} \frac{\dot{x}_m}{x_m \dot{x}_r - x_m^2} (\dot{\phi}_{x2} \cdot \phi_{y1} - \phi_{x1} \dot{\phi}_{y2}) - \frac{\pi \lambda \omega R^2 a^2 k_z L}{r^2 - R^2} - M_T, \end{aligned} \quad (2.57)$$

В формуле 2.57 параметры со штрихом относятся к двигателю вращения.

2.2.3 Математическая модель инерционного конвейера со звеном предварительного разгона ЛАЭСЖД

2.2.3.1 Задачи звена предварительного разгона линейного асинхронного электропривода в инерционном конвейере

Общий КПД инерционного конвейера есть произведение КПД электропривода $\eta_{ЛЭП}$ и рабочей машины $\eta_{МЭХ}$:

$$\eta = \frac{P_{TP}}{P_1} = \frac{P_{TP}}{P_{МЭХ}} \times \frac{P_{МЭХ}}{P_1} = \eta_{МЭХ} \times \eta_{ЛЭП}, \quad (2.58)$$

где P_{TP} – мощность транспортирования, Вт, $P_{TP} = m_{zp} \cdot g \cdot f_{TP} \cdot v_{cp}$;
 m_{zp} – масса транспортируемого груза, находящегося на лотке, кг;

v_{cp} – средняя скорость транспортирования, м/с;

$f_{тр}$ – коэффициент трения транспортируемого груза об транспортирующую поверхность лотка;

$P_{МЕХ}$ – механическая полезная мощность электродвигателя, которая, в свою очередь, является мощностью «затрачиваемой» рабочей машиной, Вт;

P_1 – мощность потребляемая электродвигателем, Вт:

$$P_1 = P_{МЕХ} + \Delta P_{Э1} + \Delta P_{МГ} + \Delta P_{Э2} + \Delta P_{МХ} + \Delta P_{Д}, \quad (2.59)$$

где $\Delta P_{Э1}$ – электрические потери в обмотке индуктора, Вт, $\Delta P_{Э1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2$;

$\Delta P_{МГ}$ – магнитные потери, Вт;

$\Delta P_{Э2}$ – электрические потери в обмотке вторичного элемента, Вт, $\Delta P_{Э2} = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = s \cdot P_{ЭМ}$;

R_1, R_2 – активное сопротивление одной фазы обмотки индуктора и вторичного элемента, соответственно, Ом;

I_1, I_2 – ток в обмотке индуктора и вторичного элемента соответственно, А;

$P_{ЭМ}$ – электромагнитная мощность ЛАД, Вт;

s – скольжение.

Электрические потери в обмотках занимают значительную долю всех потерь в электродвигателе, и, как известно, электрические потери в обмотках вторичного элемента $\Delta P_{Э2}$ пропорциональны скольжению, а потери в обмотках индуктора $\Delta P_{Э1}$ тоже имеют положительную зависимость от него.

Следовательно, в целях повышения энергоэффективности ЛЭП необходимо снижение скольжения, что возможно применением звена предварительного разгона.

Рассмотрим КПД рабочей машины:

$$\eta_{МЕХ} = \frac{P_{ТР}}{P_{МЕХ}} = \frac{P_{ТР}}{P_{ТР} + \Delta P_{РОЛ} + \Delta P_{УПР} + \Delta P_{ЗР}}, \quad (2.60)$$

где $\Delta P_{РОЛ}$ – потери на преодоление силы сопротивления опорных роликов подвижных элементов, Вт.

$\Delta P_{УПР}$ – потери при взаимодействии с упругими элементами, Вт;

$\Delta P_{ЗР}$ – потери на обратное проскальзывание транспортируемого груза, Вт.

Обратное проскальзывание возникает при чрезмерно большой силе, действующей на транспортирующий лоток, когда сила инерции транспортируемого груза превышает его «критическую» силу трения об поверхность лотка. Следовательно из-за изменения усилия при изменении скорости вторичного элемента ЛАД не способен обеспечивать эффективное транспортирование без применения дополнительных устройств, стабилизирующих развиваемое усилие.

С учетом вышесказанного сформулированы задачи звена предварительного разгона ЛЭП в инерционном конвейере [35, 37, 148]:

– сокращение потерь энергии в обмотках ЛАД за счет снижения скольжения;

– снижение потерь мощности на обратное проскальзывание транспортируемого груза $\Delta P_{ЗР}$ путем стабилизации силы, действующей на транспортирующий лоток, и накопления избыточной энергии упругими элементами;

- повышение полезной мощности транспортирования P_{TP} за счет использования энергии, накопленной звеном предварительного разгона;
- снижение пусковых токов.

2.2.3.2 Выбор конструкции линейного асинхронного электропривода со звеном предварительного разгона

Для построения эффективной конструкции линейного асинхронного электропривода со звеном предварительного разгона инерционного конвейера рассмотрены комбинации вариантов конструкций отличающихся по размещению линейного асинхронного электропривода на рабочем механизме и по исполнению звена предварительного разгона линейного асинхронного электропривода (таблица 2.2).

Несмотря на принципиальные отличия, приведенные конструкции имеют общие свойства, что позволяет их объединить в группы и исследовать в совокупности.

Конструкции с подвижным индуктором (рисунки *a* и *б*) сопряжены сложностью подвода питания к индуктору, поэтому нецелесообразно применять их в механизмах с малой амплитудой и высокой частотой возвратно-поступательного движения.

Кроме того, индуктор и вторичный элемент линейного асинхронного двигателя можно рассмотреть как два взаимоотталкивающихся тела. В таком случае в отношении динамических процессов они отличаются лишь массами, т. к. обычно индуктор обладает большей массой, чем вторичный элемент. Поэтому конструкции на рисунках *a* и *б* можно исключить из дальнейшего исследования и исследовать только конструкции на рисунках *в* и *г*.

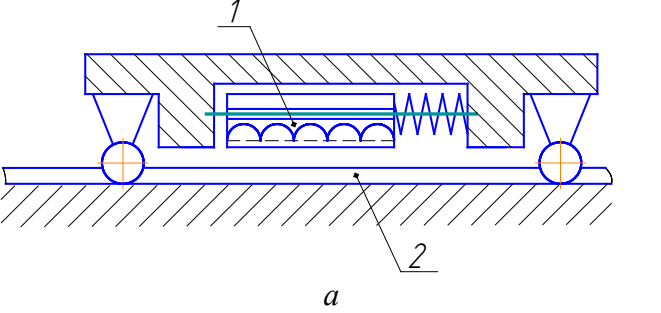
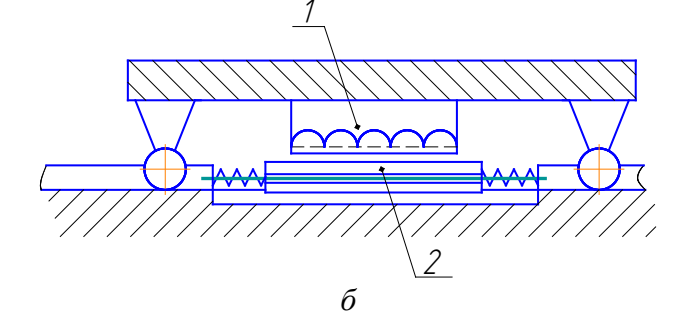
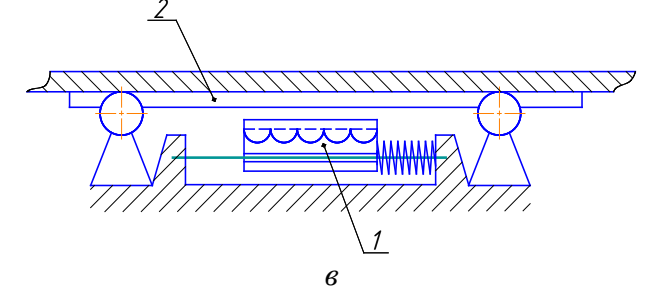
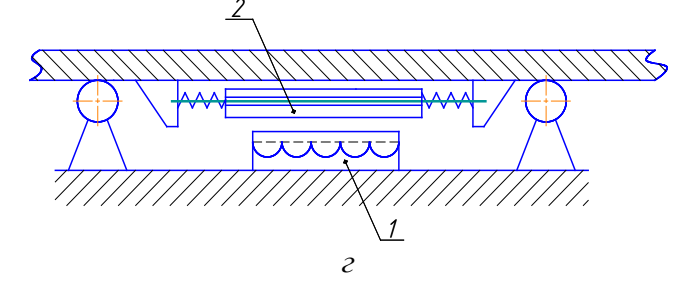
Соответственно далее в работе исследуются две конструкции линейного асинхронного электропривода со звеном предварительного разгона линейного асинхронного электропривода в инерционном конвейере:

- с предварительным разгоном индуктора, установленного на основании с возможностью его возвратно-поступательного движения параллельно направлению транспортирования и связанного с основанием упругими элементами (таблица 2.2 рисунок *в*);
- с предварительным разгоном вторичного элемента, установленного на транспортирующей лотке с возможностью его возвратно-поступательного движения параллельно направлению транспортирования и связанного с рабочим органом упругими элементами (таблица 2.2 рисунок *г*).

2.2.3.3 Разработка математической модели инерционного конвейера со звеном предварительного разгона линейного асинхронного электропривода

Результаты исследования математической модели дают возможность исследовать взаимосвязи в приводе, что позволит проектировать линейный электропривод по заданной скорости перемещения различных грузов и подобрать рациональные параметры конвейера для достижения максимальной скорости транспортирования при минимальных энерго- и ресурсозатратах.

Таблица 2.2 Варианты реализации звена предварительного разгона линейного асинхронного электропривода с упругими накопителями «пусковой» энергии

<p>По исполнению звена предварительного разгона линейного асинхронного электропривода:</p> <p>По размещению линейного асинхронного электропривода на рабочем механизме:</p>	<p>С предварительным разгоном индуктора 1. Индуктор 1 связан с подвижной (вариант <i>a</i>) или неподвижной (вариант <i>б</i>) частью рабочего механизма посредством упругих элементов с возможностью возвратно-поступательного движения параллельно направлению движения.</p>	<p>С предварительным разгоном вторичного элемента 2. Вторичный элемент 2 связан с подвижной (вариант <i>г</i>) или неподвижной (вариант <i>в</i>) частью рабочего механизма посредством упругих элементов с возможностью возвратно-поступательного движения параллельно направлению движения.</p>
<p>С подвижным индуктором 1. Применимы в установках со значительной длиной хода.</p>	 <p style="text-align: center;"><i>a</i></p>	 <p style="text-align: center;"><i>б</i></p>
<p>С подвижным вторичным элементом 2. Применимы в установках с малой амплитудой движения, так как ход движения рабочего органа ограничивается длиной вторичного элемента 2 ЛАД.</p>	 <p style="text-align: center;"><i>в</i></p>	 <p style="text-align: center;"><i>г</i></p>

При моделировании приняты следующие допущения: сила вязкого трения между роликами и грузонесущим желобом не учитываются, характеристика упругих элементов считается линейной [6]. Моделирование процесса движения груза по колеблющейся поверхности желоба проводится при допущениях, общепринятых при решении аналогичных задач [3, 6]:

- транспортируемый груз является материальной точкой;
- между лотком и транспортируемым грузом присутствует только сила сухого трения, подчиняющаяся закону Кулона;
- масса транспортируемого груза в течение времени моделирования остается постоянной;
- момент инерции опорных роликов и массы упругих элементов не учитываются.

Для удобства построения математической модели в работе применены следующие математические функции:

$\theta(X)$ – функция единичного скачка (функция Хевисайта), кусочно-постоянная функция, определяемая следующим образом:

$$y = \theta(X) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq 0, \\ 0, & \text{если } x < 0, \end{cases}$$

$\text{sign}(X)$ – функция «сигнум», кусочно-постоянная функция, определяемая следующим образом:

$$y = \text{sign}(X) = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0; \\ 0, & \text{если } x = 0; \\ -1, & \text{если } x < 0. \end{cases}$$

Применение кусочно-постоянных функций позволяет упростить математическое описание процессов с возвратно-поступательным движением характерного для объекта исследования и в дальнейшем перевести полученные уравнения в программу моделирования.

Составляющими математической модели являются силы взаимодействия основных узлов инерционного конвейера (транспортирующий лоток, упругие элементы, индуктор и вторичный элемент ЛАД) и транспортируемый груз. Уравнения сил составлены по расчетным схемам (рисунки 2.10 и 2.11).

Для описания математической модели приняты следующие системы координат: XOY – неподвижная относительно основания, $X'O'Y'$ – неподвижная относительно транспортирующего лотка. Причем перемещение, скорость, ускорение транспортируемого груза и лотка в этих системах связаны следующим образом:

$$x'_{zp} = x_{zp} - x_l, \quad x'_{в.э.} = x_{в.э.} - x_l,$$

где x'_{zp} , $x'_{в.э.}$ – перемещение транспортируемого груза и вторичного элемента, соответственно, по оси $O'X'$, м;

x_{zp} , $x_{в.э.}$, x_l – перемещение транспортируемого груза, вторичного элемента и лотка, соответственно, м.

Эффективность инерционного транспортирования зависит от многих параметров, основным является закон колебаний транспортирующей поверхности. Наиболее эффективный – закон колебаний с кусочно-постоянным ускорением, предложенный В.А. Троицким [45, 46] (рисунок 2.3, б).

Закон колебания инерционного конвейера с классическим приводом отличается от оптимального закона колебаний и близок к синусоидальному. Линейный асинхронный электропривод с упругими накопителями механической энергии обеспечивает более рациональный закон движения желоба, с его применением можно достичь наиболее близкий к кусочно-постоянному закону - ударно-вибрационный [44] (рисунок 2.9).

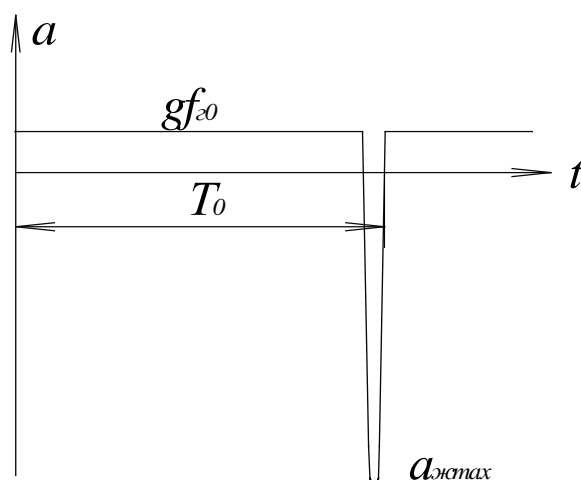


Рисунок 2.9

Ударно-вибрационный закон колебаний инерционных конвейеров:

T_0 – период колебаний желоба с транспортирующей поверхностью; $f_{\lambda 0}$ – коэффициент трения транспортируемого груза об транспортирующую поверхность; a_{λ} – ускорение лотка с транспортирующей поверхностью

Исходя из условия, что инерционное перемещение транспортируемого груза происходит, когда сила инерции груза больше его силы трения покоя об транспортирующую поверхность $F_{zp} > F_{тр.гр.0}$, можно задаться значением ускорения груза a_{zp} следующим условием:

$$a_{zp} = \begin{cases} a_{mp} \cdot \text{sgn}(-V'_{zp}), & \text{если } |V'_{zp}| > 0, \\ a_{mp} \cdot \text{sgn}(a_{\lambda}), & \text{если } V'_{zp} = 0, |a_{\lambda}| > a_{mp}, \\ a_{\lambda}, & \text{если } V'_{zp} = 0, |a_{\lambda}| \leq a_{mp}, \end{cases} \quad (2.61)$$

где V'_{zp} – скорость транспортируемого груза относительно транспортирующей поверхности по оси $O'X'$ (рисунки 2.10, 2.11), м/с;

a_{mp} – ускорение транспортируемого груза при его скольжении по поверхности лотка по оси OX , м/с².

a_{λ} – ускорение лотка по оси OX , м/с².

Для высокой эффективности транспортирования лоток с транспортирующей поверхностью в большей части периода колебаний T_0 должен двигаться с постоянным ускорением a_l не превышающим значение gf_{zp} , иначе будет наблюдаться обратное проскальзывание груза. С другой стороны, оно должно быть как можно больше и ближе к значению gf_{zp} , для достижения максимальной скорости, а, следовательно, накопления энергии грузом на минимальном участке пути. В конце периода T_0 происходит интенсивное торможение и изменение направления движения, в этот момент груз за счет запасенной кинетической энергии скользит по транспортирующей поверхности. Чем больше значение ускорения $a_{l,max}$ и дольше оно длится, тем интенсивнее торможение и дальше будет перемещение груза.

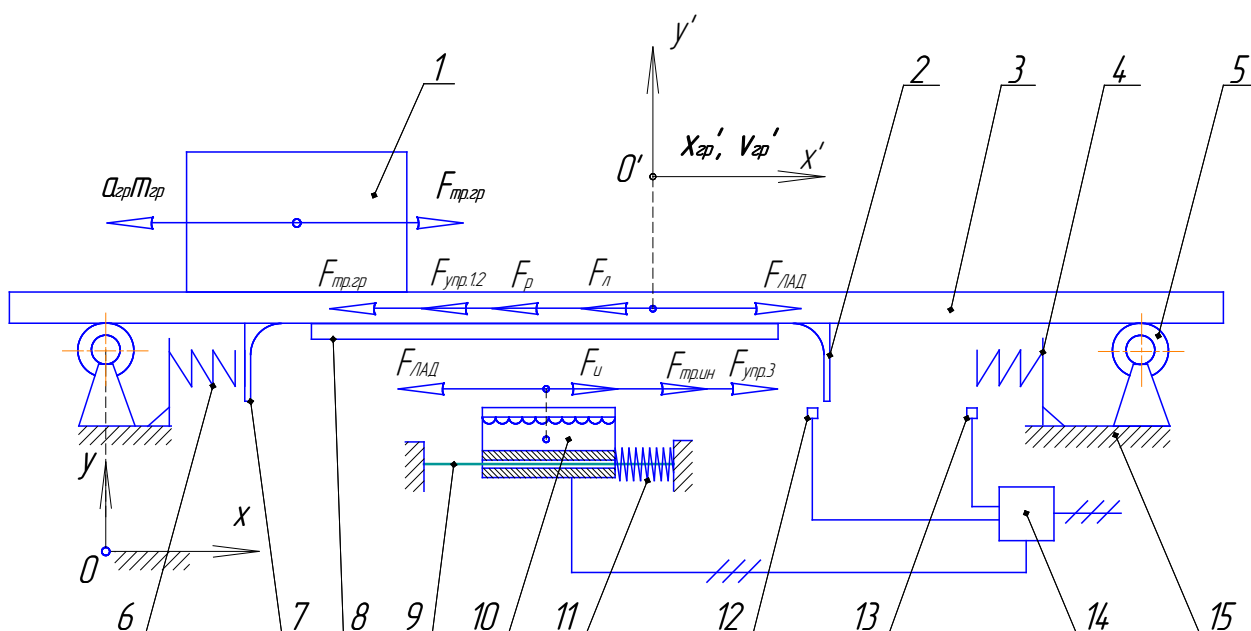


Рисунок 2.10

Инерционный конвейер с предварительным разгоном индуктора:

- 1 – транспортируемый груз; 2, 7 – упоры лотка; 3 – транспортирующий лоток (рабочий орган); 4, 6, 11 – упругие элементы (пружины); 5 – опорные ролики; 8 – вторичный элемент; 9 – направляющие индуктора; 10 – индуктор; 12, 13 – датчики положения лотка; 14 – блок управления; 15 – основание

Механическая мощность на лотке с транспортирующей поверхностью:

$$P_{мех} = FV_l. \quad (2.62)$$

Для определения эффективности транспортирования необходимо определить в модели интегральные показатели (2.43–2.46).

Средняя скорость транспортирования:

$$V_{cp} = x_2 / T. \quad (2.63)$$

Средняя механическая мощность, затрачиваемая на транспортирование груза:

$$P_{mp} = m_2 g f_2 V_{cp}. \quad (2.64)$$

КПД транспортирования:

$$\eta_{mp} = \frac{P_{mp}}{P_1}, \quad (2.65)$$

Средняя производительность конвейера [т/ч]:

$$Q = 3,6 \times m_2 \times V_{cp} / L, \quad (2.66)$$

где L – длина конвейера.

На рисунке 2.10 показана расчетная схема инерционного конвейера с предварительным разгоном индуктора с указанием действующих сил на транспортируемый груз 1, транспортирующий лоток 3 и индуктор 10. Силы по оси OY не указаны, чтобы не загромождать рисунок, но учтены в расчетах сил трения, в том числе силы тяжести и нормальная сила ЛАД.

Инерционный конвейер с предварительным разгоном индуктора работает следующим образом [188]: при подключении индуктора 10 с помощью блока управления 14 к сети трехфазного переменного напряжения возникает электромагнитная сила между индуктором 10 и вторичным элементом 8, которая стремится привести в движение вторичный элемент 8 с жестко закрепленным к нему лотком 3 в направлении бегущего магнитного поля, а индуктор 10 – против него.

Индуктор 10, двигаясь, (на рисунке 2.10 влево) растягивает упругий элемент 11, который при этом накапливает потенциальную энергию.

По мере растяжения упругого элемента 11 скорость индуктора 10 будет снижаться, а вторичный элемент 8 с лотком 3 ускоряться в направлении транспортирования (на рисунке 2.10 вправо). По мере разгона вторичного элемента с лотком упругий элемент 11 сжимается, при этом индуктор 10 движется в направлении исходного положения, тем самым обеспечивается дальнейший разгон лотка.

При достижении лотка 3 упором 2 датчика положения 13 блок управления 14 отключает индуктор 10 от сети. Лоток 3, движущийся по инерции, взаимодействует с пружиной 4 и резко останавливается; пружина 4, сжимаясь, накапливает потенциальную энергию, затем, разжимаясь, разгоняет лоток 3 с вторичным элементом 8 в обратном направлении. После взаимодействия с пружиной 6 лоток 3, двигаясь вправо, достигает упором 2 датчика положения 12, блок управления 14 подключает индуктор 10 к сети, и процесс повторяется.

Индуктор ЛАД подключен к сети через блок управления, который обеспечивает коммутацию напряжения обмотки статора по сигналам бесконтактных датчиков положения лотка, отслеживающих его координаты и направление движения по оси OX .

Напряжение, подаваемое на обмотку индуктора U_u :

$$U_u = U_{ист}, \text{ если } \dot{X}_л \geq 0 \text{ и } X_{выкл} \geq X_л \geq X_{вкл}, \text{ иначе } U_u = 0.$$

С применением кусочно-постоянных функций данное условие можно представить в виде следующего выражения:

$$U_u = U_{ист} \cdot \theta(\dot{X}_л) \cdot \theta(X_л - X_{вкл}) \cdot \theta(X_{выкл} - X_л), \quad (2.67)$$

где $U_{ист}$ – напряжения источника питания, В;

$X_л$ – перемещение лотка по оси OX , м;

$X_{вкл}$ – координата расположения датчика включения на оси OX , м;

$X_{выкл}$ – координата расположения датчика выключения на оси OX , м.

На лоток по оси OX действуют силы:

$$\sum F_x = 0: \quad F_{\text{ЛАД}} - F_{k.l} - F_{\text{рол}} - F_{\text{тр.гр}} - F_l = 0; \quad (2.68)$$

где $F_{\text{ЛАД}} = f(U_u, \dot{X}'_u)$ – продольная сила, развиваемая ЛАД, подчиняющаяся уравнению электромеханического преобразования энергии (2.13), зависит от значений подаваемого напряжения, скорости вторичного элемента и параметров схемы замещения [3];

$F_{k.l}$ – сумма сил $F_{k.6}$ и $F_{k.4}$ сопротивления пружин 6 и 4 (рисунок 2.10) действующих на лоток, подчиняющихся закону Гука с учетом координат их расположения по оси OX и сил первоначального сжатия $F_{0.6}$ и $F_{0.4}$, Н,

$$F_{k.l} = F_{k.6} + F_{k.4} = \theta(x_l - x_{\text{вкл}}) \times (k_6 \cdot (x_l - x_{\text{вкл}}) + F_{0.6}) + \theta(x_l - x_{\text{выкл}}) \times (k_4 \cdot (x_l - x_{\text{выкл}}) + F_{0.4}), \quad (2.69)$$

где k_6, k_4 – коэффициенты жесткости пружин 6 и 4 (рисунок 2.10), соответственно, Н/м;

$F_{\text{рол}}$ – сила сопротивления опорных роликов лотка, которая подчиняется следующему условию, Н:

$$F_{\text{рол}} = \begin{cases} F_{\text{тр.ск}} \cdot \text{sgn}(\dot{X}_l), & \text{если } |\dot{X}_l| > 0, \\ (F_{\text{эм}} - F_{k.l} - F_{\text{тр.гр}}), & \text{если } |F_{\text{эм}} - F_{k.l} - F_{\text{тр.гр}}| < F_{\text{тр.ск}}, \dot{X}_l = 0, \\ F_{\text{тр.ск}} \cdot \text{sgn}(F_{\text{эм}} - F_{k.l} - F_{\text{тр.гр}}), & \text{если } |F_{\text{эм}} - F_{k.l} - F_{\text{тр.гр}}| > F_{\text{тр.ск}}, \dot{X}_l = 0; \end{cases} \quad (2.70)$$

где $F_{\text{тр.ск}} = |(m_l + m_{\text{сп}}) \cdot g - F_N| \cdot f_{\text{рол}}$ – сила трения скольжения роликов, Н;

$F_N = f(U_u, \dot{X}'_u)$ – нормальная сила, сила притяжения вторичного элемента к индуктору, так же подчиняется уравнению электромеханического преобразования (2.15), Н;

$f_{\text{рол}}$ – коэффициент трения качения роликов;

$m_{\text{сп}}, m_l$ – массы транспортируемого груза и лотка, соответственно, кг;

$F_{\text{тр.гр}}$ – сила трения груза об поверхность лотка, $F_{\text{тр.гр}} = m_{\text{сп}} \cdot g \cdot f_{\text{гр}}$, Н;

F_l – сила инерции лотка, Н:

$$F_l = m_l a_l. \quad (2.71)$$

Из (2.68) с учетом (2.70) и (2.71) можно выразить:

$$\begin{aligned} \ddot{X}_l = F_l / m_l = \text{sgn}|\dot{X}_l| \times (|F_{\text{эм}} - F_{k.l} - F_{\text{тр.гр}}| - F_{\text{рол}} \cdot \text{sgn}(\dot{X}_l)) / m_l + \\ + (1 - \text{sgn}|\dot{X}_l|) \times (|F_{\text{эм}} - F_{k.l} - F_{\text{тр.гр}}| - F_{\text{рол}}) \times \\ \times \theta(F_{\text{эм}} - F_{k.l} - F_{\text{тр.гр}} - F_{\text{рол}}) \times \text{sgn}(F_{\text{эм}} - F_{k.l} - F_{\text{тр.гр}}) / m_l. \end{aligned} \quad (2.72)$$

На транспортируемый груз по оси OX действуют силы:

$$\sum F_x = 0: \quad F_{\text{тр.гр}} - F_{\text{сп}} = 0; \quad (2.73)$$

где $F_{\text{сп}}$ – сила инерции транспортируемого груза, $F_{\text{сп}} = m_{\text{сп}} \cdot \ddot{X}_{\text{сп}}$, Н.

Из уравнения (2.73) следует $\ddot{X}_{\text{сп}} = g \cdot f_{\text{сп}}$.

Выражение условия инерционного движения можно представить в линейной форме:

$$\ddot{X}_{ep} = \operatorname{sgn}(-\dot{X}'_{ep}) \cdot a_{mp} + (1 - \operatorname{sgn}|\dot{X}'_{ep}|) \times (\operatorname{sgn}(\ddot{X}_l) \times \ddot{X}_{mp} \times \theta(|\ddot{X}_l| - \ddot{X}_{mp}) + \ddot{X}_l \times \theta(\ddot{X}_{mp} - |\ddot{X}_l|))$$

На индуктор по оси OX действуют силы:

$$\sum F_x = 0: \quad F_{k.u} + F_{\text{тр.напр}} + F_u - F_{\text{ЛАД}} = 0, \quad (2.74)$$

где $F_{k.u}$ – сила сопротивления пружины 11 действующей на индуктор по оси OX , $F_{k.u} = -k_{11}x_u$, Н;

k_{11} – коэффициент жесткости пружины 11, Н/м;

$F_{\text{тр.напр}}$ – сила трения направляющих индуктора, Н;

F_u – сила инерции индуктора, $F_u = m_u \ddot{X}_u$, Н;

m_u – масса индуктора, кг;

\ddot{X}_u – ускорение индуктора по оси OX , м/с^2 .

По приведенным уравнениям можно сделать вывод, что конструкция линейного электропривода не будет обеспечивать необходимую плавность пуска. Т. к. транспортирующий лоток жестко связан с вторичным элементом, усилия переходного процесса передаются от вторичного элемента к транспортирующему лотку и приводят к проскальзыванию транспортируемого материала в обратном направлении. Кроме того, построение конструкции привода с предварительным разгоном индуктора ЛАД сопряжено с трудностями из-за большой массы индуктора.

На рисунке 2.11 представлена расчетная схема инерционного конвейера с предварительным разгоном вторичного элемента.

Инерционный конвейер с предварительным разгоном вторичного элемента работает следующим образом: при подключении индуктора 10 с помощью блока управления 14 к сети, и так как вторичный элемент имеет возможность двигаться относительно транспортирующего лотка 3 и связан с ним посредством упругих элементов 11, в движение приходит вторичный элемент 8 (на рисунке 2.11 вправо) и начинает сжимать упругие элемент 11, которые при этом накапливают потенциальную энергию. В свою очередь, на транспортирующий лоток 3 воздействует сила упругого элемента 11 и лоток тоже ускоряется.

По мере сжатия упругих элементов 11 скорость вторичного элемента 8 будет снижаться, а лоток 3 ускоряться в направлении транспортирования (на рисунке 2.11 вправо), т. к. по мере разгона лотка 3 упругий элемент 11 разжимается, тем самым обеспечивается дальнейший разгон лотка 3.

При сравнении между собой рассматриваемых выше расчетных схем конструкций конвейеров со звеном предварительного разгона линейного электропривода можно заметить их взаимные достоинства и недостатки. В конструкции с предварительным разгоном индуктора возникает сложность подвода питания к индуктору за счет его подвижности, но появляется возможность дополнительной вентиляции обмоток индуктора.

В конструкции с предварительным разгоном вторичного элемента более точно и проще обеспечивается необходимый минимальный воздушный зазор между индуктором и вторичным элементом за счет «гибкой» связи последнего с грузонесущим лотком. Но есть и недостаток: за счет подвижной связи вторичного элемента ЛАД с грузонесущим лотком конструкция подвижной части конвейера сложнее и обладает большей массой.

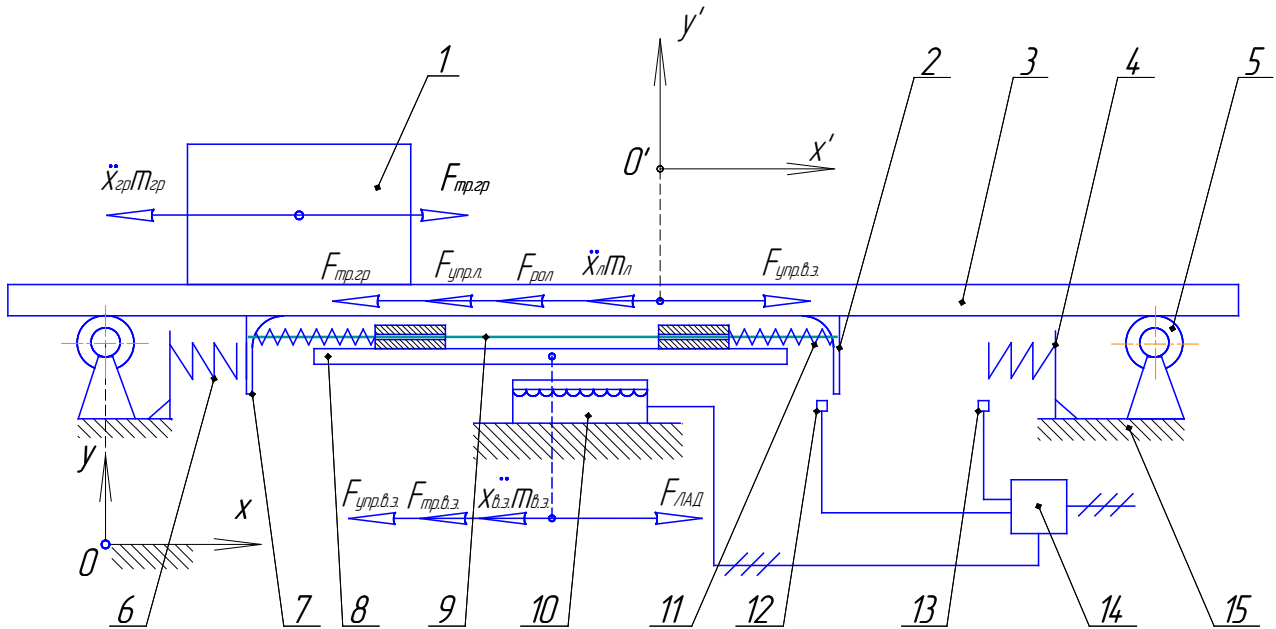


Рисунок 2.11

Инерционный конвейер с предварительным разгоном вторичного элемента:

- 1 – транспортируемый груз; 2, 7 – упоры лотка, 3 – лоток транспортирующей поверхностью (рабочий орган), 4, 6, 11 – пружины (упругие элементы); 5 – опорные ролики;
- 8 – вторичный элемент; 9 – направляющие вторичного элемента; 10 – индуктор;
- 12, 13 – датчики положения лотка; 14 – блок управления; 15 – основание

Напряжение питания ЛАД:

$$U_1 = U_{ист} \cdot \theta(\dot{x}_л) \cdot \theta(x_л - x_{вкл}) \cdot \theta(x_{выкл} - x_л), \quad (2.75)$$

где $U_{ист}$ – напряжение источника питания, В;

$x_{вкл}$, $x_{выкл}$ – координаты датчиков включения и выключения напряжения питания ЛАД, м.

Ускорения транспортирующего лотка, транспортируемого груза и вторичного элемента, соответственно м/с²:

$$\ddot{x}_л = \frac{1}{m_л} (F_{упр.в.э.} - F_{упр.л} - F_{рол} - F_{тр.гр} + F_{тр.в.э.}), \quad (2.76)$$

$$\ddot{x}_{гр} = \text{sign}(-\dot{x}'_{гр}) \cdot g \cdot f_{гр} + (1 - \text{sign}|\dot{x}'_{гр}|) \times \\ \times (\text{sign}(\ddot{x}_л) \cdot g \cdot f_{гр} \cdot \theta(|\ddot{x}_л| - g \cdot f_{гр}) + \ddot{x}_л \cdot \theta(g \cdot f_{гр} - |\ddot{x}_л|)), \quad (2.77)$$

$$\ddot{x}_{в.э.} = \frac{1}{m_{в.э.}} (F_{ЛАД} - F_{упр.в.э.} - F_{тр.в.э.}), \quad (2.78)$$

где $m_l, m_{в.э.}$ – масса транспортирующего лотка и вторичного элемента, соответственно, кг;

$f_{зр}$ – коэффициент трения транспортируемого груза об поверхность лотка;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$F_{упр.в.э.}$ – сила упругого элемента звена предварительного разгона, Н:

$$F_{упр.в.э.} = \theta(x'_{в.э.}) \cdot (k_{11} \cdot x'_{в.э.} + F_{0.11}), \quad (2.79)$$

где k_{11} – коэффициент жесткости упругого элемента звена предварительного разгона 11, Н/м;

$F_{0.11}$ – сила предварительного сжатия упругого элемента 11, Н;

$F_{упр.л}$ – сумма сил упругих элементов 6 и 4 действующих на лоток с учетом координат их расположения и сил их предварительного сжатия $F_{0.6}$ и $F_{0.4}$, Н:

$$\begin{aligned} F_{упр.л} &= F_{упр.6} + F_{упр.4} = \\ &= \theta(x_l - x_{вкл}) \times (k_6 \cdot (x_l - x_{вкл}) + F_{0.6}) + \\ &+ \theta(x_l - x_{выкл}) \times (k_4 \cdot (x_l - x_{выкл}) + F_{0.4}), \end{aligned} \quad (2.80)$$

где k_6, k_4 – коэффициенты жесткости упругих элементов 6 и 4, Н/м;

$F_{рол}$ – сила сопротивления опорных роликов лотка, Н:

$$\begin{aligned} F_{рол} &= F_{тр.к.} \cdot \text{sign}(\dot{x}_l) \cdot \theta(\dot{x}_l) + (F_{упр.в.э.} - F_{упр.л} - F_{тр.гр}) \times \\ &\times (1 - \theta(F_{упр.в.э.} - F_{упр.л} - F_{тр.гр})) \cdot (1 - \theta|\dot{x}_l|) + \\ &+ F_{тр.к.} \cdot \text{sign}(F_{упр.в.э.} - F_{упр.л} - F_{тр.гр}) \times \\ &\times (\theta|F_{упр.в.э.} - F_{упр.л} - F_{тр.гр}| - F_{тр.к.}) \cdot (\theta|\dot{x}_l|), \end{aligned} \quad (2.81)$$

где $F_{тр.к} = (m_l + m_{зр} + m_{в.э.}) \cdot g \cdot f_{рол}$ – сила трения качения роликов, Н;

$m_{зр}$ – масса транспортируемого груза, кг;

$f_{рол}$ – коэффициент трения качения роликов;

$F_{тр.гр}$ – сила трения транспортируемого груза об поверхность лотка, Н:

$$F_{тр.гр} = m_{зр} \ddot{x}_{зр}. \quad (2.82)$$

$F_{тр.в.э.}$ – сила трения в направляющих звена предварительного разгона, Н:

$$\begin{aligned} F_{тр.в.э.} &= (F_{тр} + F_{огр}) \cdot \text{sign}(\dot{x}'_{в.э.}) \cdot \theta(\dot{x}'_{в.э.}) + (F_{в}) \times (1 - \theta(F_{в})) \cdot (1 - \theta|\dot{x}'_{в.э.}|) + \\ &+ (F_{тр} + F_{огр}) \cdot \text{sign}(F_{в}) \times (\theta|F_{в}| - (F_{тр} + F_{огр})) \cdot (\theta|\dot{x}'_{в.э.}|), \end{aligned}$$

где $F_{тр.ск}$ – сила трения скольжения, Н;

$F_{огр}$ – сила, учитывающая ограничение хода вторичного элемента в сторону отрицательного перемещения относительно транспортирующего лотка, Н:

$$F_{огр} = \theta(\text{sign}(\dot{x}'_{в.э.})) \cdot \theta(\text{sign}(x'_{в.э.})) \cdot \infty, \quad (2.83)$$

$F_{в}$ – сила взаимодействия вторичного элемента и лотка, Н:

$$F_{в} = F_{ЛД} - F_{упр.в.э.} - \frac{m_{в.э.}}{m_{в.э.} + m_l} (F_{ЛД} - F_{упр.л} - F_{тр.гр} - F_{рол});$$

$F_{\text{ЛАД}} = f(U_1, \dot{x}_{\text{в.э}})$ – продольная сила, развиваемая ЛАД, подчиняющаяся уравнению электромеханического преобразования энергии Парка – Горева и зависящая от значений подаваемого напряжения U_1 , скорости вторичного элемента, параметров схемы замещения, полюсного деления и синхронной скорости ЛАД.

Результирующая сила, действующая на лоток по оси OX , необходимая для обеспечения наибольшего ускорения транспортирующего лотка без обратного проскальзывания груза, определяется следующим выражением, Н:

$$\sum F_{\text{л.х.}} = (m_{\text{л}} + m_{\text{сп}}) \cdot g \cdot f_{\text{гр}} = \text{const}. \quad (2.84)$$

Следовательно, силы упругих элементов 11 – звена предварительного элемента и 6 – лотка (рисунок 2), Н:

$$F_{\text{упр.в.э.}} = (m_{\text{л}} + m_{\text{сп}}) \cdot g \cdot f_{\text{гр}} + F_{\text{тр.рол}} - F_{\text{тр.в.э.}} = \text{const}, \quad (2.85)$$

$$F_{\text{упр.6.}} = (m_{\text{л}} + m_{\text{сп}} + m_{\text{в.э.}}) \cdot g \cdot f_{\text{гр}} - F_{\text{тр.рол}} = \text{const}. \quad (2.86)$$

Если силу упругости деформированной пружины можно выразить как $F_{\text{упр.}} = F_0 + k x$, то для выполнения условия $F_{\text{упр.}} = \text{const}$ необходима жесткость $k = 0$ и сила предварительного сжатия $F_0 = F_{\text{упр.}}$, что на практике не реализуемо. Следовательно, необходимо, чтобы упругий элемент звена предварительного элемента имел наименьшую возможную жесткость при необходимом значении силы предварительного сжатия F_0 и рабочего хода $x'_{\text{в.э.}}$.

Основываясь на том же условии, можно определить необходимое усилие ЛАД:

$$F_{\text{ЛАД.н.}} = (m_{\text{л}} + m_{\text{сп}} + m_{\text{в.э.}}) \cdot g \cdot f_{\text{гр}} + F_{\text{тр.рол}}. \quad (2.87)$$

Результат данного выражения предварительно можно принять за номинальное тяговое усилие ЛАД. А его точное значение и значение пускового усилия будет определяться результатами дальнейшего исследования.

2.3 Выводы по главе

1. Определен диапазон параметров ЛАД ($G > 20$; $V_1 < 10$ м/с; $2p > 4$) в приводе технологической машины в АПК со сложным колебательным движением рабочего органа.

2. Предложена методика расчета в ЛАД электромеханических сил тяги F_x и нормальной F_y по «Т»-образной схеме замещения, при изменяющемся воздушном зазоре двигателя, а поперечной F_z – полевым методом.

3. В качестве накопителей механической энергии выбраны цилиндрические винтовые пружины, которые обеспечивают стабильность настройки, имеют сравнительно небольшие габаритные размеры и массы, простые в сборке и выносимые при применении.

4. Разработаны кинематические схемы и по ним математические модели основных технологических машин в АПК: зерноочистительной, вальцедековой и инерционного конвейера.

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЭСЖД ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

Интеграция рабочего органа технологической машины с ЛАЭСЖД приводит к необходимости анализа привода и машины, работающих в комплексе. Значительный интерес в предложенных ЛАЭСЖД рабочих органов представляет анализ сил, развиваемых ЛАД для получения сложных колебаний. Сложные колебания рабочих органов сопровождаются постоянным изменением воздушного зазора ЛАД, при этом меняются его параметры схемы замещения.

На стадии проектирования ЛАЭСЖД необходимо определить влияние на характеристики технологической машины различных параметров конструктивных элементов привода и режимов работы двигателя и схемы управления с учетом параметров обрабатываемого материала. Детальное изучение электромеханических процессов позволяет создать ЛАЭСЖД, который в большей мере отвечает требованиям технологической машины. С целью оценки эксплуатационных возможностей технологических машин с ЛАЭСЖД и повышения их эффективности приводится анализ зерноочистительной машины, шелушильной машины и инерционного конвейера с ЛАЭСЖД.

3.1 Анализ сил, развиваемых ЛАД для получения сложных колебаний

Согласно методике расчета параметров схемы замещения и сил, развиваемых ЛАД, описанной в главе 2, проведем их анализ в статике и динамике.

В настоящее время наиболее удобным инструментом для работы является пакет объектно-визуального моделирования Matlab (приложение Simulink), специально предназначенный для моделирования нелинейных динамических систем. В нем реализованы принципы визуально-ориентированного программирования, позволяющие набирать нужные блоки и связывать их между собой с целью составления модели системы или устройства. При этом уравнения состояния, описывающие работу модели, формируются автоматически.

Визуальное моделирование в Simulink имеет существенный ряд достоинств, широко представленных в научной литературе [63, 87, 88, 94, 95, 96, 97, 128, 196, 197, 198, 199, 252, 254]:

- прозрачность реализуемой модели – все составляющие модель блоки соединены между собой линиями связи с указанием направления или специальными блоками «входа», «выхода», в результате чего модель представляет собой структурную схему, из которой легко понять сущность процессов, происходящих в системе;
- модель может иметь иерархическую структуру, т. е. состоять из моделей более низкого уровня;
- состав библиотеки SIMULINK может быть пополнен новыми модулями, что позволяет пользователю не отвлекаться каждый раз на рутинные операции синтеза исходных элементов «строительных блоков» и т. д.
- исследование математической модели электропривода решетного стана в среде объектно-визуального моделирования Matlab (Simulink).

Математический аппарат позволяет исследовать механические характеристики ЛАЭСЖД с учетом переходных процессов при изменяющемся воздушном зазоре. К примеру, на рисунках 3.1 приведены зависимости развиваемых сил ЛАД от скорости вторичного элемента по осям OX и OY . Как видно, сила тяги F_x при приближении V_x к V_0 уменьшается, а нормальная сила F_y увеличивается. На рисунках 3.2–3.4, как пример, приведены зависимости сил, развиваемых ЛАД от скольжения в статике (зазор не изменяется).

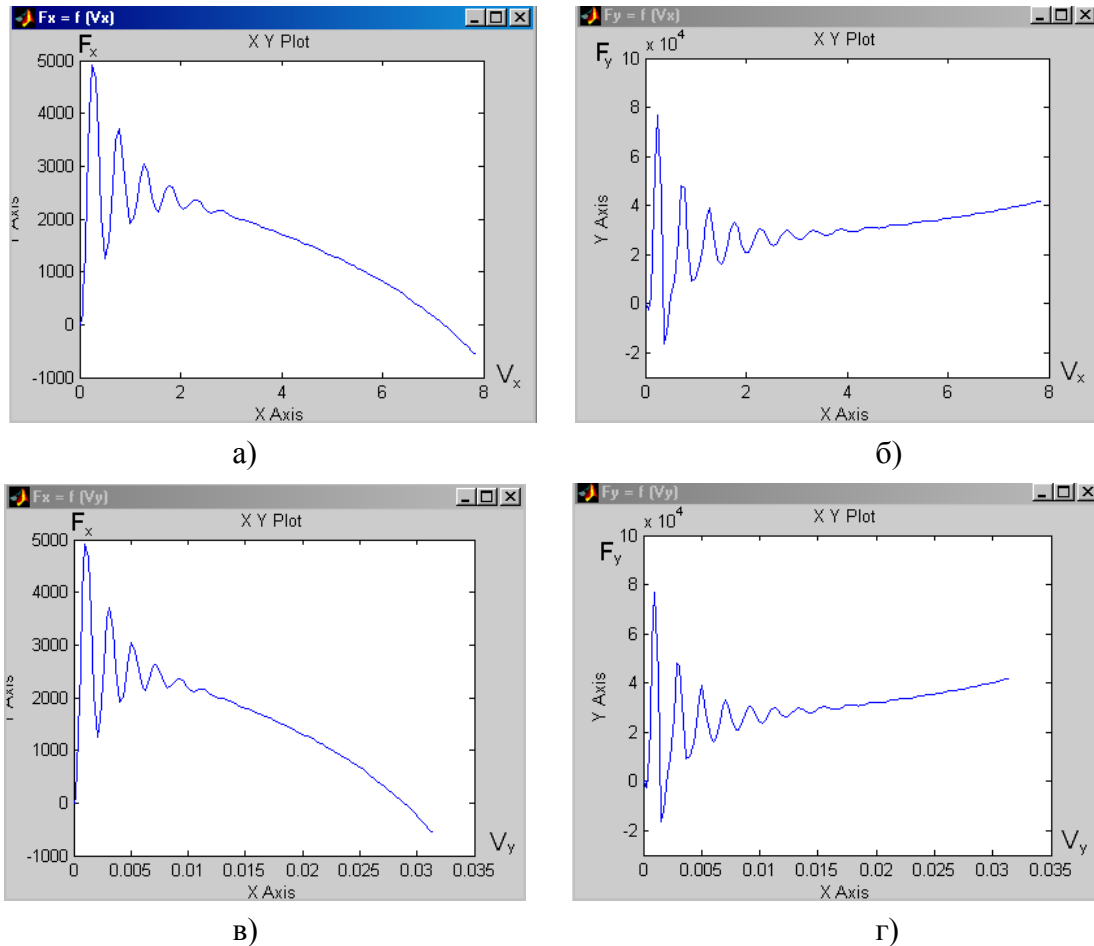


Рисунок 3.1
Зависимости развиваемых сил ЛАД от скорости по осям OX и OY
с учетом переходных процессов

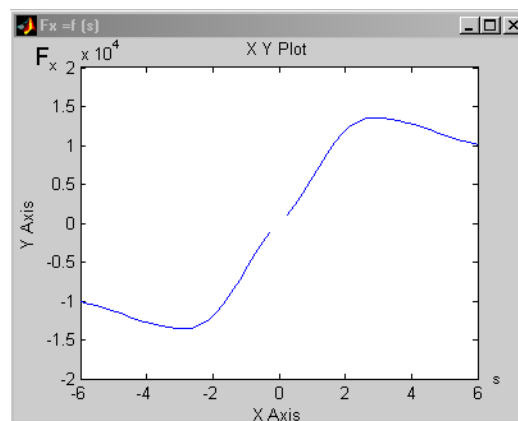


Рисунок 3.2
Зависимость развиваемой ЛАД силы тяги F_x от скольжения S

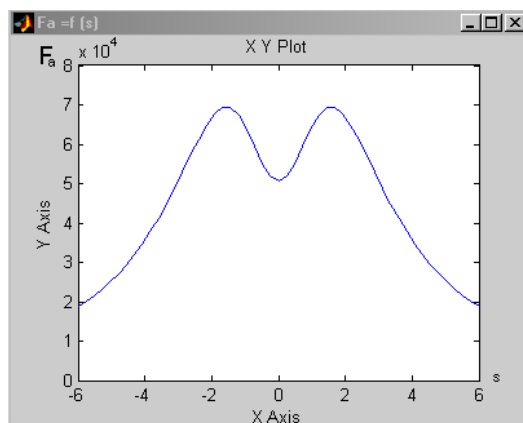


Рисунок 3.3
Зависимость развиваемой ЛАД силы притяжения F_{ya} от скольжения S

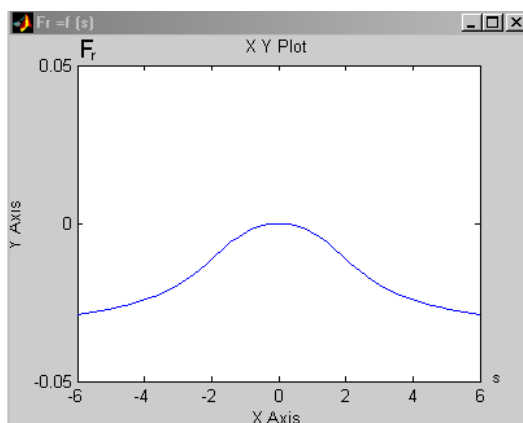


Рисунок 3.4
Зависимость развиваемой ЛАД силы отталкивания F_{yr} от скольжения S

Видно, что сила отталкивания F_{yr} (2.10) не оказывает существенного влияния, в целом, на нормальную силу ЛАД (2.11). Поэтому, при расчете нормальной силы ЛАД в низкоскоростном приводе силу отталкивания можно не учитывать.

3.2 Исследование ЛАЭСКД решетного стана зерноочистительной машины

Проводимые исследования направлены на установление взаимосвязей в электроприводе решетного стана с повышением эффективности его работы, а также установлением параметров колебательного процесса, при которых наблюдается наиболее эффективная очистка зернового материала. При этом, обзор доступной литературы и существующих конструкций зерноочистительных машин со сложным движением решетного стана показал, что процесс очистки может происходить без снижения его эффективности при большом диапазоне технологических параметров: амплитуда продольных $A_{\text{прод}} = 5 \dots 30$ мм и поперечных колебаний $A_{\text{попер}} = 2$ мм, частота $f_{\text{кол.рс}} = 2 \dots 20$ Гц и выше. Учитывая факт, что ЛАД нецелесообразно использовать при частоте колебаний свыше 3 Гц, при проведении опытов примем максимально допустимое значение частоты колебаний $f_{\text{кол.рс}} = 3$ Гц. Соответственно, при проведении эксперимен-

тов на зерноочистительной машине необходимо получить параметры в установленном режиме работы $A_{\text{попер}} = 2$ мм и $f_{\text{кол.рс}} = 3$ Гц, после чего при различной амплитуде $A_{\text{прод}}$ исследовать разработанный электропривод.

Основные исследуемые параметры можно разделить на 2 группы:

1) технологические параметры, определяемые технологией производства, конструкцией машины и свойствами зернового материала. Наиболее важными из них являются производительность зерноочистительной машины Q , масса решетного стана $m_{\text{рс}}$, масса зернового материала, находящегося на решетном стане m_3 , коэффициенты трения покоя $f_{\text{п}}$ и скольжения $f_{\text{ск}}$ по поверхности решетного стана.

2) конструктивные параметры и режимы работы ЛЭП. К ним относятся: мощность ЛАД, коэффициенты жесткости упругих элементов C_1 и C_2 , координаты включения и выключения индуктора ЛАД $S_{\text{вкл}}$ и $S_{\text{выкл}}$, конструктивные особенности индуктора и вторичного элемента ЛАД.

Судить об эффективности работы математической модели напрямую невозможно. Это связано с тем, что такие выходные характеристики, позволяющие анализировать работу решетного стана, как амплитуда поперечного $A_{\text{попер}}$ и продольного $A_{\text{прод}}$ колебаний, частота колебаний $f_{\text{кол.рс}}$ и угол наклона относительно горизонтали α оказывают прямое влияние на эффективность сепарации зернового материала, но при этом сами являются зависимыми величинами от таких параметров, как мощность ЛАД P , жесткость упругих элементов C_1 и C_2 , координат включения и выключения питания $S_{\text{вкл}}$ и $S_{\text{выкл}}$, а также массы решетного стана $m_{\text{рс}}$ и зернового материала m_3 . Поэтому предлагается проводить теоретические исследования созданной математической модели в 2 этапа. На первом этапе необходимо исследовать влияние различных параметров работы ЛАД на выходные характеристики, а затем только исследовать влияние последних на эффективность выделения сорных примесей (экспериментально).

3.2.1 Математическая модель электропривода решетного стана в среде объектно-визуального моделирования Matlab (Simulink)

Основное окно математической модели в пакете Simulink представлено на рисунке 3.5. В нем расположены блоки, реализующие систему уравнений (2.19–2.50) и блочные подсистемы, рассчитывающие его члены. Интерфейс Simulink не поддерживает русские названия переменных, поэтому в модели переменные обозначены через похожие английские буквы.

Постоянными параметрами зерноочистительной машины в течение времени моделирования T являются: масса решетного стана $m_{\text{рс}}$ (в модели – mrs); масса зернового материала, находящегося на поверхности решетного стана m_3 (mgr); коэффициент трения зерен о поверхность решетного стана f_3 (fgr); минимальный рабочий зазор δ_{min} (Yrs_0); максимальный рабочий зазор δ_{max} (Yrs_max); сопротивление упругих подвесок $R_{\text{подв}}$ ($F_{\text{тол}}$); полюсное деление τ (τ), синхронная скорость V_0 (V_0); параметры схемы замещения R'_2 (Rr); X_k – (Xk); X_s (Xs); X_m (Xm).

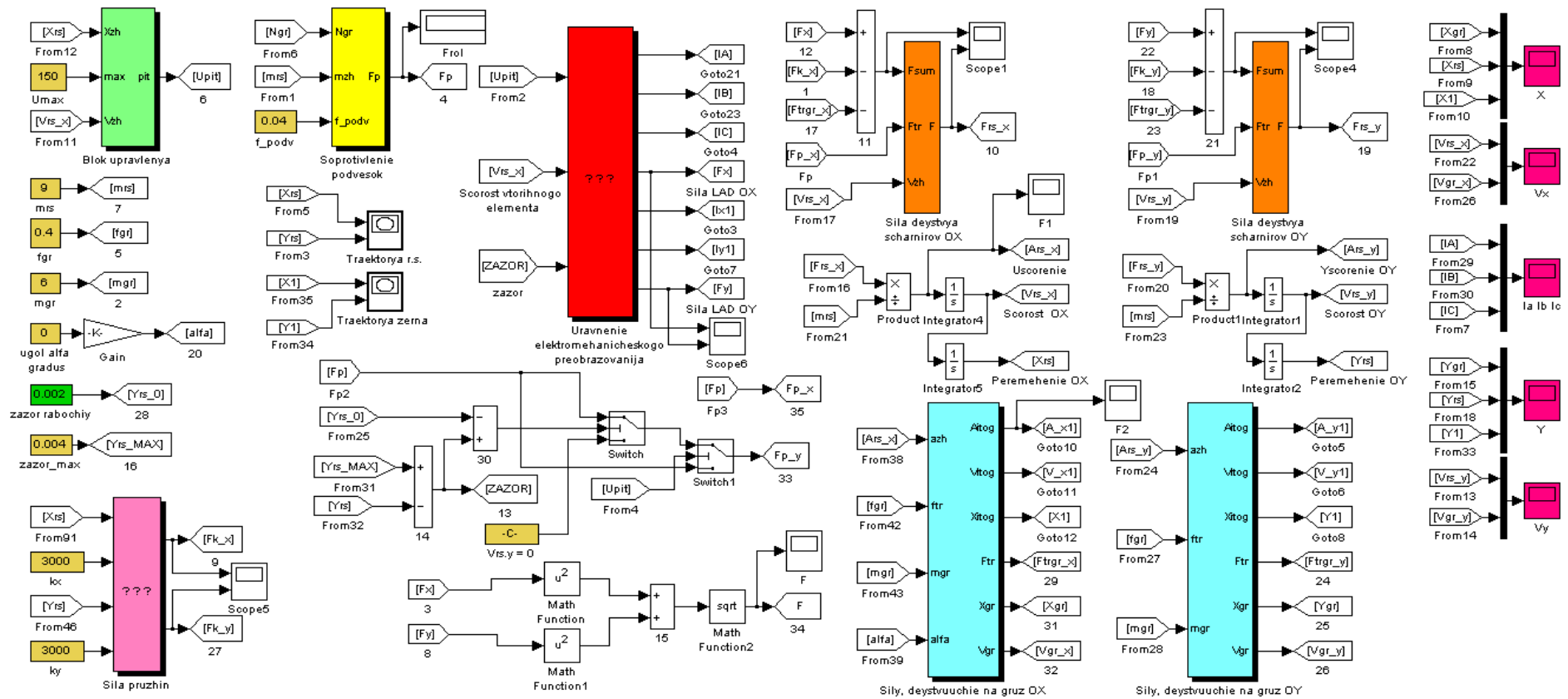


Рисунок 3.5

Основное окно математической модели электропривода решетчатого стана в среде объектно-визуального моделирования Matlab (Simulink)

Расчет силы тяги ЛАД F_x и основных электрических величин: P_1 (в модели P1), Q_1 (Q1), $P_{\text{инд}}$ (Pin), $P_{\text{л}}$ (Pl), I_{I_x} (I1x), I_{I_y} (I1y), S (S) согласно (2.35...2.50) производится в подсистеме «Uравnenie elektromehaničeskogo preobrazovanija». Временную зависимость силы противодействия упругих элементов $F_{k,x}$ по формулам (2.23) рассчитывает подсистема «Sila pruzhin», сила сопротивления вертикальных подвесок $F_{\text{подв}}$ в подсистеме (2.24) рассчитывается в блоке «Soprotivlenie podvesok», сила трения зернового материала $F_{\text{тр}}$ и $F_{\text{тр1}}$ для различных систем координат по системе (2.25, 2.30) в блоке «Trenie gruzа».

3.2.2 Исследование характеристик ЛАД в приводе зерноочистительной машины

Параметры схемы замещения ЛАД для привода решетного стана, рассчитанные согласно методике [3, 6], составляют: $R_1 = 6,92$ Ом, $R'_2 = 4,09$ Ом, $X_1 = 4,86$ Ом, $X'_2 = 0,254$ Ом, $X_m = 2,67$ Ом, $\tau = 0,0425$ м.

При моделировании приняты следующие постоянные параметры:

- коэффициент трения зерна о поверхность решетного стана $f_3 = 0,4$;
- масса решетного стана $m_{\text{рс}} = 19$ кг;
- сила сопротивления шарниров упругих подвесок $F_{\text{под}} = 3,5$ Н.

В большинстве существующих конструкций ЛЭП немагнитный воздушный зазор складывается из суммы толщины воздушного зазора и дюралевой пластины вторичного элемента. Для уменьшения немагнитного воздушного зазора можно использовать шихтованный вторичный элемент, выполненный с короткозамкнутой обмоткой, уложенной в пазы стального сердечника (конструкция выполнена подобно индуктору ЛАД), или же представляющий собой сплошную токопроводящую пластину, изготовленную из меди, алюминия или ферромагнитной стали.

Для определения влияния воздушного зазора δ на поперечную (нормальную) силу ЛАД F_y построена зависимость $F_y = f(\delta)$ (рисунок 3.6).

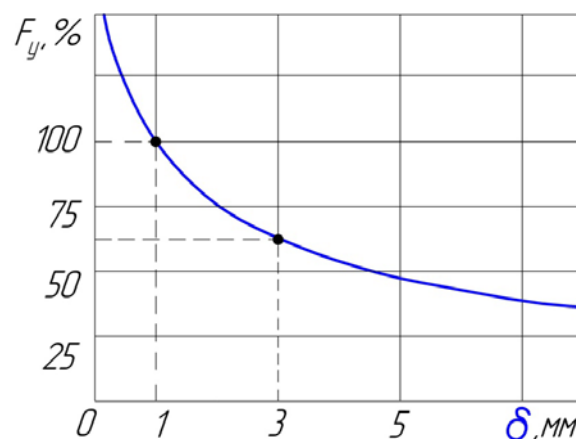


Рисунок 3.6

Расчетная зависимость поперечной силы ЛАД F_y от воздушного зазора δ

Необходимое изменение зазора с 3 мм до 1 мм обусловлено технологическим процессом очистки (амплитуда поперечных колебаний решетного стана

должна составлять $A_{\text{попер}} = 2$ мм). Уменьшение зазора менее 1 мм приводит к опасности соприкосновения поверхностей индуктора и вторичного элемента, что связано с несовершенством обработки поверхности индуктора фрезерным инструментом.

Анализ рисунка 3.6 показывает, что при изменении зазора с максимального $\delta = 3$ мм до рабочего $\delta = 1$ мм, являющегося одновременно и минимальным, значение силы F_y составляет 67 % от номинального [30].

Определено соотношение поперечной F_y и продольной F_x сил при величине воздушного зазора $\delta = 3$ мм в момент пуска, составляющее $F_y = (8 \dots 10) \cdot F_x$ (рисунок 3.7).

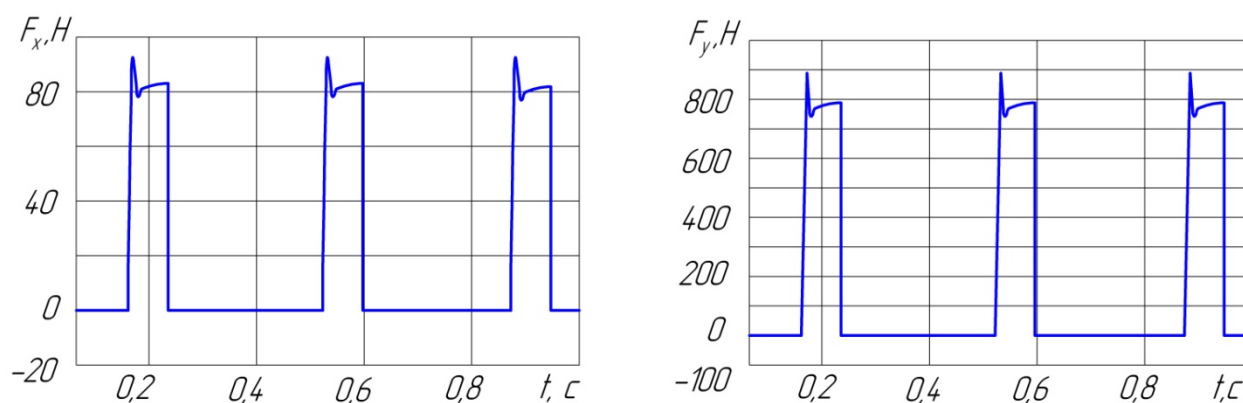


Рисунок 3.7

Расчетные временные зависимости продольной F_x и поперечной F_y сил

Полученные зависимости показывают значительную разницу между значениями сил, что позволяет при математическом моделировании сделать допущение, что в момент включения основное влияние на решетный стан оказывает поперечная сила F_y и, соответственно, ЛАД работает как электромагнит. При этом сила F_y оказывает существенное влияние на траекторию движения зернового материала в момент пуска ЛАД, притягивая решетный стан, а продольная сила начинает значительно влиять на траекторию только после уменьшения воздушного зазора до рабочего значения $\delta = 1$ мм.

Построена зависимость продольной силы (силы тяги) ЛАД F_x (рисунок 3.8) и тока I индуктора ЛАД (рисунок 3.9) от величины воздушного зазора δ . Анализ полученных зависимостей показывает, что при изменении зазора с максимального $\delta = 3$ мм до рабочего $\delta = 1$ мм значение F_x возрастает на 32 %; ток индуктора ЛАД снижается на 17 %.

С учетом полученных зависимостей характеристик ЛАД от воздушного зазора необходимо отметить, что при проектировании электропривода необходимо стремиться к минимально допустимому значению воздушного зазора, ограничиваясь при этом конструктивно безопасным расстоянием для избежания соприкосновения поверхности индуктора и вторичного элемента между собой.

При работе зерноочистительных машин часто приходится сталкиваться со скачками напряжения в сети, что негативно сказывается на сроке эксплуатации машин, а также может приводить к изменению заявленных технологических параметров колебаний. Согласно ПУЭ (Правила устройства электроуста-

новок) установлен предел отклонения напряжения сети $\pm 5\%$ для нормального режима и $\pm 10\%$ для послеаварийного. На рисунке 3.10 показана зависимость продольной ЛАД F_x и частоты колебаний решетного стана $f_{\text{кол.рс}}$ (рисунок 3.11) при изменении линейного напряжения сети U .

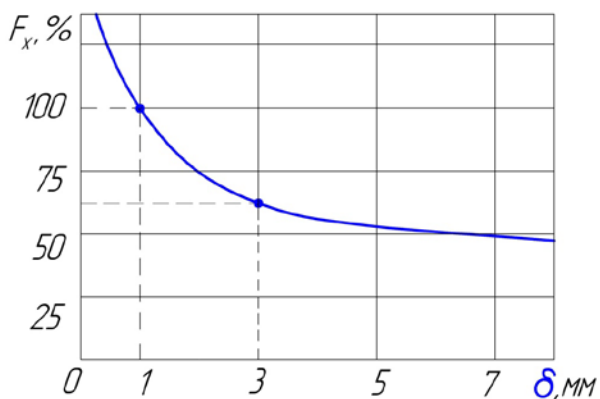


Рисунок 3.8

Расчетная зависимость продольной силы ЛАД F_x от воздушного зазора δ

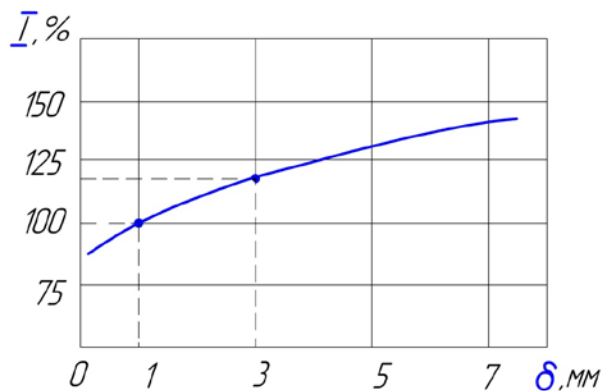


Рисунок 3.9

Расчетная зависимость тока индуктора ЛАД от воздушного зазора δ

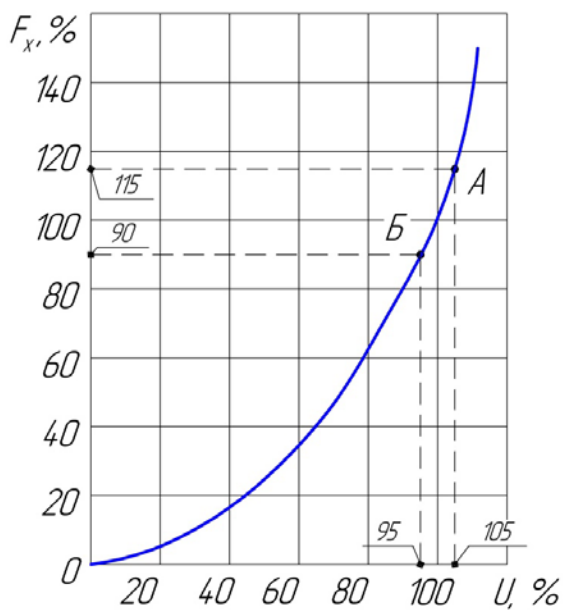


Рисунок 3.10

Расчетная зависимость продольной силы F_x от линейного напряжения U

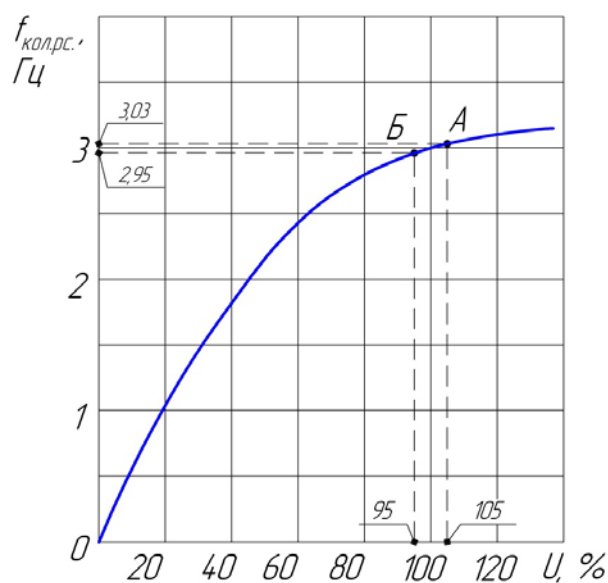


Рисунок 3.11

Расчетная зависимость частоты колебаний решетного стана $f_{\text{кол.рс}}$ от линейного напряжения U

При проведении исследований в Matlab (Simulink) не приводятся зависимости частоты поперечных колебаний решетного стана от различных параметров работы, т. к. частота продольных и поперечных колебаний идентичны друг другу. Величина амплитуды поперечных колебаний при проведении опытов ограничивалась величиной воздушного зазора δ и установкой ограничивающих данное движение упорных роликов и оставалась постоянной.

Анализ графических зависимостей показывает, что при увеличении линейного напряжения U с 95 % до 105 % от номинального значения, значительно

возрастает продольная сила F_x , что обуславливается их квадратичной зависимостью. В свою очередь изменение напряжения U в пределах $\pm 5\%$ не окажет существенного влияния на частоту колебаний решетного стана $f_{\text{кол.рс}}$, что говорит о стабильности колебательного процесса.

3.2.3 Влияние координат включения и выключения индуктора ЛАД, коэффициента жесткости упругих элементов на параметры колебательного процесса

При описании принципа работы зерноочистительной машины было сказано, что режим автоколебаний осуществляется подключением и отключением индуктора ЛАД от сети при достижении решетным станом оптических датчиков положения с определенными координатами, влияние которых на процесс очистки рассмотрим ниже.

Анализ полученных зависимостей показывает, что амплитуда и частота продольных колебаний значительно зависят от координат включения и выключения индуктора ЛАД, при этом наиболее рациональными значениями являются координата оптического датчика включения $S_{\text{вкл}} = -0,02 \dots -0,03$ м и координата выключения $S_{\text{выкл}} = 0,01 \dots 0,02$ м, т. к. в этих диапазонах изменения параметров колебательного процесса решетного стана происходят незначительно.

В соответствии с функциональной схемой колебательного ЛЭП (рисунок 1.26) для энергетически эффективной работы необходимо подобрать и установить упругие элементы в электропривод решетного стана зерноочистительной машины. При подаче напряжения на индуктор ЛАД упругие элементы 3 начинают работать на растяжение, а упругие элементы 4 сжиматься (рисунок 2.4). Учитывая это, принят суммарный исследуемый коэффициент жесткости в интервале $C = 1000 \dots 5000$ Н/м.

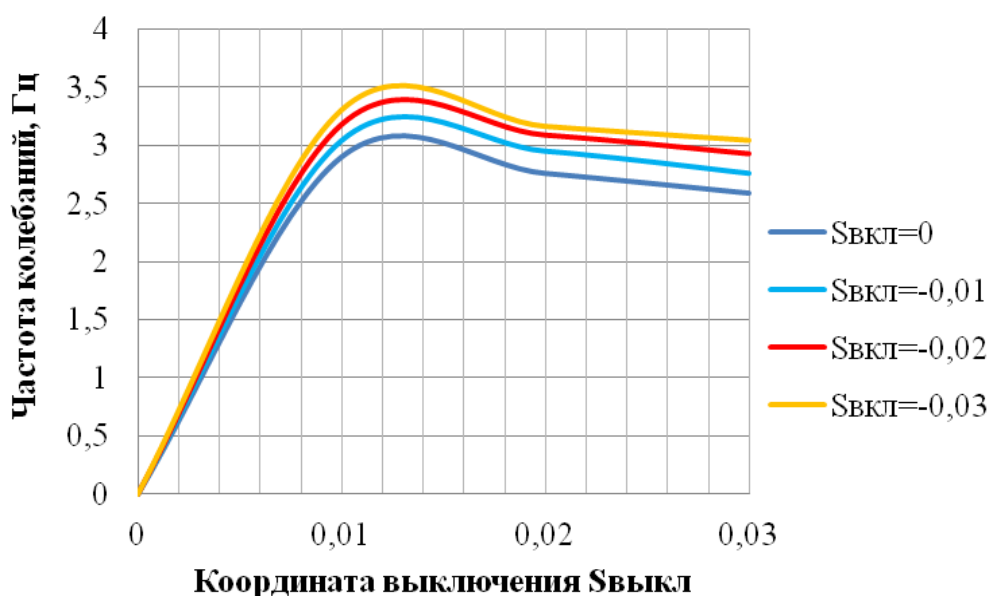


Рисунок 3.12

Расчетная зависимость частоты продольных колебаний решетного стана от координаты включения и выключения индуктора ЛАД

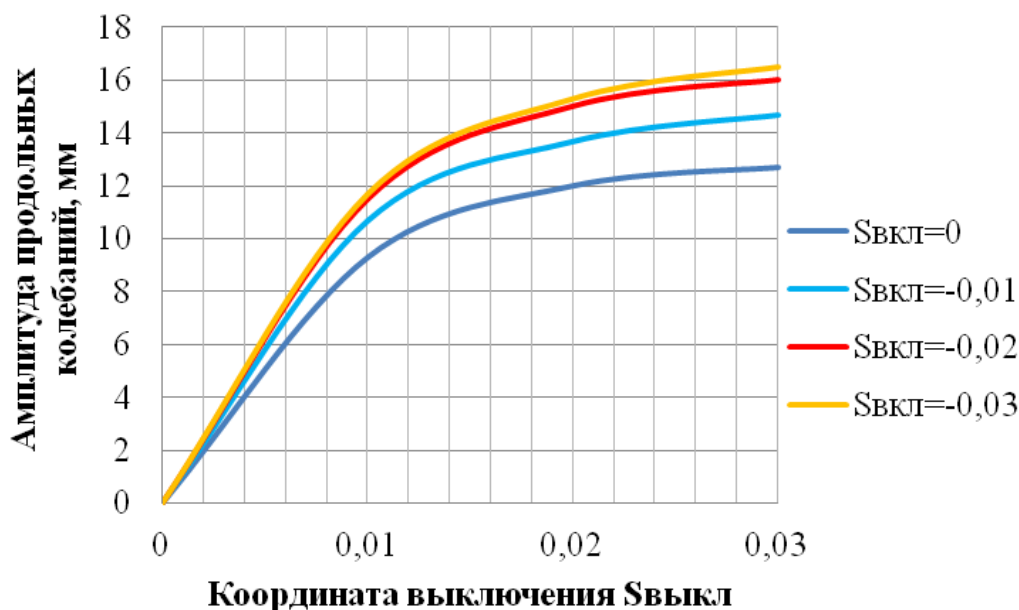


Рисунок 3.13

Расчетная зависимость амплитуды продольных колебаний решетного стана от координаты включения и выключения индуктора ЛАД

Проведены исследования зависимостей продольной амплитуды колебаний и частоты колебаний решетного стана от коэффициента жесткости упругих элементов $A_{\text{прод}} = f(C)$, $f_{\text{кол.рс}} = f(C)$. Исследования проводились при постоянной подаче зернового материала.

На рисунке 3.14 построена зависимость продольной амплитуды колебаний $A_{\text{прод}}$ от коэффициента жесткости C . Анализ зависимости $A_{\text{прод}} = f(C)$ показывает, что с увеличением суммарной жесткости C упругих элементов амплитуда продольных колебаний $A_{\text{прод}}$ уменьшается, что вызвано недостаточной мощностью ЛАД. Кроме этого, снижаются показатели эффективности очистки зернового материала, т. к. начинается сгруживание материала на поверхности решетного стана.

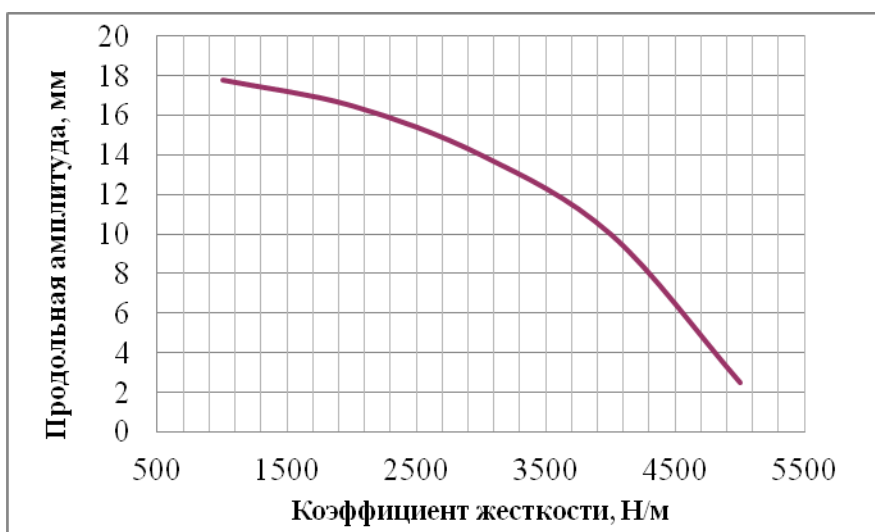


Рисунок 3.14

Расчетная зависимость амплитуды продольных колебаний $A_{\text{прод}}$ от коэффициента жесткости упругих элементов $A_{\text{прод}} = f(C)$

Уменьшение коэффициента C приводит к увеличению $A_{\text{прод}}$, что не имеет смысла, т. к. при этом будет происходить отрыв зернового материала от поверхности решетного стана, а также его подбрасывание, что не подчиняется закону ударно-вибрационных колебаний, описанному в главе 2.1. Таким образом, определено, что при коэффициенте жесткости $C = 3000 \dots 3200$ Н/м наблюдаются наилучшие показатели эффективности очистки.

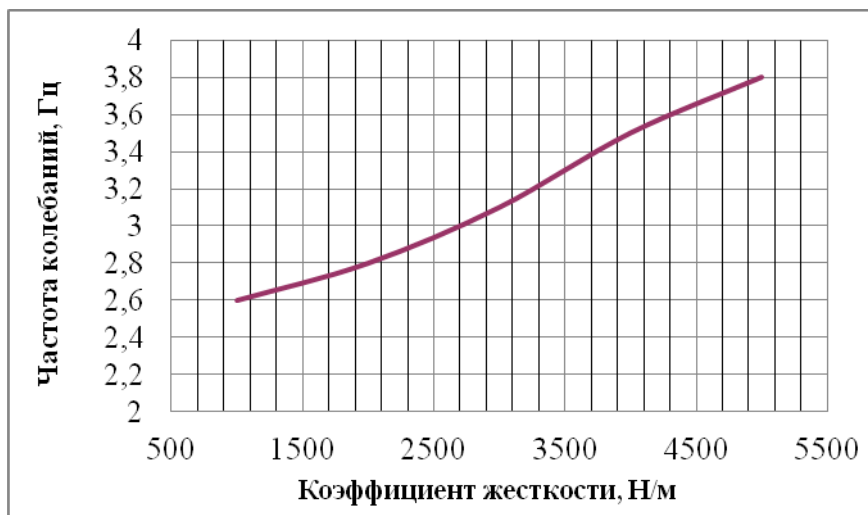


Рисунок 3.15

Расчетная зависимость частоты продольных колебаний от коэффициента жесткости упругих элементов $f_{\text{кол.рс}} = f(C)$

На рисунке 3.15 представлена зависимость частоты продольных колебаний решетного стана $f_{\text{кол.рс}}$ от коэффициента жесткости упругих элементов $f_{\text{кол.рс}} = f(C)$. Анализ полученных зависимостей показывает, что частота $f_{\text{кол.рс}}$ значительно зависит от коэффициента жесткости C , что связано с небольшой амплитудой колебаний. Исходя из полученных зависимостей и конструкции зерноочистительной машины значение C должно быть выбрано из интервала $C = 2800 \dots 3000$ Н/м.

3.2.4 Влияние параметров зернового материала на траекторию движения решетного стана

Известным фактом является то, что в зависимости от очищаемой культуры объемные массы (натуры) зернового материала отличаются между собой. Например, по данным ФГУ Государственная семенная инспекция по Республике Башкортостан в 2012 г. объемная масса семян пшеницы составила 700...800 г/л, озимой ржи 640...740 г/л, ячменя 600...700 г/л. Учитывая данный факт, предлагается осуществлять подачу зернового материала по объемной массе. При этом необходимо рассмотреть, будет ли влиять изменение начальной удельной нагрузки q зернового материала на траекторию движения решетного стана (рисунок 3.16).

Полученные траектории свидетельствуют о том, что решетный стан осуществляет сложное колебательное движение. Определено, что при изменении удельной нагрузки q на 0,14 кг/с·м амплитуда продольных колебаний измени-

лась на 5,5 % от значения $A_{\text{прод}} = 14,5$ мм (при данной амплитуде наблюдался наиболее эффективный процесс очистки) [30].

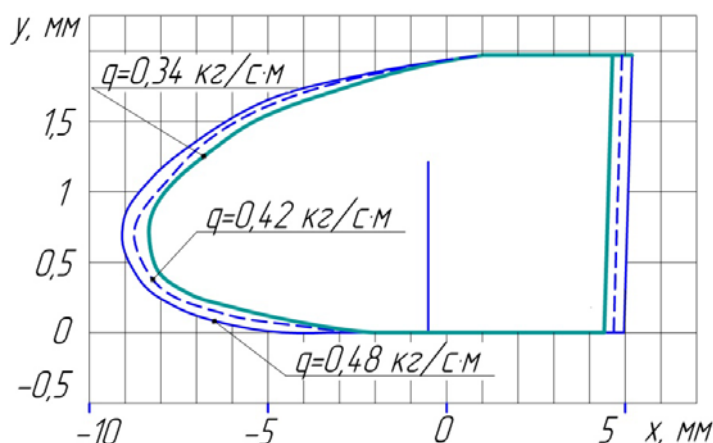


Рисунок 3.16

Траектория движения решетчатого стана при изменении удельной нагрузки q

3.2.5 Ускорение и средняя скорость решетчатого стана в зависимости от коэффициента жесткости упругих элементов и полюсного деления ЛАД

Одно из решающих влияний на движение зернового материала по поверхности решетчатого стана оказывает максимальное ускорение $a_{\text{макс.рс}}$ колебательного движения решетчатого стана, определяющее скорости, режимы и характер движения зернового материала. Если слой материала на решетке небольшой, соизмеримый с толщиной частиц, подлежащих разделению, то для их надежного просеивания достаточно сообщить решетку ускорение, не превышающее значение $a_{\text{макс.зм}} \leq 25 \text{ м/с}^2$. Кроме этого, при превышении данного значения $a_{\text{макс.зм}}$ происходит отрыв зернового материала от поверхности решетчатого стана. При значительной же толщине слоя приходится сообщать решетку значительные ускорения для того, чтобы мелкие частицы могли проникнуть через слой и достигнуть отверстий решета.

Зависимости максимального ускорения решетчатого стана $a_{\text{макс.рс}}$ и зерновой частицы относительно решетчатого стана $a_{\text{макс.зм}}$ от коэффициента жесткости упругих элементов $a_{\text{макс.рс}} = f(C)$ и $a_{\text{макс.зм}} = f(C)$ представлены на рисунках 3.17 и 3.18, соответственно.

Анализ зависимостей показывает, что при коэффициенте C в диапазоне $C = 1000 \dots 4000 \text{ Н/м}$ максимальное ускорение зерновой частицы относительно решетчатого стана не превышает $a_{\text{макс.зм}} \leq 25 \text{ м/с}^2$. Уменьшение коэффициента C увеличивает время прохождения частицы по поверхности решетчатого стана и, как следствие, уменьшается эффективность очистки.

На рисунках 3.19 и 3.20 изображены зависимости максимальных ускорений $a_{\text{макс.рс}}$ и $a_{\text{макс.зм}}$ от мощности индуктора ЛАД. Выявлено, что для получения наиболее эффективных параметров рабочего процесса экспериментальной установки необходима мощность ЛАД $P = 700 \dots 900 \text{ Вт}$. Увеличение мощности свыше 900 Вт приведет к превышению ускорением зерновой частицы значения $a_{\text{макс.зм}} \geq 25 \text{ м/с}^2$.

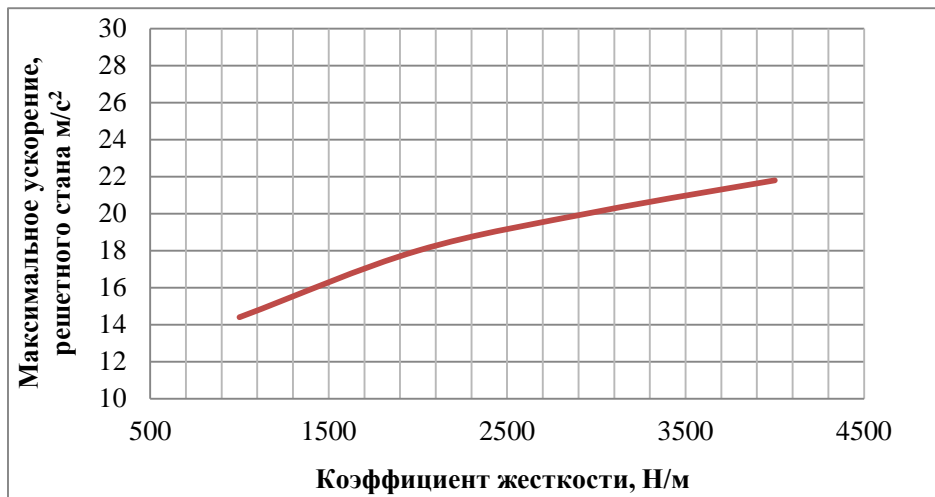


Рисунок 3.17

Расчетная зависимость максимального ускорения решетного стана от коэффициента жесткости упругих элементов $a_{\text{макс.рс}} = f(C)$

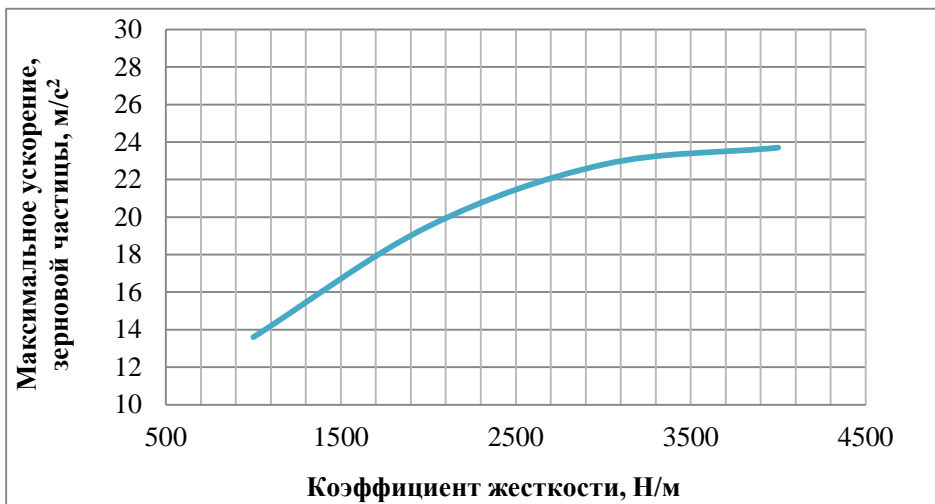


Рисунок 3.18

Расчетная зависимость максимального ускорения зерновой частицы от коэффициента жесткости упругих элементов $a_{\text{макс.зМ}} = f(C)$

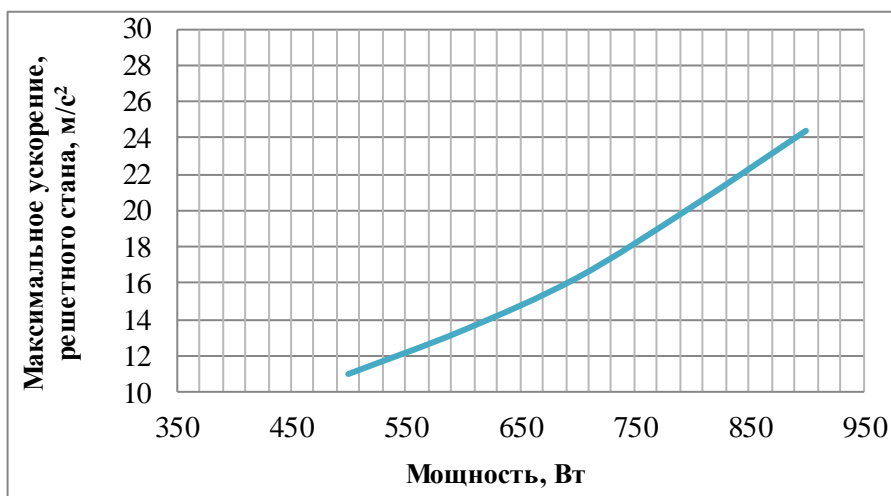


Рисунок 3.19

Расчетная зависимость максимального ускорения решетного стана от мощности ЛАД $a_{\text{макс.рс}} = f(P)$

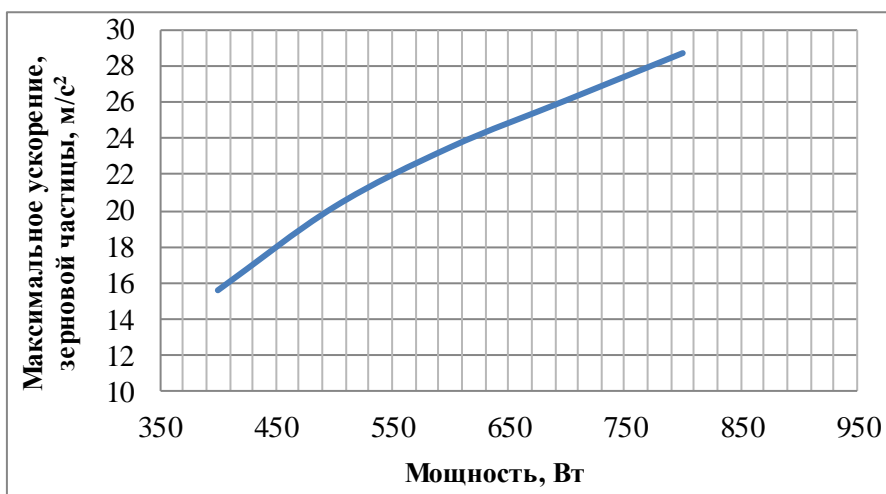


Рисунок 3.20

Расчетная зависимость максимального ускорения зерновой частицы от мощности ЛАД $a_{\text{макс.рс}} = f(P)$

На рисунке 3.21 показана зависимость средней скорости решетного стана $v_{\text{ср.рс}}$ от коэффициента жесткости упругих элементов C при различных величинах полюсного деления τ . Анализ зависимости показывает, что с увеличением полюсного деления возрастает значение $v_{\text{ср.рс}}$. В интервале коэффициента жесткости $C = 3200 \dots 3400$ Н/м при полюсном делении ЛАД $\tau = 0,045$ м средняя скорость $v_{\text{ср.рс}} = 0,2 \dots 0,23$ м/с.

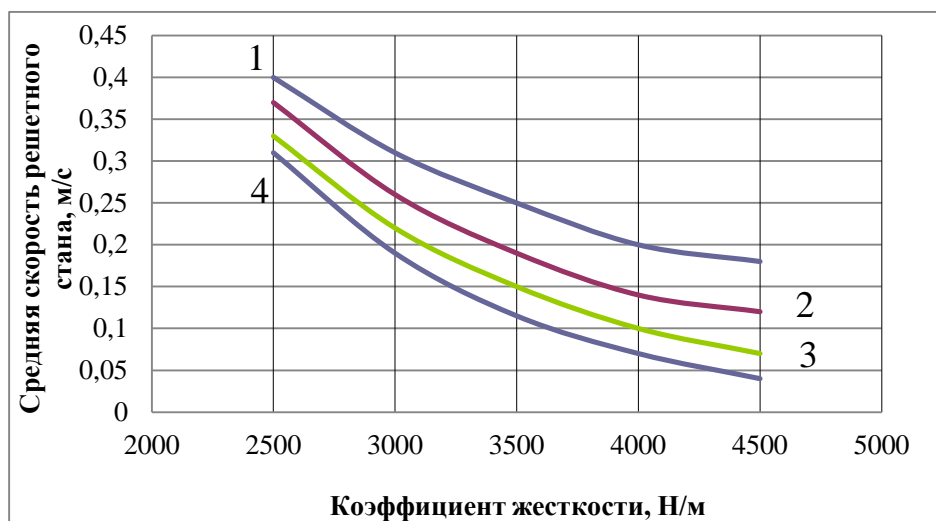


Рисунок 3.21

Расчетная зависимость средней скорости решетного стана от коэффициента жесткости упругих элементов при различном полюсном делении ЛАД: 1 – $\tau = 0,05$ м; 2 – $\tau = 0,045$ м; 3 – $\tau = 0,04$ м; 4 – $\tau = 0,035$ м

3.2.6 Энергетические показатели электропривода решетного стана

Для оценки энергетических показателей электропривода решетного стана построены зависимость мощности ЛАД P от коэффициента жесткости $P = f(C)$ при неизменных амплитуде продольного $A_{\text{прод}}$ и поперечного $A_{\text{попер}}$ колебаний, частоте колебаний и сохранении траектории сложного движения, зависимость мощ-

ности ЛАД P от производительности Q зерноочистительной машины $P = f(Q)$, а также зависимость энергетического КПД линейного двигателя $\eta_{\text{энерг}}$ от удельной нагрузки q при разных значениях коэффициента жесткости упругих элементов $\eta_{\text{энерг}} = f(q, C)$.

Анализ полученной зависимости (рисунок 3.22) показывает, что при увеличении коэффициента C потребляемая ЛАД мощность P возрастает и при жесткости $C = 3000$ Н/м составляет $P = 720$ Вт.

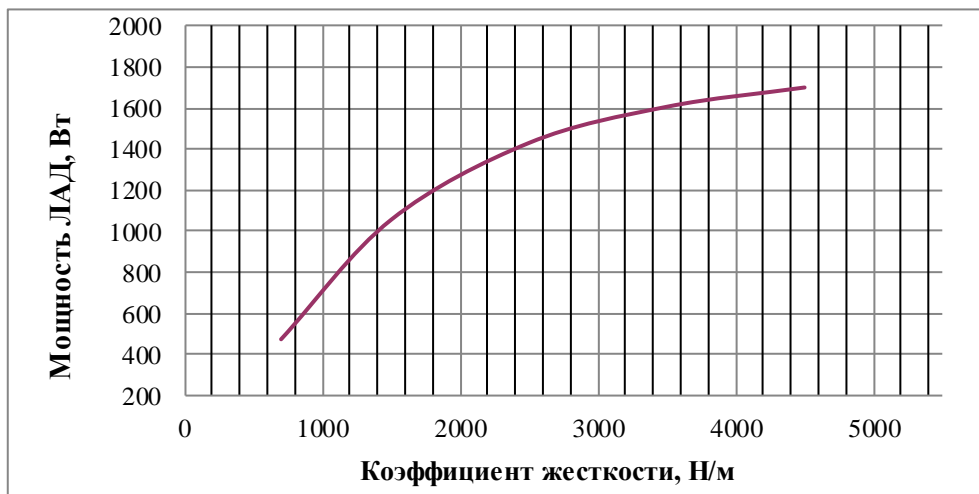


Рисунок 3.22
 Расчетная зависимость мощности ЛАД от коэффициента жесткости упругих элементов $P = f(C)$

Построенная теоретическая зависимость $P = f(Q)$ позволяет оценить мощность ЛАД, необходимую для проектируемого электропривода решетного стана зерноочистительной машины (рисунок 3.23). Мощность ЛАД линейно круто возрастает до производительности 1400 кг/ч, после чего начинает увеличиваться незначительно. Это связано с тем, что масса решетного стана перестает оказывать существенное влияние на мощность ЛАД.

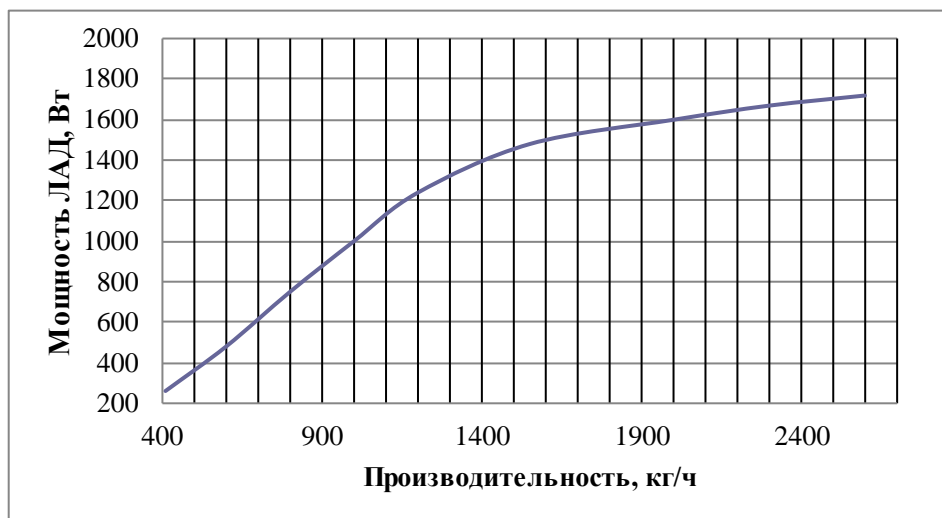


Рисунок 3.23
 Расчетная зависимость мощности ЛАД от производительности зерноочистительной машины $P = f(Q)$

На рисунке 3.24 показана зависимость энергетического КПД линейного двигателя $\eta_{\text{энерг}}$ от удельной нагрузки q при разных значениях коэффициента жесткости $\eta_{\text{энерг}} = f(q, C)$. По определению, энергетический КПД – это произведение $\cos\varphi$ и КПД линейного двигателя. По полученной зависимости можно оценить максимальный энергетический КПД ($\eta_{\text{энерг}} = 0,41$) разработанного электропривода, т. к. ЛАД – это его основной конструктивный элемент, при этом нет возможности сравнить его с существующими электроприводами зерноочистительных машин ввиду отсутствия такого понятия у последних.

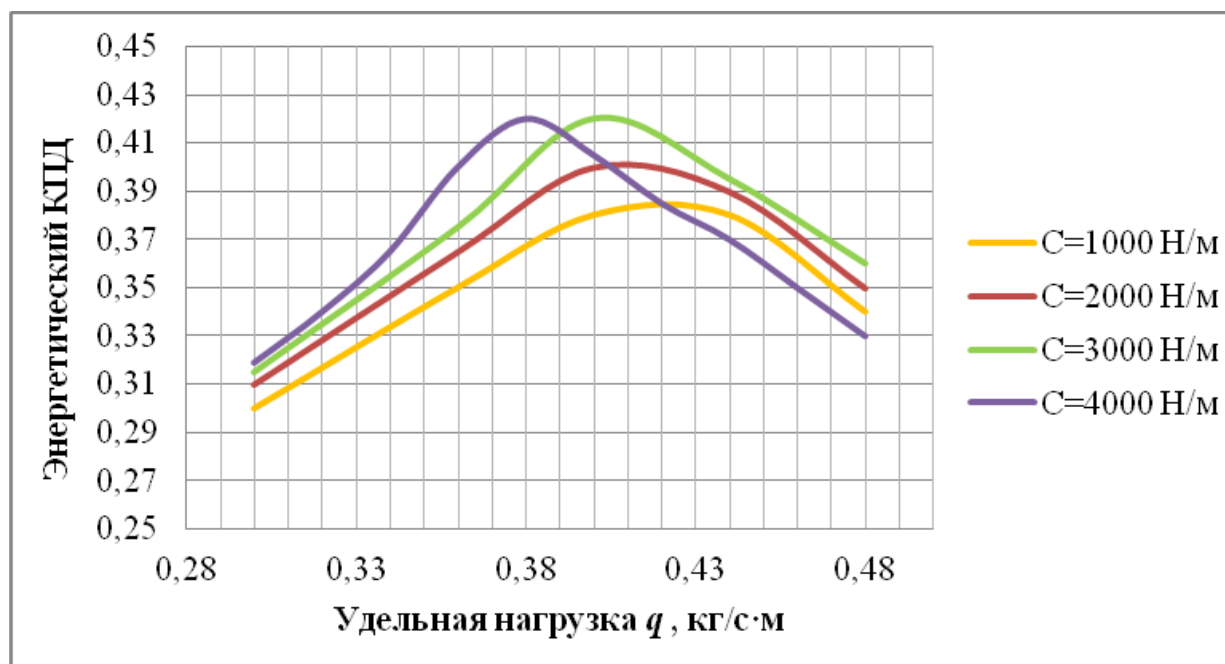


Рисунок 3.24

Расчетная зависимость энергетического КПД от удельной нагрузки при разных значениях коэффициента жесткости $\eta_{\text{энерг}} = f(q, C)$

3.3 Исследование КВЭП вальцедековой шелушильной машины

3.3.1 Математическая модель КВЭП вальцедековой шелушильной машины в среде объектно-визуального моделирования Matlab (Simulink)

Основное окно математической модели КВЭП вальцедековой машины для шелушения зерна с хрупким ядром без АД (рисунок 3.25) в Matlab (Simulink) представляет собой совокупность подсистемы «ЛАД», реализованной по уравнениям Парка – Горева, блоков «Сила упругости», «Сила трения», «Сила сопротивления от потока зерна», описывающих силы сопротивления движению деки, подсистемы «Уравнение динамики привода», описывающей соотношение силы ЛАД и суммарной силы сопротивления движению, подсистемы «Управление ЛАД», реализующей импульсное управление двигателем, блока «Энергетические показатели», описывающего потребляемую, полезную мощности, КПД, коэффициент мощности привода и блока измерений, на который подаются сигналы временных зависимостей силы ЛАД, ускорения, скорости и перемещения деки машины.

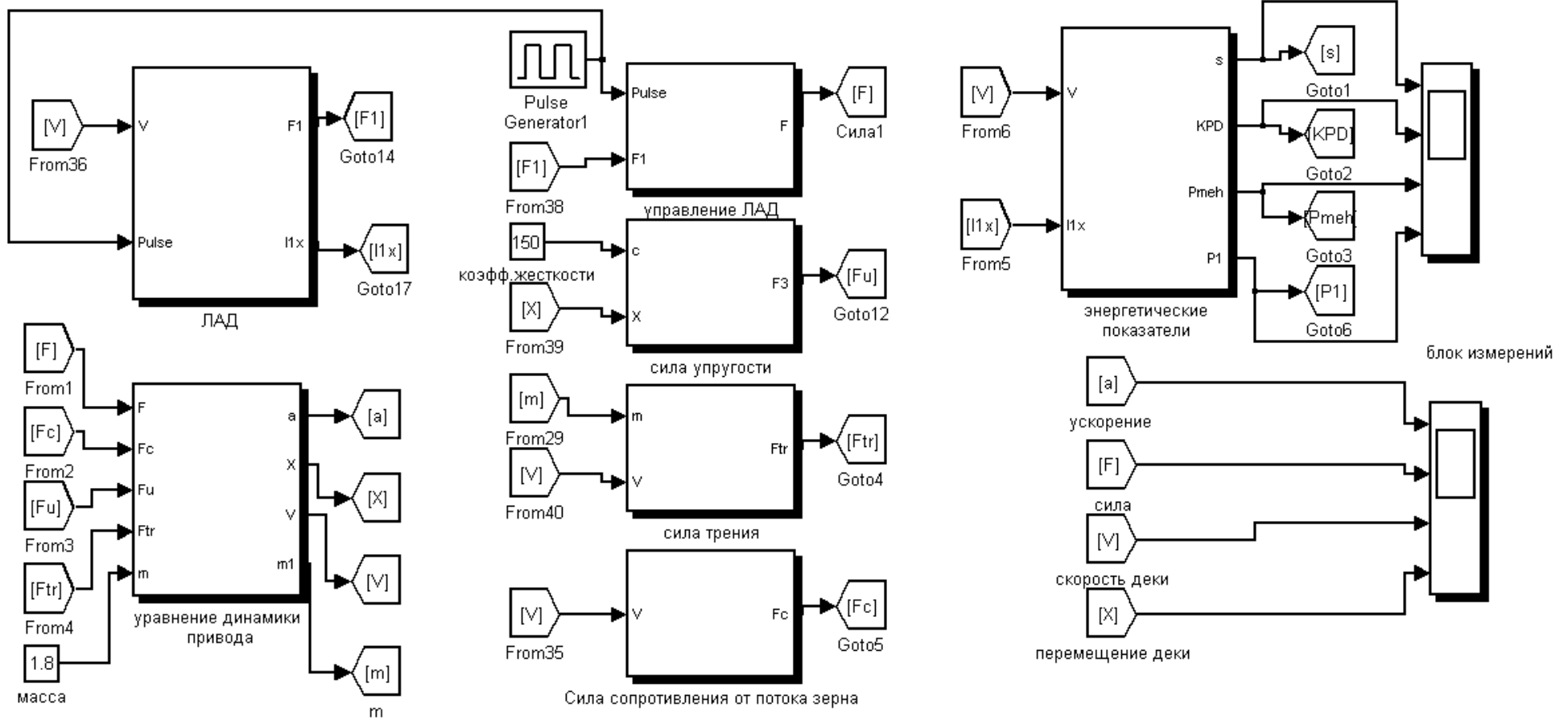


Рисунок 3.25

Основное окно математической модели КВЭП вальцедековой машины в среде Matlab (Simulink)

Исследования проводились со следующими параметрами схемы замещения ЛАД, рассчитанными по известной методике, изложенной [36]: $R1 = 4,09$ Ом, $R2 = 1$ Ом, $X1 = 0,141$ Ом, $X2 = 0,85$ Ом, $X_m = 4,7$ Ом, $U = 220$ В, $\omega = 314$ рад/с, $\tau = 0,036$ м, $V_0 = 3,6$ м/с. Остальные параметры: жесткость упругого элемента 300 Н/м, масса подвижных элементов привода – 1,8 кг, частота включения ЛАД – 1,5 Гц, длительность включения 65 %, динамическая вязкость среды (зерно гречихи в рабочем зазоре) 10 Па·с, внешний радиус вальца 0,097 м, внутренний радиус деки 0,1 м, длина деки 0,14 м, коэффициент заполнения зоны шелушения 0,75 [168, 227].

На рисунках 3.26 и 3.27 представлены подсистемы «Сила сопротивления зерна в рабочем зазоре» и «Уравнение динамики». На рисунках 3.28–3.30 представлены некоторые динамические характеристики привода, работающего в условиях установившихся колебаний.

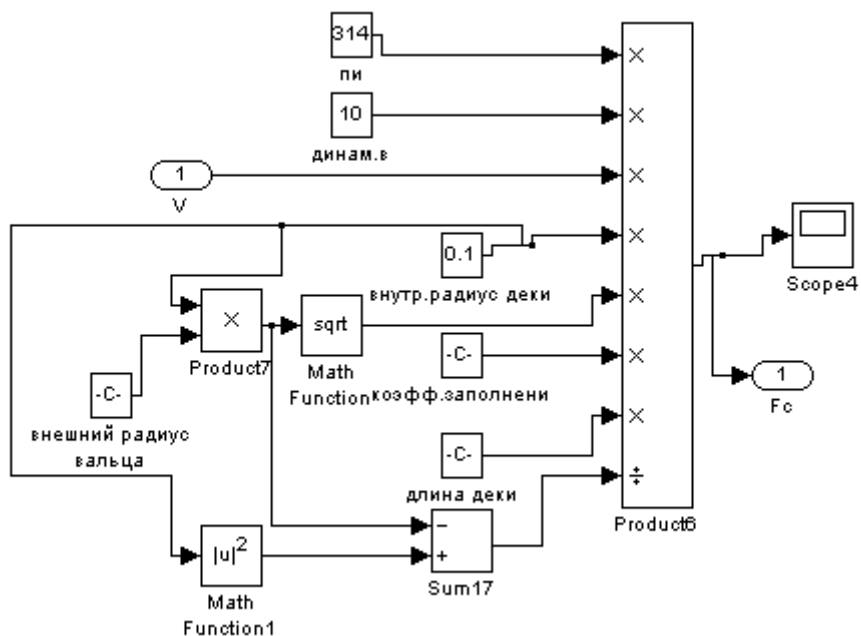


Рисунок 3.26

Вид подсистемы «Сила сопротивления зерна в рабочем зазоре»

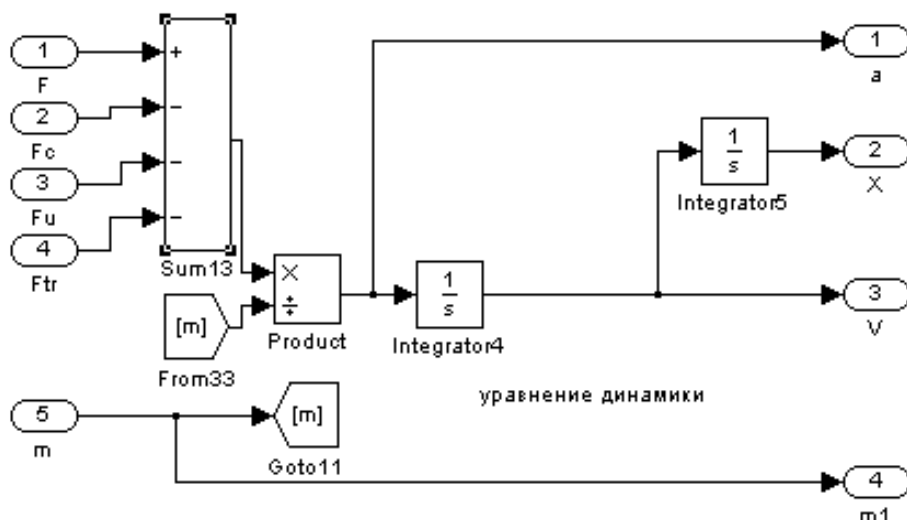


Рисунок 3.27

Вид подсистемы «Уравнение динамики привода»

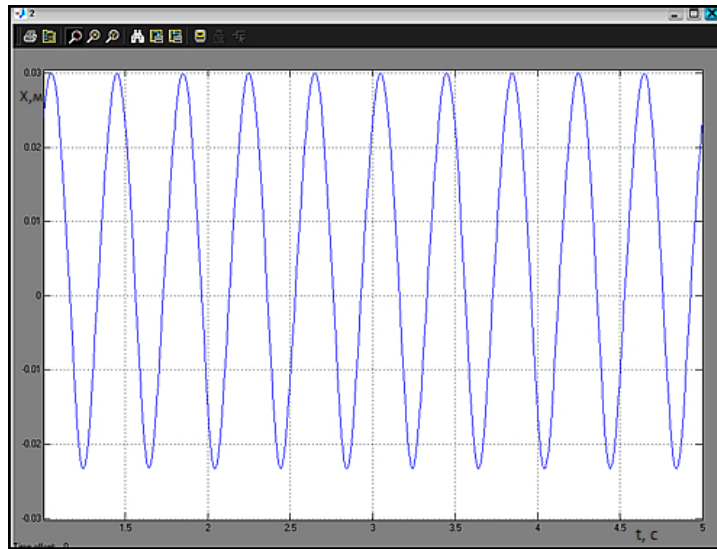


Рисунок 3.28
Перемещение деки

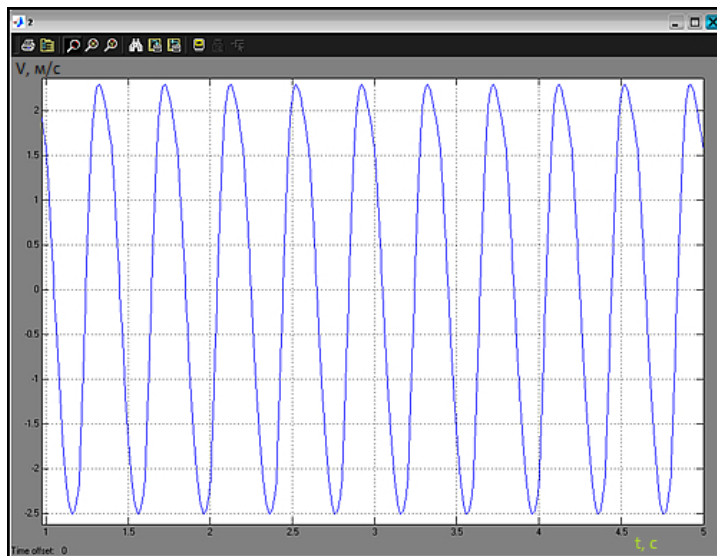


Рисунок 3.29
Скорость деки

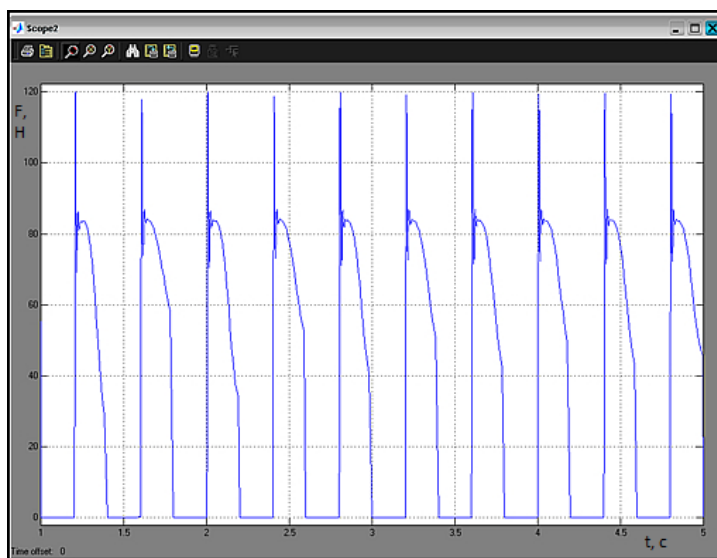


Рисунок 3.30
Сила, развиваемая ЛАД

3.3.2 Анализ пуска ЛАД КВЭП вальцедековой машины, работающей в режиме вынужденных колебаний

При включении асинхронных двигателей к источнику питания при пуске в обмотках индуктора двигателя возникают электромагнитные переходные процессы. Так как при работе в рассматриваемом режиме скорость перемещения вторичного элемента ЛАД не остается постоянной, то электромагнитные переходные процессы протекают одновременно с механическими переходными процессами. Это приводит к тому, что максимальные значения действительных токов в двигателе в переходном процессе оказываются отличными от амплитуд токов, соответствующих установившемуся режиму [265].

Токи, протекающие по обмоткам ЛАД в течение электромагнитных переходных процессов, можно разложить на свободные и вынужденные составляющие [263, 266]. Свободные составляющие токов ко времени окончания электромагнитного переходного процесса практически затухают до нуля. В результате влияния свободных токов, а также изменения скорости вторичного элемента, электромагнитная сила (момент) двигателя в течение переходного процесса может быть как больше, так и меньше силы, определяемой статической механической характеристикой. Это обуславливает колебательный характер изменения электромагнитной силы асинхронного двигателя во времени со значительными амплитудами на начальном участке переходного процесса.

Частота включения ЛАД на установках с циклической работой привода, применяемых в технологических системах, находится в интервале 0,5–10 Гц, поэтому появляется необходимость изучения электромеханических переходных процессов и их взаимосвязь с технологически-конструктивными параметрами машины.

Для цилиндрического двигателя с немагнитным зазором 1,7 миллиметра изменение фазного тока индуктора ЛАД в режиме смоделированного противовключения представлено на рисунке 3.31. Как видно, превышение фазного тока в момент пуска ЛАД от установившегося значения не превышает 28 % при длительности протекания пускового тока 0,25 с.

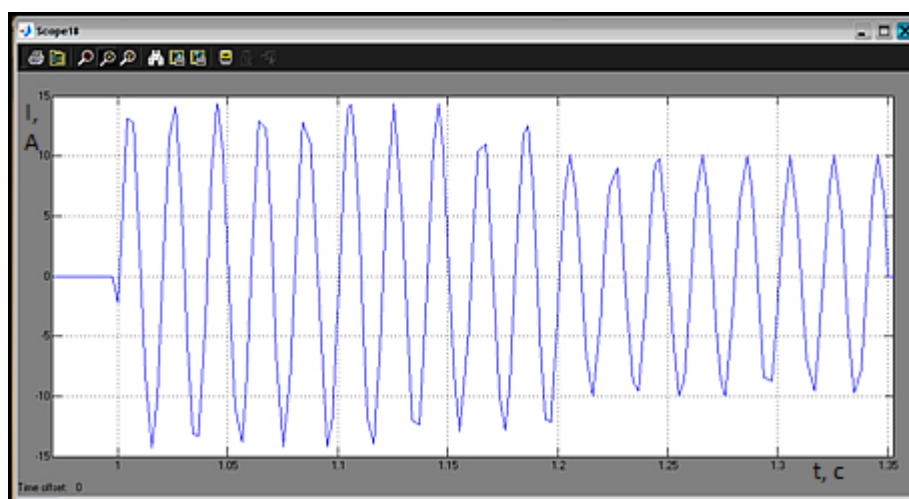


Рисунок 3.31
Фазный ток индуктора ЛАД

Невысокие пульсации пускового тока не будут оказывать негативного влияния на питающую сеть в виде кратковременного снижения напряжения, а также на тепловые процессы самого двигателя, что позволяет эффективно использовать их в повторно-кратковременном режиме работы (S3).

3.3.3 Анализ влияния параметров КВЭП и конструктивно-технологических параметров вальцедековой шелушильной машины на скоростной режим деки машины

Определение зависимостей скорости движения деки от жесткости упругого элемента, длительности и частоты включения ЛАД, коэффициента заполнения зоны шелушения, динамической вязкости потока зерна, массы подвижных элементов является важной исследовательской задачей, так как полученные зависимости могут быть использованы при проектировании конкретных конструкций. От скорости деки зависит интенсивность воздействия сил сжатия и сдвига вдоль оси вальца на зерно гречихи в рабочем зазоре, а, значит, и эффективность шелушения как основной технологический показатель работы вальцедековой машины.

На рисунках 3.32–3.37 представлены зависимости скорости движения деки от основных конструктивно-технологических параметров вальцедековой шелушильной машины. При анализе отдельно рассматривались скорости движения деки под действием силы ЛАД («вперед») и скорость деки при движении в обратном направлении под действием потенциальной энергии, запасенной в упругом элементе («назад»).

Изменение частоты и продолжительности включения ЛАД является эффективным способом управления скоростью деки вальцедековой машины.

Как видно из рисунка 3.32, при изменении частоты включения ЛАД скорость движения деки уменьшается значительно, так, при изменении частот включения от 1,5 до 2,5 Гц скорость «вперед» изменяется на 0,53 м/с, а скорость «назад» на 0,6 м/с.

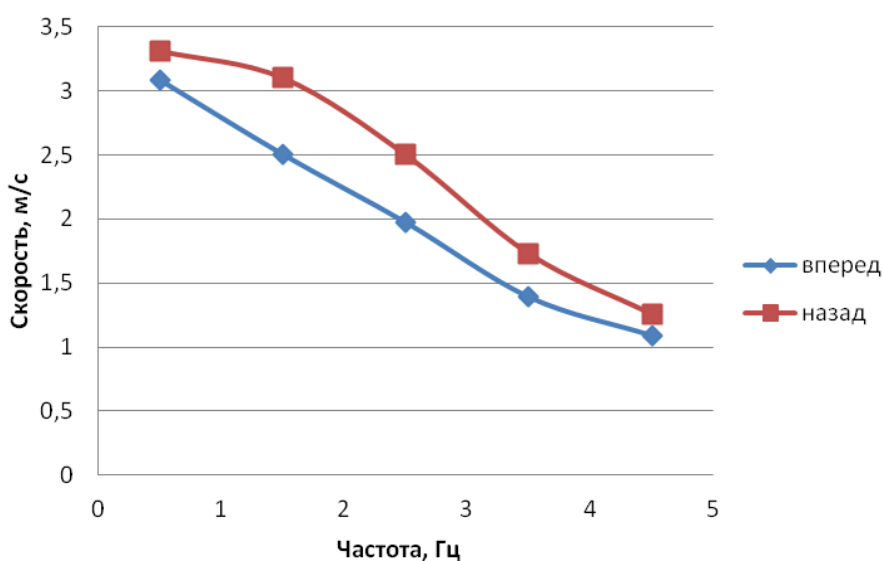


Рисунок 3.32
Влияние частоты включения ЛАД на скоростной режим деки

Максимальное влияние на скорость деки частота включения оказывает при диапазоне изменения частоты включения 1,5...3,5 Гц..

При изменении продолжительности включения от 55 % до 65 % изменение скорости движения деки «назад» незначительно (рисунок 3.33). Дальнейшее увеличение продолжительности включения от 65 % до 85 % приводит к уменьшению скоростей «вперед» и «назад» в одинаковой степени.

Увеличение коэффициента жесткости в диапазоне 90...130 Н/м, неравнозначно сказывается на скоростях деки при движении в прямом и обратном направлениях: приводит к уменьшению скорости «вперед» на 0,1 м/с и увеличению скорости «назад» на 0,22 м/с, что объясняется увеличением силы упругости, препятствующей движению деки в прямом направлении и способствующей возврату в исходное положение.

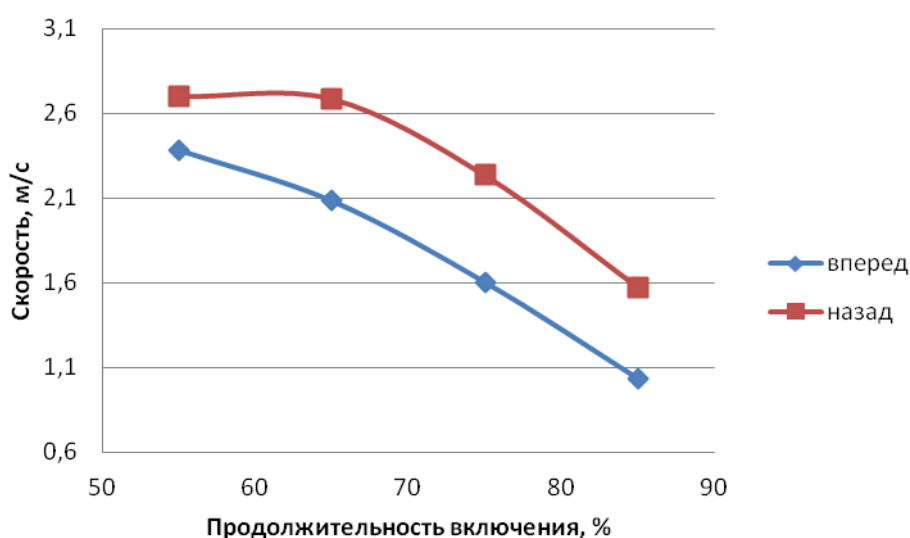


Рисунок 3.33

Влияние продолжительности включения ЛАД на скоростной режим деки

На рисунке 3.34 представлен график зависимости скорости деки от жесткости упругого элемента.

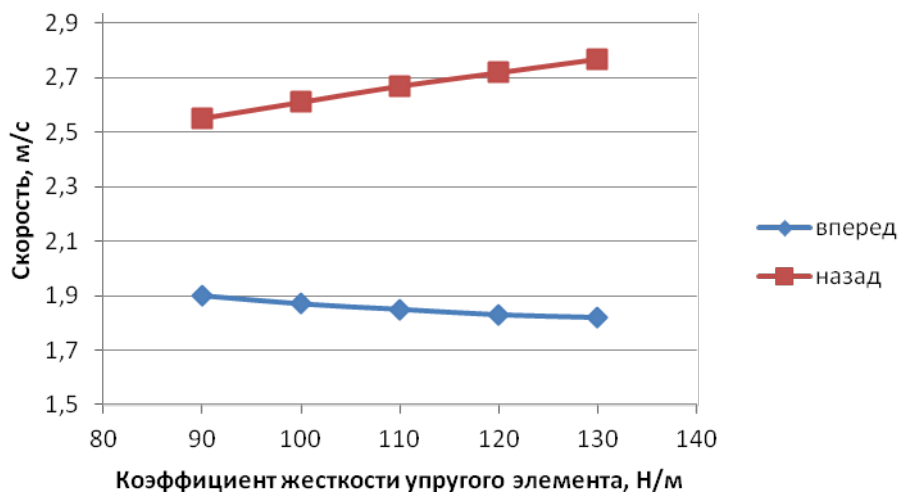


Рисунок 3.34

Влияние жесткости упругого элемента на скоростной режим деки

Рисунок 3.35 иллюстрирует уменьшение скоростей движения деки, как «вперед», так и «назад» при увеличении массы подвижных элементов КВЭП.

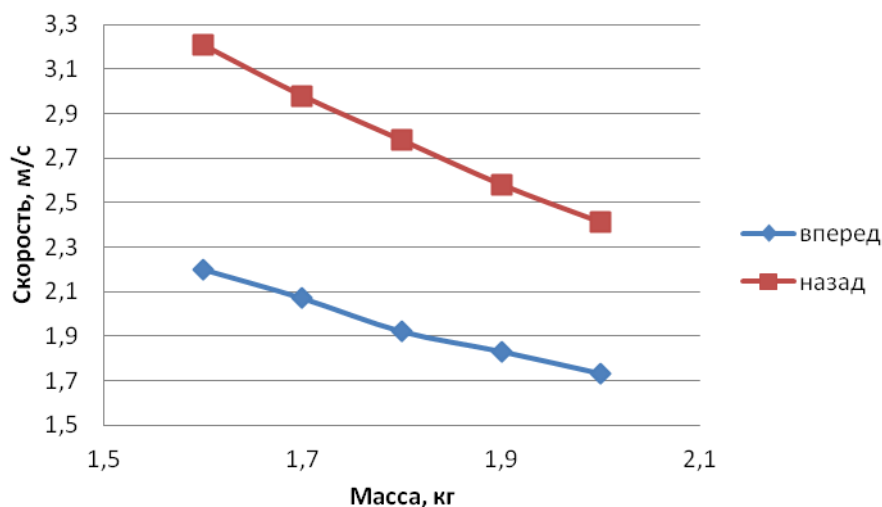


Рисунок 3.35
Влияние массы подвижных элементов на скоростной режим деки

Коэффициент заполнения зоны шелушения определяется интенсивностью и равномерностью подачи зерна в зону шелушения и влияет на производительность машины [160, 168, 227] (рисунок 3.36).

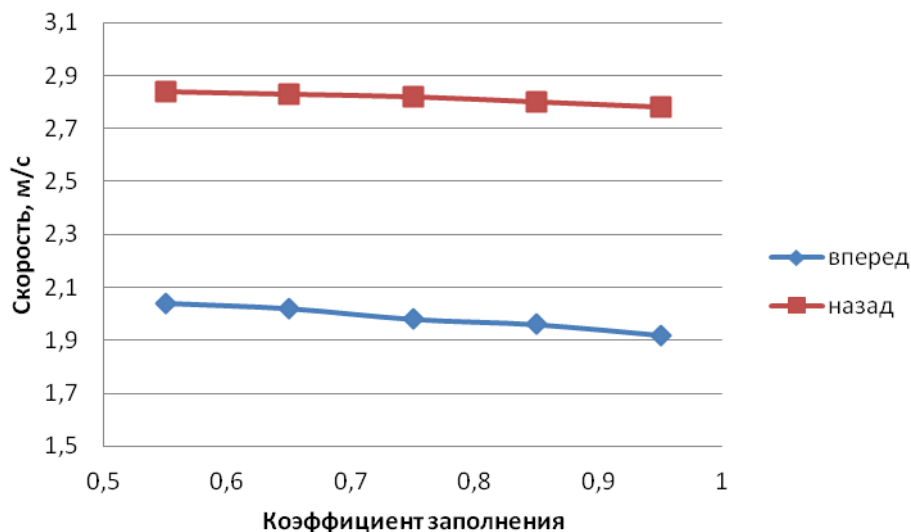


Рисунок 3.36
Влияние коэффициента заполнения зоны шелушения на скоростной режим деки

Увеличение коэффициента заполнения зоны шелушения незначительно уменьшает скорость движения деки как вперед, так и «назад».

Динамическая вязкость зерна комплексно характеризует основные технологические показатели зерна гречихи: величину, форму зерна, влажность, прочность и упругость оболочки, и для гречихи может находиться в пределах от 6 до 14 Па·с [227] (рисунок 3.37).

Как видно из графика, увеличение динамической вязкости незначительно сказывается на скоростном режиме деки в сторону уменьшения скорости.

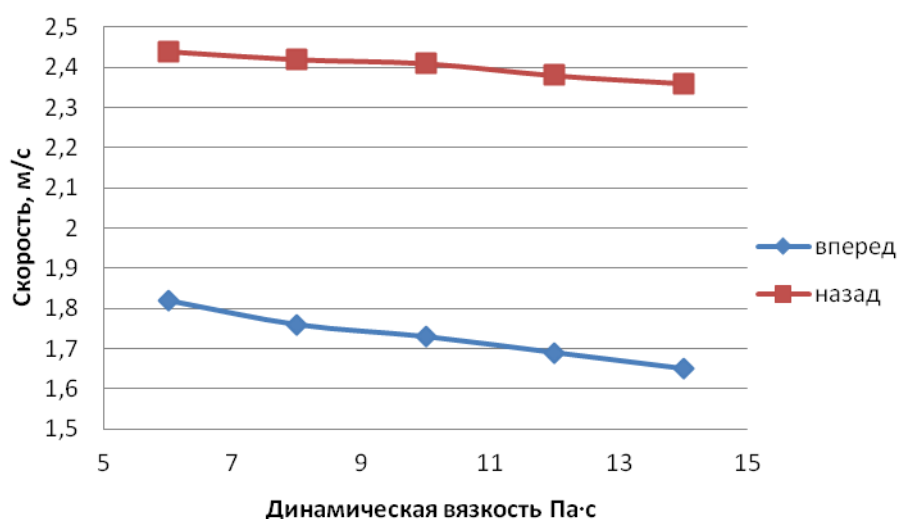


Рисунок 3.37

Влияние динамической вязкости потока зерна на скоростной режим деки

Анализ графиков зависимостей скорости деки от коэффициента заполнения зоны шелушения и динамической вязкости потока зерна показывает, что значительное изменение этих технологических параметров слабо отражается на скоростном режиме деки. Это позволяет сделать вывод о незначительном влиянии параметров сырья на скоростной режим КВЭП вальцедековой шелушильной машины, что расширяет возможности применения машины при работе с различным сырьем.

3.3.4 Амплитудно-частотные характеристики КВЭП вальцедековой машины

В зависимости от конструктивно-технологических особенностей вальцедековой машины и параметров сырья возникает необходимость регулирования параметров колебаний деки машины – частоты и амплитуды.

Эффективным способом регулирования параметров колебаний деки является изменение частоты и продолжительности включения ЛАД. Изменение частоты включения и амплитуда колебаний вторичного элемента находятся в обратно пропорциональной зависимости (рисунки 3.38–3.42). Причем с увеличением частоты изменение продолжительности включения более значительно сказывается на увеличении амплитуды колебаний (рисунок 3.38).

Альтернативным способом регулирования параметров колебательного процесса КВЭП является изменение коэффициента жесткости упругого элемента (рисунок 3.39).

Недостатком данного способа является невозможность регулирования без остановки технологического процесса.

На рисунке 3.40 представлены графики АЧХ при изменении массы подвижных элементов.

Рисунки 3.41 и 3.42 иллюстрируют зависимость параметров колебательного процесса от динамической вязкости потока зерна и коэффициента заполнения зоны шелушения.

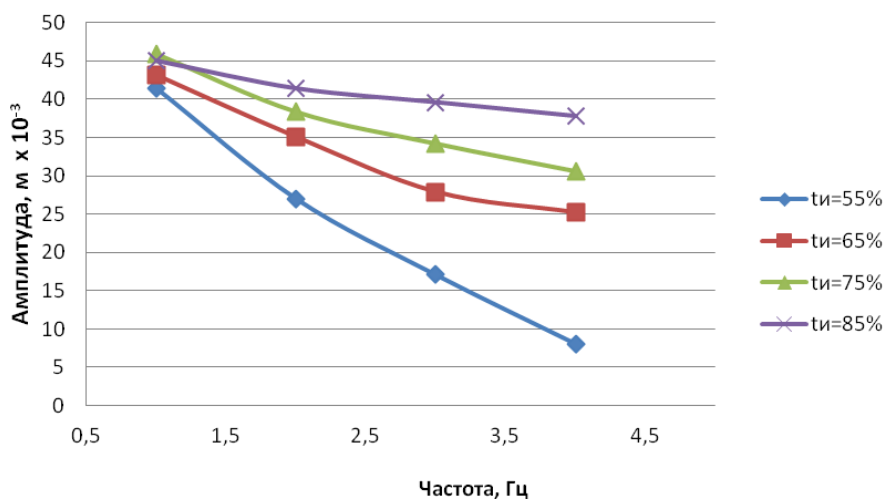


Рисунок 3.38

Амплитудно-частотные характеристики КВЭП вальцедековой машины в зависимости от продолжительности включения ЛАД

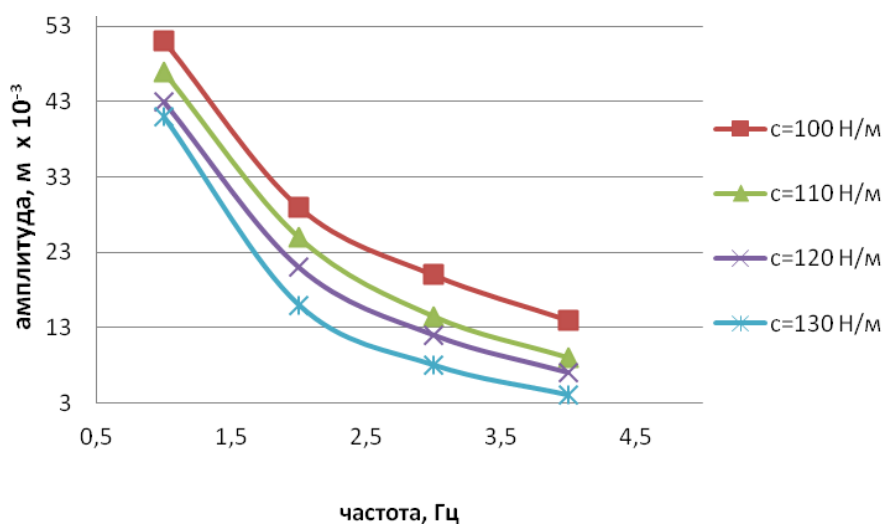


Рисунок 3.39

Амплитудно-частотные характеристики КВЭП вальцедековой машины в зависимости от жесткости упругого элемента

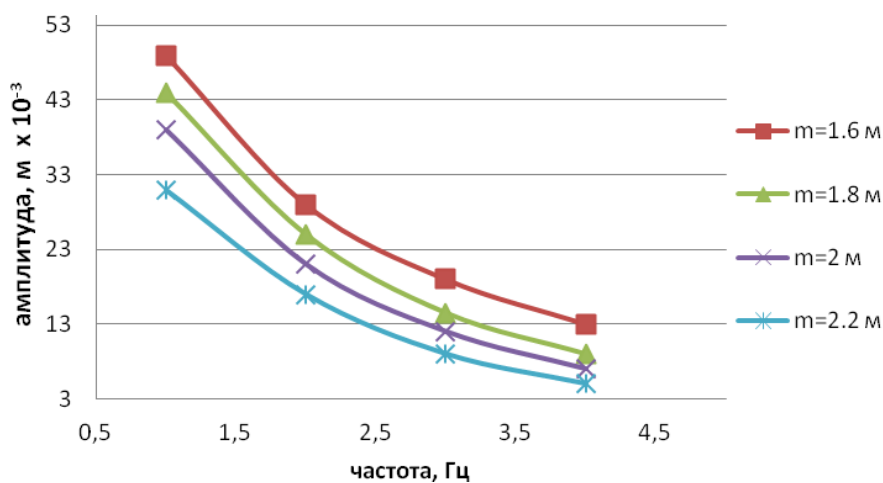


Рисунок 3.40

Амплитудно-частотные характеристики КВЭП вальцедековой машины в зависимости от массы подвижных элементов

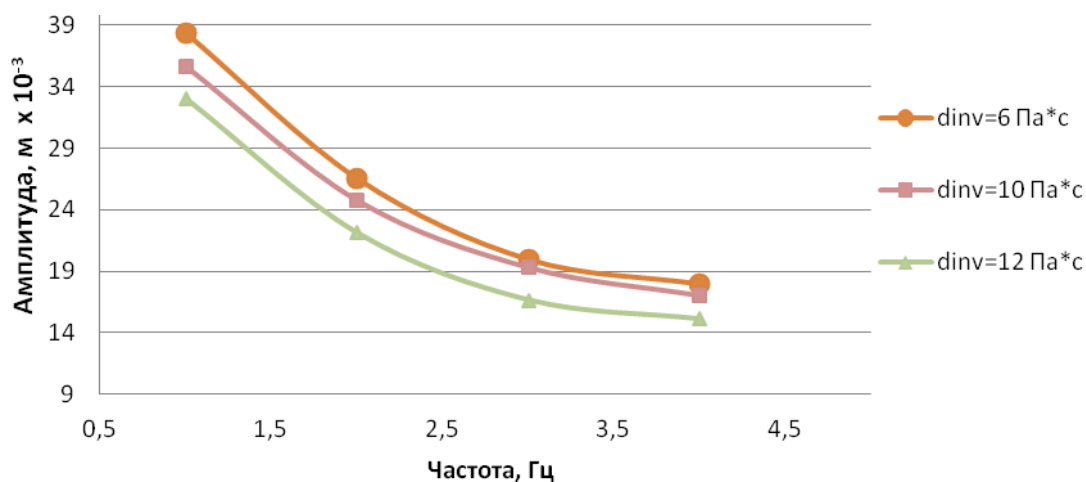


Рисунок 3.41
Амплитудно-частотные характеристики КВЭП вальцедековой машины
в зависимости от динамической вязкости потока зерна

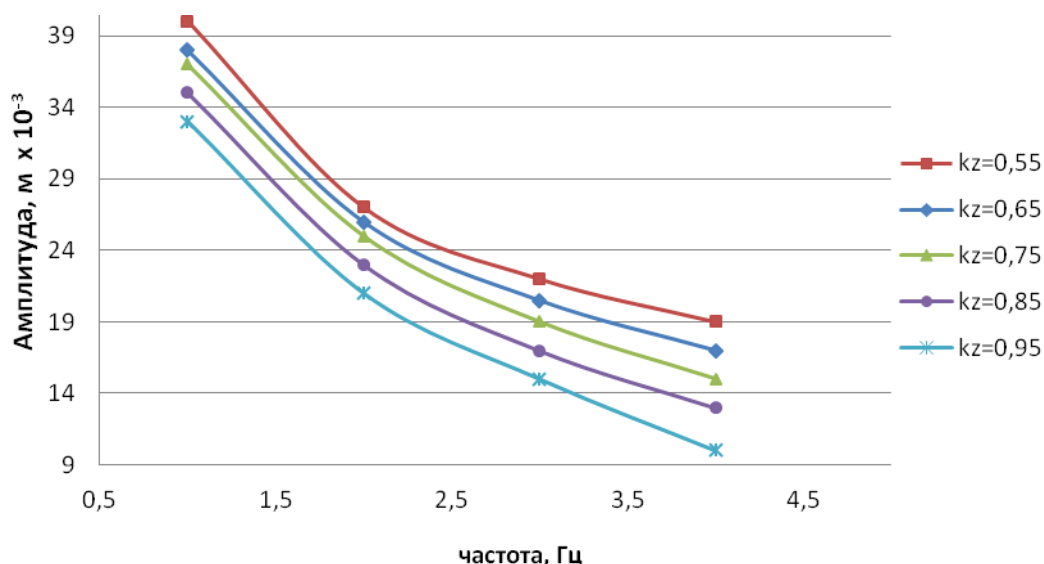


Рисунок 3.42
Амплитудно-частотные характеристики КВЭП вальцедековой машины
в зависимости от коэффициента заполнения зоны шелушения

Анализ графиков 3.41 и 3.42 позволяет сделать вывод о незначительной зависимости параметров колебательного процесса от динамической вязкости потока зерна и коэффициента заполнения зоны шелушения, это означает, что технологические параметры зерна, интенсивность и равномерность подачи не оказывают существенного влияния на эффективность работы машины.

3.4 Исследование ЛАЭСКД инерционного конвейера со звеном предварительного разгона

Исследования направлены на установление влияния звена предварительного разгона инерционного конвейера с ЛАЭСКД, на эффективность его работы и на установление наиболее рациональных значений параметров колебательного процесса.

Обзор характеристик существующих инерционных конвейеров показал, что частота колебаний транспортирующего лотка лежит в пределах $f_{кол} = 3 \dots 5$ Гц, и амплитуда – $A = 0,2 \dots 20$ мм [130]. Линейный двигатель нецелесообразно использовать при частоте колебаний свыше 3 Гц, т. к. при этом возникают трудности его управления и снижение энергетических показателей. Поэтому опыты проведены при значении частоты колебаний $f_{кол} = 0 \dots 3$ Гц.

Техническая производительность конвейеров для белого сахара под центрифугами, т/сут. Рассчитывается по формуле [85]:

$$A = 1440 \times 100 \times 60 \times v \times b \times h \times p_o / a, \quad (3.1)$$

где p_o – плотность сахара, $p_o = 0,8$ т/м³;

b – ширина желоба конвейера, м;

a – количество сахара, % к массе свеклы (принимать по расчету продуктов, но не менее 15 %);

h – средняя толщина слоя сахара в желобе, м, по нормативу $h = 0,05$ м;

v – скорость движения сахара, м/с:

$$v = 0,21 \times n \times r \times \operatorname{tg} \alpha \times f, \quad (3.2)$$

r – радиус кривошипа, м;

f – коэффициент трения скольжения сахара о желоб, по нормативу $f = 0,3$;

n – частота вращения кривошипа, об/мин;

α – угол наклона пружин к вертикали, градусы.

Учитывая геометрические размеры транспортирующего лотка, производительность конвейера и насыпную плотность сахара-песка влажностью 0,5... 1 %, можно рассчитать массу транспортируемого груза находящегося на лотке.

У конвейера Ш53ПТА-3, предназначенного для завода производительностью по свекле 3000 т/сут, производительность по сахару составляет 450 т/сут или 18,8 т/ч. Следовательно, учитывая размеры транспортирующего лотка, масса груза находящегося на транспортирующем лотке:

$$m = h \times b \times l \times p_o = 0,05 \times 0,5 \times 8,56 \times 800 = 172,2 \text{ кг},$$

где l – длина транспортирующего лотка конвейера, м.

Скорость движения сахара по транспортирующей поверхности лотка:

$$v = 0,21 \times n \times r \times \operatorname{tg} \alpha \times f = 0,21 \times 260 \times 0,015 \times \operatorname{tg} 20^\circ \times 0,3 = 0,09 \text{ м/с}.$$

При исследовании приняты за базовые величины, рассчитанные выше: значения массы и скорости транспортируемого груза, находящегося на транспортирующем лотке, а также масса транспортирующего лотка конвейера Ш53ПТА-3, которая составляет 550 кг.

3.4.1 Вид математической модели ЛАЭСКД инерционного конвейера со звеном предварительного разгона в среде Matlab (Simulink)

Основное окно математической модели инерционного конвейера с предварительным разгоном вторичного элементом ЛАД в Matlab /Simulink/ представлено в приложении А.

Постоянными в течение времени моделирования T параметрами являются следующие параметры (прямоугольные блоки желтого цвета): m_n в модели – m_{zh} ; $m_{сп}$ – m_{gr} ; $f_{сп}$ – f_{gr} ; c – c ; R_1 – R_s ; R'_2 – R_r ; X_r – X_r ; X_s – X_s ; X_m – X_m ; V_0 – V_0 ; τ – τ .

Расчет силы тяги ЛАД $F_{ЛАД}$ и токов производится в блоке «LAD», расчет электрических и механических мощностей основных электрических величин производится в подсистеме «ЛАД». Временную зависимость силы противодействия упругих элементов F_y по формулам (2.80) рассчитывает подсистема «Сила упругих элементов», сила трения роликов F_p по системе (2.81) рассчитывается в блоке «Сила трения роликов», сила трения груза F_{mp} по системе (2.82) в блоке «Трение груза». Оценку эффективности работы конвейера при различных параметрах можно производить по смоделированным временным зависимостям скоростей грузонесущего лотка v_n (Vgl) и транспортируемого груза v_{zp} (Vgr) (рисунок 3.43), а также, сравнивая смоделированную временную зависимость ускорения грузонесущего лотка a_n (agl) с теоретическим оптимальным законом колебаний.

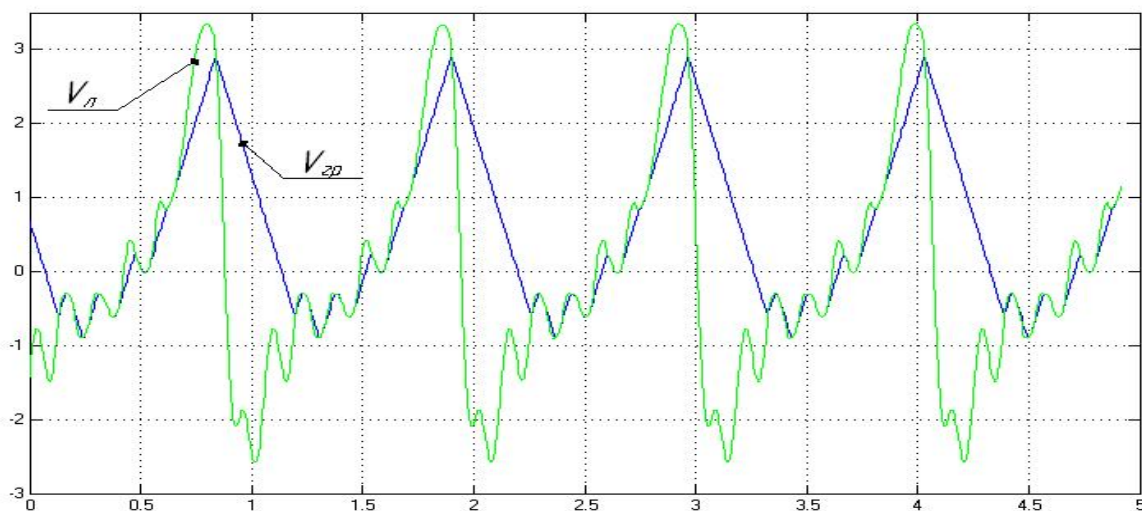


Рисунок 3.43
Смоделированные временные зависимости скоростей грузонесущего лотка – v_n и транспортируемого груза – v_{zp}

Исследуя математическую модель инерционного конвейера со звеном предварительного разгона линейного асинхронного электропривода можно подобрать параметры, при которых будут достигаться рациональные для технологической линии соотношения потребления электроэнергии, КПД, скорости транспортирования, производительности, амплитуды колебаний, мощности ЛАД.

3.4.2 Параметры ЛАД для инерционного конвейера

Для предлагаемой кинематической схемы инерционного конвейера с ЛАЭСЖД, исходя из технологических характеристик конвейера, согласно методике [4, 6] рассчитан плоский односторонний линейный асинхронный двигатель со следующими параметрами:

- Полюсное деление $\tau = 36$ мм;
- Число полюсов $2p + 1 = 23$;
- Синхронная скорость $V1 = 3,6$ м/с;

Воздушный зазор $\delta = 1$ мм.

Параметры Т-образной схемы замещения рассчитаны согласно [6] и составляют: $R1 = 0,5$ Ом, $R2' = 1$ Ом, $X1 = 1$ Ом, $X2' = 0,1$ Ом, $Xm = 5$ Ом.

3.4.3 Влияние на эффективность работы инерционного конвейера длины участка разгона ЛАЭСКД

Проведены исследования зависимости показателей эффективности работы инерционного конвейера со звеном предварительного разгона ЛЭП при изменении координат выключения ЛАД $X_{выкл} = X_y$ от 0,05 до 0,45 м с шагом 0,1 (рисунки 3.44).

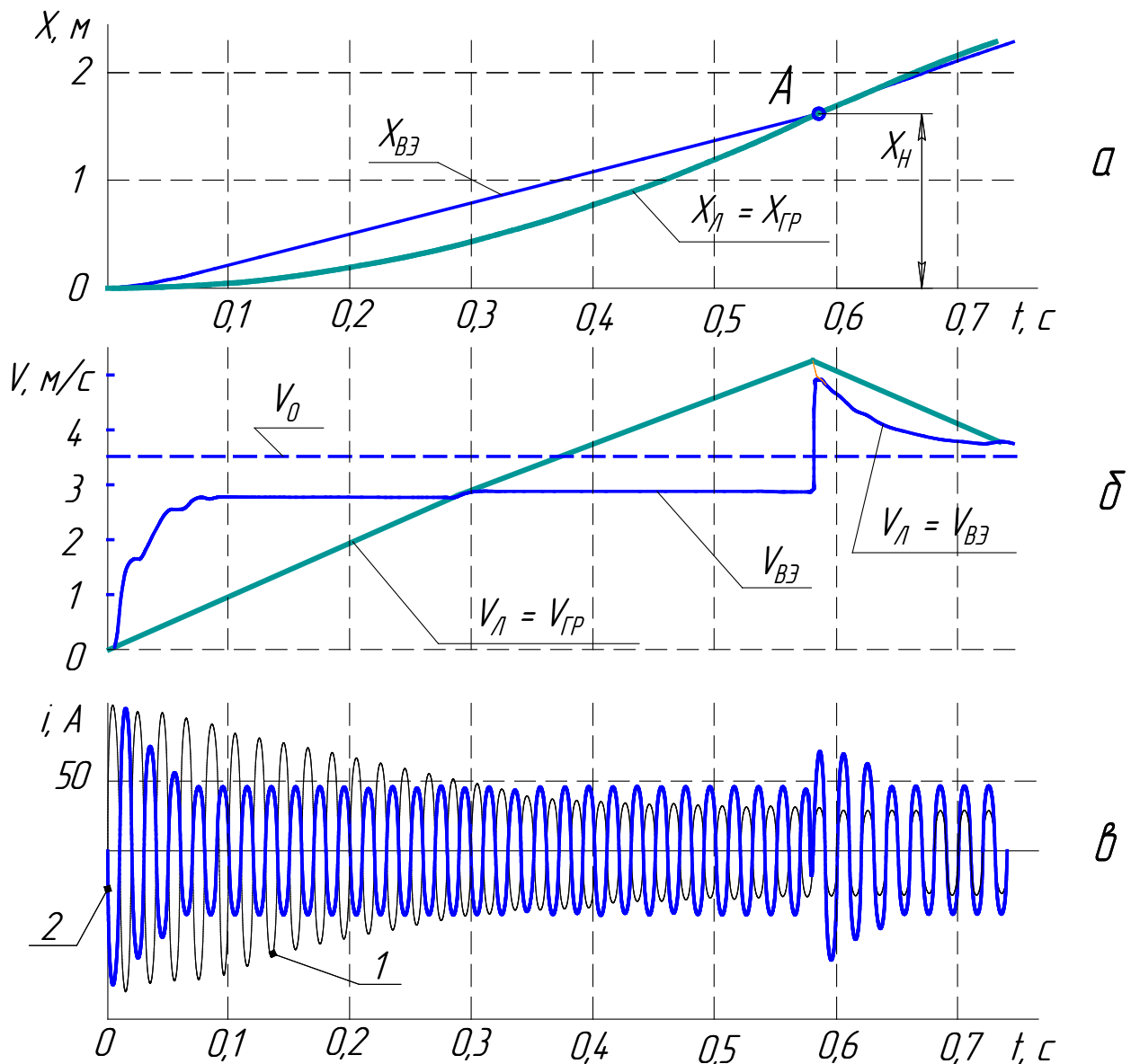


Рисунок 3.44

Процесс непрерывного разгона инерционного конвейера с предварительным разгоном вторичного элемента ЛЭП: $X_{BЭ}$ ($V_{BЭ}$), $X_{Л}$ ($V_{Л}$), $X_{ГР}$ ($V_{ГР}$) – перемещение (скорость), соответственно, вторичного элемента, транспортирующего лотка, транспортируемого груза, V_0 – синхронная скорость ЛАД; i – ток ЛАД: 1 – без и 2 – со звеном предварительного разгона

Отключение двигателя производится при начале взаимодействия лотка с упругими элементами торможения, т. е. $X_{\text{выкл}} = X_y$. Для облегчения расчетов очевидно принять $X_{\text{вкл}} = 0$.

При исследовании процесса разгона подвижного элемента получены расчетные временные зависимости перемещений и скоростей (рисунки 3.44, а и б), по которым можно определить длину участка разгона X_H , необходимую для полной передачи энергии, накопленной звеном предварительного разгона при пуске.

Полученные осциллограммы (рисунок 3.44, в) потребляемого тока индуктором ЛАД подтверждают снижение пусковых токов, как по амплитуде, так и по продолжительности.

3.4.4 Влияние напряжения ЛАД и конструктивных параметров ЛАЭСЖД на энергоемкость разгона инерционного конвейера

Проведены исследования зависимости выходных данных инерционного конвейера со звеном предварительного разгона ЛАЭСЖД при изменении действующего напряжения питания ЛАД $U_d = 40 \dots 380$ В и различных массах груза. Как известно, усилие развиваемое ЛАД, пропорционально квадрату напряжения питания. Следовательно, изменение развиваемого ЛАД усилия производилось изменением напряжения питания.

Введено понятие коэффициента энергоемкости разгона e транспортируемого груза, как один из критериев оценки эффективности работы инерционного конвейера:

$$e = \frac{W_1}{E_{k.zp.}}$$

где W_1 – электрическая энергия, затрачиваемая для передачи кинетической энергии транспортируемому грузу, находящемуся на транспортирующем лотке, Дж;

$E_{k.zp.}$ – кинетическая энергия транспортируемого груза, приобретённая за время разгона, Дж.

Масса желоба и коэффициенты трения груза составляют: $m_{жс} = 20$ кг; $f_z = 1$; $f_{z0} = 1,2$. Координаты включения и отключения ЛАД и начала взаимодействия с упругими элементами приняты: $X_{\text{выкл}} = X_y = 0,15$; $X_{\text{вкл}} = 0$. Коэффициент жесткости упругих элементов принят $k = 100000$.

На рисунке 3.45 показаны зависимости энергоемкости разгона e от длины участка разгона лотка при различном напряжении питания ЛАД.

Минимальная энергоемкость соответствует длине участка разгона, при котором энергия, накопленная упругим элементом звена предварительного разгона, успевает полностью передаться лотку с грузом до отключения ЛАД.

Получены зависимости минимальной энергоемкости разгона транспортируемого груза e_{min} от напряжения U_1 питания ЛАД (рисунок 3.46) и зависимости необходимой длины участка разгона X_H для получения e_{min} при различной массе

вторичного элемента и при его жестком соединении (Жест.) к лотку (рисунок 3.47).

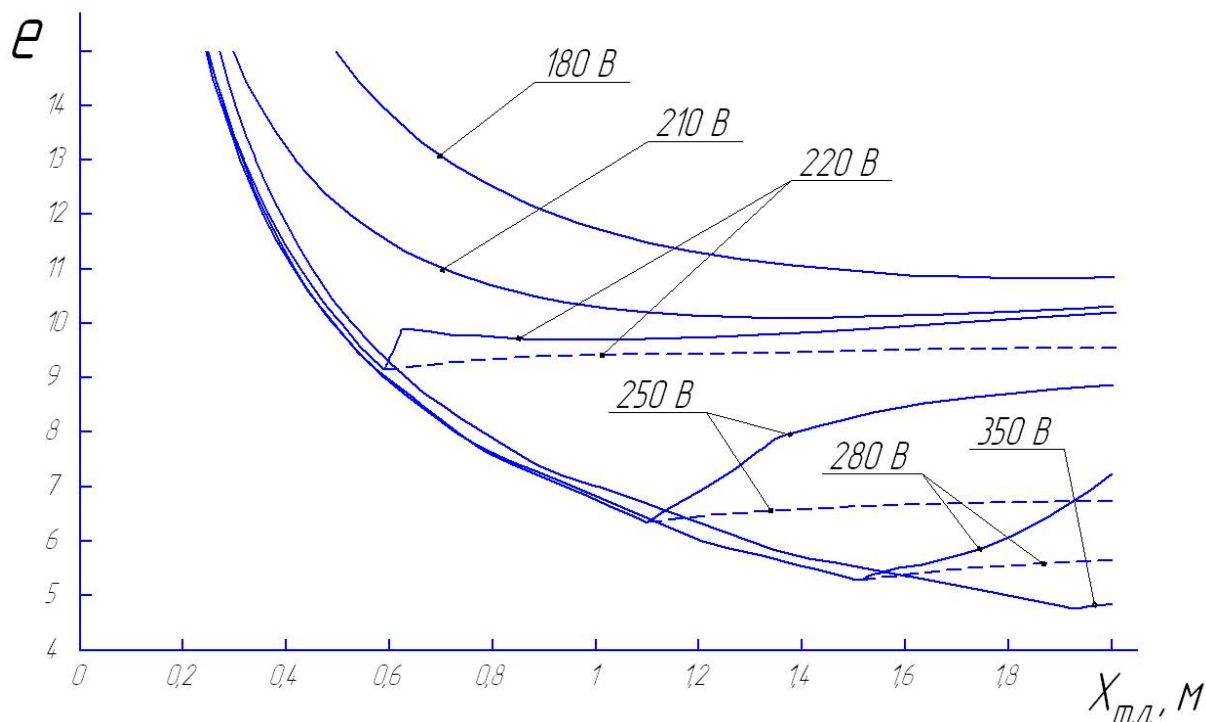


Рисунок 3.45
Зависимость энергоемкости разгона груза e от длины участка разгона транспортирующего лотка $X_{m.l.}$

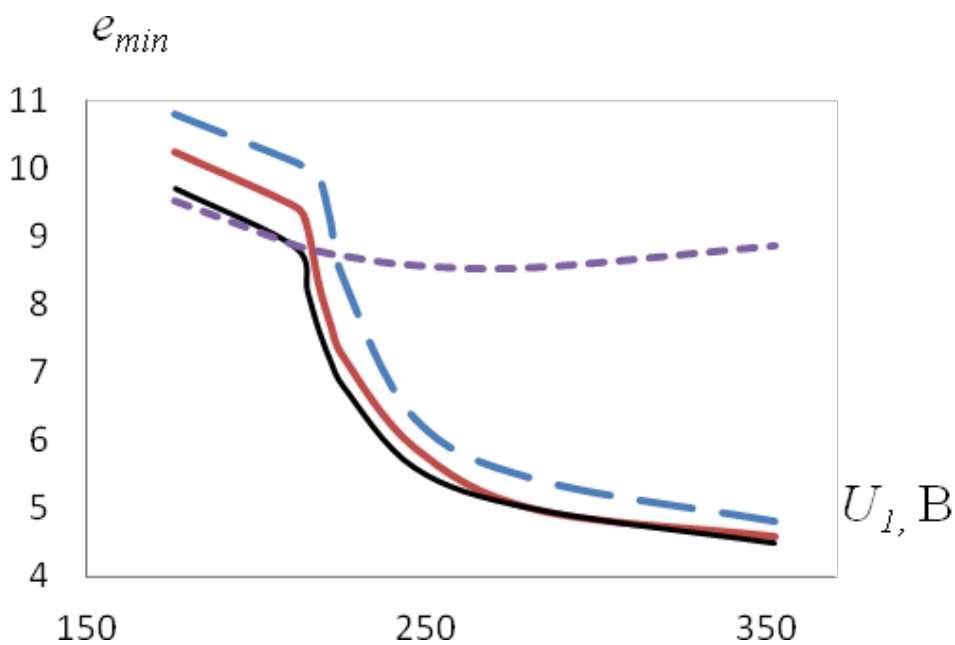


Рисунок 3.46
Расчетная зависимость минимальной энергоемкости e_{min} разгона транспортируемого груза от напряжения U_1 питания ЛАД

Изменение напряжения есть способ изменения силы тяги ЛАД. При увеличении силы ЛАД увеличивается значение ускорения и скорости вторичного

элемента (второе слагаемое в уравнении движения электропривода, а точнее – ускорения вторичного элемента относительно лотка):

$$F_{\text{ЛАД}} = F_{\text{упр.в.э}} + m_{\text{в.э}} \cdot a_{\text{в.э}} = F_{\text{упр.в.э}} + m_{\text{в.э}} \cdot (a_{\text{л}} + a'_{\text{в.э}}).$$

Вследствие чего снижается скольжение и пропорциональные ему потери энергии в обмотках вторичного элемента (рисунок 3.48).

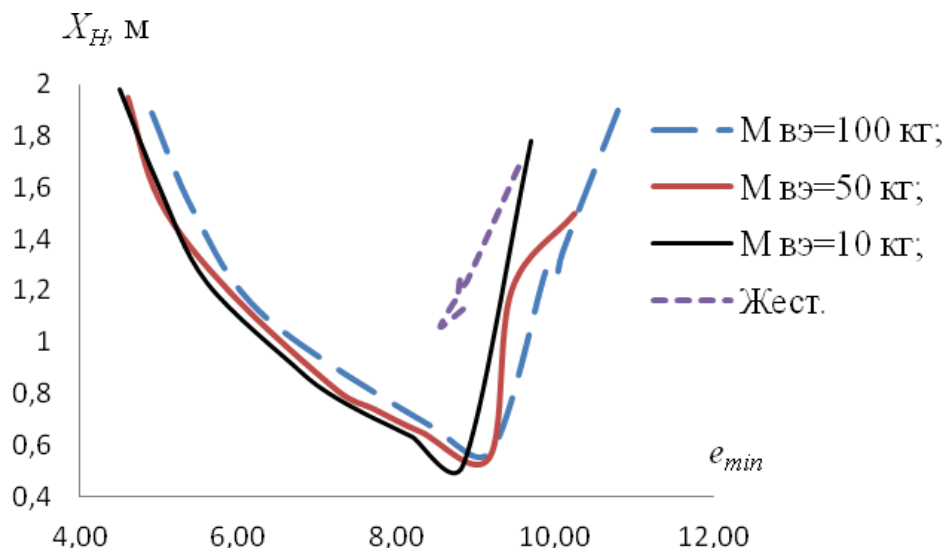


Рисунок 3.47

Расчетная зависимость необходимой длины участка разгона X_H для достижения минимальной энергоемкости e_{\min} разгона транспортируемого груза

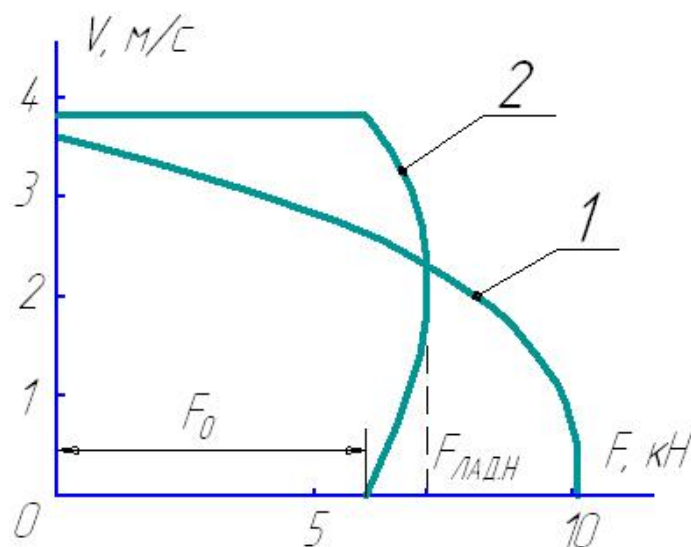


Рисунок 3.48

К пояснению влияния напряжения питания ЛАД на энергоемкость разгона:
 1 – механическая характеристика ЛАД $F_{\text{ЛАД}} = f(V_{\text{в.э}})$; 2 – механическая характеристика линейного электропривода совместно со звеном предварительного разгона $F_{\text{упр.в.э}} = f(V_{\text{л}})$

Оказалось, что X_H пропорциональна синхронной скорости ЛАД V_0 , имеет отрицательную зависимость от начальной скорости транспортирующего лотка $V_{\text{л.0}}$ (рисунок 3.49) и положительную – от отношения пускового усилия ЛАД $F_{\text{п}}$ к силе предварительно сжатия упругого элемента $F_{0,11}$ (рисунок 3.50).

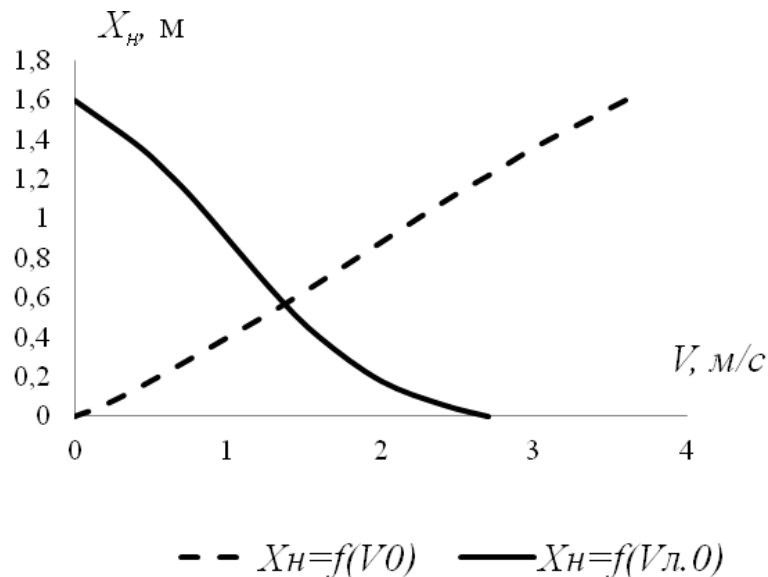


Рисунок 3.49

Расчетная зависимость X_H от синхронной скорости ЛАД V_0 , и начальной скорости транспортирующего лотка $V_{л.0}$

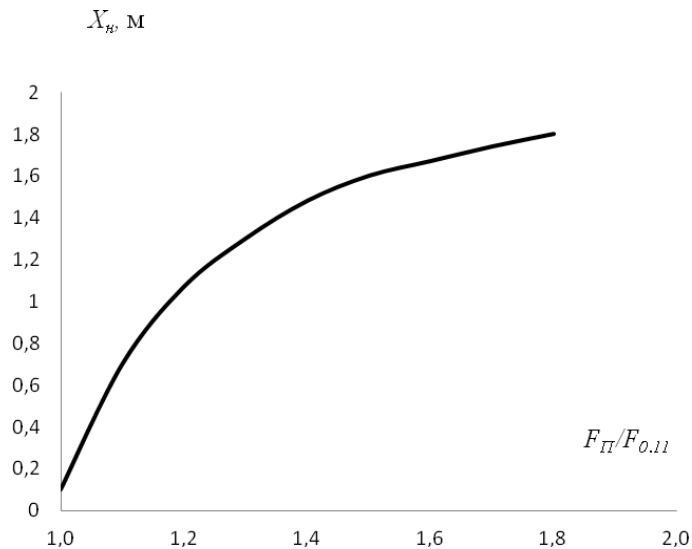


Рисунок 3.50

Расчетная зависимость X_H от отношения пускового усилия ЛАД $F_{п}$ к силе упругого элемента $F_{0.11}$

3.5 Выводы по главе

1. В среде объектно-визуального моделирования Simulink [Matlab] реализованы математические модели ЛАД и ЛАЭСКД рабочих органов различных технологических машин, что позволяет исследовать взаимосвязи в их приводе с учетом электромеханических переходных процессов ЛАД в реальном масштабе времени.

2. Впервые получены в статике и динамике зависимости сил, развиваемых ЛАД (F_x и F_y), от скорости вторичного элемента по осям OX и OY (V_x и V_y) при изменяющемся воздушном зазоре. С увеличением скорости V_x и уменьшающемся зазоре сила тяги F_x уменьшается, а нормальная сила F_y увеличивается. Сила отталкивания F_{yr} настолько незначительна, что ее в расчетах можно не учитывать.

3. Получены траектории сложного колебательного движения рабочих органов при различных удельных нагрузках и кинематических параметрах ЛАЭСЖД.

4. В результате анализа рабочих процессов ЛАЭСЖД получены неизвестные ранее взаимосвязи параметров колебаний рабочих органов с режимом работы ЛАД, силами сопротивления движению, напряжением источника питания и параметрами ЛАЭСЖД.

5. При увеличении линейного напряжения U с 95 % до 105 % от номинального значения продольная сила F_x значительно возрастает, что обуславливается их квадратичной зависимостью, а на частоту колебаний рабочих органов не оказывает существенного влияния, что говорит о стабильности колебательного процесса.

6. Анализ полученных зависимостей показывает, что параметрами колебательного процесса решетного стана, при которых наблюдались наилучшие показатели эффективности процесса очистки зернового материала, следующие: амплитуда продольных колебаний $A_{\text{прод}} = 14,5$ мм, поперечных колебаний $A_{\text{попер}} = 2$ мм, частота колебаний $f_{\text{кол.рс}} = 3$ Гц. С учетом данных параметров при мощности линейного двигателя $P = 680$ Вт, суммарной жесткости упругих элементов $C = 3200$ Н/м и удельной нагрузке не более $q = 0,45$ кг/с·м производительность установки составляет $Q = 750$ кг/ч.

7. Для оценки энергетических показателей существующего и проектируемого электроприводов технологических машин построены зависимость мощности ЛАД P от коэффициента жесткости $P = f(C)$, зависимость мощности ЛАД P от производительности Q машины $P = f(Q)$.

Максимальный энергетический КПД ЛАД, а, следовательно, и разработанного электропривода зерноочистительной машины (ЛАД – это его основной конструктивный элемент) составил $\eta_{\text{энерг}} = 0,41$. При этом нет возможности сравнить его с существующими электроприводами зерноочистительных машин ввиду отсутствия такого понятия у последних.

8. Влияние динамической вязкости потока зерна на параметры колебания деки шелушительной машины в диапазоне 6...12 Па·с и коэффициента заполнения зоны шелушения в пределах 0,55...0,85 приводит к незначительному уменьшению амплитуды колебаний деки, не более, чем на 6,5 мм, что позволяет распространить полученные результаты исследований на зерно с хрупким ядром различных сортов, фракций, влажности.

9. Исследован процесс разгона инерционного конвейера. Установлено:

– эффективность работы ЛАЭСЖД зависит от длины участка разгона транспортирующего лотка;

– энергоемкость разгона снижается с ростом напряжения питания при применении звена предварительного разгона;

– эффективность работы инерционного конвейера имеет положительную зависимость от жесткости упругих элементов торможения лотка, но жесткость ограничивается прочностными характеристиками упоров и нарушением устойчивости автоколебаний;

– при недостаточной жесткости упругого элемента звена предварительного разгона со снижением коэффициента жесткости упругих элементов торможения и увеличением напряжения питания ЛАД наблюдается обратное транспортирование груза.

ГЛАВА 4

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛАЭСЖД РАБОЧИХ ОРГАНОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Экспериментальные исследования ЛАЭСЖД зерноочистительной машины, шелушильной машины и инерционного конвейера проводятся с целью подтверждения адекватности разработанных математических моделей и проверки теоретических положений.

Для проведения физических экспериментов принят следующий порядок их выполнения:

- 1) Разработка и реализация физических установок с ЛАЭСЖД зерноочистительной машины, шелушильной машины и инерционного конвейера;
- 2) Разработать методику проведения экспериментальных исследований;
- 3) В соответствии с разработанной методикой эксперимента укомплектовать исследуемые установки контрольно-измерительными приборами;
- 4) Снять экспериментальные данные с физических установок, с последующей обработкой полученных результатов эксперимента;
- 5) Сравнить результаты теоретических и экспериментальных исследований, сделать выводы;
- 6) Оценка эффективности работы опытных установок.

При исследованиях измерялись:

- ✓ электрические параметры – амплитуда, частота и фазы питающих токов, напряжений и мощностей;
- ✓ механические параметры – амплитуды, частоты и фазы колебательных перемещений, скоростей вторичного элемента ЛАД; параметры колебаний от нагрузки и напряжения питания;
- ✓ технологические параметры – полнота разделения, потери, просеиваемость, эффективность шелушения, точность сортирования и др.

4.1 Конструкции технологических машин для послеуборочной переработки продукции растениеводства с ЛАЭСЖД

В этом подразделе приводится описание разработанных конструкций ЛАЭСЖД рабочих органов зерноочистительной машины, шелушильной машины, инерционного конвейера. Последний представлен двумя разработками: инерционный конвейер влажного сахара; инерционной картофелесортировальной установкой. Для всех конструкций произведен расчет и изготовлен ЛАД.

4.1.1 Зерноочистительная установка с продольно-поперечными колебаниями решетного стана

На основе изложенного в главе 1.1.1 предлагается экспериментальная зерноочистительная установка с автоколебательным ЛАЭСЖД, соответствующая следующим требованиям: простота конструкции и удобство в эксплуата-

ции, устойчивость режимов работы и возможность регулирования кинематических и технологических параметров, возможность визуального наблюдения процесса сепарации (рисунок 4.1) [152, 233, 234].

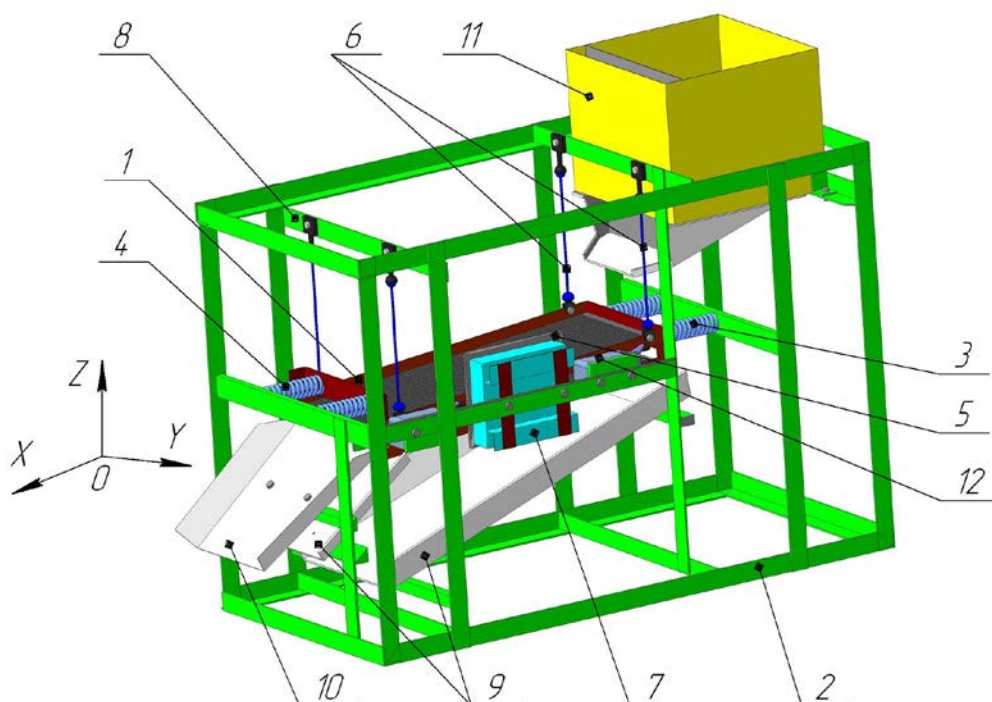


Рисунок 4.1

Экспериментальная зерноочистительная установка: 1 – решетный стан; 2 – основание; 3, 4 – упругие элементы; 5 – вторичный элемент плоского ЛАД; 6 – упругие подвески; 7 – индуктор плоского ЛАД; 8 – рамка-регулятор; 9 – лотки сходовой фракции; 10 – лоток проходовой фракции; 11 – бункер для зерна; 12 – упорные ролики

Зерноочистительная установка работает следующим образом. Блок управления (на рисунке 4.1 не показан) подключает индуктор 7 плоского ЛАД к источнику напряжения, при этом на индукторе создается бегущее электромагнитное поле. Взаимодействие бегущего электромагнитного поля индуктора 7 с бегуном 5 заставляет последний, а, следовательно, и решетный стан, двигаться в направлениях сил F_x и F_y . Решетный стан 1 (рисунок 4.1), подвешенный на шарнирно закрепленных упругих подвесках 6 одинаковой длины под углом α к горизонтали по оси OX , при включении ЛАД под действием силы F_y (поперечное направление) притягивается к индуктору 7, а под действием силы F_x (продольное направление) приходит в поступательное движение в сторону бегущего электромагнитного поля.

При этом упругие элементы 3 и 4 деформируются (цилиндрические винтовые пружины). В какой-то момент времени происходит отключение индуктора ЛАД от источника питания. Под действием потенциальной энергии, накопленной в упругих элементах 3 и 4, решетный стан 1 движется в обратном направлении. При этом за счет резкого торможения решетного стана 1 происходит инерционное перемещение зернового материала. Таким образом, решетный стан совершает возвратно-поступательное движение с продольно-поперечными колебаниями. Частицы зерновой смеси, не прошедшие сквозь решето, по-

ступают на лоток 10 проходовой фракции, а частицы, прошедшие сквозь ячейки решет, попадают на лотки 9 сходовой фракции. Подача зернового материала осуществляется из бункера 11.

В предлагаемом техническом решении для исключения соприкосновения бегуна 5 с неподвижным индуктором 7 ЛАД под действием силы F_y , на основании 2 зерноочистительной машины установлены подпружиненные упорные ролики 12, ограничивающие ход решетного стана по направлению силы F_y . Болтовое соединение фиксирует положение рамки-регулятора 8 относительно основания 2 и позволяет изменять угол наклона сепарирующей поверхности решетного стана к горизонту в пределах от 0° до 10° . Изменение продольной амплитуды колебаний решетного стана в пределах от 20 мм до 40 мм осуществляют варьированием напряжения питания на индукторе ЛАД, а также изменением положения оптических датчиков включения и выключения (на рисунке 4.1 не показаны). Необходимая форма траектории и скорость движения зернового материала обеспечивается правильным подбором жесткости упругих элементов 3 и 4, положением оптических датчиков включения и отключения, а также мощностью ЛАД.

Предложенная установка обладает такими преимуществами:

- исключается механический преобразователь вращательного движения;
- сокращается время простоя;
- уменьшаются динамические нагрузки, вызывающие вибрацию;
- снижается общий уровень шума при работе установки;
- появляются новые возможности в работе зерноочистительной машины, которые повышают эффективность последней за счет создания четко выраженных продольно-поперечных колебаний решетного стана.

На рисунке 4.2 изображен общий вид созданной экспериментальной установки. Размеры установки: длина – 1410 мм, ширина – 805 мм, высота – 1512 мм.

Изучение влияния нагрузки и кинематических параметров на процесс сепарации зернового материала на решетном стане, работающем в колосовом режиме, проводилось на установке, оснащенной решетками проволочно-сварной конструкции с размерами отверстий 3,2...4,0 мм верхнего и 2,2...2,7 мм нижнего решет, соответственно. Размер решет составляет 790×495 мм.

Для экспериментальной установки использовался односторонний плоский ЛАД, рассчитанный и изготовленный согласно методике, описанной в литературе [4, 6] со следующими техническими параметрами:

- размеры индуктора ЛАД: длина \times ширина \times высота ($230 \times 200 \times 59$) мм;
- полюсное деление $\tau = 0,0425$ м;
- число полюсов $2p = 4$;
- число зубцов $z = 13$;
- напряжение питания $U_n = 380$ В и частота сети $f = 50$ Гц;
- пусковое тяговое усилие $F_{II} = 500$ Н;
- синхронная скорость $V_0 = 4,25$ м/с.

Параметры схемы замещения, рассчитанные согласно методике [4, 6], составляют: $R_1 = 6,92$ Ом, $R_2' = 4,09$ Ом, $X_1 = 4,86$ Ом, $X_2' = 0,254$ Ом, $X_m = 2,67$ Ом.



Рисунок 4.2

Общий вид экспериментальной зерноочистительной установки

Механическая характеристика плоского ЛАД для зерноочистительной установки представлена на рисунке 4.3. При изготовлении индуктора ЛАД (рисунок 4.4) согласно разработанным чертежам использовалась следующая технология [3, 6].

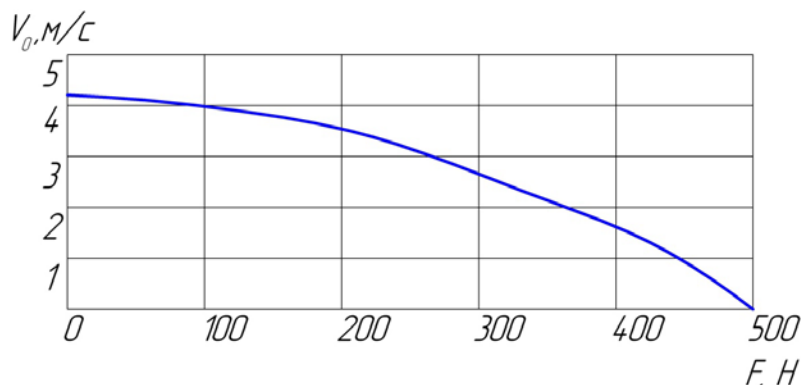


Рисунок 4.3

Механическая характеристика ЛАД для привода решетного стана

Предварительно листы электротехнической стали раскраивались по требуемому размеру, затем производилась вырубка заготовок. Эти заготовки стягивались технологическими обжимными плитами в пакеты толщиной 20...40 мм каждый. В каждом пакете на станке просверливались отверстия под стяжные шпильки индуктора. Затем пакеты разбирались, обжимались на прессе и закреплялись уголками и шпильками в единый пакет. После этого поверхность магнитопровода шлифовалась на станке для обеспечения строго параллельного расположения с вторичной цепью, затем в магнитопроводе фрезеровались прямоугольные пазы для обмоток. После чего пакет вновь разбирался, и каждая пластина очищалась от заусенец и отшлифовывалась. Для изолирования листов магнитопровода применено двухстороннее покрытие масляно-канифольным лаком № 202. После изоляции листов магнитопровода шпильки, соединяющие

листы железа в индукторе, изолировались лакотканью; пакет стали обжимался на прессе и окончательно закреплялся шпильками. После изготовления магнитопровода выполнялась укладка обмоток согласно разработанной схеме. Для этого изготовлен шаблон для намотки катушек и изготовлены катушки. Затем катушки укладывались в пазы, для пазовой изоляции применена лакоткань. После этого катушки объединены в катушечные группы по электрической схеме с помощью клеммной колодки. Вторичный элемент ЛАД для проведения многосторонних экспериментов изготовлен в двух вариантах: в первом случае – это жестко скрепленные между собой стальной и алюминиевый листы (соотношение по толщине 1:2), а во втором случае в пазы стального сердечника (конструкция которого выполнена подобно индуктору ЛАД) уложена короткозамкнутая медная обмотка.



Рисунок 4.4
Общий вид индуктора плоского ЛАД

4.1.2 Вальцедековая машина с КВЭП

В первой главе работы были приведены варианты компоновки КВЭП вальцедековой машины с линейным электродвигателем. Для создания экспериментальной установки с точки зрения удобства физической реализации и проведения эксперимента была выбрана конструкция с декой, совершающей колебательное движение вдоль оси вращения вальца [172] (рисунок 2.7,б). Предлагается экспериментальная установка вальцедековой машины (рисунок 4.5), реализующая воздействие на обрабатываемый материал в двух взаимноперпендикулярных плоскостях.

Вращающийся валец 9 машины жестко соединен с валом АД с помощью муфты, а дека 10 установлена на подвижной каретке и жестко соединена со вторичным элементом ЛАД 2 с одной стороны и упругим элементом 11 с другой, что позволяет ей совершать поступательное перемещение вдоль вращающегося вальца. Регулировать частоту вращения АД как выше, так и ниже номинальной, позволяет частотный преобразователь 7, тем самым, при необходимо-

сти, возможно и регулирование производительности машины. Изменять параметры колебательного движения ЛАД возможно путем задания необходимых значений времени импульса и времени паузы с помощью блока импульсного управления 1.

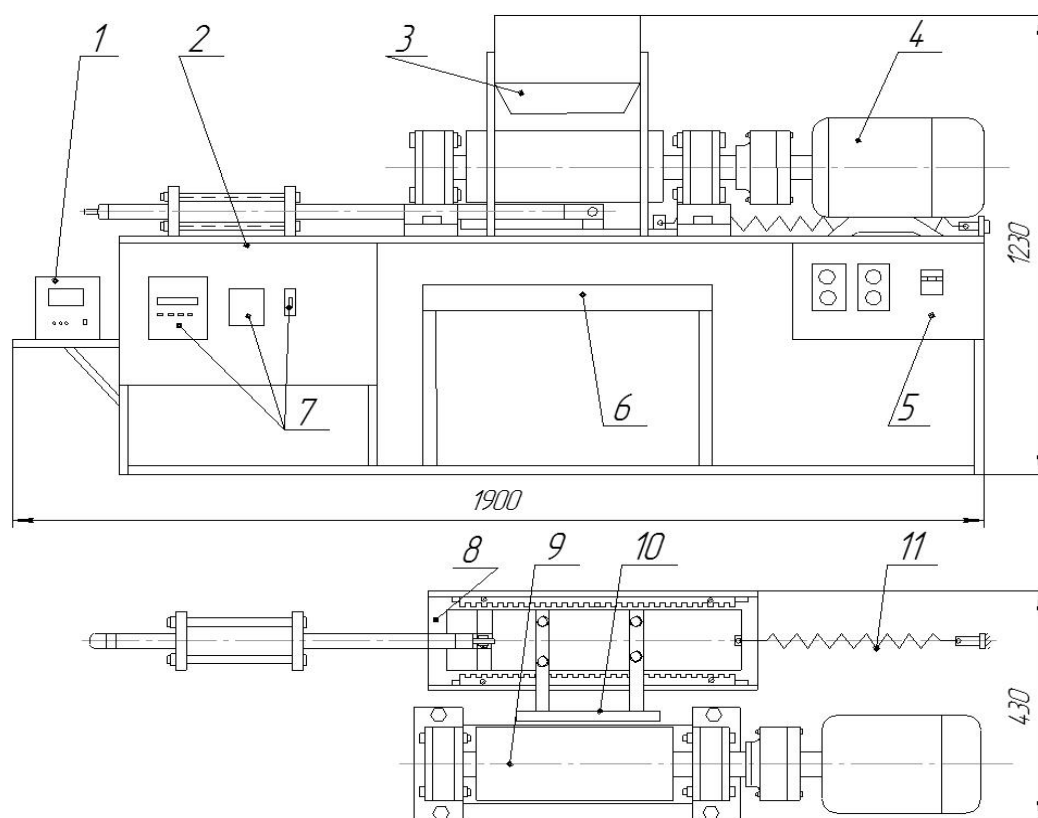


Рисунок 4.5

Общий вид экспериментальной установки с колебательно-вращательным электроприводом с подвижной декой и вращающимся вальцом: 1 – блок импульсного управления ЛАД; 2 – линейный асинхронный электродвигатель; 3 – бункер-питатель; 4 – электродвигатель вращения (ЭД) типа АИР; 5 – станция управления; 6 – приемный лоток; 7 – преобразователь частоты (управление частотой вращения ЭД); 8 – каретка линейного перемещения деки; 9 – валец; 10 – дека; 11 – упругий элемент

Экспериментальная вальцедековая машина с КВЭП представлена на рисунке 4.6 и включает в себя валец 1 и деку 2 на каретке (детально – рисунок 4.7), асинхронный двигатель вращения 3, цилиндрический ЛАД 4, упругий элемент 5, аппаратуру управления приводом 6, бункер 7, раму 8 и некоторые конструктивные элементы.

На рисунке 4.8 представлен изготовленный цилиндрический ЛАД со следующими параметрами: $R_1 = 4,09 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $X_1 = 0,141 \text{ Ом}$, $X_2 = 0,85 \text{ Ом}$, $X_m = 4,7 \text{ Ом}$, $U = 220 \text{ В}$, $\omega = 314 \text{ рад/с}$, $\tau = 0,036 \text{ м}$, $V_0 = 3,6 \text{ м/с}$. Чертеж цилиндрического ЛАД представлен в приложении Б.

Система управления ЛАД будет рассмотрена позже (раздел 4.2), а для осуществления регулирования частоты вращения АД применяется полупроводниковый преобразователь частоты АПЧ-ТТЕТ-6,3-380-Х-УХЛ4 на IGBT-транзисторах, позволяющий изменять напряжение и частоту переменного тока (рисунок 4.9). Преобразователи АПЧ представляют собой преобразователи частоты

ты типа «неуправляемый выпрямитель – звено постоянного тока – транзисторный инвертор напряжения» с микропроцессорной системой управления.

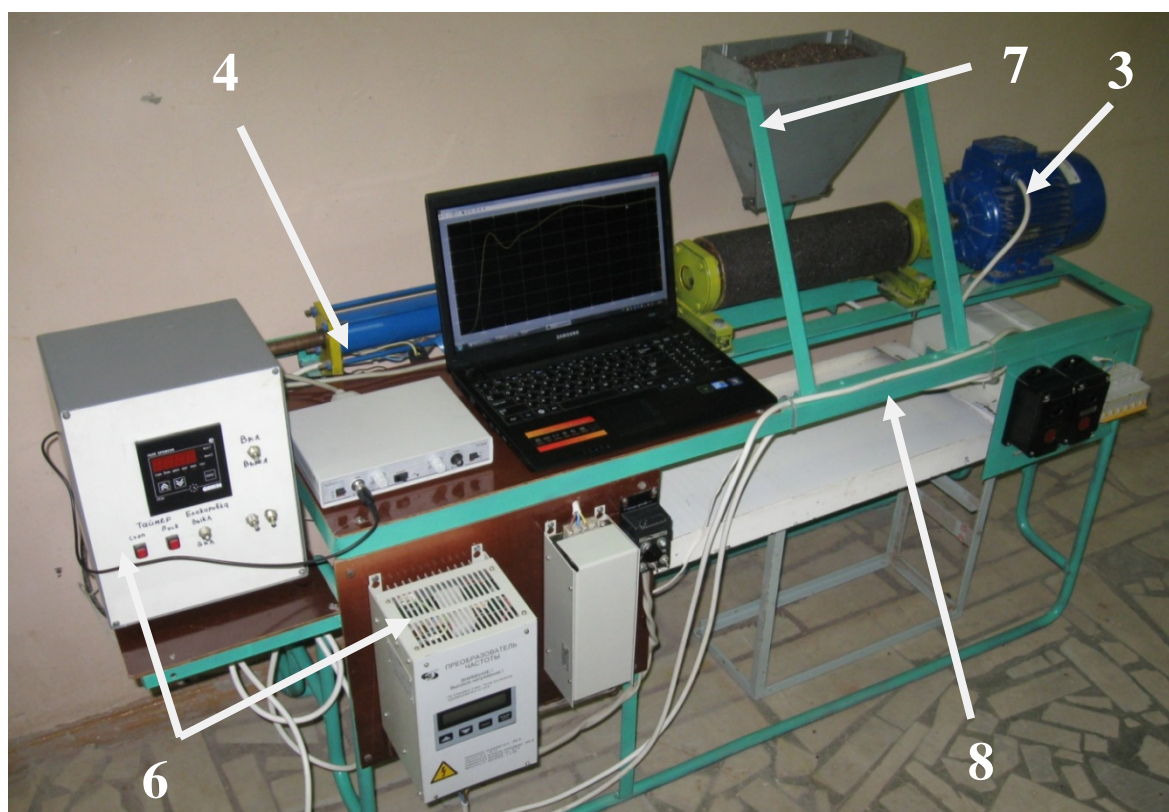


Рисунок 4.6

Общий вид экспериментальной вальцедековой машины с КВЭП

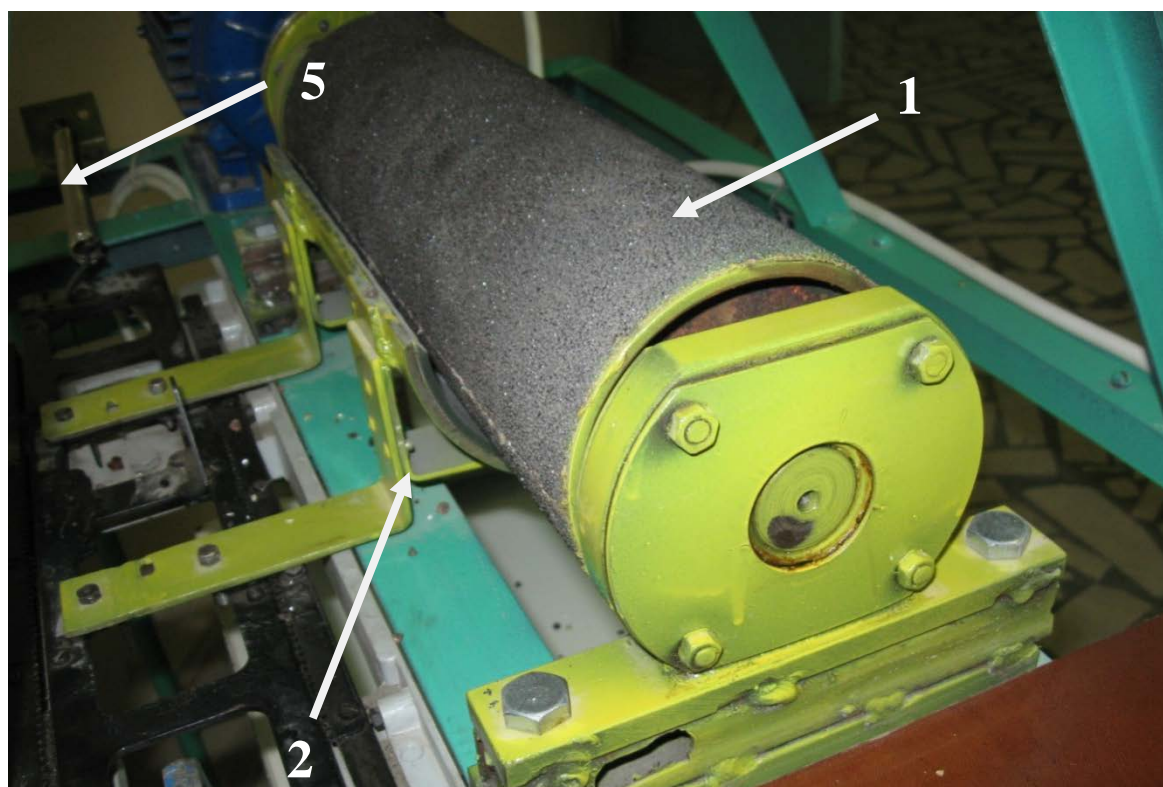


Рисунок 4.7

Валец и подвижная дека на каретке

На выходе преобразователя формируется напряжение регулируемой амплитуды и частоты, подаваемое на обмотки фаз статора двигателя. Изменение амплитуды и частоты выходного напряжения выполняется системой управления по закону $U/f = const$, обеспечивающему регулирование и поддержание на заданном уровне частоты вращения двигателя.

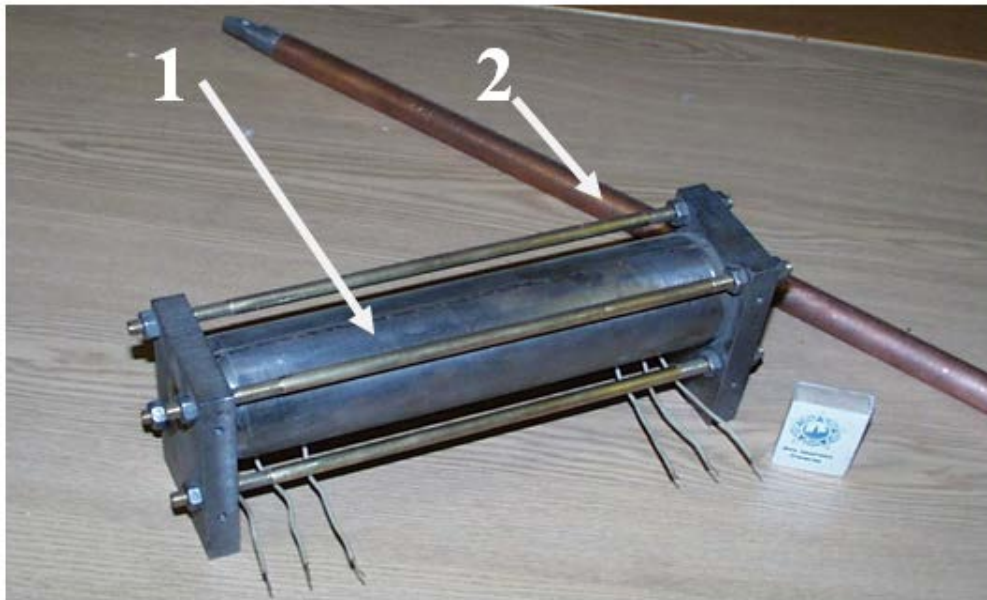


Рисунок 4.8

Цилиндрический линейный асинхронный электродвигатель:
1 – индуктор; 2 – вторичный элемент



Рисунок 4.9

Преобразователь частоты на экспериментальной установке

4.1.3 Инерционный конвейер со звеном предварительного разгона ЛАЭСЖД

Приводятся две конструкции технологических машин АПК со звеном предварительного разгона ЛАЭСЖД. Это инерционный конвейер влажного сахара для сахарных заводов и инерционная картофелесортировальная установка.

4.1.3.1 Инерционный конвейер влажного сахара

Габаритные размеры экспериментальной модели инерционного конвейера приняты схожими габаритным размерам конвейера Ш53ПТА-3 и соответствуют требованиям технологического участка.

Общий вид экспериментальной установки, предназначенной для исследования линейного асинхронного электропривода инерционного конвейера со звеном предварительного разгона, представлен на рисунке 4.10, фотография экспериментального образца инерционного конвейера со звеном предварительного разгона на рисунке 4.11 [36, 37].

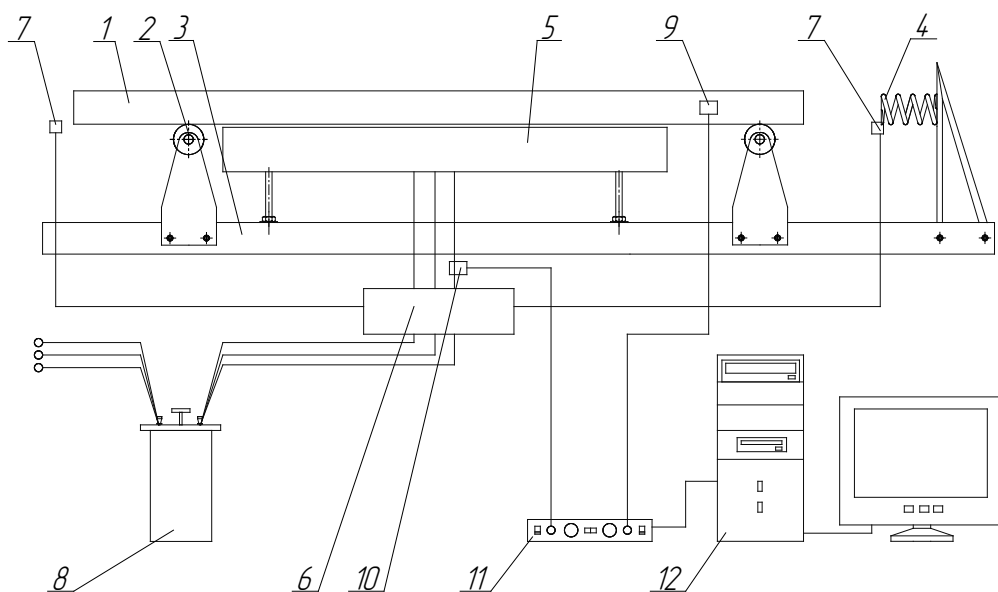


Рисунок 4.10

Общий вид экспериментальной установки для исследования ЛАЭСКД инерционного конвейера со звеном предварительного разгона

Рабочим органом конвейера является транспортирующий лоток 1, который опирается на ролики 2, закрепленные к раме 3. Привод состоит из ЛАД и упругих элементов 4 (цилиндрические винтовые пружины). Индуктор 5 устанавливается на основании под желобом. Вторичный элемент ЛАД установлен на стальном транспортирующем лотке конвейера, экранированный со стороны индуктора алюминиевым листом. При исследовании приняты за базовые величины: масса транспортируемого груза 172 кг и масса транспортирующего лотка 550 кг, которые соответствуют заводскому конвейеру Ш53ПТА-3 с производительностью по сахару 450 т/сут. Включение и отключение ЛАД от трехфазного напряжения 50 Гц осуществляется блоком управления 6, который получает информацию о перемещении желоба от двух датчиков положения 7. Регулирование напряжения питания ЛАД осуществляется с помощью автотрансформатора 8, пределы регулирования линейного напряжения 0...380 В. Регистрация временных зависимостей ускорения грузонесущего желоба и фазного тока ЛАД ведется с помощью датчика перемещений 9 и датчика тока 10 соответственно. От них аналоговый сигнал (напряжение, изменяющееся во времени) поступает

на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 11. АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой код, который можно подавать на вход персонального компьютера (ПК) 12. При помощи специальной программы сигнал представляется в виде графика на экране монитора. Далее полученную зависимость можно экспортировать в любые математические приложения для последующей обработки.

Можно изменять положения датчиков так, что перемещение грузонесущего лотка от момента включения ЛАД до отключения может варьироваться в пределах 0...600 мм. Масса грузонесущего желоба составляет 100 кг. В качестве упругих элементов использованы цилиндрические винтовые пружины сжатия с различными жесткостями.



Рисунок 4.11

Экспериментальный образец инерционного конвейера со звеном предварительного разгона линейного асинхронного электропривода

Специально для лабораторной установки согласно методике [4, 6], рассчитан плоский односторонний линейный асинхронный двигатель со следующими параметрами:

Размеры индуктора ЛАД:

- длина 1000 мм,
- ширина 420 мм,
- высота 80 мм;

Полюсное деление $\tau = 36$ мм;

Число полюсов $2p + 1 = 23$;

Число зубцов $z = 69$;

Напряжение питания $U_H = 220$ В;

Частота сети $f = 50$ Гц;

Номинальное тяговое усилие $F_H = 7250$ Н;

Пусковое тяговое усилие $F_{II} = 10000$ Н;

Синхронная скорость $V_I = 3,6$ м/с;

Воздушный зазор $\delta = 1$ мм.

Параметры Т-образной схемы замещения рассчитаны согласно [6] и составляют: $R_1 = 0,5 \text{ Ом}$, $R_2' = 1 \text{ Ом}$, $X_1 = 1 \text{ Ом}$, $X_2' = 0,1 \text{ Ом}$, $X_m = 5 \text{ Ом}$.

Механическая характеристика ЛАД представлена на рисунке 4.12.

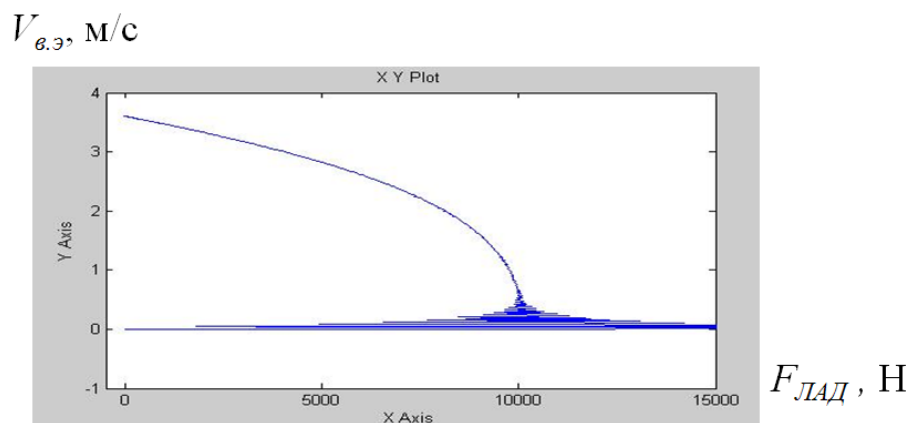


Рисунок 4.12

Расчетная механическая характеристика ЛАД для привода инерционного конвейера

При изготовлении индуктора ЛАД (рисунок 4.13) согласно разработанным чертежам использовалась технология [6], описанная в 4.1.1.

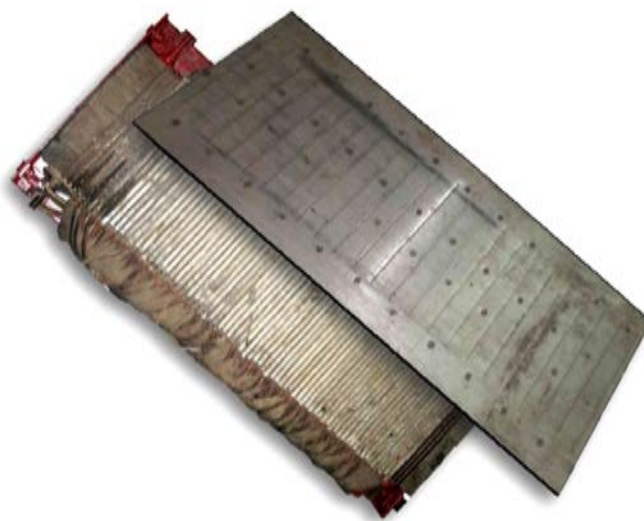


Рисунок 4.13

Индуктор и вторичный элемент плоского одностороннего ЛАД экспериментальной установки для исследования инерционного конвейера со звеном предварительного разгона линейного асинхронного электропривода

4.1.3.2 Инерционная картофелесортировальная установка

Машина для сортирования клубней картофеля представлена на рисунке 4.14, и включает в себя рабочий орган, состоящий из двух жестко соединенных между собой частей с приводом в виде плоского ЛАД [31, 157]. Первая часть представляет собой подвижный лоток 1, на котором жестко закреплены соединенные алюминиевая и стальная пластины, являющиеся вторичным элементом плоского линейного асинхронного электродвигателя (ЛАД). Под пластинами на

раме 6 установлен индуктор 2 ЛАД. На лоток 1 подается подлежащий обработке картофель.

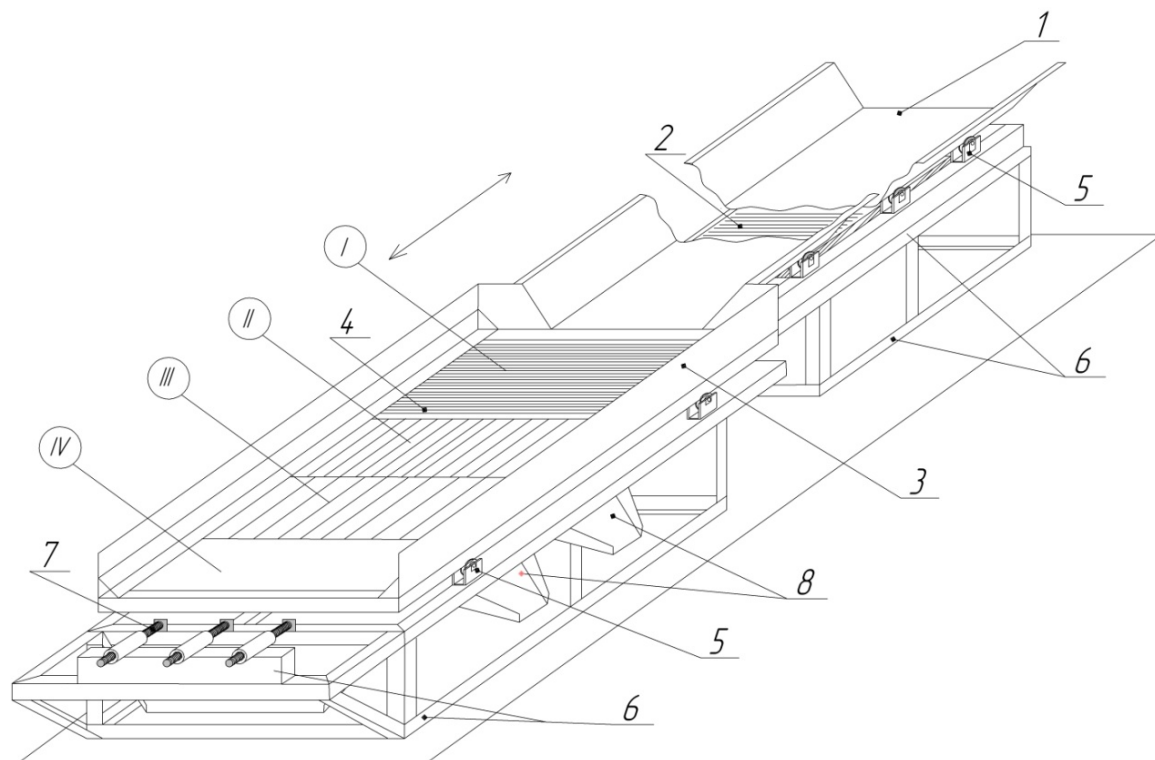


Рисунок 4.14

Инерционный конвейер для послуборочной обработки картофеля с линейным электроприводом: 1 – сплошной лоток; 2 – индуктор линейного асинхронного двигателя; 3 – лоток из прутков; 4 – прутки; 5 – ролик; 6 – основание; 7 – упругие элементы; 8 – лоток, I – участок очистки, II – участок сортировки (мелкая фракция), III – участок сортировки (средняя фракция), IV – участок сортировки (крупная фракция)

Вторая подвижная часть 3 установки выполнена из прутков 4, установленных на определенном расстоянии друг от друга. На этом участке происходит доочистка картофеля от мелких примесей и его сортировка: I – участок доочистки, II – участок сортировки (мелкая фракция), III – участок сортировки (средняя фракция), IV – участок сортировки (крупная фракция).

Подвижные части 1 и 3 установлены на роликах 5 таким образом, что по мере перемещения в обоих направлениях ударяются в упругие элементы 7, установленные на основании 6. На рисунке 4.14 упругие элементы показаны только с одной стороны. Сортированный по размеру картофель отводится с конвейера ячейками 8.

Установка работает следующим образом. При подаче напряжения блоком управления (на рисунке 4.14 не показан) на индуктор 2 ЛАД рабочий орган вместе с картофелем приходит в поступательное движение в направлении упругих элементов 7 (рисунок 4.14). Звено предварительного разгона (в виде вторичного элемента) аналогично инерционному конвейеру влажного сахара, поэтому здесь отдельно не рассматривается. При достижении последних индуктор отключается от сети, рабочий орган ударяется в упругие элементы и резко останавливается, а картофель по инерции движется вперед. За счет накоплен-

ной потенциальной энергии упругими элементами 7 рабочий орган движется в обратном направлении, где также взаимодействует с упругими элементами, останавливается и разгоняется в первоначальном направлении. В этот момент индуктор снова подключается к сети и далее описанный процесс повторяется. Таким образом, рабочий орган установки для сортировки картофеля работает в режиме автоколебаний, а картофель поступательно перемещается на участки доочистки и сортировки.

При движении по поперечным пруткам 4 (участок I) картофель освобождается от мелких примесей. Далее сквозь продольные прутки проходит мелкая фракция картофеля (участок II), затем средняя (участок III), а оставшаяся крупная фракция поступает на IV участок.

Предложенная машина обладает следующими преимуществами:

1. Обладает достоинствами присущими всем инерционным конвейерам системы Маркуса.

2. Устраняются недостатки вибрационных и инерционных транспортеров с приводом от двигателя вращения, а именно:

- повышается надежность;
- упрощается эксплуатация;
- снижается шум;

– уменьшается количество необходимых текущих ремонтов за счет исключения механического преобразователя вида движения, основанного на сложных кинематических схемах;

- исчезает проблема пуска двигателя.

3. Появляются новые возможности, повышающие эффективность работы не только конвейера, но и сушильной установки. Они заключаются в следующем:

– повышается производительность, появляется возможность работы при больших ускорениях, что способствует обеспечению бесперебойного перемещения картофеля. Это достигается за счет исключения из привода механического преобразователя, который ограничивает амплитуду колебаний желоба размерами кривошипно-шатунного или эксцентрикового механизма.

– появляется возможность регулирования производительности и направления транспортирования за счет изменения параметров автоколебаний (напряжения питания, моментов включения и отключения ЛАД, жесткости упругого элемента).

На рисунке 4.15 представлены фотографии экспериментальной инерционной картофелесортировальной установки.

Размеры желоба: длина – 2000 мм, ширина – 332 мм, высота борта – 70 мм. Включение и отключение ЛАД от трехфазного напряжения 50 Гц осуществляется блоком управления, который получает информацию о перемещении желоба от двух датчиков положения. Датчики положения могут менять свое расположение так, что перемещение грузонесущего желоба от момента включения ЛАД до отключения может варьироваться в пределах 0...500 мм. Масса грузонесущего желоба составляет 25 кг.



Рисунок 4.15
Экспериментальная установка для исследования ЛАЭСКД
инерционной картофелесортировальной машины

Специально для лабораторной установки согласно методике [6], рассчитан и изготовлен плоский односторонний ЛАД (рисунок 4.16) со следующими параметрами:

Размеры индуктора ЛАД:

Длина 700 мм, ширина 210 мм, высота 80 мм;

Полюсное деление $\tau = 0,021$ мм;

Число полюсов $2p = 30$;

Число зубцов $z = 93$;

Напряжение питания $U_n = 220$ В;

Частота сети $f = 50$ Гц;

Пусковое тяговое усилие $F_{II} = 340$ Н;

Синхронная скорость $V_I = 2,105$ м/с;

Воздушный зазор $\delta = 4$ мм.



Рисунок 4.16
Индуктор плоского одностороннего ЛАД, залитый компаундом

Параметры схемы замещения рассчитаны согласно [6] и составляют: $R_1 = 3,46 \text{ Ом}$, $R_2' = 4,09 \text{ Ом}$, $X_1 = 2,43 \text{ Ом}$, $X_2' = 0,127 \text{ Ом}$, $X_m = 2,67 \text{ Ом}$.

Механическая характеристика изготовленного ЛАД представлена на рисунке 4.17.

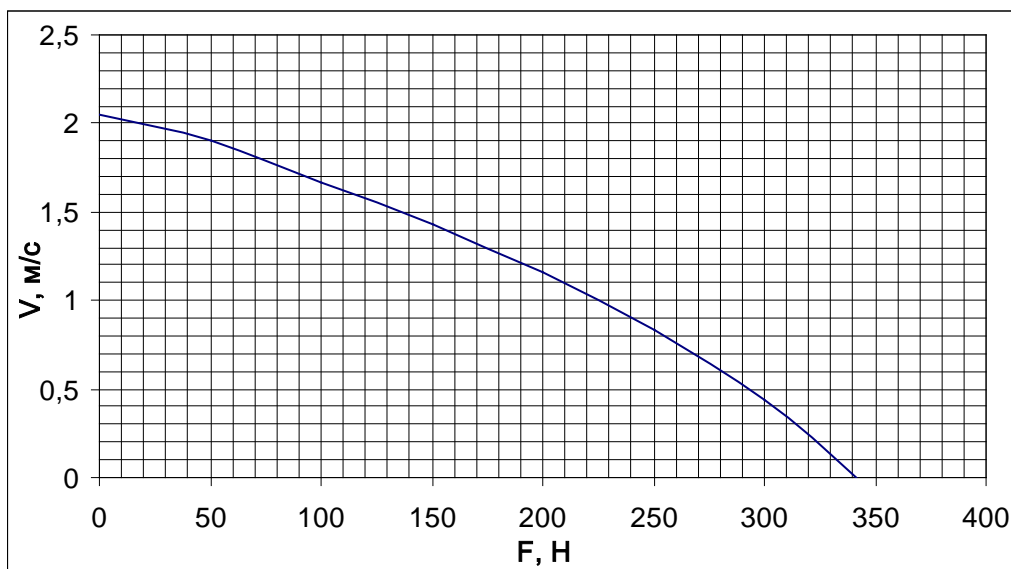


Рисунок 4.17

Механическая характеристика ЛАД

4.2 Блок управления ЛАЭСЖД

Экспериментальные установки имеют широкие возможности регулирования напряжения посредством тиристорного регулятора напряжения (ТРН) типа РНТТЕ (рисунок 4.18), а длительности и частоты включения ЛАД – с помощью блока импульсного управления.



Рисунок 4.18

Тиристорный регулятор напряжения РНТТЕ-63

Блок-схема блока импульсного управления экспериментальной установки показана на рисунке 4.19. В этой схеме ЛАД (11) с помощью тиристорного коммутатора (10) периодически подключается к источнику питания (9), напряжение которого неизменно.

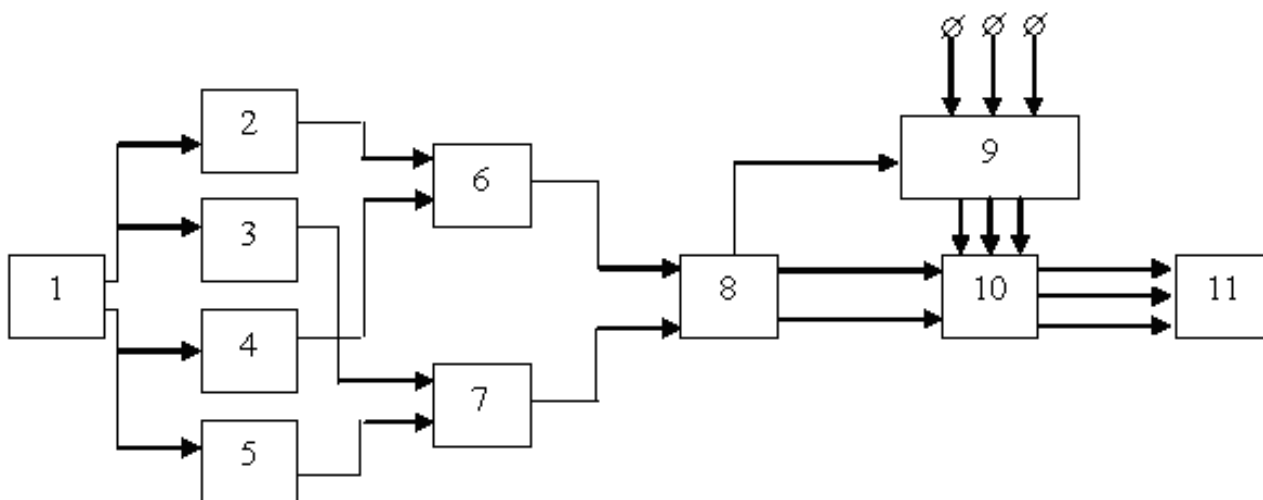


Рисунок 4.19

Блок-схема импульсного управления ЛАД (режим вынужденных колебаний КЛАП):

1 – генератор импульсов; 2, 5 – цепи задержки; 3, 4 – инверторы; 6, 7 – ключи;
8 – коммутатор; 9 – источник питания; 10 – тиристорный коммутатор; 11 – ЛАД

Период коммутаций ЛАД задается генератором импульсов (1), а асимметричность – длительностью включенного и выключенного состояний ЛАД определяется длительностью включенного и выключенного состояний ключей (6) и (7). Регулирование соотношения длительностей включенного и выключенного состояний ключей (6) и (7) осуществляется задержкой импульсов генератора (1) через цепи задержки (2) и (5). Инверторы (3) и (4) служат для согласования режимов работы генератора импульсов (1) и ключей (6) и (7), а коммутатор (8) – для выбора режима работы привода.

Управление работой ЛАД может выполняться различными способами. При широтно-импульсном регулировании (ШИР) остается неизменным период коммутаций $T_k = const$ и, значит, частота коммутаций $f_k = 1 / T_k = const$, а изменение скважности осуществляется путем изменения времени включенного состояния ЛАД t_I ; при этом $t_I = var$.

В случае частотно-импульсного регулирования (ЧИР) остается неизменной длительность включенного состояния ЛАД. Изменяется частота коммутаций, а значит, и длительность периода коммутаций.

Возможен также и комбинированный широтно-частотный способ импульсного регулирования (ШЧИР), когда одновременно изменяются и длительность включенного состояния двигателя, и частота коммутаций. Из указанных способов наиболее предпочтителен КЛАП ШИР, так как при его использовании относительно просто осуществить изменение скважности сигналов γ ($\gamma = t_I / T_k$) от 0 до 1, что, в свою очередь, дает возможность в широких пределах импульсно регулировать скорость двигателя.

Второй способ – ЧИР характеризуется, как правило, более простыми схемными решениями, однако в этом случае не представляется возможным осуществить глубокое регулирование скорости, так как при $t_I = const$ для $\gamma \rightarrow 0$ необходимо, чтобы $T_k \rightarrow \infty$ или $f_k \rightarrow 0$, то есть по существу вырождается идея импульсного регулирования.

На рисунке 4.20 приведена блок-схема, позволяющая осуществлять ШИР. На рисунке 4.21 приведены осциллограммы, поясняющие сущность процессов, происходящих в схеме на рисунке 4.20.

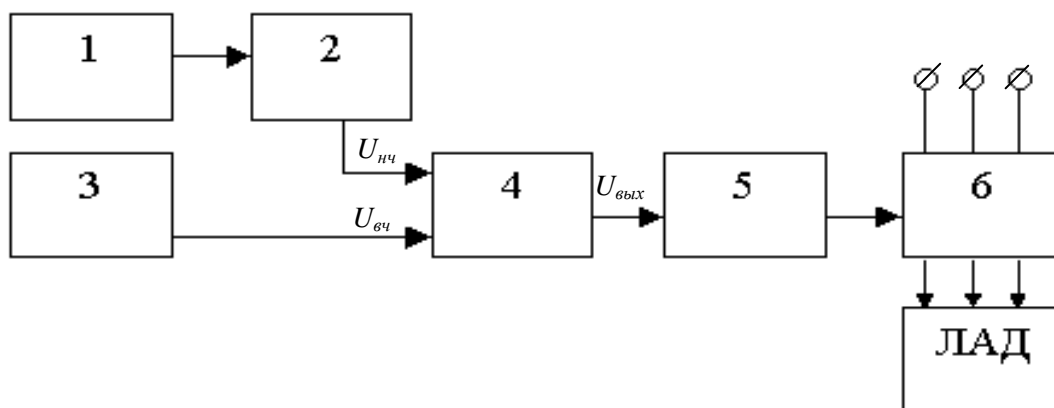


Рисунок 4.20

Блок-схема, позволяющая осуществлять ШИР: 1 – генератор низкой частоты; 2 – ждущий мультивибратор; 3 – генератор высокой частоты; 4 – схема совпадения; 5 – формирователь импульсов; 6 – тиристорный коммутатор

С выхода генератора низкой частоты (1) импульсы поступают на вход ждущего мультивибратора (2). На выходе ждущего мультивибратора имеются импульсы с регулируемой скважностью (рисунок 4.21,а). Генератор высокой частоты (3) вырабатывает импульсы частотой 5–8 кГц (рисунок 4.21,б). На выходе схемы совпадения (4) или на входе усилителя-формирователя импульсов (5) формируются прямоугольные импульсы низкой частоты с высокочастотным наполнением (рисунок 4.21,в). Такие импульсы после необходимого усиления схемой (5) обеспечивают надежное включение тиристорного коммутатора (6).

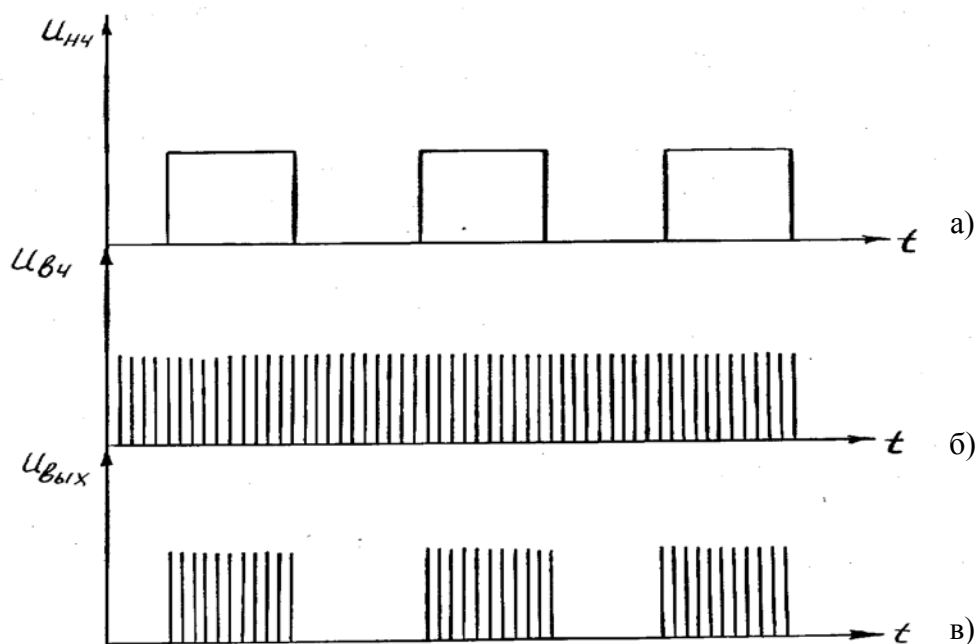


Рисунок 4.21

Осциллограммы, поясняющие работу ШИР

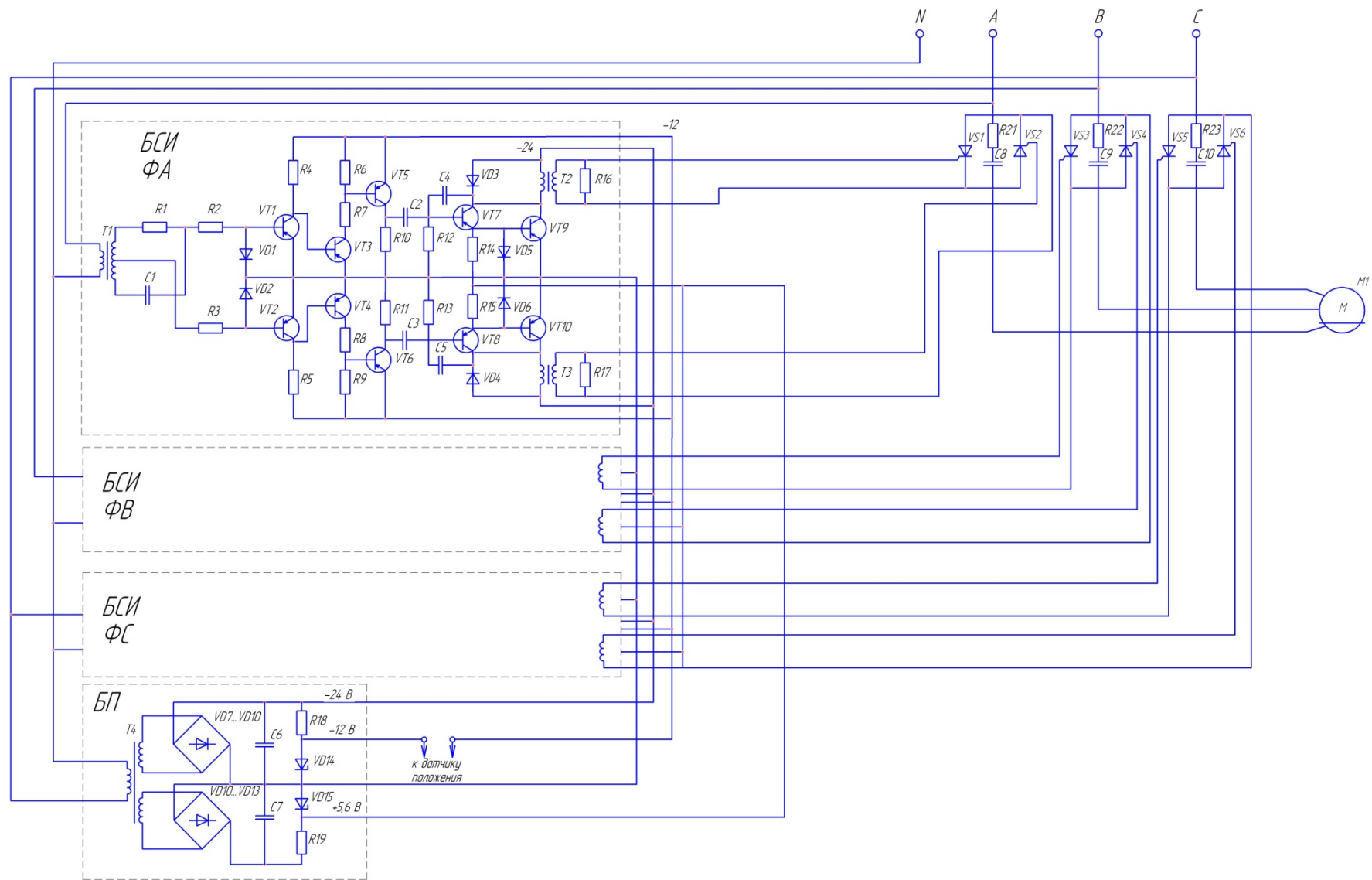


Рисунок 4.22
Принципиальная электрическая схема управления ЛАД

Для управления ЛАД разработана бесконтактная импульсная схема управления, базирующаяся на современной элементной базе, схема электрическая принципиальная которой показана на рисунке 4.22 (на рисунке 4.23 показана схема электрическая структурная). Частота колебаний решетного стана, необходимая для обеспечения эффективной работы ЛАД, составляет 1...4 Гц, что не позволяет применить для управления ЛАД релейно-контактную аппаратуру. Схема импульсного управления позволяет осуществлять коммутацию ЛАД с источником питания, работающего в режиме автоколебаний по двум датчикам положения или в режиме вынужденных колебаний, тем самым предполагает периодическое подключение ЛАД к источнику питания и отключение от него.

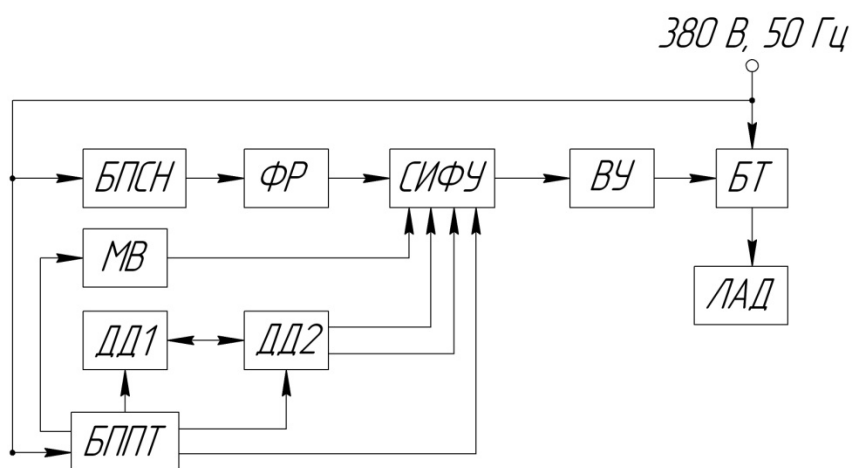


Рисунок 4.23

Структурная схема импульсного блока управления:

БПСН – блок питания синхронизирующего напряжения; ФР – фазорегулятор;
 СИФУ – синхронно-импульсное фазовое управление; ВУ – выходное устройство;
 БТ – блок тиристоров; ЛАД – линейный асинхронный двигатель; МВ – мультивибратор;
 ДД1 и ДД2 – датчики положения; БП – блок питания постоянного напряжения

4.3 Контрольно-измерительные приборы, оборудование и датчики

Для снятия рабочих характеристик электропривода рабочих органов и их дальнейшего анализа на основаниях экспериментальных установок закреплены датчики и измерительное оборудование, снимающие показания одновременно с процессом сепарации:

- датчики линейного перемещения Gefran PY1, представляющие собой переменные резисторы с линейной вольтамперной характеристикой, с выхода которых снимается сигнал об изменении подаваемого на них напряжения, после чего сигнал посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП) Velleman PCS64i передается на персональный компьютер и выводится в рабочем окне программе WinDSO FG32 с последующим сохранением рабочих характеристик. Полученные зависимости можно экспортировать в математические приложения для последующей обработки;

- датчик тока CSLA1CF 0149MEX, также имеющий выход на АЦП (регистрирует изменение величины силы тока на ЛАД);

- оптические датчики положения O02-NO-PNP;
- вольтметр электронный GDM-8246;
- персональный компьютер (ПК) с пакетом прикладных программ;
- блок питания многоканальный БП-98-7-Х.

В экспериментальных установках имеется возможность изменения расположения датчиков положения в широком диапазоне, к примеру, в зерноочистительной установке в пределах $S_{\text{вкл}} = 0 \dots 30$ мм.

Включение и отключение ЛАД от трехфазного напряжения $U = 380$ В частотой $f = 50$ Гц осуществляется блоком управления, который получает информацию о перемещении решетчатого стана от двух оптических датчиков положения O02-NO-PNP.

Сигнал с датчиков – напряжение, пропорциональное физическому изменению измеряемой величины, регистрируется двухканальным АЦП Velleman PCS64i (рисунок 4.24). Последний подключается к любому IBM совместимому компьютеру и имеет собственное приложение WinDSO FG32, интерфейс которого выполнен как экран осциллографа (рисунок 4.25). Приложение WinDSO FG32 работает в среде DOS и WINDOWS, управление производится с помощью клавиатуры и мыши. Имеется возможность сохранять регистрируемые данные как в виде изображений в формате GPEG, так и экспортировать в другие математические приложения. На рисунке 4.26 представлено рабочее место с АЦП и персональным компьютером (ПК).



Рисунок 4.24
АЦП Velleman PCS64L

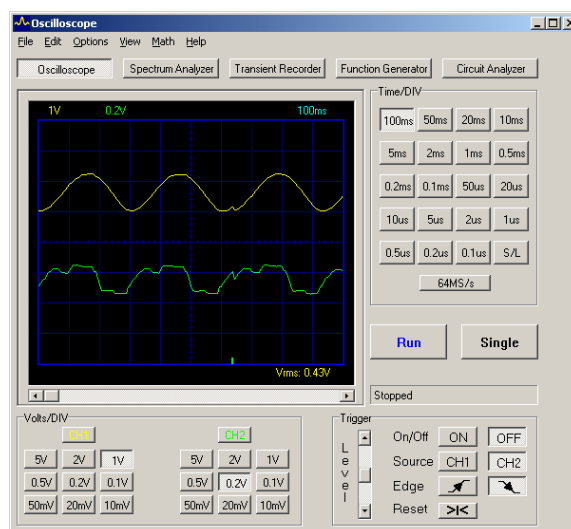


Рисунок 4.25
Общий вид панели управления осциллографом в ОС WINDOWS



Рисунок 4.26
Рабочее место с АЦП Velleman PCS64i и ПК

В экспериментальных исследованиях использовались следующие измерительные приборы и оборудование, представленные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Измерительные приборы и оборудование

№ п.п.	Наименование	Марка	Класс точности	Назначение
1	Датчик тока	CSLA1CF 0149MEX	2,5	Определение значения силы тока
2	Датчик линейного перемещения	Gefran PY1	0,1	Определение линейного перемещения
3	ПК с пакетом прикладных программ	–	–	Накопление и обработка полученных данных
4	Вольтметр электронный	GDM-8246	2	Определение питающего напряжения
5	Преобразователь аналого-цифровой	Velleman PCS64i	1,5	Передача данных с датчиков на ПК
6	Датчик положения оптический	O02-NO-PNP	1	Коммутация цепи питания ЛАД
7	Блок питания многоканальный	БП-98-7-X	1,5	Источник питания постоянного тока
8	Влагомер зерна	Farmpoint	0,1	Измерение влажности зернового материала
9	Весы электронные	ВК-1500	0,05	Определение массы полученных фракций

Измерение тока, потребляемого индуктором ЛАД, с учетом электромагнитных переходных процессов осуществляется активным линейным датчиком тока марки CSLA1CF (рисунок 4.27). Он позволяет бесконтактным способом измерять постоянный, переменный и импульсный токи в диапазонах ± 100 А.

Датчик основан на эффекте Холла, имеет аналоговый выход, напряжение на котором прямо пропорционально величине тока, протекающего через контролируемый проводник. При нулевом токе на выходе действует напряжение смещения, равное половине напряжения источника питания $U_{пит} / 2$. Размах вы-

ходного напряжения и, соответственно, чувствительность линейно зависят от напряжения источника питания (пропорциональный выход, $0,25 \cdot U_{\text{пит}} < U_{\text{вых}} < 0,75 \cdot U_{\text{пит}}$). Дополнительная регулировка чувствительности производится путем увеличения числа витков проводника вокруг кольца магнитопровода датчика. Датчики на базе сенсора SS94A1 имеют двухтактный выходной каскад на PNP и NPN транзисторах, а на базе 91SS12-2 – каскад на PNP транзисторе с открытым коллектором. С учетом того, что датчик тока линейный, то снятые показания напряжения, согласно установленной пропорции, переводятся в реальные значения тока.



Рисунок 4.27
Общий вид датчика тока CSLA1CF

На рисунках 4.28 и 4.29 представлены соответственно сигнал напряжения, поступающий на осциллографическую приставку с датчика тока, и отражающий его действительный ток индуктора ЛАД. Амплитудное значение напряжения 1 В на осциллографической приставке соответствует значению силы тока 15 А.

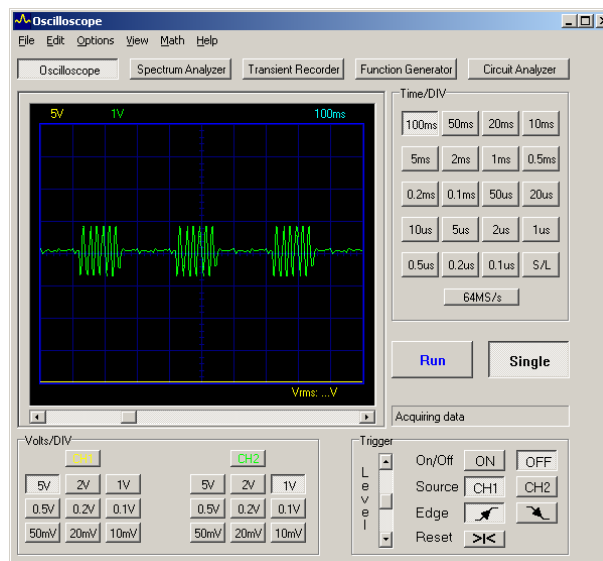


Рисунок 4.28
Осциллограмма тока индуктора ЛАД, снятая датчиком CSLA1CF

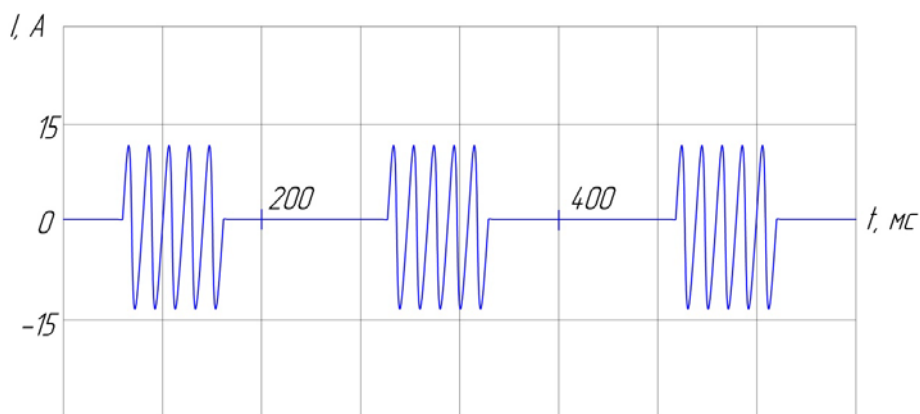


Рисунок 4.29
Потребляемый ток индуктора ЛАД

Изменение тока в режиме включения не превышает 9 % от его установившегося значения, а длительность не более 0,15 с. При условии, что вторичный элемент предварительно разогнан, величина броска силы тока при включении ЛАД еще меньше. На основе полученных графиков делаем вывод, что они достаточно достоверны.

Измерение перемещений рабочих органов установок производилось путем снятия выходного напряжения с датчика линейного перемещения Gefran PY1, которые подвижной частью жестко закреплялись на рабочих органах, а неподвижной – к основанию установки с возможностью перемещения датчиков перпендикулярно измеряемому перемещению (рисунок 4.30).

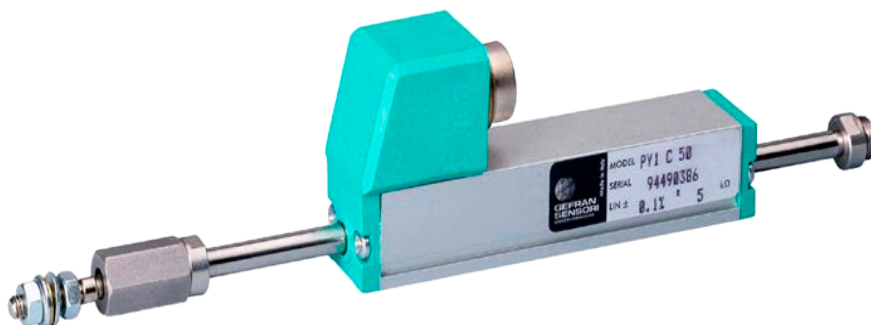


Рисунок 4.30
Общий вид датчика линейных перемещений GEFRAN PY1

Измерение производилось в следующей последовательности. От стабилизатора напряжения на вход датчика подается напряжение 5 В, а с выхода резистора снимается напряжение 0,88 В, что соответствует начальному положению рабочего органа установки. При включении установки рабочий орган начинает движение, что приводит к изменению выходного напряжения на датчике, которое посредством АЦП PCS64i фиксируется на ПК. Перевод записанного сигнала напряжения в соответствующее ему изменение положения рабочего органа производится аналогично определению тока индуктора ЛАД.

На рисунке 4.31 и 4.32 представлены сигналы напряжений, поступающих на АЦП с датчиков решетчатого стана зерноочистительной установки и отражающие его действительное положение в метрах (верхний сигнал – осциллограмм-

ма продольного перемещения, нижний сигнал – осциллограмма поперечного перемещения).

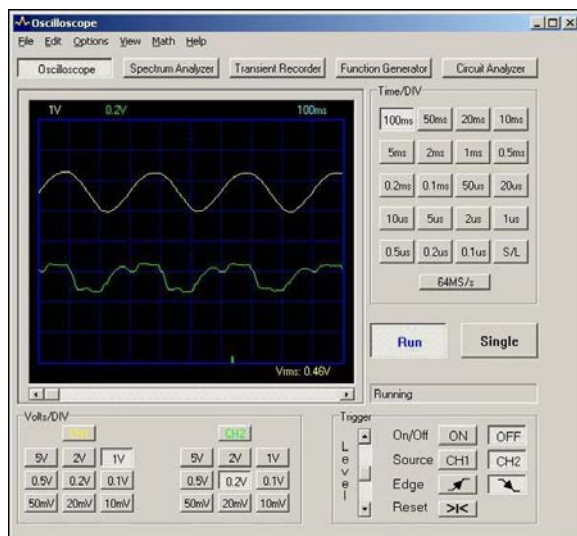


Рисунок 4.31
Осциллограммы датчиков линейных перемещений

Перемещение решетного стана на 10 мм соответствует напряжению 0,5 В на дисплее осциллографа для продольного перемещения и 1 мм соответствует 0,1 В для поперечного перемещения. На рисунке 4.32 штриховой линией изображена амплитуда продольного перемещения $A_{\text{прод}}$, основной линией – амплитуда поперечного перемещения $A_{\text{попер}}$ (масштабы для графических зависимостей выбираем исходя из необходимых для этого осей).

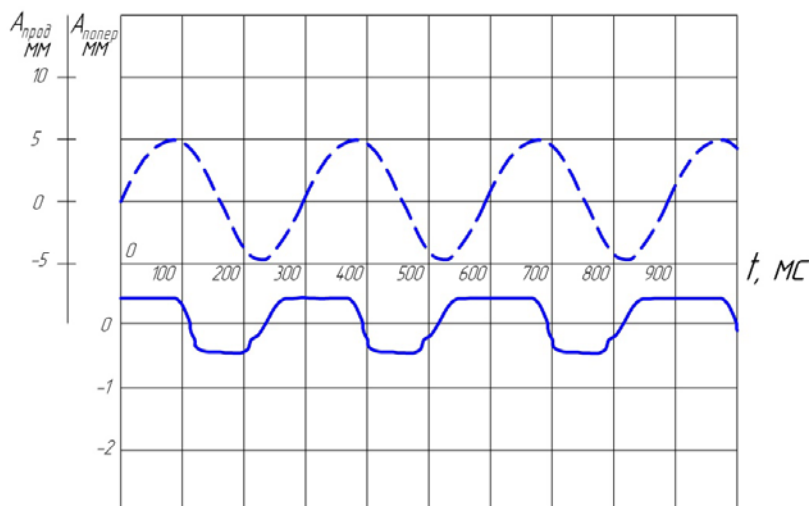


Рисунок 4.32
Продольно-поперечное перемещение решетного стана

Приложение WinDSO FG32 имеет возможность выводить в рабочем окне программы одновременно оба канала АЦП Velleman PCS64i. При анализе работы решетного стана выведем одновременно в рабочем окне продольное и поперечное перемещение, тем самым получим траекторию движения решетного стана (рисунок 4.33 и 4.34).

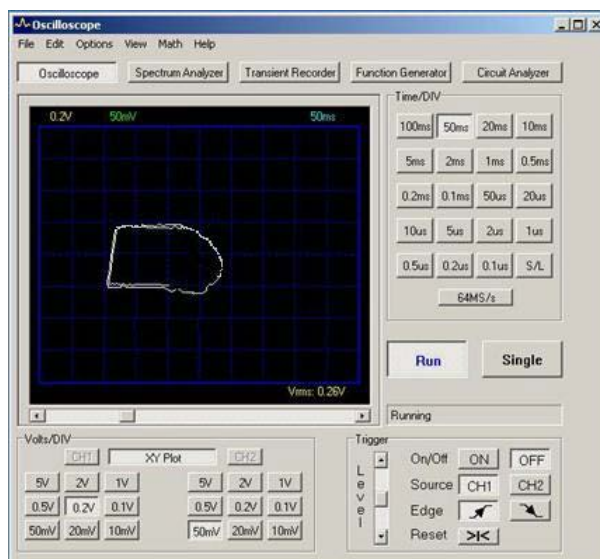


Рисунок 4.33

Осциллограмма траектории движения решетного стана

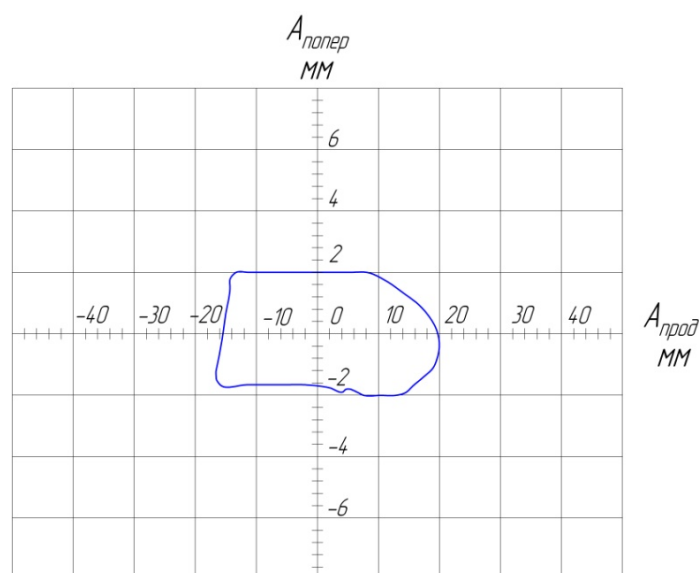


Рисунок 4.34

Траектория колебательного движения решетного стана

Для снятия зависимостей фазного тока индуктора ЛАД и линейного перемещения деки от времени экспериментальная вальцедековая машина была оснащена таким же оборудованием, только для передачи показаний датчиков на персональный компьютер для последующей обработки был использован двухканальный цифровой запоминающий осциллограф (АЦП) Acute-1102 фирмы AcuteInc, общий вид представлен на рисунке 4.35.

На рисунках 4.36 и 4.37 представлено размещение датчиков тока и перемещения на экспериментальной шлушильной установке.

На рисунках 4.38 и 4.39 представлены, соответственно, вид сигнала, поступающего с датчика линейного положения на экран виртуального осциллографа и отражающее его перемещение деки в миллиметрах.

Полученный график позволяет определить амплитуду и частоту колебаний деки.



Рисунок 4.35

Двухканальный цифровой запоминающий осциллограф (АЦП) Acute-1102

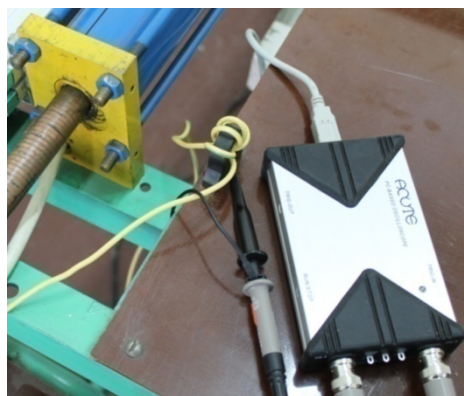


Рисунок 4.36

Общий вид и место установки датчика тока на экспериментальной шелушильной установке



Рисунок 4.37

Общий вид датчика линейного положения на экспериментальной шелушильной установке

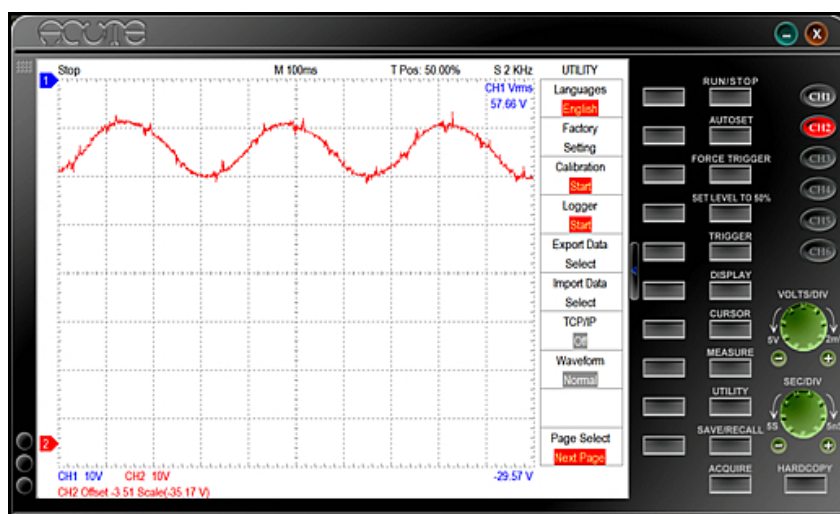


Рисунок 4.38

Сигнал, поступающий на АЦП с датчика линейного положения

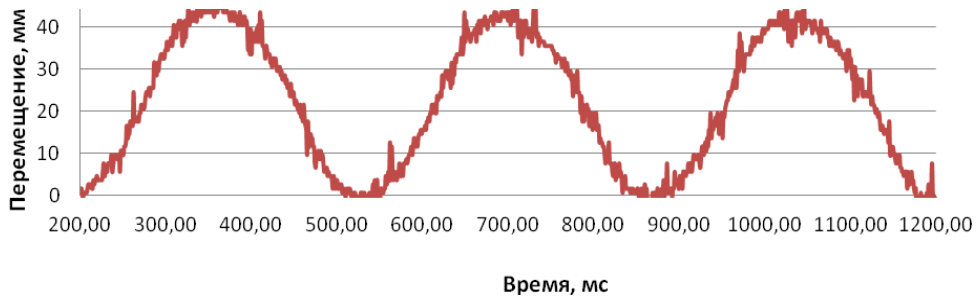


Рисунок 4.39
Перемещение деки

Для снятия зависимостей фазного тока индуктора ЛАД и линейного перемещения транспортирующего лотка от времени экспериментальная установка инерционного конвейера также была оснащена приведенными датчиками. На рисунках 4.40 и 4.41 представлены соответственно график напряжения, подаваемого с датчика тока на АЦП, и обработанный в Excel действующий фазный ток ЛАД. Амплитудное значение напряжения 3,9 В на осциллографической приставке соответствует 13,9 А реального фазного тока ЛАД.

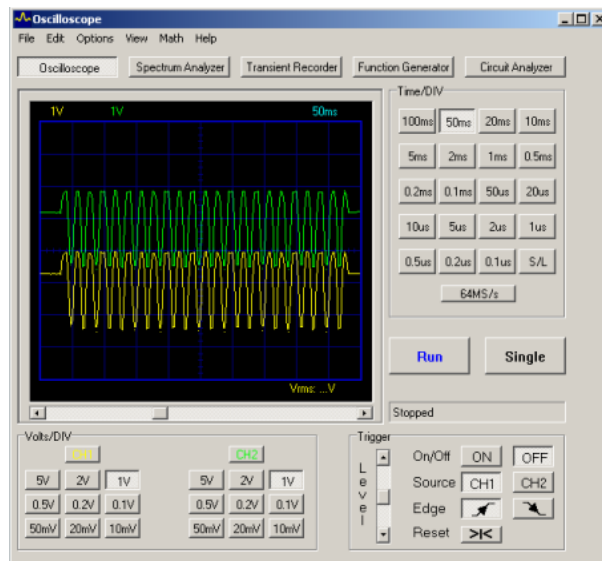


Рисунок 4.40
Временные зависимости напряжений, снимаемые с датчика тока

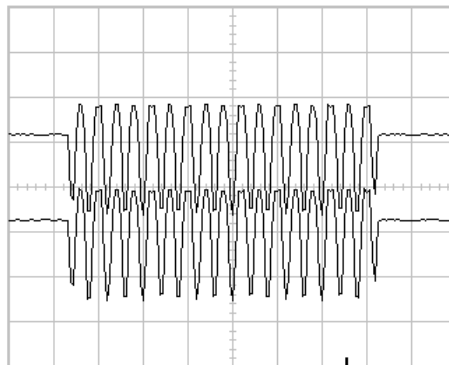


Рисунок 4.41
Полученная в приложении Matlab, временная зависимость фазного тока ЛАД

Измерение временной зависимости ускорения вторичного элемента ЛАД (грузонесущего лотка конвейера) производится путем двойного дифференцирования осциллограммы перемещения, которая, в свою очередь, получена с помощью датчика перемещения фирмы «Gefran». Подвижная часть датчика крепится на вторичном элементе ЛАД параллельно оси перемещения (рисунок 4.42).

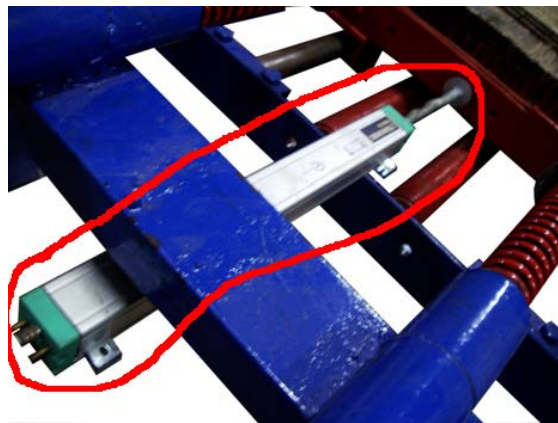


Рисунок 4.42

Датчик перемещения транспортирующего лотка на экспериментальной установке инерционного конвейера влажного сахара

На рисунках 4.43 и 4.44 представлены соответственно двойной дифференциал временной зависимости напряжения поступающего на осциллографическую приставку с датчика перемещения и отражающее его действительное ускорение в м/с^2 .

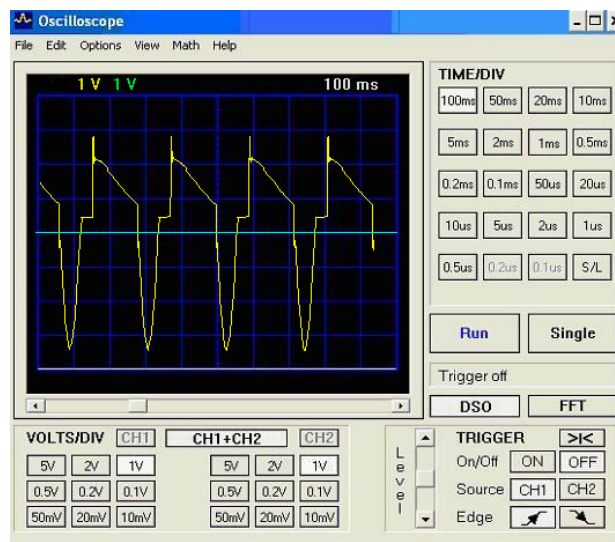


Рисунок 4.43

Двойной дифференциал временной зависимости напряжения поступающего на осциллографическую приставку с датчика перемещения

На рисунках 4.45, 4.46, 4.47 представлены соответственно общий вид датчика перемещения на картофелесортировальной установке, сигнал на осциллографической приставке и реальное перемещение рабочего органа.

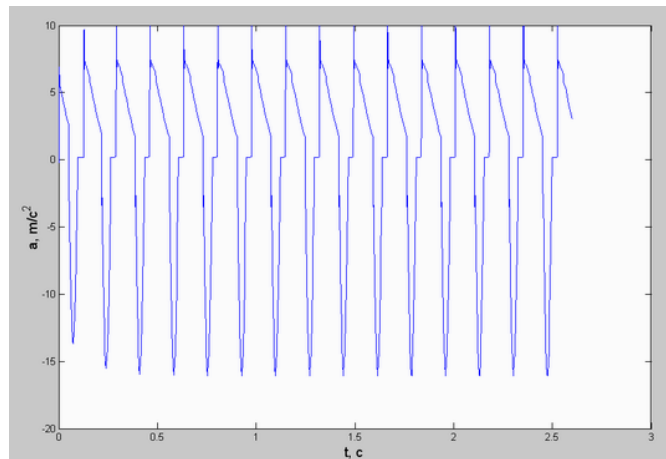


Рисунок 4.44

Полученная в приложении Matlab, временная зависимость ускорения грузонесущего лотка



Рисунок 4.45

Общий вид датчика линейных перемещений GEFRAN на картофелесортировальной установке

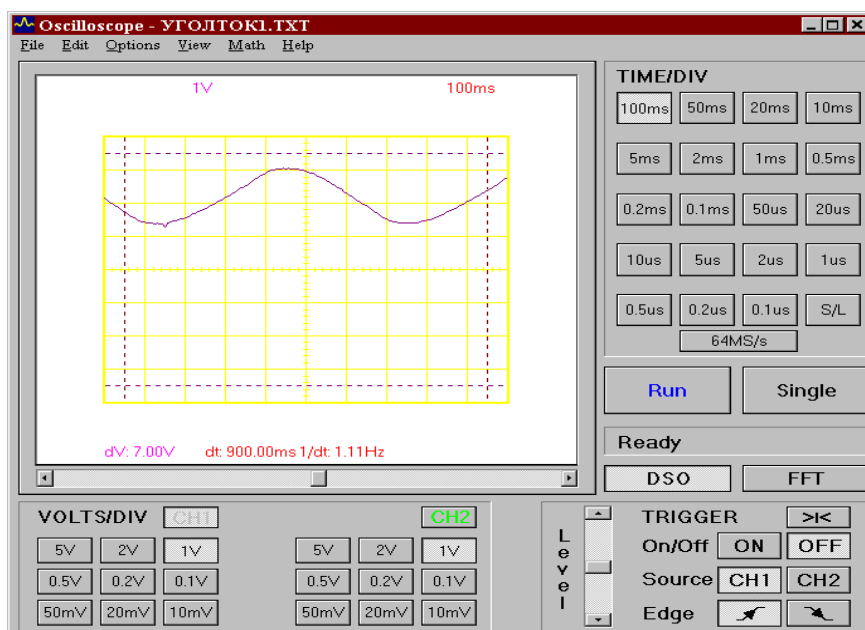


Рисунок 4.46

Сигнал, поступающий на осциллографическую приставку с датчика линейных перемещений

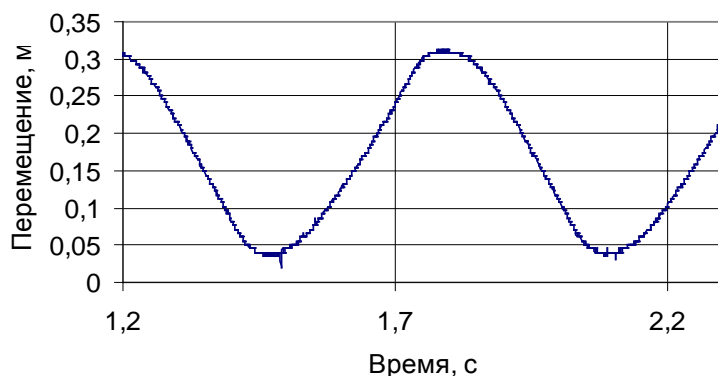


Рисунок 4.47
Перемещение рабочего органа установки

4.4 Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований

Для сравнения полученных на экспериментальной установке зависимостей и теоретических зависимостей, полученных с помощью математического моделирования в соответствии с методикой, изложенной в главе, совместим их на одном графике.

Для зерноочистительной установки сравнивались характеристики при следующих постоянных величинах: $U = 380$ В, $C = 3200$ Н/м, $m_{pc} = 19$ кг, $f_{кол.рс} = 3$ Гц. Для определения влияния воздушного зазора δ на поперечную силу ЛАД F_y построена зависимость $F_y = f(\delta)$, полученная экспериментальным путем (рисунок 4.48).

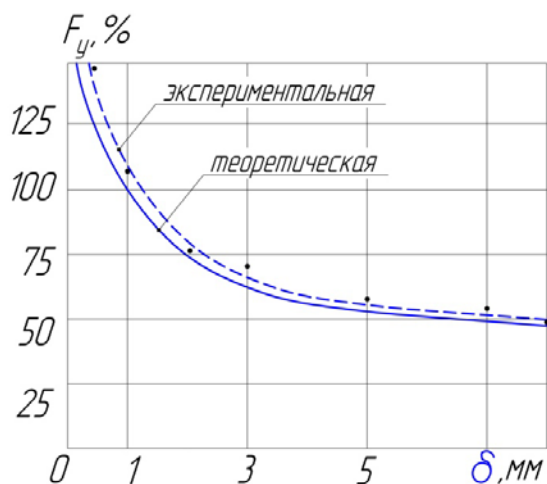


Рисунок 4.48
Экспериментальная и теоретическая зависимости поперечной силы ЛАД F_y от воздушного зазора δ

Эксперименты проводились при изначально неподвижном вторичном элементе, значения поперечной силы F_y фиксировались в момент пуска с помощью тензодатчиков. Кроме этого, проводилось измерение усилия в динамическом режиме. Для этого при помощи MEMS-акселерометра на базе микросхемы MMA7260QT проводилось измерение ускорения решетчатого стана $a_{рс}$, затем по формуле $F_y = a_{рс} \cdot m_{рс}$ находили силу F_y .

Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований зависимости $F_y = f(\delta)$ показывает, что значения поперечной силы при изменении зазора максимально отличается на 9 %.

Совмещение экспериментальных временных зависимостей амплитуд колебания решетного стана зерноочистительной машины с теоретической позволяет сделать вывод о том, что отличие амплитуды продольных колебаний $A_{\text{прод}}$ не выходит за предел 8,5 %, а амплитуды поперечных $A_{\text{попер}}$ за 7 % (рисунок 4.49).

Судить о движении решетного стана только по амплитудам продольных $A_{\text{прод}}$ и поперечных колебаний $A_{\text{попер}}$ недостаточно, т. к. при этом может получаться траектория движения, отличающаяся от требуемой. Анализ временных зависимостей полученных траекторий (рисунок 4.50) показывает, что по форме они схожи между собой.

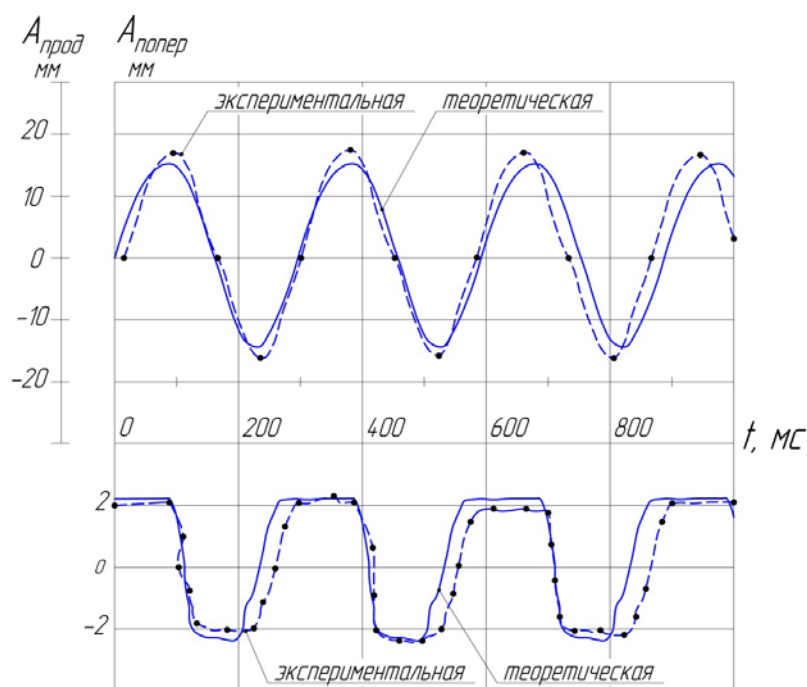


Рисунок 4.49

Экспериментальная и теоретическая временные зависимости продольной и поперечной амплитуды колебаний

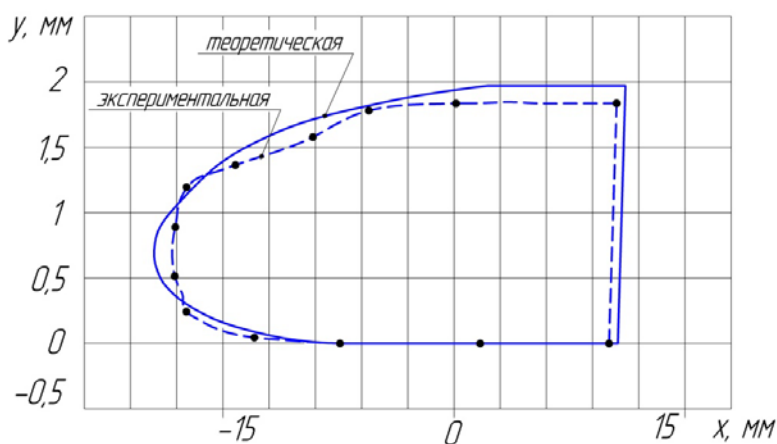


Рисунок 4.50

Экспериментальная и теоретическая траектории движения решетного стана

На рисунке 4.51 приведены графики амплитудно-частотных характеристик КВЭП, полученные в результате моделирования в среде Matlab и в результате эксперимента. Анализ графиков показывает отклонение амплитуд не более, чем на 3,44 мм, что составляет 8,5 %.

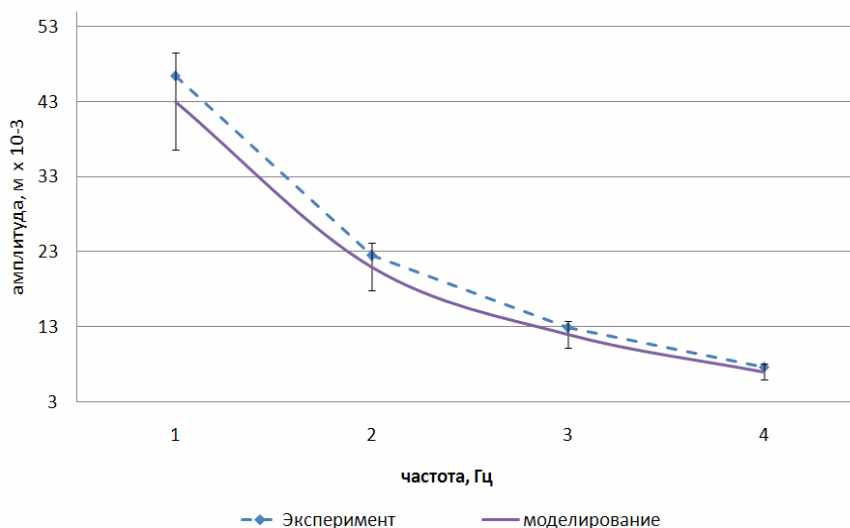


Рисунок 4.51
Сравнение смоделированной амплитудно-частотной характеристики КВЭП с экспериментальной

Основным электрическим показателем для оценки адекватности разработанных математических моделей выбран ток I , потребляемый индуктором ЛАД. В качестве примера на рисунке 4.52 приведены временные зависимости потребляемого тока индуктором ЛАД инерционного конвейера. Анализ по всем установкам показал, что расхождение теоретических и экспериментальных зависимостей не превышает 9 %.

Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей амплитуды перемещения вторичного элемента относительно лотка от напряжения питания ЛАД показало, что их расхождение не превышает 8 % (рисунок 4.53).

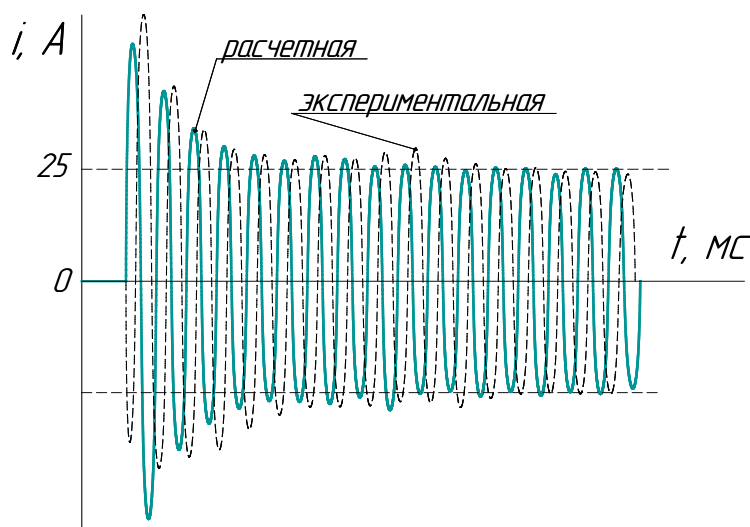


Рисунок 4.52
Временная зависимость потребляемого тока индуктором ЛАД

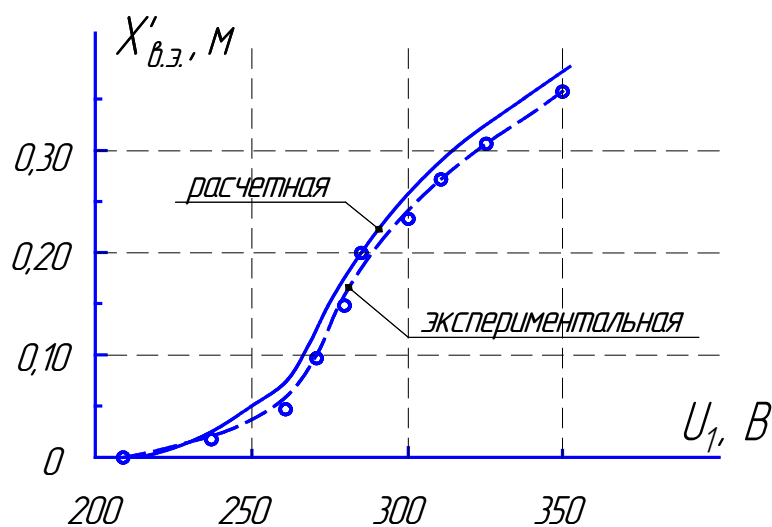


Рисунок 4.53

Зависимость амплитуды перемещения вторичного элемента относительно лотка $X'_{в.э.}$ от напряжения питания U_1 ЛАД

Всесторонние эксперименты на созданных установках с ЛАЭСЖД подтвердили основные теоретические положения и показали их широкие возможности.

Расхождение полученных теоретических и экспериментальных значений как по электрическим, так и по механическим параметрам не выходит за 9 %.

4.5 Выводы по главе

1. На основе теоретических исследований спроектированы и реализованы экспериментальные ЛАЭСЖД рабочих органов для технологических машин послеуборочной обработки продукции растениеводства.

2. Разработана методика экспериментального исследования ЛАЭСЖД рабочих органов для технологических машин. Экспериментальные установки укомплектованы контрольно-измерительными приборами с цифровым представлением информации в реальном масштабе времени.

3. Предложена бесконтактная импульсная схема управления электроприводом рабочих органов, базирующаяся на современной элементной базе, позволяющая осуществлять вынужденные колебания и автоколебания рабочих органов по оптическим датчикам положения с возможностью регулировать технологические параметры работы машин.

4. Экспериментально исследованы электрические и механические параметры установок, включая силы ЛАД, реализующие сложное движение рабочих органов и получена их траектория сложного колебательного движения.

5. Сравнение полученных теоретических и экспериментальных данных по всем представленным установкам с ЛАЭСЖД показывает различие между ними не более 10 %. Разработанный математический аппарат для исследования ЛАЭСЖД адекватно отражает физические процессы, происходящие в разработанных установках. Математическая обработка экспериментальных данных показывает, что погрешность измерений не превышает 4 %.

ГЛАВА 5

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН С ЛАЭСЖД

5.1 Определение технологических характеристик машин

Для оценки технико-экономических показателей предложенных установок с ЛАЭСЖД кроме технических характеристик необходимо знать технологические показатели, такие, как: полнота разделения, потери, просеиваемость, эффективность шелушения, точность сортирования.

Зерноочистительная установка. Исследования проводились следующим образом. В бункер установки при помощи дозирующего устройства непрерывно засыпался зерновой материал, фиксировалась постоянная подача зерна, угол наклона, равный $\alpha = 7^\circ$, амплитуда и частота колебаний сепарирующей поверхности с варьированием одного из факторов при постоянстве других (кроме этого затем проводились многофакторные эксперименты с варьированием 2-х параметров). Установка запускалась в работу. После того, как появлялся устойчивый режим работы установки, производился отбор фракций зернового материала для определения эффективности очистки. Исследования продольной амплитуды колебаний решетного стана проводилось при варьировании этого параметра в диапазоне $A_{\text{прод}} = 10 \dots 30$ мм.

Компоненты зернового материала, используемые в исследованиях, прошли предварительную очистку на ворохоочистителе НТ-12. Влажность зерен пшеницы составляла в среднем 13...14 %.

Опытные данные, характеризующие эффективность разделения зернового материала от изучаемых факторов, обрабатывали в соответствии с ГОСТ 8.207-76 [52, 84].

После проведения опытов на экспериментальной зерноочистительной установке производилась качественная оценка работы решетных полотен по 3-м показателям:

1) Полнота разделения E оценивалась с количественной стороны по следующей зависимости:

$$\xi = \frac{P}{P_o \cdot a_{\text{п}}}, \quad (5.1)$$

где P – количество зерна, выделенного зерноочистительной установкой за время опыта, кг;

P_o – общее количество зерна, поступившего в зерноочистительную установку за время опыта, кг;

$a_{\text{п}}$ – относительное содержание сорных примесей в исходном материале.

2) Потери зерна Π определялись по формуле:

$$\Pi = \frac{m_{\text{п}}}{m_o}, \quad (5.2)$$

где $m_{\text{п}}$ – масса навески потерянного зерна, кг;

m_o – общая масса навески зерна, прошедшего через установку за время опыта, кг.

3) Просеиваемость зерна P , характеризующаяся отношением навески просеянного зерна $m_{пр}$ к общей массе навески зерна m_0 , прошедшего через установку за время опыта.

Одним из показателей эффективности работы зерноочистительной машины также является травмированность зерен. В настоящее время самым удобным и доступным методом определения травмированности зерна является его численное определение по всхожести зерен.

Под лабораторной всхожестью семян понимается количество (в %) нормально проросших семян за определенный срок (в основном 7...10 дней) в пробе, взятой для анализа, что дает представление о реальной возможности получения всходов растений в поле. Лабораторные испытания проведены на кафедре «Агрохимии, защиты растений и агроэкологии» ФГБОУ ВПО Башкирский ГАУ в имеющейся у них теплице (рисунок 5.1).



а



б

Рисунок 5.1

Зерна пшеницы в чашке Петри: а – в первый день опыта; б – на 8 день опыта

Определение травмированности проводится в следующей последовательности. Для определения всхожести зерен отбираются 100 семян в 10-ти кратной последовательности. На дно чашки Петри с увлажненной фильтровальной бумагой равномерно раскладываются семена и накрываются хорошо увлажненной фильтровальной бумагой.

Чашки прикрываются крышками и ставятся в термостат с постоянной температурой (20 °С). Проращивание проводится в темноте, ежедневно проверяется температура и степень увлажнения. Подсчет проросших семян проводится на 7...10-е сутки.

При учете всхожести все семена разделяют 4 на группы: нормально прорастающие (зародышевый корешок должен быть не менее длины или диаметра семени, а росток – не менее половины длины семени), ненормально проросшие (отсутствует корешок или он неразвит, уродлив), набухшие, загнивающие. Всхожесть выражают в процентах как среднеарифметическое 10-и повторностей. Среднеарифметическое значение всхожести определяется по формуле:

$$B_c = \frac{\sum_i^n B_c}{n}. \quad (5.3)$$

Шелушильная установка. Вследствие определенного различия свойств отдельных зерен каждое из них реагирует на приложенное воздействие индивидуально. Поэтому при проходе через шелушильную машину от оболочки освобождаются не все зерна, некоторое количество их может оказаться нешелушенными, а часть ядер – битыми или размолотья в мучку.

Основным показателем, характеризующим эффективность работы вальцедековой шелушильной машины, является эффективность шелушения, которая одновременно учитывает оценку количества воспринявших шелушение зерен и сохранение ядра целым [101]. Таким образом, эффективность шелушения является произведением коэффициента шелушения и коэффициента целостности зерна.

Оценка эффективности шелушения производится по формулам (1.1...1.3) главы 1.1.2 в соответствии с технологиями и методиками, принятыми в крупяном производстве [86, 133, 134, 201, 202].

Эксперимент проводился путем пропуска через экспериментальную установку гречихи сорта «Чишминская» 1 фракции, полученной на ОАО «Уфимский мелькомбинат» (проход с сита Ø5,0, сход с сита Ø 4,5) очищенной от примесей и прошедшей гидротермическую обработку. Масса навесок 100 гр. Для определения содержания шелушенных и нешелушенных зерен, наличия битых ядер и мучки продукт шелушения просеивают на ситах вручную на гладкой поверхности равномерными возвратно-поступательными движениями по направлению продольной оси продолговатых отверстий сит, без встряхивания. Размах колебаний сит около 10 см. Продолжительность просеивания – 3 минуты при 110...120 движениях в минуту. Для определения крупности гречневой крупы допускается применение лабораторного отсева.

При отсутствии необходимости отдельного анализа битого зерна и мучки продукт шелушения после отделения лузги однократно пропускают сквозь сито для отделения ядрицы от битого зерна и мучки, что упрощает процесс анализа. Затем отдельные фракции (ядрица, нешелушенное зерно, битое и мучка) взвешивают и выражают в процентах к массе взятой навески.

Инерционная картофелесортировальная установка. Точность сортирования определялась для каждого режима работы картофелесортировки следующим образом.

Через машину пропускалось 200–230 кг картофеля и определялась масса каждой фракции. Для определения массы фракций использовались напольные весы по ГОСТ 11219-71. После записи массы каждой фракции брались пробы по 100 клубней из крупной, средней и мелкой фракций. Клубни каждой пробы взвешивались поштучно с точностью до 0,1 грамма на весах ВЛТК-500. Полученные данные записывались в таблицу. Далее находился коэффициент точности сортирования картофеля i -ой фракции γ_i , и по машине в целом γ_Σ .

Коэффициент точности сортирования картофеля i -ой фракции γ_i , рассчитывался по формуле:

$$r_i = \frac{M_i}{M_i^{np}} \times 100\%, \quad (5.4)$$

где M_i – масса пробы клубней i -ой фракции, отвечающих ее требованиям, г;
 M_i^{np} – общая масса пробы клубней, оказавшихся в i -ой фракции, г;

Коэффициент точности сортирования картофеля по машине в целом r_Σ рассчитывался по формуле:

$$r_\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} r_i \times M_{\phi i}}{M_\Sigma}, \% \quad (5.5)$$

где n – число фракций;

$M_{\phi i}$ – общая масса клубней, оказавшихся в i -ой фракции, кг;

M_Σ – общая масса клубней всех фракций, кг.

5.2 Рекомендации по установке ЛАЭСКД на зерноочистительные машины

Полученные экспериментальные зависимости подтвердили основные теоретические положения и показали широкие возможности созданного электропривода зерноочистительной установки. С их помощью возможно изучение динамических процессов работы электропривода решетного стана, а также параметров автоколебательных ЛЭП зерноочистительных машин. Вышеизложенное послужило основанием для использования установки, как в учебном, так и научно-исследовательском процессе кафедры «Электрические машины и электрооборудование» Башкирского ГАУ.

По результатам проведенных теоретических исследований в среде объектно-визуального моделирования Matlab (Simulink) и натуральных экспериментов разработанной зерноочистительной установки сформулированы рекомендации по установке ЛЭП на зерноочистительные машины:

- использовать автоколебательный режим работы ЛАД с установкой в цепи управления датчиков положения, что позволяет поддерживать фиксированное значение амплитуды продольных $A_{\text{прод}}$ и поперечных $A_{\text{попер}}$ колебаний решетного стана;

- для уменьшения воздушного зазора между индуктором и вторичным элементом ЛАД необходимо устанавливать шихтованный вторичный элемент, выполненный с короткозамкнутой обмоткой, уложенной в пазы стального сердечника;

- установить максимальный воздушный зазор между индуктором и вторичным элементом ЛАД равный $\delta_{\text{max}} = 3$ мм, а рабочий воздушный зазор равный 1 мм;

- установить амплитуду продольных колебаний $A_{\text{прод}}$ решетного стана равную 14,5 мм, с частотой колебаний $f_{\text{кол.рс}} = 3$ Гц;

- при определении геометрических размеров вторичного элемента необходимо учитывать, что его минимально допустимая длина в положительном

направлении силы F_x и по ширине вторичного элемента должна превышать геометрические размеры индуктора ЛАД на 15 мм, а минимально допустимая длина в обратном направлении должна превышать длину индуктора на 29,5 мм (определяется максимальной амплитудой продольных колебаний);

– использовать разработанную математическую модель для определения необходимого коэффициента жесткости упругих элементов C , мощности линейного двигателя P , удельной нагрузки q в зависимости от требуемой производительности установки Q .

5.3 Методика проектирования инерционного конвейера со звеном предварительного разгона ЛАЭСЖД

Предложенную математическую модель возможно применить в целях проектирования инерционных машин предлагаемой конструкции. При сравнении экспериментальных и теоретических исследований доказана адекватность математической модели. Одной из основных частей конструкции является упругий элемент торможения транспортирующего лотка. Задачей проектирования является расчет жесткости упругого элемента.

Исходными данными являются:

m_z – масса груза, находящегося на лотке конвейера, кг;

$m_{жс}$ – масса грузонесущего лотка, кг;

f_z – коэффициент трения скольжения влажного сахара-песка по стали;

A_k – максимально допустимая амплитуда колебаний грузонесущего желоба (определяется размерами приемного бункера элеватора), м;

F_{max} – максимальное усилие, определяемое прочностью отбойника, Н;

f_p – коэффициент трения качения катков грузонесущего лотка.

Порядок расчета следующий:

Определяется максимальная допустимая жесткость пружины по формуле:

$$k_{max} = F_{max} / x_y, \quad (5.6)$$

где x_y – рабочий ход пружины (рисунок 5.1), м.

Рабочий ход пружины определяется исходя из закона сохранения энергии:

$$E_y = A_k. \quad (5.7)$$

Чтобы сжатые упругие элементы вернули грузонесущий лоток в исходное положение, потенциальная энергия пружин должна быть равна работе, совершаемой при перемещении лотка с грузом на расстояние равное амплитуде колебаний.

Из этого условия выражаем потенциальную энергию упругих элементов:

$$E_y = k_{max} x_y^2 / 2. \quad (5.8)$$

Работа по перемещению желоба с грузом:

$$A_k = f_p (m_z + m_{жс}) g A. \quad (5.9)$$

То есть

$$k_{max} x^2 / 2 = f_p (m_z + m_{жс}) g A. \quad (5.10)$$

Подставляя формулу 5.6 в формулу 5.10, получаем значение рабочего хода пружин:

$$x_y = 2f_p (m_z + m_{жс}) g A / F_{max}. \quad (5.11)$$

Далее по формуле 5.9 определяется жесткость пружин и по справочнику подбирается стандартная пружина.

Для того, чтобы сжать пружины до рабочего хода x_y , необходимо, чтобы грузонесущий желоб в момент начала взаимодействия с пружинами имел кинетическую энергию, достаточную для преодоления силы трения качения опорных роликов на расстояние x_y и сжатия упругого элемента на то же расстояние:

$$E = f_k (m_{gr} + m_{zh}) gx + kx_y^2 / 2. \quad (5.12)$$

По формуле кинетической энергии определяется скорость желоба в момент взаимодействия с пружинами:

$$V = \sqrt{\frac{2E}{m_z + m_{ж}}}. \quad (5.13)$$

Средняя скорость грузонесущего желоба от момента начала движения до взаимодействия с упругим элементом ($V_0 = 0$):

$$V_{жср} = V / 2. \quad (5.14)$$

Время от начала движения до взаимодействия с упругим элементом:

$$t = (A - x) / V_{ср}. \quad (5.15)$$

Среднее ускорение на пути от начала движения до взаимодействия с упругим элементом:

$$a_{ср} = V_{ср} / t. \quad (5.16)$$

Результирующая сила на грузонесущем желобе:

$$F_{жс} = a_{ср}(m_z + m_{жс}). \quad (5.17)$$

Пусковая сила ЛАД:

$$F = F_{жс} + f_k(m_z + m_{жс}). \quad (5.18)$$

Синхронная скорость ЛАД выбирается исходя из условия:

$$V_{ЛАД} > V. \quad (5.19)$$

Далее по пусковой силе и синхронной скорости рассчитывается ЛАД по известным методикам [3, 6].

Настройка блока управления, который осуществляет включение и отключение индуктора, производится исходя из следующих соображений:

Из условий безопасности и из-за ограничений по размерам приемного бункера нежелательно, чтобы амплитуда колебаний грузонесущего лотка превышала допустимые значения. Но необходимо, чтобы лоток набрал наибольшую скорость для придания грузу максимальной кинетической энергии, и, кроме того, чтобы звено предварительного разгона полностью передало накопленную в момент пуска энергию грузонесущему лотку. Ускорение, как приводилось выше, должно быть максимально приближено к значению:

$$a_{жс} = f_2 g. \quad (5.20)$$

Исходя из сказанного, целесообразно отключение ЛАД от сети осуществлять при начале взаимодействия желоба с упругим элементом, а включение в конце взаимодействия с упругим элементом разгона при движении лотка уже в направлении транспортирования. Тогда перемещения желоба, при которых производится включение и отключение ЛАД:

$$X_{выкл} = (2A - x_y); \quad (5.21)$$

$$X_{вкл} = 0. \quad (5.22)$$

5.4 Результаты производственных испытаний

С учетом вышеперечисленных рекомендаций для проведения производственных испытаний выбран семяочиститель универсальный МВР-2 (СУ-0,1) производства ОАО ГСКБ «Зерноочистка» (технические характеристики машины приведены в разделе 1.4), предназначенный для вторичной очистки и сортирования семян сельскохозяйственных растений: зерновых, зернобобовых, масличных, технических, овощных, пряно-ароматических культур и семян трав от легких, крупных и мелких примесей, выделяемых двукратной обработкой воздушным потоком. Данная машина имеет один решетный стан, к которому возможен всесторонний открытый доступ для установки различных элементов электропривода и упругих элементов.

При проведении опытов использовался зерновой материал следующих культур: озимая рожь «Чулпан-7» и яровая пшеница «Омская-36» (некоторые из полученных результатов по очищенному материалу представлены в приложениях Г и Д). Засоренность исходного материала мелкими тяжелыми примесями $B = 5 \%$, т. е. чистота исходного материала 95% .

По обоснованным конструктивно-технологическим параметрам был разработан электропривод решетного стана и модернизирована зерноочистительная машина (рисунок 5.2).



Рисунок 5.2
Семяочиститель универсальный МВР-2 (СУ-0,1) с ЛАЭСЖД

Наряду с семяочистителем МВР-2 (СУ-0,1) проведены исследования на зерноочистительной комбинированной машине ЗКМ-1,5 (рисунок 5.3). Производительность данной машины составляет не более 1500 кг/ч .

Производственные испытания ЛАЭСЖД вальцедековой шелушильной машины проводились в ФГУП УОХ «Миловское» Уфимского района Республики Башкортостан.



Рисунок 5.3
Зерноочистительная комбинированная машина ЗКМ-1,5

Производственные испытания ЛАЭСКД инерционного конвейера влажного сахара проводились в ООО «Раевсахар», ОАО «Карламанский сахар», ОАО «Чишминский сахарный завод» Республики Башкортостан.

ЛАЭСКД инерционной картофелесортировальной установки принят к внедрению в Управлении сельского хозяйства Караидельского района Республики Башкортостан.

5.4.1 Оценка эффективности выделения сорных примесей и травмированности зернового материала

Для того, чтобы сравнить эффективность выделения сорных примесей при различных конструкциях электропривода решетного стана на первом этапе производственных испытаний сделан анализ работы семяочистителя МВР-2 (СУ-0,1) до его модернизации согласно методике, изложенной в предыдущем разделе. Качественная оценка работы решетных полотен в соответствии с ГОСТ-5888-74 и агротехническими требованиями к вторичной очистке по 3-м показателям:

- полнота разделения E (не ниже 80 %);
- потери зерна $П$ (не более 1 %);
- просеваемость зерна P .

Получив требуемые зависимости, произведена модернизация электропривода решетного стана (установили ЛАД), исследования эффективности выделения сорных примесей которого показана на рисунках 5.4, 5.5.

Для оценки эффективности выделения сорных примесей из зернового материала семяочистителем МВР-2 (СУ-0,1) построены зависимости полноты разделения зернового материала E , потерь зерна $П$ и просеваемости зерна P от производительности и кинематического режима работы решетного стана с учетом травмированности зерна (рисунки 5.4, 5.5).

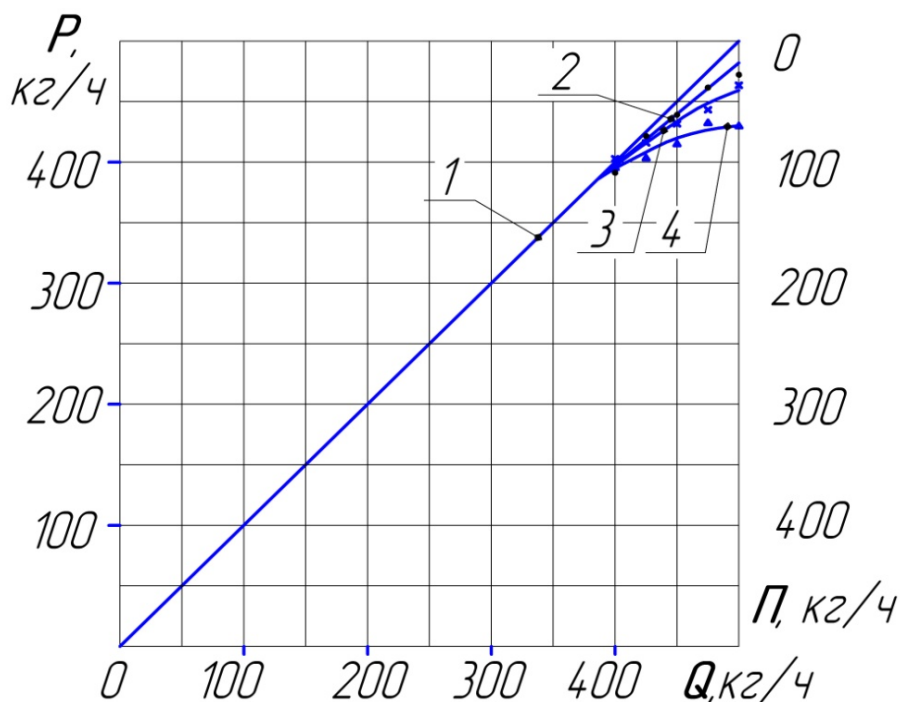


Рисунок 5.4

Изменение просеиваемости и потерь зерна в зависимости от производительности и кинематического режима работы зернового решета Б₂:

- 1 – максимальная просеиваемость; 2 – режим $A_{\text{прод}} \cdot f_{\text{кол.рс}} = 43,5 \text{ мм} \cdot \text{Гц}$;
- 3 – режим $A_{\text{прод}} \cdot f_{\text{кол.рс}} = 48 \text{ мм} \cdot \text{Гц}$; 4 – режим $A_{\text{прод}} \cdot f_{\text{кол.рс}} = 52,5 \text{ мм} \cdot \text{Гц}$

Полученные зависимости позволяют сделать вывод, что при установке линейного электропривода на МВР-2 (СУ-0,1) при амплитуде продольных $A_{\text{прод}} = 14,5 \text{ мм}$ и поперечных $A_{\text{попер}} = 2 \text{ мм}$ колебаниях решетчатого стана и частоте $f_{\text{кол.рс}} = 3 \text{ Гц}$ (режим $A_{\text{прод}} \cdot f_{\text{кол.рс}} = 43,5 \text{ мм} \cdot \text{Гц}$) повысилась полнота разделения E , увеличена просеиваемость P и уменьшены потери зерна сходом Π , при этом травмированность зерна не превышает допустимого значения.

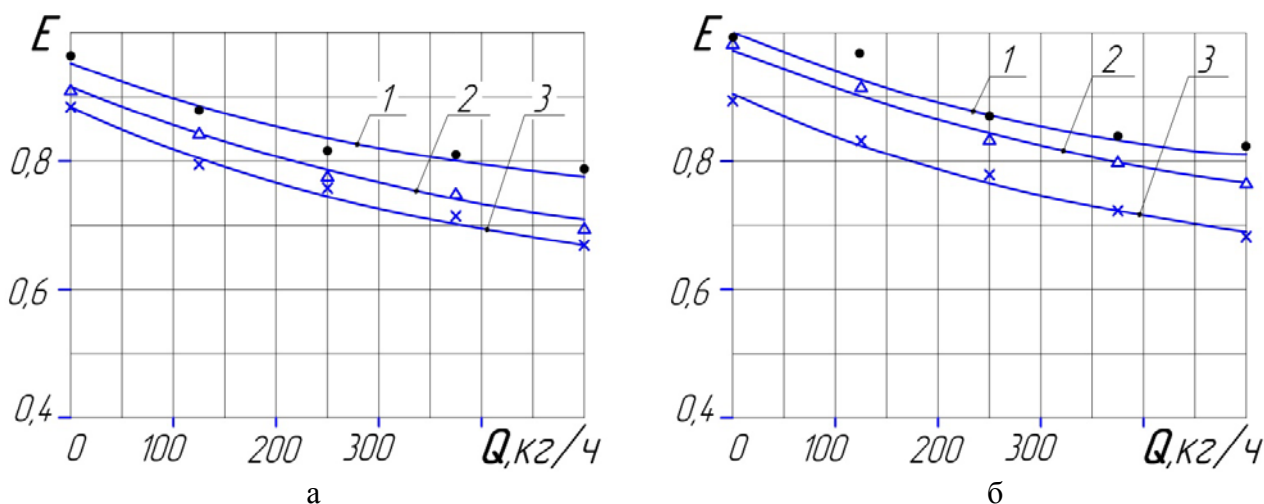


Рисунок 5.5

Изменение полноты разделения зернового материала в зависимости от производительности и кинематического режима подсевного решета В (а) и сортировального решета Г (б):

- 1 – режим $A_{\text{прод}} \cdot f_{\text{кол.рс}} = 43,5 \text{ мм} \cdot \text{Гц}$; 2 – режим $A_{\text{прод}} \cdot f_{\text{кол.рс}} = 48 \text{ мм} \cdot \text{Гц}$;
- 3 – режим $A_{\text{прод}} \cdot f_{\text{кол.рс}} = 52,5 \text{ мм} \cdot \text{Гц}$

Далее определим всхожесть очищенного зерна, выраженную в процентах как среднеарифметическое 10-и повторностей (таблица 5.1).

Максимальная травмированность зерна составила для семяочистителя МВР-2 (СУ-0,1) не более 3,5 %, для ЗКМ-1,5 – не более 5,1 %.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что при установке ЛАЭСКД на зерноочистительную машину повысилась полнота разделения E , увеличена просеиваемость P и уменьшены потери зерна сходом Π , при этом травмированность зернового материала не превышает существующих значений.

Среднеарифметическое значение всхожести:

$$B_c = \frac{\sum_i^n B_c}{n},$$

$$B_c = \frac{96 + 95 + 96 + 97 + 96 + 98 + 96 + 95 + 97 + 98}{10} = 96,4\%.$$

Таблица 5.1 Результаты проведенных опытов по определению травмированности зерна

№ опыта	Число семян, шт.	Число непроросших семян, шт.	Всхожесть, %
1	100	4	96
2	100	5	95
3	100	4	96
4	100	3	97
5	100	4	96
6	100	2	98
7	100	4	96
8	100	5	95
9	100	3	97
10	100	2	98

5.4.2 Определение эффективности шелушения зерна вальцедековой машиной с КВЭП

Задачи опытов – экспериментально доказать повышение эффективности шелушения в вальцедековой машине с КВЭП и определить оптимальные значения частоты колебаний деки при максимуме эффективности шелушения.

Для доказательства положительного влияния колебаний деки вдоль оси вращения вальца на эффективность шелушения необходимо построить зависимости коэффициента шелушения $K_{ш}$, коэффициента целостности ядра $K_{ц}$ и эффективности шелушения $E_{ш}$ от частоты вращения вальца при неподвижной и колеблющейся деке.

На рисунках 5.6...5.8 индекс $K_{ш1}$, $K_{ц1}$, $E_{ш1}$ – зависимости, снятые при неподвижной деке, $K_{ш2}$, $K_{ц2}$, $E_{ш2}$ – зависимости, снятые при деке, колеблющейся с частотой 3 Гц.

Анализ графиков показывает, что коэффициент шелушения возрастает с ростом частоты вращения до 450 мин.⁻¹, затем остается неизменным. Это значение оптимальной частоты вращения для вальцедековых машин лежит в диапазоне, рекомендованном технологами и конструкторами: 400...450 мин.⁻¹ При-

дание деке колебательного движения увеличивает коэффициент шелушения на величину от 0,06 до 0,08, максимальное увеличение наблюдается при частотах 450...500 мин.⁻¹ Увеличение коэффициента шелушения можно объяснить более интенсивным воздействием на зерно в зоне шелушения сил сжатия и сдвига в двух направлениях, а не в одном, как в машинах традиционной конструкции.

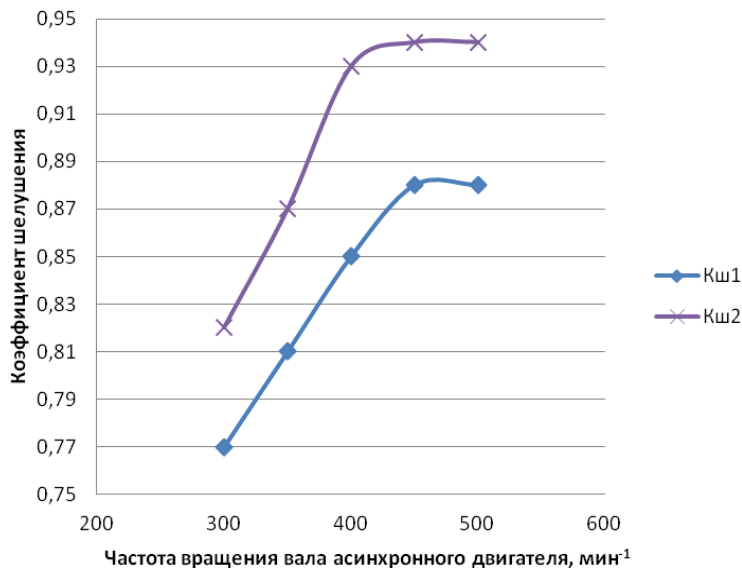


Рисунок 5.6

Зависимость коэффициента шелушения от частоты вращения вальца машины

С ростом частоты вращения вальца коэффициент целостности уменьшается, что объясняется более интенсивным воздействием на зерно в рабочем зазоре. Уменьшение количества дробленых зерен и мучки при подвижной деке можно объяснить более равномерным распределением зерна в зазоре вдоль оси вращения вальца. Причем с ростом частоты вращения вальца разница коэффициентов уменьшается вследствие того, что зерно не успевает равномерно распределиться по всей длине зазора.

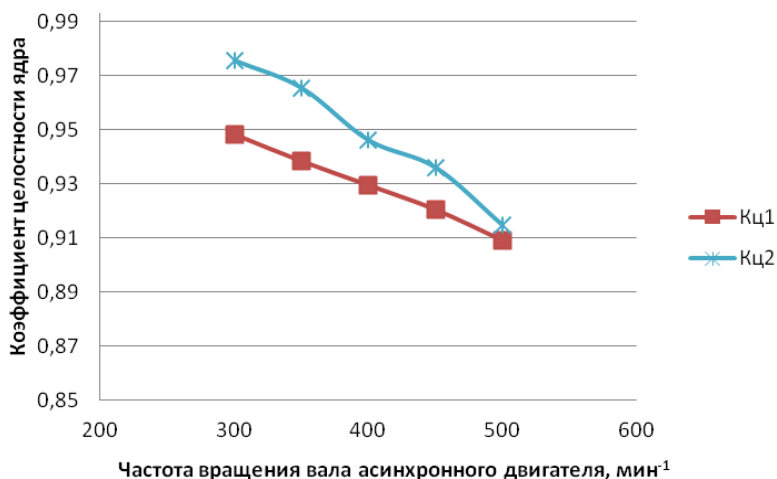


Рисунок 5.7

Зависимость коэффициента целостности ядра от частоты вращения вальца машины

Полученные значения $K_{ш}$, $K_{ц}$ и $E_{ш}$ на всем диапазоне изменения частоты вращения вальца, как при неподвижной, так и при колеблющейся деке соответствуют нормам содержания шелушенных зерен и дробленого ядра после шелушения [201, 202], что свидетельствует о соблюдении технологии шелушения гречихи на созданной экспериментальной установке.

График эффективности шелушения при неподвижной деке имеет экстремум со значением $E_{ш} = 0,81$ при частоте вращения вальца 450 мин.^{-1} . Как видно, колебательное движение деки оказывает значительное положительное влияние на эффективность шелушения – максимальное значение эффективности шелушения достигло 0,89. Максимальные значения эффективности шелушения наблюдаются при частотах вращения $400 \dots 450 \text{ мин.}^{-1}$.

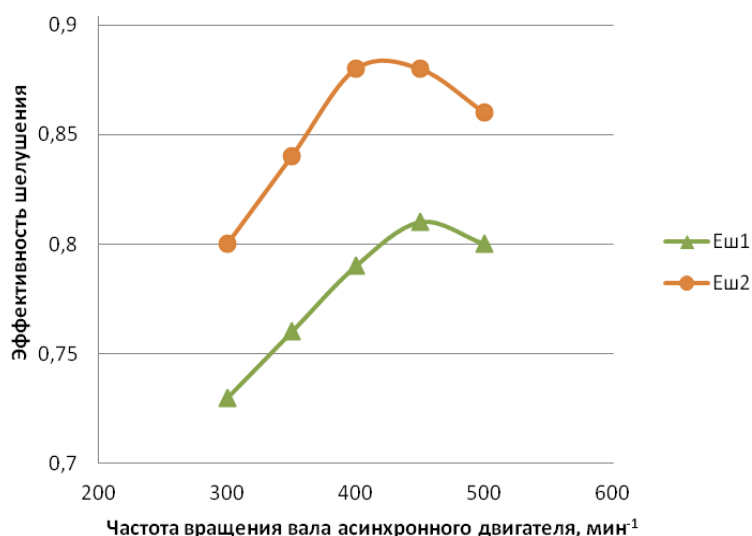


Рисунок 5.8

Зависимость эффективности шелушения от частоты вращения вальца машины

Для определения зависимости параметров качества шелушения от частоты колебаний деки машины необходимо получить и проанализировать графики зависимостей $K_{ш}$, $K_{ц}$, $E_{ш} = f(f)$ (рисунок 5.9). При этом валец машины будет вращаться со скоростью 400 мин.^{-1} .

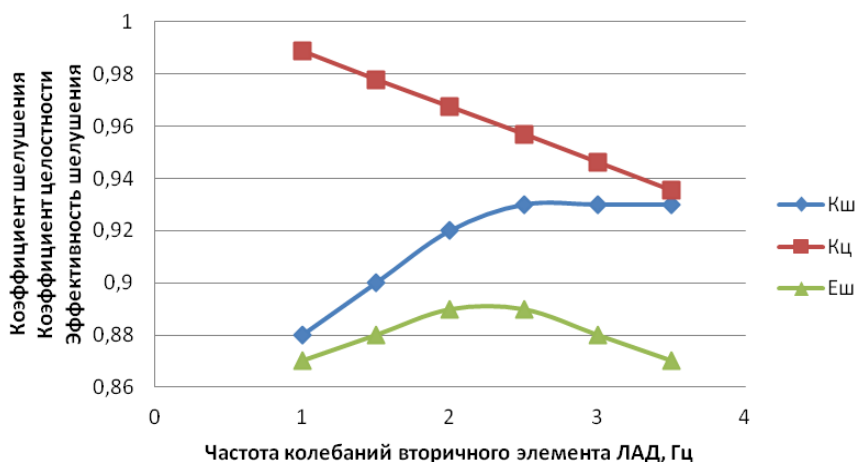


Рисунок 5.9

Влияние частоты колебания деки на качество шелушения

Максимальное значение эффективности шелушения $E_{ш} = 0,89$ наблюдается на диапазоне частот $f = 2...2,5$ Гц. Такой разброс оптимальных частот колебания деки допускает некоторую погрешность регулирования частоты колебаний ЛАД, что упрощает систему управления КВЭП.

5.4.3 Определение эффективности работы инерционного конвейера

Для оценки эффективности разработанного инерционного конвейера построены зависимости средней скорости транспортирования сахара-песка и КПД транспортирования материала от массы транспортируемого груза (рисунок 5.10).

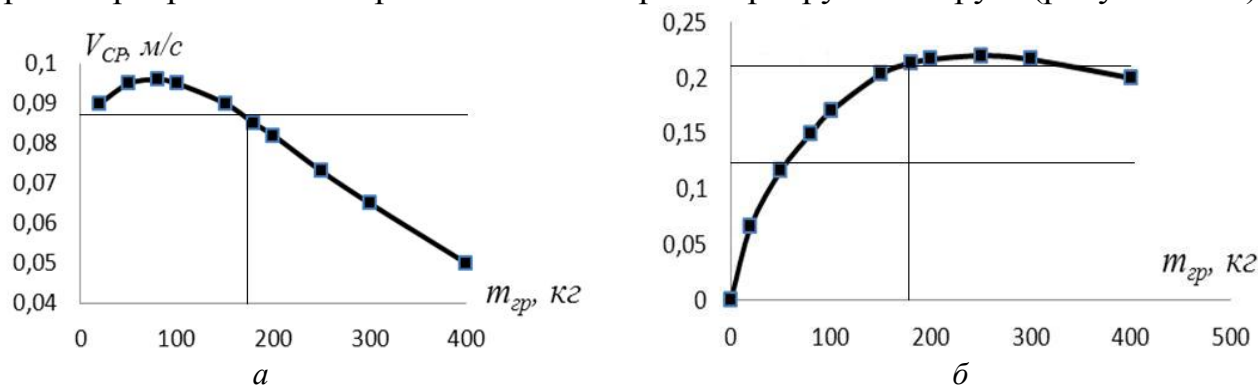


Рисунок 5.10

Зависимости: *a* – средней скорости транспортирования V_{cp} ;
б – КПД η транспортирования от массы груза m_{zp}

КПД привода базового варианта (Ш53-ПТА-3) при номинальной производительности составляет $\eta_2 = 12$ %.

КПД разработанного ЛЭП со звеном предварительного разгона составляет $\eta_1 = 20$ %. Соответственно, КПД привода инерционного конвейера повышается на 8 %.

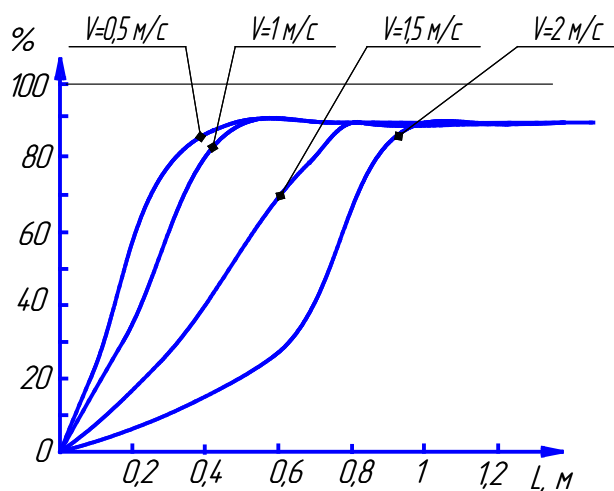


Рисунок 5.11

Экспериментальное определение длины участков сортирования картофеля на инерционной картофелесортировальной установке

На рисунке 5.11 представлены зависимости качества сортирования картофеля от длины участков сортирования при различных скоростях транспорти-

рующего лотка. Как видно, можно добиться качества сортировки 90 % на предложенной установке, но с ограничением скорости лотка не более 2 м/с, т. к. при большей скорости может наблюдаться повреждение клубней картофеля. Оптимальной длиной участков сортирования можно считать 0,6 м.

5.5 Выводы по главе

1. По результатам теоретических и экспериментальных исследований сформулированы рекомендации по проектированию ЛАЭСЖД рабочих органов технологических машин и реализованы их производственные образцы.

2. Проведены производственные испытания технологических машин с ЛАЭСЖД. Полученные данные свидетельствуют о повышении их технологических параметров.

3. Расчет коэффициента удельной энергетической эффективности после модернизации зерноочистительной машины повысился на 32,85. Энергоемкость процесса инерционного транспортирования влажного сахара снизилась с 0,497 кВт*ч/т до 0,397 кВт*ч/т. Увеличение эффективности шелушения зерна гречи на вальцедековой машине с КВЭП составило 9 % по сравнению с машиной с традиционным приводом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии показано, что применяемые электроприводы с преобразователями вращательного в колебательное движение рабочих органов технологических машин усложняют их конструкции, и, как следствие, снижают их технические, эксплуатационные и технологические характеристики. Повышение эффективности технологических машин является важной научной проблемой, решение которой базируется на применении безредукторных линейных асинхронных электроприводов, которые обеспечивают непосредственное преобразование электрической энергии в колебательное движение рабочего органа, причем и сложной формы.

Исследованы технологические характеристики машин для послеуборочной обработки продукции растениеводства, что позволило согласовать установку ЛАД в электропривод рабочих органов для обеспечения их сложного регулируемого колебательного движения (амплитуда до 0,7 м; частота до 5 Гц). Разработаны конструкции ЛАЭСКД на уровне изобретений и способы их практической реализации, что повышает технико-экономические показатели этих машин, а также открывает перспективу создания новых технологических машин.

В ЛАЭСКД технологических машин определен диапазон параметров ЛАД ($V_1 < 10$ м/с; $2p > 4$), для которого предложена методика расчета электро-механических продольной F_x и нормальной F_y сил по «Т»-образной схеме замещения при изменяющемся воздушном зазоре ЛАД.

Разработаны и реализованы в среде объектно-визуального моделирования Simulink |Matlab| математические модели ЛАЭСКД рабочих органов технологических машин для послеуборочной обработки продукции растениеводства. Исследования показали, что нормальная сила F_y превышает в 8...10 раз продольную силу F_x . Это позволяет реализовать выраженные продольные колебания рабочего органа с поперечной составляющей. Получены траектории сложного колебательного движения рабочих органов при различных удельных нагрузках и кинематических параметрах ЛАЭСКД.

В результате анализа рабочих процессов ЛАЭСКД получены неизвестные ранее взаимосвязи параметров колебаний рабочих органов с режимом работы ЛАД, силами сопротивления движению, напряжением источника питания и параметрами ЛАЭСКД, что позволяет проектировать ЛАЭСКД технологических машин АПК с регулируемыми параметрами колебаний.

Спроектированы и реализованы ЛАЭСКД рабочих органов зерноочистительной и шелушильной машин, инерционного конвейера влажного сахара, картофелесортировальной машины. Разработана методика и проведен большой объем исследований различных моделей ЛАЭСКД, что подтвердило адекватность разработанных математических моделей и достоверность полученных теоретических результатов. Экономический эффект данных устройств достигается повышением эффективности технологического процесса и снижением эксплуатационных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
2. Азрилевич, М.Я. Технологическое оборудование сахарных заводов / М.Я. Азрилевич. – М.: Пищевая промышленность, 1982. – 391 с.
3. Аипов, Р.С. Линейные электрические машины и линейные асинхронные электроприводы технологических машин: монография / Р.С. Аипов, А.В. Линенко. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. – 308 с.
4. Аипов, Р.С. Линейный электропривод колебательного движения / Р.С. Аипов. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 1994. – 77 с.
5. Аипов Р.С., Барыкин К.К., Даутов А.М. Выбор параметров ЛАД для привода качающихся транспортирующих машин / Электрические машины с разомкнутыми магнитопроводами в технологии и приводе: межвузовский сб. научн. трудов. – Свердловск: УПИ, 1988. – С. 41–44.
6. Аипов, Р.С. Линейные электрические машины и приводы на их основе / Р.С. Аипов. – Уфа: БГАУ, 2003. – 201 с.
7. Аипов, Р.С. Разработка и создание энергоресурсосберегающих установок с линейными асинхронными приводами для предприятий АПК / Р.С. Аипов, А.В. Линенко // Материалы III международной конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014». Сборник научных трудов. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ им. Первого президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – С. 152–155.
8. Аипов, Р.С. Математическая модель колебательного линейного электропривода бункера-питателя / Р.С. Аипов, А.В. Линенко. Электрификация сельского хозяйства: межвуз. науч. сб. Выпуск 3 // БГАУ. – Уфа, 2002. – С. 26–30.
9. Аипов, Р.С. Линейный электропривод бункеров – питателей сыпучих материалов / Р.С. Аипов, А.В. Линенко. Электрификация сельского хозяйства: межвуз. науч. сб. Выпуск 2 // БГАУ. – Уфа, 2000. – С. 38–43.
10. Аипов, Р.С. Энергетика двухцелевого линейного электропривода / Р.С. Аипов, А.В. Линенко. Электрификация сельского хозяйства: межвуз. науч. сб. Выпуск 2 // БГАУ. – Уфа, 2000. – С. 93–97.
11. Аипов, Р.С. Математическое моделирование асинхронных двигателей в среде MATLAB / SIMULINK / Р.С. Аипов, А.В. Линенко. Энергосбережение, эксплуатация электрооборудования и автоматизация технологических процессов в АПК // Сб. науч. трудов Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – Пушкин: С-ПГАУ, 2001. – С. 93–99.
12. Аипов, Р.С. Перспективы применения безредукторного асинхронного электропривода для процессов послеуборочной обработки зерна / Р.С. Аипов, Я.Д. Осипов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – СПб – Пушкин, СПбГАУ, 2009. – № 16. – С. 152–157.
13. Аипов, Р.С. Бункера-питатели с колебательным линейным асинхронным электроприводом ворошителей-задвижек / Р.С. Аипов, А.В. Линенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 7. – С. 14–15.

14. Аипов, Р.С. Анализ влияния параметров схемы замещения линейного асинхронного двигателя на его динамические характеристики / Р.С. Аипов., А.В. Линенко. Электрификация сельского хозяйства: межвуз. науч. сб. Выпуск 3 // БГАУ. – Уфа, 2002. – С. 22–26.

15. Аипов, Р.С. Исследование линейного асинхронного электропривода ворошителей-задвижек / Р.С. Аипов, А.В. Линенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – № 5. – С. 29–31.

16. Аипов, Р.С. Динамика линейного асинхронного электропривода ворошителей-задвижек бункера-питателя в технологических линиях перерабатывающих предприятий / Р.С. Аипов, А.В. Линенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006. – № 4. – С. 22–24.

17. Аипов, Р.С. Перспективы применения линейных асинхронных двигателей в приводе машин с колебательным движением рабочего органа / Р.С. Аипов, А.В. Линенко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. Серия Агроинженер. – 2008. – № 1. – С. 35–36.

18. Аипов, Р.С. Применение линейных асинхронных двигателей для привода технологических машин / Р.С. Аипов, Ю.Ж. Байрамгулов, А.В. Линенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 1. – С. 24.

19. Аипов, Р.С. Асинхронный электропривод машины для шелушения зерна / Р.С. Аипов, Я.Д. Осипов // Сельский механизатор. – 2009. – № 5. – С. 35.

20. Аипов, Р.С. Математическая модель колебательно-вращательного электропривода измельчителя листостебельных кормов на основе скользящего комбинированного резания / Р.С. Аипов, Ю.Ж. Байрамгулов, Я.Д. Осипов, В.В. Эбингер // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2011. – № 4 (20). – С. 46–51.

21. Аипов, Р.С. Исследование неполнофазных режимов работы линейных асинхронных двигателей для технологических процессов АПК / Р.С. Аипов, А.В. Линенко, В.Ф. Гильванов // Материалы XLVIII международной научно-практической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». Часть 2. – Челябинск: ЧГАА, 2009. – С. 175–180.

22. Аипов, Р.С. Максимальные КПД и движущая сила при разгоне рабочего органа вальцедековой машины для шелушения зерна линейным асинхронным двигателем / Р.С. Аипов, А.В. Линенко, Я.Д. Осипов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2007. – № 10. – С. 25–28.

23. Аипов, Р.С., Чанов Л.Г. Влияние электромагнитных переходных процессов линейного асинхронного двигателя на электромеханические / Управляемые электрические цепи и электромагнитные поля // Межвуз. сб. – Уфа: УАИ, 1992. – С. 71–79.

24. Аипов, Р.С. Качающийся конвейер с двухцелевым линейным асинхронным приводом / Р.С. Аипов, А.С. Шагаргазин. «Достижения науки – агропромышленному производству» // XLIII Международная научно-техническая конференция: тез. докл. – Челябинск: ЧГАУ, 2004. – Т. 1. – 365 с.

25. Аипов, Р.С. Качающийся конвейер с линейным асинхронным приводом / Р.С. Аипов, А.С. Шагаргазин. // Механизация и электрификация с/х. – 2004. – № 10. – С. 34.

26. Аипов, Р.С. Математическая модель сепаратора с подвижным индуктором линейного асинхронного электропривода / Р.С. Аипов, А.В. Линенко, М.З. Нафиков // Вестник Башкирского ГАУ. – 2010. – № 4. – С. 31–34.
27. Аипов, Р.С. Качающийся конвейер на базе линейного электропривода для транспортирования и подсушивания зерна / Р.С. Аипов, А.С. Шагаргазин // Достижения аграрной науки – производству: материалы 110 научно-практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов университета. – Уфа: БГАУ, 2004. – 160 с.
28. Аипов, Р.С. Влияние влажности транспортируемого сахара на производительность качающегося конвейера с линейным асинхронным приводом / Р.С. Аипов, А.В. Линенко, А.С. Шагаргазин // Проблемы и перспективы обеспечения продовольственной безопасности регионов России: материалы всероссийской научно-практической конференции. – Уфа: БГАУ, 2003. – С. 137–140.
29. Акчурин, С.В. Повышение энергоэффективности инерционного конвейера с линейным электроприводом путем накопления «пусковой» энергии упругими элементами / С.В. Акчурин, В.Ф. Гильванов, А.В. Линенко // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2011. – № 4 (20). – С. 51–54.
30. Акчурин, С.В. Анализ работы привода решетного стана экспериментальной зерноочистительной установки с использованием линейного электродвигателя / С.В. Акчурин, А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 2 (18). – С. 97–101.
31. Акчурин, С.В. Установка с линейным электроприводом для сортирования картофеля / С.В. Акчурин, А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров // Сельский механизатор. – 2012. – № 12. – С. 8–9.
32. Акчурин, С.В. Математическая модель инерционного движения материала в установках с линейным электроприводом / С.В. Акчурин, А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2013. – № 1 (25). – С. 83–86.
33. Акчурин, С.В. Применение линейного асинхронного двигателя в сушильных установках / С.В. Акчурин, А.В. Линенко // Материалы XLIX междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАА, 2010. – Ч. 2. – С. 275–278.
34. Акчурин, С.В. Конвейер для сушки початков кукурузы с линейным электроприводом / С.В. Акчурин, А.В. Линенко // Научное обеспечение инновационного развития АПК. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2010. – Ч. III. – С. 150–152.
35. Акчурин, С.В. Повышение технико-экономических показателей инерционного конвейера с линейным электроприводом // Материалы I междунар. науч.-техн. конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАА, 2011. – Ч. V. – С. 3–7.
36. Акчурин, С.В. Экспериментальная установка инерционного конвейера с подвижным индуктором линейного асинхронного двигателя / С.В. Акчурин, А.В. Линенко // Научное обеспечение развития АПК в современных условиях: матер. Всерос. науч.-практ. конф.; в 3 т. – Ижевск: Ижевская ГСХА, 2011. – Т. 3. – С. 53–56.

37. Акчурин, С.В. Инерционный транспортер влажного сахара на базе линейного асинхронного электропривода с подвижным индуктором / С.В. Акчурин, А.В. Линенко // Материалы II международной науч.-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАА, 2013. – Ч. V. – С. 89–96.

38. Акчурин, С.В. Математическая модель инерционного транспортера на базе линейного асинхронного электропривода со звеном предварительного разгона / С.В. Акчурин, А.В. Линенко // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Фундаментальные основы научн.-технической и технологической модернизации АПК». – Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. – С. 409–415.

39. Александров, А.В. Сопrotивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов; 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2003. – 561 с.

40. Багин, Д.Н. Расчет электродинамических сепараторов как электромеханических систем / Д.Н. Багин, А.Ю. Коняев // Материалы III международной конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014». Сборник научных трудов. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ им. Первого президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – С. 156–159.

41. Бадретдинов, И.Д. Совершенствование пневматической системы машины предварительной очистки зернового вороха: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ильдар Дамирович Бадретдинов. – Уфа, 2011. – 183 с.

42. Барыкин, К.К. Электрические машины с разомкнутым магнитопроводом: учебное пособие. – Уфа: изд. Уфимского ордена Ленина авиационного института им. Серго Орджоникидзе, 1985. – 85 с.

43. Барыкин, К.К. Об улучшении энергетических показателей линейного электропривода / К.К. Барыкин, А.П. Казадаев // Региональные проблемы повышения качества и экономии электроэнергии: тезисы докладов. – Астрахань: АТИРПХ, 1991. – С. 52–53.

44. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.

45. Блехман, И.И. Вибрационная механика / И.И. Блехман. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.

46. Блехман, И.И. Вибрационное перемещение / И.И. Блехман, Г.Ю. Джанелидзе. – М.: Наука, 1964. – 410 с.

47. Бобров, В.П. Транспортные и грузочные устройства автоматических линий / В.П. Бобров, Л.И. Чеканов. – М.: Машиностроение, 1980. – 118 с.

48. Бутковский, В.А. Технологическое оборудование мукомольного производства: учебное пособие / В.А. Бутковский, Г.Е. Птушкина. – М.: ГП «Журнал Хлебопродукты», 1999. – 208 с.

49. Бутковский, В.А. Технологии зерноперерабатывающих производств: учебное пособие / В.А. Бутковский, А.И. Мерко, Е.М. Мельников. – М.: Агропромиздат, 1999. – 241 с.

50. Бушуев, Н.М. Семяочистительные машины. Теория, конструкция и расчет / Н.М. Бушуев. – М.: Свердловск: Машгиз, 1962. – 238 с.

51. Важнов, А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.

52. Веденяпин, Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г.В. Веденяпин. – М.: Колос, 1973. – 199 с.
53. Веселовский, О.Н. Некоторые вопросы теории и применения линейных двигателей / Электродвигатели с разомкнутым магнитопроводом: межвуз. сб. науч. тр. // Под ред. О.Н. Веселовского. – Новосибирск: Новосиб. электротехн. ин-т, 1989. – С. 3–7.
54. Веселовский, О.Н. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
55. Вибрация в технике. Справочник в 6-ти томах. – М.: Машиностроение, т. 1. 1978. – 352 с., т. 2. 1979. – 351 с., т. 3. 1980. – 544 с., т. 4. 1981. – 496 с., 1981. – 456 с.
56. Власов, М.Л. Совершенствование технологического процесса очистки семенного зерна на зерноочистительной линии: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Власов Михаил Леонидович. – Челябинск, 1993. – 209 с.
57. ВНИИПТМАШ. Отраслевая инструкция по определению экономической эффективности новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в подъемно-транспортном машиностроении. – М.: ОТИ ВНИИПТМАШа, 1979. – 56 с.
58. Вовкотруб, Ю.С. Переходный режим пуска в электроприводе с ЛАД / Ю.С. Вовкотруб, В.С. Замараев, Ю.А. Кожемякин, В.В. Тиунов // Автоматизированный электропривод: межвузовский сб. науч. трудов. – Пермь, 1979. – С. 161–165.
59. Водяников, В.Т. Организационно-экономические основы сельской электроэнергетики: учебное пособие / В.Т. Водяников. – М.: Экмос, 2002. – 312 с.
60. Водяников, В.Т. Экономическая оценка энергетики АПК: учебное пособие / В.Т. Водяников. – М.: Экмос, 2002. – 304 с.
61. Вольдек, А.И. Индукционные магнетогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.
62. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – М.: Энергия, 1974. – 840 с.
63. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0 / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт, 2001. – 320 с.
64. Гильванов, В.Ф. Шагающий конвейер для очистки корнеплодов от примесей на базе линейного асинхронного электропривода / В.Ф. Гильванов, А.В. Линенко // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов «Молодежная наука и АПК: проблемы и перспективы». Часть I. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2008. – С. 230–232.
65. Гильванов, В.Ф. Инерционный конвейер с линейным электроприводом для очистки и сортировки картофеля / В.Ф. Гильванов, А.В. Линенко // Материалы I международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству». Часть V. – Челябинск: ЧГАА, 2011. – С. 42–45.
66. Гильванов, В.Ф. Применение линейного электропривода со сложным движением рабочего органа / В.Ф. Гильванов, А.В. Линенко // Материалы Все-

российской научно-практической конференции в рамках XIX Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2009». Часть I. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2009. – С. 191–195.

67. Гильванов, В.Ф. Экспериментальное исследование инерционного конвейера для очистки и сортировки картофеля с линейным электроприводом / В.Ф. Гильванов, А.В. Линенко // Научное обеспечение развития АПК в современных условиях: материалы Всероссийской научн.-практ. конф. в 3 т. Т. 3. – Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2011. – С. 63–66.

68. Гинзбург, М.Е. Технология крупяного производства: учебное пособие / М.Е. Гинзбург. – М.: Колос, 1981. – 208 с.

69. Гладков, Н.Г. Зерноочистительные машины. Конструкции, расчет, проектирование и эксплуатация / Н.Г. Гладков. – М.: Машгиз, 1961. – 368 с.

70. Гортинский, В.В. Движение материальной частицы по шероховатой поверхности, совершающей колебания, близкие к круговым поступательным / В.В. Гортинский, И.И. Блехман // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1971. – Вып. 4.

71. Гортинский, В.В. Основные направления научно-технического прогресса в области сепарирования / В.В. Гортинский. – М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш. – 1976. – Вып. 5.

72. Гортинский, В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. – М.: Колос, 1973. – 296 с.

73. Гортинский, В.В. О техническом уровне и перспективах развития вибрационных машин для зерноперерабатывающей и пищевой промышленности / В.В. Гортинский // Машиноведение. – 1985. – № 1. – С. 3–7.

74. Гортинский, В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. – М.: Колос, 1980. – 304 с.

75. Горячкин, В.П. Собрание сочинений. Т. I–VI. М.: Колос, 1965, т. I – 720 с., т. II – 720 с., т. III – 720 с., т. IV – 720 с., т. V – 720 с., т. VI – 720 с.

76. ГОСТ 10840-64 Зерно. Методы определения природы. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 4 с.

77. ГОСТ 10967-90 Зерно. Методы определения запаха и цвета. – М.: Издательство стандартов, 2011. – 3 с.

78. ГОСТ 30483-97 Зерно. Методы определения общего и фракционного содержания сорной и зерновой примесей; содержания мелких зерен и крупности; содержания зерен пшеницы, поврежденных клопом-черепашкой; содержания металломагнитной примеси. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 32 с.

79. ГОСТ 13586.5-93 Зерно. Метод определения влажности. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 8 с.

80. ГОСТ 23729-88 Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки специализированных машин. – М.: Государственный стандарт союза СССР, 1988. – 9 с.

81. ГОСТ 28672-90. Ячмень. Требования при заготовках и поставках. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 5 с.

82. ГОСТ Р 52777-2007 Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2007. – 11 с.
83. ГОСТ Р 53056-2008 Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2008. – 23 с.
84. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – Государственная система обеспечения единства измерений, 1977. – 11 с.
85. Гребенок, В.К. Технологическое оборудование сахарных заводов / В.К. Гребенок. – М.: Пищевая промышленность, 1983. – 420 с.
86. Гречиха. Требования при заготовках и поставках. ГОСТ 19092-92. введен 1993.06.01. – М.: Госстандарт России, 1993. – 69 с.
87. Гультияев, А.К. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс / А.К. Гультияев. – СПб.: Питер, 2000. – 432 с.
88. Данилов, А.И. Компьютерный практикум по курсу «Теория управления». Simulink – моделирование в среде Matlab / А.И. Данилов; под ред. А.Э. Софиева. – М.: МГУИЭ, 2002. – 128 с.
89. Демский, А.Б. Оборудование для производства муки и крупы: справочник / А.Б. Демский [и др.]. – СПб.: Издательство «Профессия», 2000. – 624 с.
90. Денисов, В.Н. Развитие теории и разработка вибрационных электро-механических систем сельскохозяйственного назначения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.20 / Денисов Валерий Николаевич. – М., 2012. – 350 с.
91. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – 5-е изд., доп. и перераб. / Б.А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
92. Доспехов, Б.А. Планирование полевого опыта и статистическая обработка его данных / Б.А. Доспехов. – М.: Колос, 1972. – 205 с.
93. Дринча, В.М. Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки / В.М. Дринча. – Воронеж: Издательство НПО «МОДЭК», 2006. – 384 с.
94. Дьяконов, В.П. Matlab 6: учебный курс / Дьяконов В.П. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
95. Дьяконов, В.П., Круглов, В.В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В.П. Дьяконов, В.В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
96. Дьяконов, В.П., Круглов, В.В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / В.П. Дьяконов, В.В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 448 с.
97. Дьяконов, В.П. Simulink 4. Специальный справочник / В.П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
98. Дьячков, В.К. Машины непрерывного транспорта / В.К. Дьячков. – М.: Машгиз, 1961. – 285 с.
99. Евтягин, В.Ф. О режимах работы зерноочистительных машин. В кн.: Совершенствование сельскохозяйственной техники: сб. науч. тр. / В.Ф. Евтягин. – Омск: Омск. с.-х. ин-т, 1978. – 177 с.

100. Егоров, Г.А. Технология и оборудование мукомольной, крупяной и комбикормовой промышленности. / А.Г. Егоров, Я.Ф. Мартыненко, Т.П. Петренко. – М.: Издательский комплекс МГАПП, 1996. – 210 с.
101. Егоров, Г.А. Технологические свойства зерна: учебник / Г.А. Егоров. – М.: Агропромиздат, 1985. – 334 с.
102. Епифанов, А.П. Метод исследования плотности распределения нормальных сил в одностороннем линейном асинхронном двигателе / А.П. Епифанов, А.М. Лебедев, В.Е. Скобелев, Г.И. Соловьев // ИВУЗ. Электромеханика. – Новочеркасск, 1985. – № 1.
103. Епифанов, А.П. Основные вопросы проектирования тяговых линейных асинхронных двигателей / А.П. Епифанов. Ч. 1., Ч. 2, Ч. 3 // Электротехника. – 1992. – № 1, № 6, № 10.
104. Епифанов, А.П. Анализ путей улучшения характеристик тяговых линейных асинхронных двигателей для высокоскоростного наземного транспорта / А.П. Епифанов, В.Е. Скобелев, Г.И. Соловьев // Железные дороги мира. – 1978. – № 2. – С. 3–12.
105. Епифанов, А.П., Соловьев Г.И. Трехмерная теория линейного асинхронного двигателя с различными типами обмоток / А.П. Епифанов, Г.И. Соловьев: епонир. рукопись. Реф. 10И234. РЖ. «ЭЭ». – 1976. – № 10.
106. Жарик, В.Н. Механизация трудоемких процессов на сахарных заводах / В.Н. Жарик. – Киев: Урожай, 1988. – 160 с.
107. Желтов, В.С. Механизация послеуборочной обработки зерна: справочник / В.С. Желтов. – М.: Колос, 1973. – 254 с.
108. Заика, П.М. Технологический процесс работы вибрационных семяочистительных машин / П.М. Заика. – М.: МИИСП, 1985. – 118 с.
109. Зенков, Р.Л. Машины непрерывного транспорта / Р.Л. Зенков, И.И. Ивашков, Л.Н. Колобо. – М.: Машиностроение, 1987. – 432 с.
110. Зюлин, А.Н. Теоретические проблемы развития технологий сепарирования зерна / А.Н. Зюлин. – М.: ВИМ, 1992. – 208 с.
111. Иванов, М.Н. Детали машин: учебник для студентов вузов / М.Н. Иванов. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.
112. Иванова, В.А. Основы стандартизации, метрологии, сертификации: учебник / В.А. Иванова, О.П. Яблонский. – М.: Феникс, 2004. – 448 с.
113. Иванушкин, В.А. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов / В.А. Иванушкин, Ф.Н. Сарапулов, П. Шымчак. – Щецин, 2000. – 310 с.
114. Ижеля, Г.И. Линейные асинхронные двигатели / Г.И. Ижеля, С.А. Ребров, А.Г. Шаповаленко. – Киев: Техника, 1975. – 136 с.
115. Иофинов, А.П. Практикум по расчетному курсу сельскохозяйственных машин / А.П. Иофинов, А.С. Самигуллин, Э.В. Хангильдин. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2007. – 236 с.
116. Калоша, В.К. Математическая обработка результатов эксперимента / В.К. Калоша. – Минск: Высш. Школа, 1982. – 103 с.
117. Кириенко, Ю.И. Систематизация размерно-массовых характеристик клубней картофеля / Ю.И. Кириенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1979. – № 9. – С. 44–45.

118. Клевцов, А.В. Средства оптимизации потребления электроэнергии / А.В. Клевцов. – М.: Солон-пресс, 2004. – 240 с.
119. Ключев, В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
120. Ковач, К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 126 с.
121. Кожуховский, И.Е. Зерноочистительные машины. Конструкции, расчет и проектирование / И.Е. Кожуховский. – М.: Машиностроение, 1974. – 200 с.
122. Кожуховский, И.Е. Зерноочистительные машины / И.Е. Кожуховский. – М.: Машиностроение, 1974. – 237 с.
123. Колчин, Н.Н. О сортировании картофеля по размерным признакам / Н.Н. Колчин, Е.А. Смехунов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1975. – № 9. – С. 13–15.
124. Кононеко, Е.В. Электрические машины / Е.В. Кононеко, Г.А. Сипайлов, К.А. Хорьков. – М.: Высшая школа, 1975. – 279 с.
125. Коняев, А.Ю. Оценка электромагнитных усилий, определяющих поведение немагнитных проводящих тел, в электродинамических сепараторах / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров, Н.С. Якушев // Материалы III международной конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014»: сборник научных трудов. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УрФУ им. Первого президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – С. 190–193.
126. Коняев, А.Ю. Вопросы применения ЛАД для индукционного нагрева стальных листов / А.Ю. Коняев / Электрические машины с разомкнутыми магнитопроводами в технологии и приводе: межвузовский сб. научн. трудов. – Свердловск: УПИ, 1988. – С. 45–49.
127. Коняев, А.Ю. Линейные индукционные машины для технологического электромагнитного воздействия на обрабатываемые электропроводящие изделия и материалы / А.Ю. Коняев: автореф. дис. доктора техн. наук. – Екатеринбург, 1996. – 32 с.
128. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
129. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2000. – 607 с.
130. Копылов, Н.Г. Теория качающихся конвейеров / Н.Г. Копылов. – Л.: Машгиз, 1963. – 340 с.
131. Косилов, Н.И. Пути совершенствования технологии и технических средств для предварительной очистки / Н.И. Косилов. – Челябинск, 1985. – 52 с.
132. Круковский, Л.Е. Колебательный линейный электропривод вибротранспортирующих машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Л.Е. Круковский; МАДИ. – М., 1983. – 19 с.
133. Крупа. Правила приемки и методы отбора проб. ГОСТ 26312.1-84 – Введ. 1986–01–01. – М.: Госстандарт России, 1986. – 6 с.
134. Крупа. Методы определения крупности или номера, примесей и доброкачественного ядра. ГОСТ 26312.4-84 – Введ. 1986–01–01. – М.: Госстандарт России, 1986. – 5 с.

135. Лапшин, И.П. Расчет и конструирование зерноочистительных машин / И.П. Лапшин, Н.И. Косилов. – Курган: ГИПП «Зауралье», 2002. – 168 с.
136. Левинский, И.В. Конвейеры общего назначения / И.В. Левинский. – Киев: Высш. Школа, 1971. – 152 с.
137. Левитский, Н.И. Колебания в механизмах: учебное пособие для вузов / Н.И. Левитский. – М.: Наука, 1988. – 336 с.
138. Летошнев, М.Н. Сельскохозяйственные машины. 3-е изд., перераб. и доп. / М.Н. Летошнев. – Москва, 1955. – 764 с.
139. Лиелпегер, Я.Я. Физико-технические основы линейных индукционных МГД машин / Я.Я. Лиелпегер. – Рига, 1970. – 256 с.
140. Линенко, А.В. Разработка и анализ безредукторного колебательного линейного электропривода технологического назначения / А.В. Линенко. Седьмая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: тез. докл. В 3-х т. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – Т. 2. – С. 126.
141. Линенко А.В. Имитационное моделирование динамических характеристик колебательного линейного электропривода в SIMULINK / А.В. Линенко, Р.Н. Исламов. Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB: тез. докл. Всероссийской научн. конф. – М.: ИПУ РАН, 2002. – С. 161–162.
142. Линенко, А.В. Повышение эффективности привода технологических машин АПК применением линейных асинхронных двигателей / Научное и инновационное обеспечение модернизации АПК России: сб. трудов ВСМУиС / А.В. Линенко. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2012. – С. 51–53.
143. Линенко, А.В. Проектирование колебательного линейного электропривода технологического назначения / Восьмая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: тез. докл. В 3-х т. / А.В. Линенко. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – Т. 2. – С. 89.
144. Линенко, А.В. Моделирование работы линейного асинхронного электродвигателя / А.В. Линенко, В.Ф. Гильванов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 3. С. 19–21.
145. Линенко, А.В. К вопросу динамической характеристики асинхронного электродвигателя / А.В. Линенко, Р.Б. Яруллин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 2, т. 9. – С. 42–46.
146. Линенко, А.В. Математическая модель бункера-питателя в среде визуального моделирования MATLAB / SIMULINK / А.В. Линенко // Материалы ХLI научно-технической конференции Челябинского государственного агроинженерного университета. – Челябинск: ЧГАУ, 2002. – Ч. 2. – С. 220–223.
147. Линенко, А.В. Повышение эффективности технологического оборудования АПК путем применения линейного электропривода со сложным движением рабочего органа. / А.В. Линенко // Интеграция аграрной науки и производства: состояние, проблемы и пути решения: материалы всероссийской научно-практической конференции. – Уфа: БГАУ, 2008. – С. 162–164.

148. Линенко, А.В. Математическая модель инерционного конвейера со звеном предварительного разгона линейного асинхронного электропривода / А.В. Линенко, С.В. Акчурин, М.Ф. Туктаров // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – № 03 (097). С. 997–1010. – IDA [article ID]: 0971403070. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/03/pdf/70.pdf>, 0,875 у.п.л., импакт-фактор РИНЦ = 0,346.

149. Линенко, А.В. Энергетические показатели линейного электропривода решетного стана зерноочистительной машины / А.В. Линенко, С.В. Акчурин, М.Ф. Туктаров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – № 1, т. 10. – С. 28–32.

150. Линенко, А.В. Применение линейного электропривода в зерноочистительных машинах / А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров // Материалы XLIX междунар. науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству». – Челябинск: ЧГАА, 2010. – Ч. 2. – С. 355–358.

151. Линенко, А.В. Применение плоского линейного электропривода в зерноочистительных машинах / А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров // Научное обеспечение инновационного развития АПК. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2010. – Ч. III. – С. 179–180.

152. Линенко, А.В. Линейный электропривод решетного стана экспериментальной зерноочистительной установки / А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы I междунар. науч.-техн. конференции. – Челябинск: ЧГАА, 2011. – Ч. V. – С. 114–117.

153. Линенко, А.В. Перспективы применения винтового электропривода в АПК / А.В. Линенко, Я.Д. Осипов // Повышение эффективности и устойчивости развития агропромышленного комплекса: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Часть II. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2005. – С. 200–202.

154. Линенко, А.В. Безредукторный асинхронный электропривод технологической машины со сложным колебательным движением рабочего органа / А.В. Линенко, Я.Д. Осипов // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Т. 1. – Уфа: Издательство УГНТУ, 2007. – С. 255–259.

155. Линенко, А.В. Математическая модель качающегося конвейера с линейным асинхронным приводом / А.В. Линенко, А.С. Шагаргазин / Пути повышения эффективности АПК в условиях вступления России в ВТО: материалы международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Часть 1. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2003. – С. 259–261.

156. Линенко, А.В. Производительность бункера-питателя с ворошителями на базе колебательного линейного электропривода / А.В. Линенко // Материалы XLII научно-технической конференции Челябинского государственного агроинженерного университета. – Челябинск: ЧГАУ, 2003. – Ч. 3. – С. 104–108.

157. Линенко, А.В. Установка для послеуборочной обработки картофеля с линейным электроприводом / А.В. Линенко, В.Ф. Гильванов // Молодежная наука и АПК: материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 80-летию ФГОУ ВПО Башкирский ГАУ. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2010. – С. 125–126.
158. Луковников, В.И. Электропривод колебательного движения / В.И. Луковников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
159. Луковников, В.И. Электромашинный безредукторный колебательный электропривод / В.И. Луковников // Электротехническая промышленность. Электропривод. – 1980. – № 8. – С. 14–18.
160. Маланичев, И.В. Обоснование параметров пневмомеханического шелушителя зерна гречихи на основе моделирования технологического процесса / И.В. Маланичев: автореф. канд. техн. наук. – Казань: Казанский ГАУ, 2009. – 15 с.
161. Малюнин, А.Н. Некоторые вопросы динамики линейного электропривода / А.Н. Малюнин, Н.П. Савин, А.В. Сапсалева. Электродвигатели с разомкнутым магнитопроводом: межвуз. сб. науч. тр. // Под ред. О.Н. Веселовского; Новосибир. электротехн. ин-т. – Новосибирск, 1989. – С. 106–112.
162. Машина предварительной очистки с решетной приставкой МПР-50. Руководство по эксплуатации. ГСКБ «Зерноочистка». – Воронеж, 2001. – 21 с.
163. Машины непрерывного транспорта / под ред. В.И. Плавинского. – М.: Машиностроение, 1969. – 720 с.
164. Мельников, С.Б. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. – 2-е изд., перераб. и доп. / С.Б. Мельников. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.
165. Методы оценки функциональных показателей. Взамен РД 10.10.2-91. Введ. С 03.03.2003. – М.: Минсельхоз России, 2003. – 47 с.
166. Мударисов, С.Г. Повышение качества обработки почвы путем совершенствования рабочих органов машин на основе моделирования технологического процесса: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Салават Гумерович Мударисов. – Челябинск, 2007. – 351 с.
167. Насар, С.А. Линейные тяговые электрические машины / С.А. Насар, И. Болдеа. – М.: Транспорт, 1981. – 176 с.
168. Нуруллин, Э.Г. Разработка основ теории и машин пневмомеханического шелушения зерна крупяных культур / Э.Г. Нуруллин: автореф. докт. техн. наук. – Казань: Казанский ГАУ, 2005. – 32 с.
169. Окнин, Б.С. Машины для послеуборочной обработки зерна / Б.С. Окнин, И.В. Горбачев, А.А. Терехин. – М.: Агропромиздат, 1987. – 238 с.
170. Осипов, Я.Д. Вальцедековая шелушительная машина с комбинированным электроприводом / Я.Д. Осипов // Энергетика предприятий АПК и сельских территорий: состояние, проблемы и пути решения: материалы международной научно-практической конференции. – СПб: Издательство СПбГАУ, 2009. – С. 152–157.
171. Осипов, Я.Д. Повышение эффективности вальцедековых шелушительных машин применением колебательно-вращательного электропривода /

Я.Д. Осипов // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы XLIX международной научно-технической конференции. Часть 3. – Челябинск: ЧГАА, 2010. – С. 22–25.

172. Осипов, Я.Д. Экспериментальная установка для исследования колебательно-вращательного электропривода вальцедековой шелушительной машины / Я.Д. Осипов // Молодежная наука и АПК: проблемы и перспективы: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 80-летию Башкирского ГАУ. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2010. – С. 78–80.

173. Осипов, Я.Д. Бесконтактное управление колебательно-вращательным электроприводом вальцедековой машины для шелушения зерна с хрупким ядром / Я.Д. Осипов // Научное обеспечение развития АПК в современных условиях: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2011. – С. 146–149.

174. Основы расчета и конструирования машин и автоматов пищевых производств: справочник / под ред. Соколова А.Я. – М.: «Машиностроение», 1969. – 637 с.

175. ОСТ 10 10.02-2002. Испытания сельскохозяйственной техники. Зерноочистительные машины и агрегаты, зерноочистительно-сушильные комплексы.

176. Остроумов, В.П. Повышение динамической прочности пружин / В.П. Остроумов, В.А. Карпунин. – Свердловск: Машгиз, 1961. – 114 с.

177. Патент РФ № 2193515. Шагающий конвейер / Аипов Р.С., Линенко А.В. // БИ. 2002. № 33.

178. Патент РФ № 2215678. Бункерный питатель для выдачи порошкообразных материалов / Аипов Р.С., Линенко А.В. // БИ. 2003. № 31.

179. Патент № 2364564 Российская Федерация, МПК В 65G 25/04. Шагающий конвейер / Р.С. Аипов, В.Ф. Гильванов, А.В. Линенко; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Башкирский ГАУ-№2008114707/11; заявлен 14.04.2008; опубликован 20.08.2009, Бюл. № 23

180. Патент № 2370671 Российская Федерация, МКИ F04 В47/06. Насосная установка / Р.С. Аипов, В.Ф. Гильванов, Д.С. Леонтьев, А.В. Линенко; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Башкирский ГАУ – № 2008130485; заявлен 22.07.2008; опубликован 20.10 2009, Бюл. № 29.

181. Патент № 2380882. Российская Федерация, МКИ А01D 34/(30; 32; 37) Привод режущего аппарата / Аипов Р.С., Линенко А.В., Леонтьев Д.С., Валишин Д.Е. // БИ. 2010. № 4.

182. Патент № 2417570 Российская Федерация, МКИ А01С 7/16 Высевающий аппарат / Аипов Р.С., Валишин Д.Е. Линенко А.В. // БИ. 2011. № 13.

183. Патент Зерноочистительная машина [Текст]: пат. 2282976 Рос. Федерация: МПК⁵¹ А01F12/44. / Орлов А.А.; заявитель и патентообладатель Орлов А.А. – № 2005104196/12; заявл. 16.02.2005; опублик. 10.09.2006, Бюл. № 7. – 5 с.

184. Патент № 2324539 Российская Федерация, МПК В02 3/00. Устройство для шелушения зерна / Р.С. Аипов, Я.Д. Осипов; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Башкирский ГАУ – № 2006109102/13; заявлен 22.03.2006; опубликован 10.10.2007, Бюл. № 14. – 8 с.

185. Пат. на изобр. № 2339211 Зерноочистительная машина / Орлов А.А.; заявитель и патентообладатель Орлов А.А. – № 2009104677/12; заявл. 11.02.2009; опубл. 27.03.2010, Бюл. № 9. – 6 с.

186. Пат. на изобр. № 2415710 РФ. Зерноочистительная установка / Мамедов Ф.А., Хромов Е.В.; заявители и патентообладатели ФГОУ ВПО «Российский государственный аграрный заочный университет» – № 2009135881/13; заявл. 29.09.2009; опубл. 29.09.2009, Бюл. № 8. – 6 с.

187. Пат. на изобр. № 2446669 РФ. Сепарирующая машина / Р.С. Аипов, С.В. Акчурин, А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров; заявители и патентообладатели Р.С. Аипов, С.В. Акчурин, А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров. – № 2010150378/13; заявл. 07.12.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10. – 7 с.

188. Пат. на изобр. № 2422348 РФ. Инерционный конвейер / Р.С. Аипов, С.В. Акчурин, А.В. Линенко, М.Ф. Туктаров; заявитель и патентообладатель Башкирский ГАУ. – № 2010110857/11; заявл. 22.03.2010; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18. – 5 с.

189. Пат. на изобр. № 2523727 РФ. Инерционный конвейер / Аипов Р.С., Линенко А.В., Акчурин С.В., Камалов Т.И.; заявители и патентообладатели Р.С. Аипов, С.В. Акчурин, А.В. Линенко, Т.И. Камалов. – № 2013118994/11; заявл. 23.04.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20. – 5 с.

190. Пененко, В.В. Математические методы планирования эксперимента / В.В. Пененко. – Новосибирск: Наука, 1981. – 255 с.

191. Петленко, Б.И. Разработка автоматизированного линейного электропривода строительного и подъемно-транспортного оборудования / Б.И. Петленко. – М.: МАДИ, 1985. – 68 с.

192. Петленко, Б.И. Исследование механических характеристик линейного асинхронного двигателя / Б.И. Петленко, Л.Е. Круковский // Сб. науч. тр. МАДИ. – М., Вып. 146. – С. 70–87.

193. Петленко, Б.И. Определение механической характеристики линейного асинхронного двигателя по режиму пуска без нагрузки / Б.И. Петленко, Л.Г. Чанов // Электричество. – 1984. – № 9. – С. 61–63.

194. Петров, Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей / Л.П. Петров. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.

195. Пинчук, С.И. Организация эксперимента при моделировании и оптимизации технических систем: учебное пособие / С.И. Пинчук. – Днепропетровск: Дива, 2008. – 248 с.

196. Потемкин, В.Г. Введение в MATLAB / В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 247 с.

197. Потемкин, В.Г. Инструментальные средства MATLAB 5.x. / В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 336 с.

198. Потемкин, В.Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x. / В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. Т. 1. – 321 с.

199. Потемкин, В.Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x. / В.Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. Т. 2. – 304 с.

200. Потураев, В.Н. Вибрационные транспортирующие машины. Основы теории и расчета / В.Н. Потураев, В.П. Франчук, А.Г. Червоненко. – М.: Машиностроение, 1964. – 272 с.

201. Правила организации и ведения технологического процесса на крупяных предприятиях. В 2 ч. Ч. 1. – М.: ВНПО «Зернопродукт», 1990. – 81 с.
202. Правила организации и ведения технологического процесса на крупяных предприятиях. В 2 ч. Ч. 2. – М.: ВНПО «Зернопродукт», 1990. – 97 с.
203. Применение математических методов и ЭВМ. Планирование и обработка результатов эксперимента: учебное пособие / А.Н. Останин и др.; Под общей редакцией Останина А.Н. – Мн.: Выш. шк., 1989. – 218 с.
204. Расчет переходных процессов линейного двигателя в приводе возвратно-поступательного движения / К.К. Барыкин, Р.С. Аипов // Автоматизация технологических процессов и промышленных установок: тез. докл. конф. – Пермь, 1981. – С. 44.
205. Рекомендации по экономической оценке ущербов, наносимых с/х производству отказами электрооборудования. – М.: ВИЭСХ, 1987. – 87 с.
206. РСТ РСФСР 764-90. Картофель. Послеуборочная доработка. Типовой технологический процесс.
207. Румшицкий, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшицкий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
208. Ряшенцев, Н.П. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями: учебное пособие / Н.П. Ряшенцев. – Новосибирск: Наука, 1981. – 149 с.
209. Сайтов, В.Е. Техничко-экономическая эффективность применения зерноочистительных машин / В.Е. Сайтов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 9. – С. 6–7.
210. Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
211. Самигуллин, А.С. Технология и оборудование для переработки зерна: учеб. пособие / А.С. Самигуллин. – Уфа: БГАУ, 2000. – 89 с.
212. Сапронов, А.Р. Технология сахарного производства / А.Р. Сапронов. – М.: Колос, 1999. – 495 с.
213. Сапсалева, А.В. Основы построения и развития теории циклических электроприводов с линейными двигателями / А.В. Сапсалева. Дисс. доктора техн. наук. – Новосибирск, 2003. – 357 с.
214. Сапсалева, А.В. Расчет параметров линейного двигателя циклового электропривода с участком пониженной скорости / А.В. Сапсалева // Тез. докл. на 3 русско-корейском симпозиуме «Наука – технология». – Новосибирск: НГТУ, 1999. – Т. 8. – С. 805.
215. Сарапулов, Ф.Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: учебное пособие / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов. П. Шымчак. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2001. – 236 с.
216. Сарапулов, Ф.Н. Передаточные функции и структурные схемы линейных асинхронных двигателей: учеб. пос. / Ф.Н. Сарапулов, И.В. Черных. – Екатеринбург: УПИ, 1992. – 100 с.
217. Свечарник, Д.В. Линейный электропривод / Д.В. Свечарник. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

218. Сергеев, А.Г. Метрология, стандартизация, сертификация: учебное пособие / А.Г. Сергеев, М.В. Латышев, В.В. Терегеря. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Университетская книга; Логос, 2009. – 560 с.
219. Сипайлов, Г.А. Математическое моделирование электрических машин / Г.А. Сипайлов, А.В. Лоос. – М.: Высшая школа, 1980. – 176 с.
220. Соболев, С.В. Выбор рациональной схемы вторичной обмотки ЛАД / С.В. Соболев, М.В. Юрченко // Взрывозащищенные ЛАД: сборник научных трудов. – Донецк: ВНИИВЭ, 1984. – С. 19–24.
221. Соколов, М.М. Электропривод с линейными асинхронными двигателями / М.М. Соколов, Л.К. Сорокин. – М.: Энергия, 1974. – 136 с.
222. Спиваковский, А.О. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства / А.О. Спиваковский, И.Ф. Гончаревич. – М.: Машиностроение, 1972. – 328 с.
223. Спиваковский, А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины / А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.
224. Справочник по технологическому оборудованию сахарных заводов. Под ред. Беллина В.Г. – Киев: Техника, 1982. – 304 с.
225. Справочник по электрическим машинам. Копылов И.П. [и др.]; Под общей редакцией И.П. Копылова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 413 с.
226. Сычугов, Н.П. Механизация послеуборочной обработки зерна и семян трав / Н.П. Сычугов, Ю.В. Сычугов, В.И. Исупов. – Киров: ФГУИПП «Вятка», 2003. – 368 с.
227. Таранин, С.А. Исследование процессов шелушения ячменя с целью создания малогабаритного шелушителя горизонтально типа: автореф. канд. техн. наук. – М.: МГУПП, 2005. – 24 с.
228. Тарасенко, А.П. Современные машины для послеуборочной обработки зерна и семян / А.П. Тарасенко. – М.: КолосС, 2008. – 232 с.
229. Терсков, Г.Д. Расчет зерноуборочных машин / Г.Д. Терсков. – М.: Машгиз, 1989. – 206 с.
230. Тийсмус, Х.А. Линейные асинхронные двигатели. Опыт разборки, изготовления и применения / Х.А. Тийсмус, Ю.Я. Лаугис, Р.А. Тээметс // Труды Таллиннского политехнического института. – Таллин, 1986. – Вып. 627. – С. 15–25.
231. Трещев, И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока / И.И. Трещев. – Л.: Энергия. 1980. – 344 с.
232. Тропман А.Г. Вибрационные конвейеры для транспортирования горячих материалов / А.Г. Тропман, Н.И. Бельков, Ю.Н. Макеева. – М.: Машиностроение, 1972. – 120 с.
233. Туктаров, М.Ф. Экспериментальная установка зерноочистительной машины на базе плоского линейного электропривода / М.Ф. Туктаров // Молодежная наука и АПК: матер. междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвящ. 80-летию ФГОУ ВПО Башкирский ГАУ. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2010. – С. 84–86.
234. Туктаров, М.Ф. Экспериментальные исследования работы линейного электропривода решетчатого стана зерноочистительной установки / М.Ф. Тук-

таров // Научное обеспечение развития АПК в современных условиях: матер. Всерос. науч.-практ. конф.; в 3 т. / ФГОУ ВПО «Ижевская ГСХА». – Ижевск: Ижевская ГСХА, 2011. – Т. 3. – С. 197–202.

235. Турбин, Б.Г. Сельскохозяйственные машины / Б.Г. Турбин. – Л.: Машиностроение, 1967. – 582 с.

236. Федоренко, В.Ф. Зерноочистка – состояние и перспективы / В.Ф. Федоренко, Е.Л. Ревякин. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2006. – 204 с.

237. Филин, В.М. Шелушение зерна крупяных культур. Совершенствование технологического оборудования: учебное пособие / В.М. Филин, Д.В. Филин. – М.: ДеЛи принт, 2002. – 135 с.

238. Цециновский, В.М. Влияние геометрии «трудных» зерен и отверстий сита на условия сепарирования / В.М. Цециновский, И.Г. Шапиро // ВНИИЗ. – 1970. – Вып. 69. – С. 13–18.

239. Цециновский, В.М. Технологическое оборудование зерноперерабатывающих предприятий / В.М. Цециновский, Г.Е. Птушкина. – М.: Колос, 1976. – 367 с.

240. Чанов, Л.Г. Динамические методы определения механических характеристик линейных электроприводов строительного и подъемно-транспортного оборудования / Л.Г. Чанов: автореф. канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 1984. – 21 с.

241. Чеботарев, О.Н. Технология муки, крупы и комбикормов: учебное пособие / О.Н. Чеботарев, А.Ю. Шаззо, Я.Ф. Мартыненко. – М.: ИКЦ «МарТ», 2004. – 688 с.

242. Черных, И.В. Основы теории и моделирования линейного асинхронного двигателя как объекта управления / И.В. Черных, Ф.Н. Сарапулов. – Екатеринбург, 1999. – 228 с.

243. Чесонис, В.И. Характеристики ЛАД при заданном напряжении / В.И. Чесонис // Электротехника. – 1980. – № 10. – С. 47–52.

244. Чесонис, В.И. Применение математических методов для расчета характеристик ЛАД / В.И. Чесонис, И.П. Бекеркис // Электротехника. – 1981. – № 8. – С. 33–36.

245. Шагаргазин, А.С. Повышение эффективности транспортировки влажного сахара инерционным конвейером с линейным асинхронным электроприводом: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Шагаргазин Артур Саримович. – Челябинск, 2005. – 128 с.

246. Электропривод на базе двигателей с разомкнутым магнитопроводом для машин агропромышленного комплекса: отчет / ЧИМЭСХ Руководитель А.А. Пястолов. – Челябинск, 1987. – 49 с.

247. Энциклопедия / под ред. И.П. Ксеновича. – М.: Машиностроение, 2002. – 720 с.

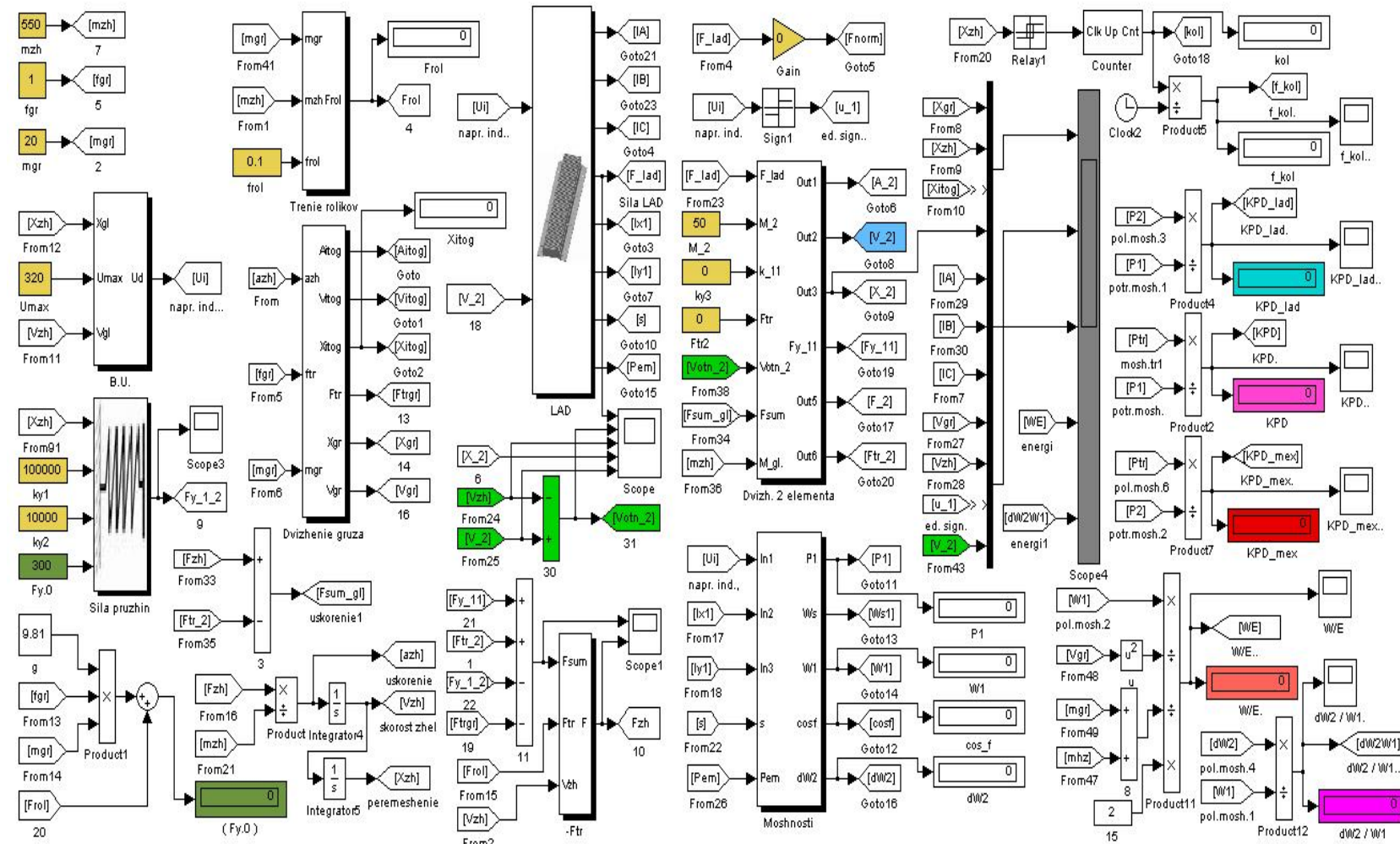
248. Ямамура, С. Теория линейных асинхронных двигателей / С. Ямамура. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 180 с.

249. Ямпиров, С.С. Технологическое и техническое обеспечение ресурсо-энергосберегающих процессов очистки и сортирования зерна и семян / Ямпиров С.С. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. – 262 с.

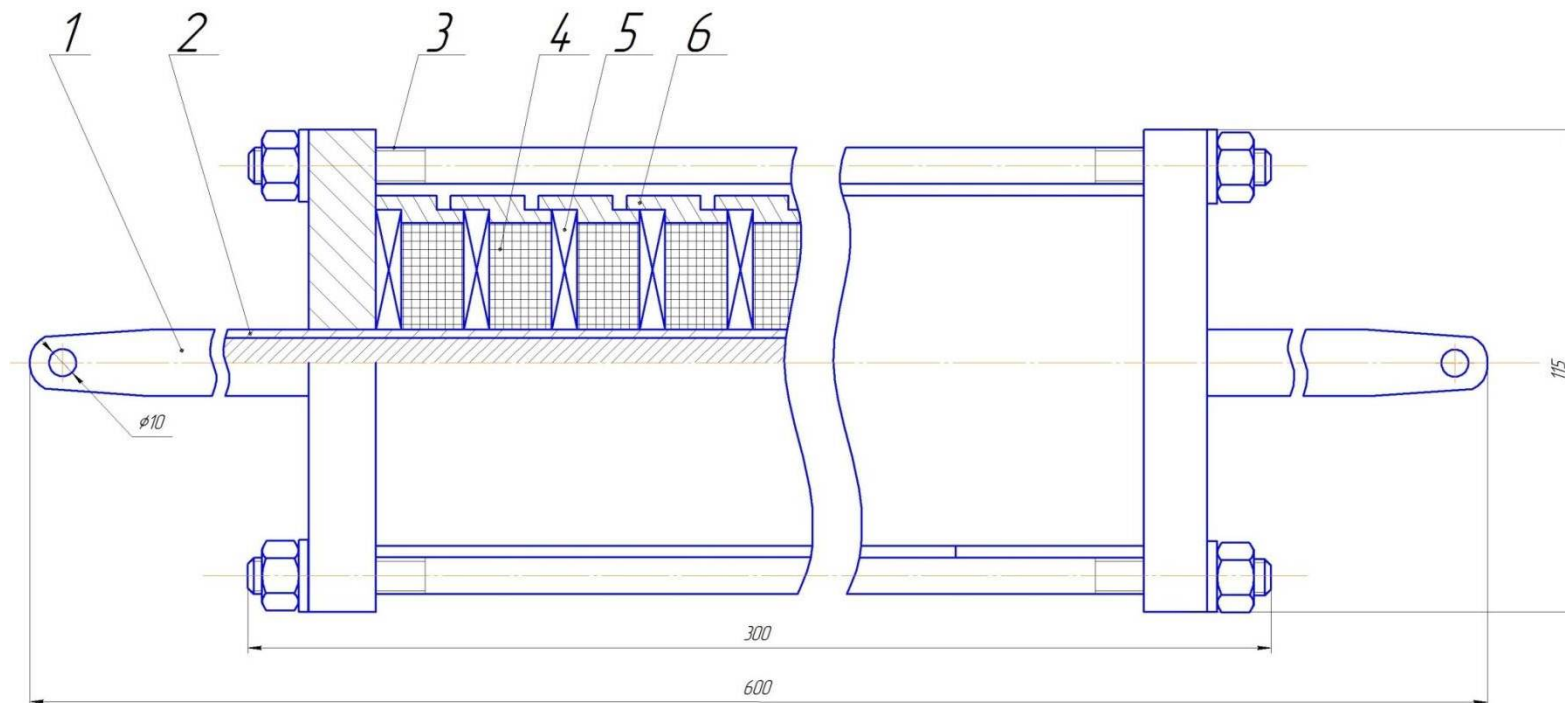
250. Яруллин, Р.Б. Повышение эффективности асинхронного электро-вибропривода с регулируемыми параметрами в технологических процессах АПК: на примере виброзерноочистительных машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.02 / Ринат Бариевич Яруллин. – Челябинск, 2011. – 371 с.
251. [http://www.force.co.uk/ Force Engineering. Linear Induction Motors](http://www.force.co.uk/Force%20Engineering.%20Linear%20Induction%20Motors).
252. <http://www.matlab.exponenta.ru> – Поддержка пользователей Matlab в РФ.
253. <http://www.matlab.exponenta.ru/Simulink/book1> – Черных И.В. Simulink Инструмент моделирования динамических систем.
254. <http://www.matlab.ru/conf2002> – Имитационное моделирование динамических характеристик колебательного линейного электропривода в SIMULINK.
255. Вальцедековый станок СГР-400 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.simo.com.ua/equip10.shtml> – 15.09.2011.
256. Сила трения знакомая, но таинственная А.А. Первозванский [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.abitura.com/collection/trenie.html> – 23.10.2011.
257. <http://www.law.optima.ru> – О федеральной целевой программе «Энергосбережение».
258. <http://monet.physik.unibas.ch> – Nonlinear dynamics of dry friction.
259. <http://www.potok-tm.ru/middle> – Вибрационные конвективные сушилки.
260. http://www.sugarindustry.ru/index_rus.shtml – Производство сахара. Аналитика.
261. <http://www.ukrfood.com.ua> – Портал сахарной промышленности Украины.
262. Laithwaite, E.R. Linear electric motors. London, Mills and Boon, 1971.
263. Laithwaite, E.R. Induction Machines for Special Purposes, New York: Chemical Publishing Co. Ltd, 1986, 377 pp.
264. Linenko, A.V. Cleaning of powders using a linear asynchronous motor / The 2-nd regional inter-university scientific and practical conference of young researchers and specialists with presentations in foreign languages. – Ufa: BSAU, 2001. – P. 13.
265. Paszek, W. Dynamika maszyn elektrycznych pradu przemiennego, Gliwice, Wydawnictwo HELION, 1998, 684 s.
266. Puchala, A. Dynamika maszyn i ukladow elektromechanicznych, Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1977, 335 s.
267. Nasar, S.A. Electromagnetic fields and forces in a linear induction motor, taking into account edge effects. – «Proc. IEE» London, 1969, v. 116, № 4.
268. 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.
269. Boldea, I. Linear Motion Electromagnetic Devices / I. Boldea. Taylor&Francis, 2001. – 270 s.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Основное окно математической модели инерционного конвейера с предварительным разгоном вторичного элемента ЛАД в приложении Simulink



Цилиндрический линейный асинхронный двигатель КВЭП



Рисунок

Общий вид цилиндрического линейного асинхронного двигателя КВЭП вальцедековой машины для шелушения зерна с хрупким ядром:
1 – вторичный элемент (бегун), 2 – медная лента, 3 – шпилька, 4 – катушка из медного провода, 5 – стальной диск, 6 – элемент корпуса

Учебное издание

Линенко Андрей Владимирович

**ЛИНЕЙНЫЕ
АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ
СЛОЖНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН АПК**

Учебное пособие

Технический и художественный редактор: *А. Е. Дереева*

Подписано в печать 09.12.2015 г. Усл.-печ. л. 10,70. Уч.-изд. л. 10,35. Заказ 577. Тираж 500 экз.
Формат бумаги 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Гарнитура «Таймс»

РИО ФГБОУ ВО БГАУ, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34