

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет электроэнергетический  
Кафедра Применения электрической энергии в сельском  
хозяйстве

Допущена к защите:  
Заведующий кафедрой,  
д.т.н., профессор Никитенко Г.В.

\_\_\_\_\_   
подпись  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021г.

Направление подготовки 35.03.06 Аргоинженерия  
Профиль Электрооборудование и электротехнологии в сельском  
хозяйстве  
Форма обучения: очная

## **БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**«Разработка устройства для съема плодов на  
основе линейного электродвигателя»**

**Выполнил:**

Мазинова Линара Энверовна

*подпись*

3 группа, 4 курс

\_\_\_\_\_ *дата*

Руководитель:

к.т.н., доцент Антонов С.Н.

*подпись*

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ *дата*

Ставрополь, 2021

СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет электроэнергетический

Кафедра Применения электрической энергии в сельском хозяйстве

Утверждаю:

Зав. кафедрой

ПЭЭСХ

д.т.н., профессор Никитенко Г.В.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

Студенту Мазиновой Линаре Энверовне

(фамилия, имя, отчество, курс, группа, направление подготовки/специальность, профиль, специализация, магистерская программа)

4 курс, 3 группа 35.03.06 – Агроинженерия

Тема ВКР: «Разработка устройства для съема плодов на основе линейного электродвигателя»

Утверждена приказом по университету № 554 от « 24 » апреля 2021 г.

1. Срок представления работы к защите « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_ г.

2. Исходные данные для выполнения работы Типовой проект,  
учебная, \_\_\_\_\_ техническая  
литература

3. Содержание бакалаврской работы: Введение. Состояние вопроса. Агротехнические требования к уборке плодов. Способы и технические средства для уборки плодов. Анализ стряхивателей плодов. Состояние исследований механизированного съема плодов стряхиванием. Моделирование линейного электродвигателя стряхивателя. Методы расчета электромагнитного поля линейного электродвигателя стряхивателя. Использование программного обеспечения ELCUT 6.3 при расчете магнитных полей. Общие сведения программного обеспечения ELCUT 6.3. Создание геометрической модели. Ввод параметров задачи. Решение задачи и анализ результата. Оптимизационные исследования параметров магнитной системы линейного электродвигателя стряхивателя. Выводы. Список Литературы.

4. Перечень графического материала (с полным указанием обязательных чертежей)

1. Презентация в формате pptx.

5. Консультанты по разделам

\_\_\_\_\_ (подпись) (инициалы, фамилия)

6. \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_ выдачи задания \_\_\_\_\_

7. Руководитель работы \_\_\_\_\_ Антонов  
С.Н.

\_\_\_\_\_ (подпись) (инициалы, фамилия)

Задание к исполнению принял «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.  
Мазинова Л.Э.

(подпись студента)

## **АННОТАЦИЯ**

Бакалаврская работа представлена пояснительной запиской на 67 страницах, содержащей 42 рисунка, 7 формул и 6 таблиц, графической частью, включающей презентацию в формате .pptx.

Данная работа посвящена проблеме сбора плодов и ягод. Проведён обзор существующих способов и аппаратов для сбора плодов и ягод. Приведена классификация стряхивателей по различным признакам. Выполнен расчет магнитного поля магнитной системы линейного электродвигателя садового стряхивателя с использованием программного обеспечения Elcut 6.3, а также оптимизационные исследования параметров магнитной системы.

В ходе оптимизационного исследования были составлены таблицы экспериментов с изменением силы тяги якоря в зависимости от изменения значений ширины немагнитной вставки и угла скоса полюсов.

ФГБОУ ВО СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГАУ

Факультет электроэнергетический

Кафедра «Применение электроэнергии в сельском хозяйстве»

Утверждаю:  
Зав. кафедрой ПЭЭСХ  
д.т.н., профессор Никитенко Г.В.

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021г

## **КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ** (бакалаврской работы)

Студента Мазиновой Линары Энверовны, 4 курс, 3 группа, 35.03.06 –  
Агроинженерия

(Фамилия, имя, отчество, курс, группа, направление подготовки)

Темы ВКР «Разработка стряхивателя для промышленного производства на  
основе линейного электродвигателя»

<b>№ п/п</b>	<b>Выполнение работ и мероприятия</b>	<b>Срок выполнения</b>
1	Выбор темы и оформление заявления на выполнение бакалаврской работы	28.01.2021
2	Подбор литературы, ее изучение и проработка.	30.01.2021
3	Составление плана работы и согласование его с руководителем	10.02.2021
4	Разработка и предоставление на проверку первой главы	10.03.2021
5	Накопление, систематизация и анализ практических материалов	20.03.2021
6	Сбор данных	10.04.2021
7	Проведение эксперимента	20.04.2021
8	Анализ полученных данных	10.05.2021
9	Разработка и предоставление на проверку второй главы	20.05.2021
10	Согласование с руководителем выводов и предложений	10.06.2021
11	Переработка (доработка) работы в соответствии с замечаниями	20.06.2021
12	Представление готовой работы на проверку руководителю	22.06.2021
13	Получение отзыва и заключения о степени оригинальности ВКР от руководителя. Получение рецензии.	26.06.2021
14	Предоставления работы, отзыва и заключения о степени оригинальности ВКР на кафедру для	26.06.2021

	прохождения предзащиты	
15	Получение допуска к защите от зав.кафедрой и получение рецензии	27.06.2021
16	Передача оформленной ВКР с отзывом, рецензией и заключением о степени оригинальности ВКР в государственную экзаменационную комиссию	27.06.2021

Руководитель ВКР: Антонов С.Н., к.т.н., доцент кафедры ПЭЭСХ

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Фамилия И.О., учёная степень, должность, место работы.

Студент: Мазинова Линара Энверовна

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Фамилия, имя, отчество

## ВВЕДЕНИЕ

Научно-исследовательская работа посвящена проблеме сбора плодов и ягод в сельскохозяйственных угодьях. С этой целью проанализирована имеющаяся литература на предмет существующих в настоящее время машин и механизмов, позволяющих провести качественную, соответствующую агротехническим требованиям сбор плодовых деревьев. Приведена классификация существующих конструкций машин и агрегатов, проведён обзор существующих стряхивателей на рынке, и произведён патентный поиск. На сегодняшний день наиболее эффективным видом энергии является электрическая энергия. Электрификация оборудования, применяемого при сборе плодовых насаждений, в отличие от других видов энергии, позволяет повысить производительность труда и минимизировать потери.

Основной проблемой существующих электрифицированных устройств для сбора плодов и ягод является передача вращательного движения электродвигателя рабочему полотну посредством преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное движение режущего полотна, для чего используются дополнительные конструктивные решения, что приводит к удорожанию и снижению надёжности конструкции стряхивателя.

Для решения этой проблемы поставлена задача, разработать конструкцию ручного электрифицированного стряхивателя, работающего на основе линейного электродвигателя, с возвратно-поступательным движением якоря, что позволит снизить вибрационные нагрузки и упростить конструкционные решения.



Проведено компьютерное моделирование магнитной системы двигателя программным комплексом ElCut с последующей оптимизацией магнитной системы.

## **1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА**

### **1.1 Агротехнические требования к уборке плодов**

Уборка урожая многолетних насаждений как стадия производства содержит последовательные виды работ: отделение плодов, перемещение и укладку их в тару, которая подлежит последующему транспортированию.

Работы должны выполняться своевременно с максимальным сохранением качества плодов, наименьшим отрицательным воздействием на деревья, соблюдением безопасных условий труда. Широкий диапазон изменения условий процесса уборки приводит к отставанию уровня механизации данного этапа производства от других этапов.

Проблема механизации уборочных работ приобретает особую актуальность при увеличении объемов производства плодов с минимальными затратами живого и овеществленного труда.

Рабочие процессы уборки урожая зависят от агрофона, который характеризуется в первую очередь свойствами деревьев и плодов. Такие свойства деревьев (таблица 1.1), как расположение, размерно-разветвляющие - признак системы выращивания плодовых насаждений.

Таблица 1.1- Свойства и показатели плодовых деревьев

Таблица 1.1

Свойства и показатели плодовых деревьев

Свойства деревьев	Показатели свойств
Расположение	Ширина междурядий Расстояние между деревьями Рабочий проход Угол наклона штамба к плоскости: – междурядья; – ряда
Размерно-разветвляющие	Высота: – дерева; – кроны; – штамба Свободный просвет под кроной Размер кроны: – вдоль ряда; – поперек ряда Диаметр штамба Число ветвей разного порядка Длина ветвей Диаметр ветвей Угол наклона ветвей к плоскости: – междурядья; – ряда
Распределение урожая	Степень неравномерности распределения: – по ярусам кроны; – по зонам кроны; – между деревьями
Механические	Приведенная масса Приведенный коэффициент жесткости Коэффициент демпфирования Частота свободных колебаний Коэффициент передачи по кроне: – частоты колебаний; – перемещения колебаний Предельный угол отклонения ствола и основных ветвей от положения равновесия Предел прочности коры при: – сжатии; – сдвиге вдоль волокон; – сдвиге поперек волокон

Система выращивания определяет способы и средства съема урожая, а при закладке новых насаждений должна учитываться перспектива развития средств механизации уборочных работ, то есть оптимальных результатов механизации можно достигнуть при комплексном усовершенствовании машин и насаждений.

Интенсификация садоводства предусматривает увеличение плотности размещения деревьев; объем крон в расчете на единицу площади снижается, вследствие чего возрастают рабочие проходы для машин. Высота деревьев влияет на производительность съема урожая вручную, а при применении уборочных технических средств увеличивается высота падения плодов, что влияет на их товарные качества.

Особенно неблагоприятные условия передачи колебаний к плодоносящим ветвям, контактирующим с кронами деревьев соседних рядов или с поверхностью междурядий. Отсутствие свободного пространства под кронами ухудшает условия работы технических средств, поскольку часть плодов может сниматься до момента перевода в рабочее положение улавливающих полотен

или других органов уборочных машин. В процессе подбора произвольно опавших плодов, а также при ручной уборке провисающие ветви препятствуют перемещению рабочих.

Перемещение плодов в таких кронах сопровождается многочисленными соударениями между собой и древесиной, вследствие чего повреждения урожая возрастают пропорционально плотности потока плодов. Наиболее приспособлены к механизированному съему дерева, в которых число основных ветвей не превышает четырех-шести.

Один из показателей режима стряхивания плодов - амплитуда колебаний точек соединения плодоножек с ветвями (точек подвеса плодов) (Рисунок.1.1).

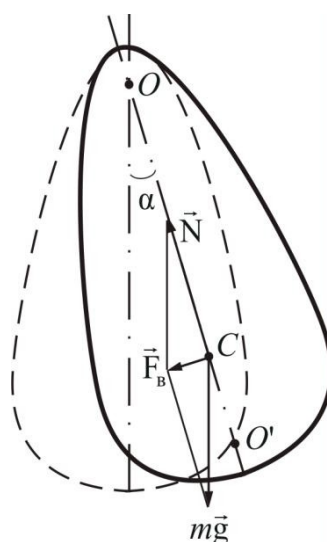


Рисунок 1.1 - Точка подвеса плодов.

Необходимая амплитуда отклонения ствола и основных ветвей от положения равновесия ограничивается возможностью повреждения корневой системы и кроны. Вынужденные колебания дерева зависят от массы, приведенной к месту приложения возмущающего усилия, сил жесткости и вязкого сопротивления отклонению, которые пропорциональны коэффициентам жесткости дерева и затухания колебаний (демпфирования).

С приближением точки приведения масс всего дерева к поверхности междурядья масса и жесткость возрастают и соответственно увеличиваются энергетические затраты на сьем плодов. Это обуславливает целесообразность приложения возмущающего усилия к центральным проводникам высокорослых деревьев со значительным диаметром штамбов. В местах взаимодействия деревьев со стряхивателями плодов может повреждаться кора пропорционально усилиям, возмущающим колебания.

Особо опасны усилия, направленные тангенциально к нагружаемой поверхности, поскольку стойкость коры к их восприятию значительно меньше в сравнении с нормальными нагрузками. Тангенциальные нагрузки могут вызывать отслоения коры, которые невозможно выявить сразу же после съема урожая, а проявляются уже в виде ее отмирания.

Запоздалая заделка скрытых повреждений очень часто не дает эффекта, потому что не предотвращает отмирание камбия. При отслоении и задирах коры дерево становится менее устойчивым к перепадам температур, вредителям и заболеваниям.

Съем плодов часто приводит к обламыванию ветвей высших порядков, что не оказывает отрицательного влияния на продуктивность многолетних насаждений. Повреждения штамбов в местах приложения возмущающих усилий могут влиять на плодоношение деревьев в последующие годы.

К основным свойствам плодов, определяющим условия процесса съема, относятся размерные, механические и расположение (таблица 1.2). Размеры плодов(высота, диаметр) - важные показатели для ручной уборки, при увеличении которых производительность труда увеличивается.

В процессе механизированного съема урожая стряхиванием размеры и пропорциональная им масса плодов менее значительно влияют на производительность труда, возрастающую соответственно уменьшению времени разгона стряхивателя до частоты, при которой силы инерции плодов превышают усилие их связи с ветвями. Плодовые культуры разных видов и частично сортов отличаются насыпной массой урожая, что необходимо учитывать при установлении силы тяжести заполненной тары.

Таблица 1.2 - Свойства и показатели плодов

Таблица 1.2

Свойства и показатели плодов	
Свойства плодов	Показатели свойств
Размерные	Высота плода Диаметр плода Длина плодоножки Диаметр плодоножки Приведенная длина плода как физического маятника
Расположение	Угол наклона плодоножки в плоскости: – междурядья; – ряда Угол естественного откоса
Механические	Масса плода Насыпная масса плодов Сила связи плодоножки с: – ветвью; – плодом Предел прочности плода при: – сжатии; – смятии Твердость плода Частота свободных колебаний Коэффициенты: – сопротивления качению; – сопротивления скольжению; – обтекаемости; – жесткости плодоножки; – демпфирования колебаний

На процессы механизированной уборки плодов также влияют свойства междурядий, в частности, от угла наклона поверхности междурядья к горизонтали зависит курсовая устойчивость мобильных машин во время перемещения вдоль ряда, их маневренность.

Снижение курсовой устойчивости отрицательно отражается на работе плодуборочных средств поточного действия, так как погрешность размещения машины относительно дерева может обусловить снижение полноты съема, повреждение дерева.

Аналогичные отрицательные последствия наблюдаются при работе на склоне машин позиционного действия вследствие их сползания вдоль склона. Следовательно, агротехнические условия уборки урожая плодовых культур, характеризующиеся в первую очередь свойствами деревьев и плодов, должны учитываться при обосновании технологических процессов уборки урожая, а также на стадиях разработки плодуборочной техники, обоснования ее параметров, технологической наладки и использования машин в конкретных производственных условиях[1].

## **1.2. Способы и технические средства для уборки плодов**

В зависимости от предметов труда, которые применяются в технологическом процессе уборки урожая плодовых культур, различают ручной, полумеханизированный, механизированный и роботизированный способы уборки. Значительной трудоемкостью и низкой производительностью труда характеризуется ручной способ, который реализуется преимущественно на уборке легкоповреждаемых плодов, предназначенных для закладки на длительное хранение и потребление в свежем виде. Снятые вручную плоды при перемещении в транспортную тару сначала накапливаются в плодуборочной таре, а потом завершается перемещение в ящики или контейнеры[2].

Ручную уборку плодов рационализируют различные средства, в частности, подставки, столы, лестницы, которые уменьшают непроизводительные затраты времени на перемещение сборщиков к верхним ярусам крон деревьев, улучшают условия и повышают безопасность труда. В качестве плодуборочной тары используются ведра, сумки и корзины различной конструкции (Рисунок 1.2)



Рисунок 1.2 – Ручной способ сбора плодов и ягод

Тара не должна обременять сборщика и препятствовать обрыванию плодов двумя руками и, кроме этого, должна предотвращать травмирование урожая, товарные качества которого повышаются вследствие выстилания внутренней поверхности ведер и корзин эластичным материалом, а также за счет уменьшения высоты падения плодов при подаче их в тару.

Применение поточных технологий позволяет уменьшить затраты ручного труда на перенос плодов в междурядьях, устранить цикл разгрузочно-погрузочных работ в саду.

Однако, низко производительный ручной способ не всегда позволяет убрать урожай в оптимальные агротехнические сроки, даже при условии широкого, дополнительного привлечения рабочих; это обуславливает понижение товарных качеств продукции, а иногда - потерю части урожая.

Характерная особенность полумеханизированного способа уборки плодов состоит в применении ручных съемников и стряхивателей, плодуборочных платформ (Рисунок 1.3)



Рисунок 1.3 – Полумеханизированный способ сбора плодов и ягод

Поштучный сьем плодов из верхних ярусов крон может осуществляться

ручными механическими, вакуумными или сьемниками-секаторами с улавливанием снятых плодов горловиной трубчатого спуска и последующим их затариванием.

В данном случае уменьшаются время и энергозатраты вспомогательного процесса уборки, который состоит в перемещении к месту съема плодов, и основного процесса - за счет перемещения урожая в транспортную тару. На уборке легкоповреждаемых плодов в специализированных садоводческих хозяйствах страны применяются платформы ПОС-0,5 и ПКО-0,7(Рисунок 1.4)

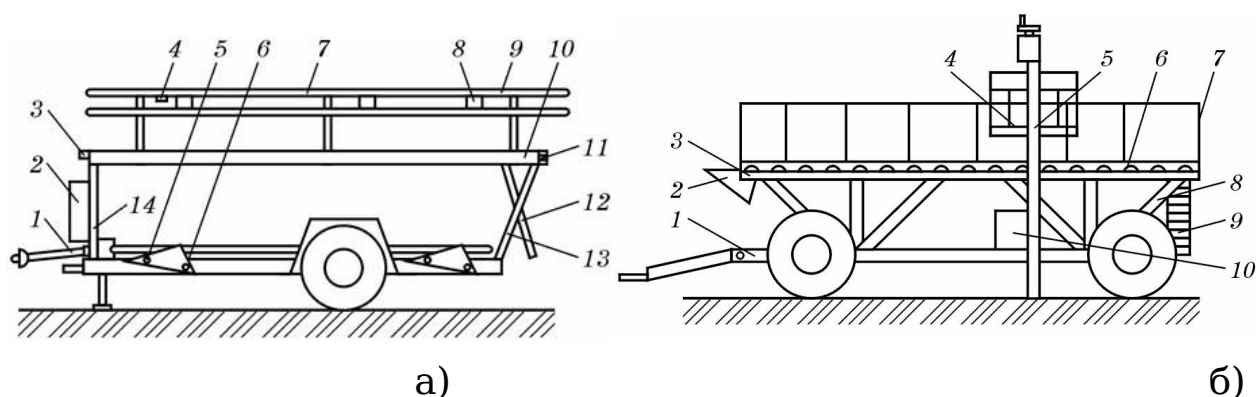


Рисунок 1.4 - а) Плодоуборочная платформа ПОС-0,5 б) Плодоуборочная платформа ПКО-0,7



За рубежом в странах с развитым садоводством платформы также являются основным техническим средством для уборки легкоповреждаемых плодов. Первым этапом механизации одновременного, массового съема плодов стала разработка ручных вибрационных стряхивателей, составляющих вместе с энергетической установкой и улавливателем плодов уборочный агрегат. Перечень и конструкция других составных частей стряхивателей зависит от уровня их технического выполнения.

Ручные вибрационные стряхиватели плодов, комплексно используемые с улавливающими приспособлениями, в сравнении с ручной уборкой позволяют повысить производительность труда в два раза и могут эффективно применяться на агрофоне, недоступном для мобильных энергетических средств.

Облегчение условий труда, дальнейшее повышение ее производительности за счет одновременного съема плодов со значительного объема или всей кроны обеспечивается внедрением механизированного способа уборки урожая многолетних насаждений, характерным признаком которого является использование плодуборочных машин (агрегатов).

В общем случае реализации данного способа технологический процесс уборки (Рисунок 1.5) содержит такие основные рабочие процессы, как съем, улавливание, транспортировку, очистку и затаривание плодов, а также вспомогательный процесс - подачу машины к месту работы.



Рисунок 1.5 – Рабочие процессы

В случае сбора плодов машинами поточного действия часть этапа вспомогательного процесса, которая заключается в отведении рабочих органов, реализуется одновременно с перемещением машины. Рабочие органы могут выключаться или не выключаются в зависимости от принципа действия и уровня автоматизации технологического цикла машины, перемещение которой совмещается с подводом рабочих органов к следующему дереву.

Эффективность технологического процесса механизированной уборки плодов характеризуется следующими показателями: полнотой уборки, сбора и съема; содержанием примесей; повреждениями плодов, кроны, корневой системы, коры ствола или основных ветвей в месте приложения возмущающей силы.

На эффективность уборки преимущественно влияют основные рабочие процессы, о чем свидетельствует сравнительная оценка, выполненная на основании метода расстановки приоритетов, согласно которого в матрице (Таблица 1.3) расставляются коэффициенты преимуществ.

Если процесс  $i$ -ой строчки имеет преимущество над процессом  $j$ -го столбца, тогда коэффициент принимается равным 1,5, а при условии одинаковой или меньшей значимости - соответственно 1,0 или 0,5.

Таблица 1.3 – Матрица приоритетов процессов механизированной уборки плодов

Матрица приоритетов процессов механизированной уборки плодов

Процесс	Коэффициенты преимуществ					$\Sigma k_i$	$P_{ij}$	$\lambda_i$	Ранг
	1	2	3	4	5				
1. Съем	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	7,0	34,0	0,296	1
2. Улавливание	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	6,0	27,5	0,239	2
3. Транспортировка	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	3,0	14,0	0,122	5
4. Очистка	0,5	0,5	1,5	1,0	1,5	5,0	22,0	0,191	3
5. Затаривание	0,5	0,5	1,5	0,5	1,0	4,0	17,5	0,152	4

Всем рабочим процессам механизированного сбора плодов должно уделяться всестороннее внимание на стадиях исследования, проектирования и реализации в условиях производства, однако первоочередному исследованию подлежит неотъемлемый и наиболее весомый процесс - съем плодов. Плодоуборочные машины, используемые при механизированной уборке(Рисунок 1.5)



Рисунок 1.5 – Механизированный способ сбора плодов и ягод  
Подразделяются на разные типы за следующими признаками:  
способом агрегатирования - прицепные, полуприцепные,  
навесные и самоходные;

прерывностью движения - позиционные, поточного действия;  
рабочим циклом - с частичным и завершенным циклом;  
способом съема - стряхивающего типа (вибрационные,  
виброударные, ударные);

бесконтактные (пневматические, гидравлические);

непосредственного механического действия на плоды.

Самоходная плодуборочная машина (агрегат) с завершенным технологическим циклом содержит энергетическое средство, на котором с использованием вспомогательного оборудования смонтированы рабочие органы: устройство для съема плодов, улавливатель, система транспортировки, очиститель, затариватель.

Привод активных органов обеспечивается в основном гидравлическими и механическими передачами, а их включение и выключение осуществляется органами управления. Структурная схема агрегатов для механизации уборочных работ (Рисунок 1.6), осуществляемых по двухфазной технологической схеме, включает устройство для съема плодов, навешенное с использованием вспомогательного оборудования на энергетическое средство, привод и органы управления, а также может включать улавливатель в виде полотен, которые расстилаются под деревом или натянуты на жесткий каркас

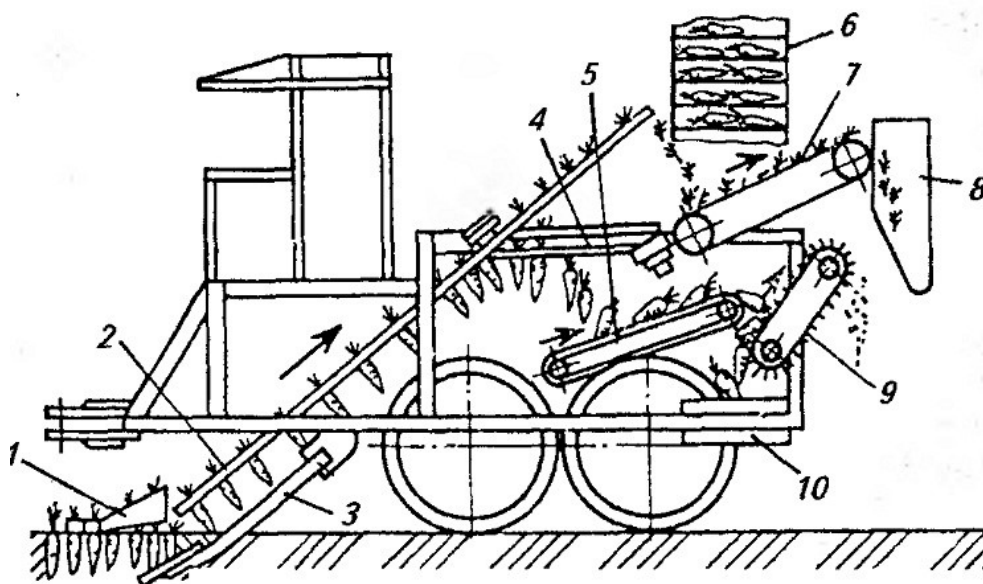


Рис. 1.6 - Структурная схема агрегатов для механизации уборочных работ

В течение последних двух-трех десятилетий создаются и апробируются в производственных условиях бесконтактные машины пневматического действия.

Однако в большинстве случаев уровень их разработки определяется отдельными экспериментальными образцами, которые совершают сьем плодов воздушным потоком высокого давления или под действием напора воздуха и сил инерции, обусловленных колебанием плодов вследствие пульсации воздушного потока.

Пневматические машины имеют высокую производительность, обеспечивают качественный сьем плодов, не нуждаются в соблюдении специальных требований к формированию кроны и штамбов, практически не повреждают деревья. Однако они характеризуются высокой энерго- и металлоемкостью, требуют специальных улавливающих приспособлений .

Менее энергоемкие гидравлические машины, отделяющие плоды струей воды, направленной на крону. Машины отличаются

значительным расходом воды и соответственно большой эксплуатационной массой; чрезмерно снимают листья, повреждают плоды, требуют применения улавливателей с высокими демпфирующими свойствами.

На данный момент роботизированный способ (Рисунок 1.7) – это наиболее перспективно развивающийся способ сбора урожая, при этом на данном этапе выявлены следующие недостатки: отсутствие универсального программного обеспечения по определению спелости плодов и ягод, отсутствие методики проектирования устройств роботизированного сбора урожая, низкая производительность и эффективность устройств.



Рисунок 1.7 – Роботизированный способ сбора плодов и ягод

Следовательно, наибольшей перспективностью отличается роботизированный способ уборки плодов и ягод. Устройства для съема плодов (стряхиватели) являются обязательными рабочими органами таких машин с разным уровнем организации технологического цикла, включая агрегаты для двухфазной технологии уборки плодовых культур.

### **1.3. Анализ стряхивателей плодов**

Устройства для съема плодов стряхивающего типа определяют режимы технологической цепи работ, базирующиеся на обеспечении высокой полноты и качества съема плодов,

устранении отрицательного влияния средств механизации на урожайность сада, обеспечении безопасных условий труда.

Основные составляющие части проблемы съема плодов с использованием стряхивателей заключаются в установлении закономерностей:

- колебания дерева в месте приложения возмущающего усилия;
- передачи частоты и амплитуды колебаний к точкам подвеса плодов;
- движения точек подвеса и плодов.

Пути решения проблемы предусматривают анализ стряхивателей плодов, в том числе средств защиты деревьев от повреждений, и исследование процесса механизированного съема урожая. В стряхивателях плодов находят применение инерционные, кинематические и принудительные, гидравлические и пневматические возбудители колебаний, которые наиболее полно отвечают: требованиям формирования мобильных агрегатов, работающим в полевых условиях; возможностям применения привода серийных мобильных энергетических средств (тракторов и шасси), на которых монтируются стряхиватели; параметрам процессов съема плодов; безопасности жизнедеятельности.

Центробежный вибровозбудитель - это инерционное устройство с вращательным движением инерционного элемента. Сила, генерируемая во время вращения данного элемента, преимущественно содержит нормальную составляющую силы инерции. Центробежные возбудители колебаний подразделяются на дебалансные и планетарные. (Рисунок 1.8)

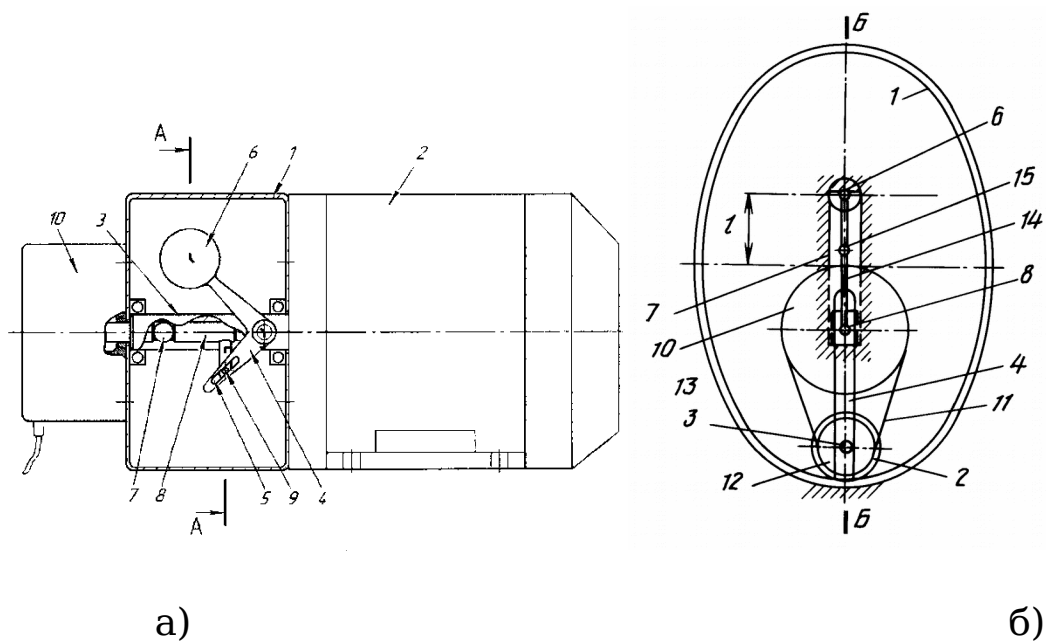


Рисунок 1.8 - а) Центробежный дебалансный

вибровозбудитель, б) Центробежный планерный вибровозбудитель

В дебалансных - инерционный элемент (дебаланс) не уравновешен относительно оси вращения.

Планетарные возбудители содержат инерционный элемент (бегунок), который перемещается по беговой дорожке корпуса. Совместным действием достаточного набора синхронных круговых сил, создаваемых центробежными вибровозбудителями, получаются различные одночастотные возмущающие силы и моменты.

Преимущества центробежных возбудителей колебаний состоят в следующем:

- простоте конструкции;
- возможности достижения высокого отношения амплитуды генерируемой силы к массе вибровозбудителя;
- широком диапазоне рабочих частот;
- удобстве регулировки частоты колебаний;
- простоте согласования совместного действия двух или нескольких возбудителей на одном рабочем органе машины;



- низкой чувствительности к внешним нагрузкам[3].

К недостаткам указанных устройств относятся сравнительно невысокий ресурс, сложность независимой регулировки частоты и амплитуды возмущающей силы, продолжительность переходного процесса при остановке.

Кроме центробежных, к инерционным возбудителям также относятся устройства с прямолинейным возвратно-поступательным движением инерционного элемента, например, устройства с кривошипно-шатунным механизмом.

Различают кинематические и гидравлические возбудители с регулируемой и нерегулируемой амплитудой колебаний. (Рисунок 1.9)

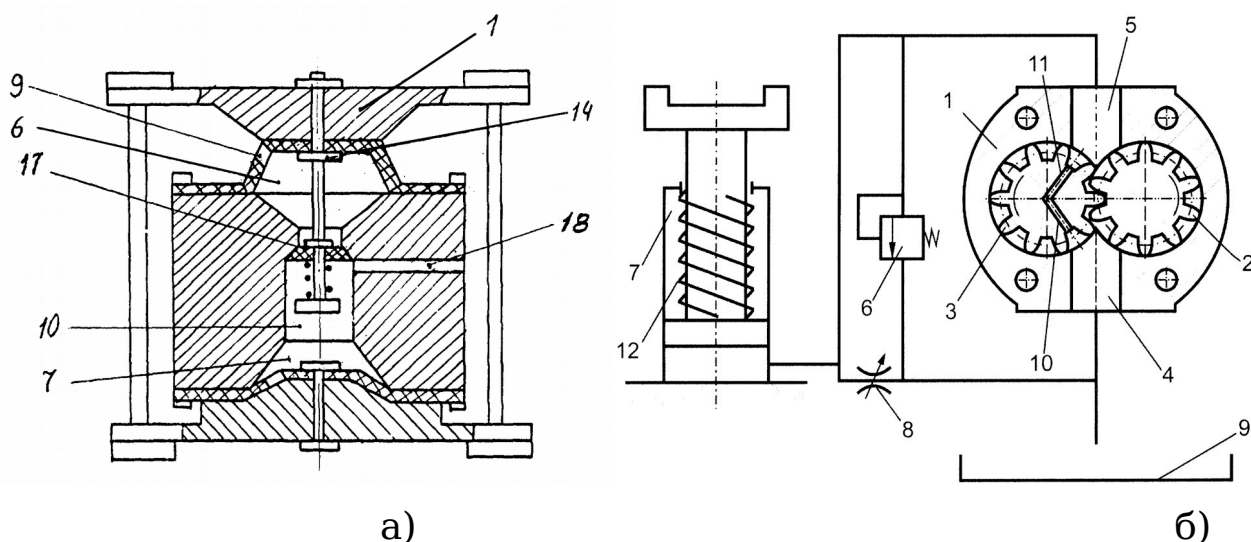


Рисунок 1.9 - а) Кинематический вибровозбудитель б)

### Гидравлические вибровозбудители

Кинематические и принудительные вибровозбудители целесообразно применять в низкочастотных машинах при условии необходимости создания больших возмущающих сил и амплитуд колебаний.

При использовании двигателей с регулируемой частотой вращения получается привод с широким диапазоном изменения

рабочих частот. Используя регулируемые эксцентрики, можно также изменять амплитуду колебаний.

Гидравлические вибровозбудители обеспечивают колебания рабочего органа вибромашины вследствие использования пульсирующего источника рабочей жидкости или прерывания постоянного по расходу потока золотниковым приспособлением. По принципу действия данные возбудители подразделяются на пульсаторные, автоколебательные, следящие и самоуправляемые.

Вибровозбудители первого типа обеспечивают привод рабочего органа пульсирующим потоком жидкости, в автоколебательных и самоуправляемых гидравлических устройствах периодическая возмущающая сила создается при условии питания рабочей жидкостью от магистрали постоянного давления вследствие автоматического периодического подвода и отвода жидкости специальной распределительной системой. Давлением рабочей жидкости регулируется частота колебаний, а амплитуда - зазором в обратной связи автоколебательного устройства или смещением специальных упоров самоуправляемых вибровозбудителей.

Конструкция хватных приспособлений определяется формой, массой, соотношением размеров и физико-механическими свойствами объектов манипулирования, условиями реализации технологического процесса.

В соответствии с выполняемыми функциями наиболее распространены хватно-удерживающие приспособления, к которым относятся захваты стряхивателей плодуборочной техники, обеспечивающие охват, удерживание и передачу деревьям возмущающих усилий.

Широкое применение в плодуборочных средствах приобрели захваты с механическим принципом действия. Учитывая принципы деления механических захватно-удерживающих приспособлений и особенности их конструкций в плодуборочных технических средствах, предложена классификация захватов стряхивателей плодов (таблица 1.4) по таким признакам: назначение, место расположения, вид привода, тип механизма передачи приводного усилия, конструктивное исполнение захватных элементов и вид их движения.

Различают захваты плодуборочной техники, предназначенные для основных ветвей и центральных проводников, многостебельных культур, штамбов. Захваты первого вида назначения монтируются на вибрирующем штоке или корпусе возбuditеля колебаний и в плодуборочных машинах преимущественно имеют гидравлический привод, хотя известен и пневматический - в ручных стряхивателях плодов. Зажимы захватных приспособлений могут быть рычажными, осевого действия, эластичными и комбинированными.

Таблица 1.4 Классификация захватов стряхивателей плодов

Признак	Захваты
Назначение	Основные ветви и центральные проводники Многостебельные культуры Штамбовые
Место расположения	Шток вибровозбудителя Корпус вибровозбудителя
Вид привода	Гидравлические Пневматические
Тип механизма передачи приводного усилия	Осевого зажима Рычажные Эластичные Комбинированные
Конструктивное исполнение захватных элементов	С плоскими и фигурными губками (подушками) Крюковые Петлевые Вильчатые Гребенчатые Комбинированные
Вид движения захватных элементов	Поступательное Вращательное Плоское

Незначительными нагрузками коры отличаются захватные приспособления эластичного типа, один из конструктивных вариантов которых предусматривает использование гофрированных шлангов, охватывающих древесину.

Стряхиватель плодуборочного комбайна КПУ-2(Рисунок 1.10) содержит захват рычажного типа, в котором рычаги имеют общую ось вращения и приводятся в действие гидроцилиндром. Эластичные подушки в виде половины цилиндра и фартуки,

которые их охватывают, уменьшают нагрузки и соответственно повреждения коры. Захвату соответствуют упрощенные механизмы навески на энергетическое средство и манипулирования.

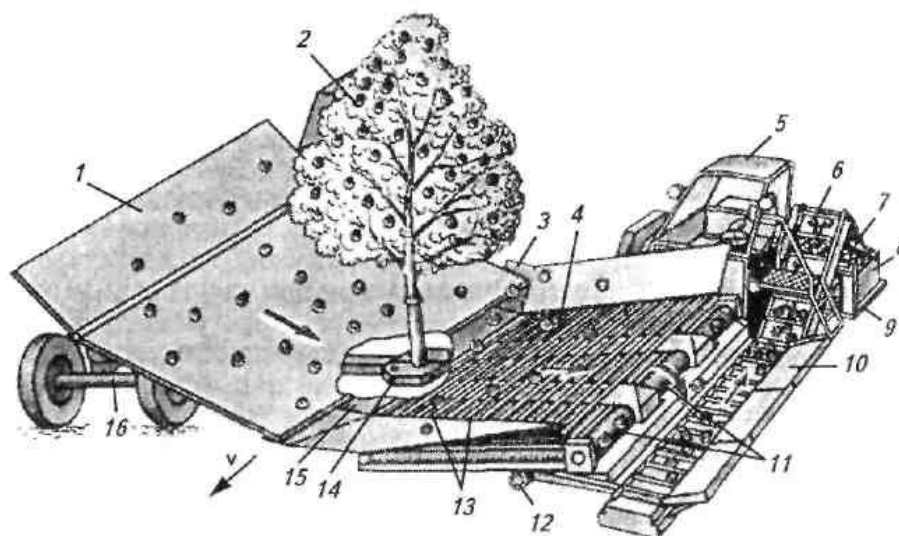


Рисунок 1.10 – Рабочий процесс плодуборочного комбайна КПУ-2А

По способу возбуждения и передачи колебаний деревьям различают вибрационные стряхиватели плодов с принудительными и кинематическими, гидравлическими, пневматическими, инерционными возбудителями колебаний, а также виброударные и ударные устройства[4].

Анализ инерционных линейных и дебалансных стряхивателей плодов подтверждает, что каждой из этих двух конструкций свойственны особенности, обусловленные принципом работы вибровозбудителя.

Стряхиватели с инерционными линейными вибровозбудителями отмечаются невысоким диапазоном возмущающих сил и охвата кроны колебаниями, однако позволяют уменьшить касательные нагрузки на кору.

Дебалансные вибровозбудители обеспечивают повышение возмущающих сил, передачи колебаний в разные зоны кроны, но

кора в месте захвата воспринимает существенные касательные нагрузки.

В процессе работы стряхивателя, который перемещается вдоль ряда деревьев, вращается ротор под действием моментов сопротивления вращению дебалансов и передач их привода. В момент контакта роликов со штамбом кинетическая энергия стряхивателя импульсно передается дереву. Пружинно-ударный стряхиватель включает поворотный в горизонтальной плоскости подпружиненный рычаг, который кинематически соединен с приводом установки его в исходное положение.

Рычаг в данном положении удерживается фиксатором, связанным тягой с датчиком определения момента удара. На свободном конце поворотного рычага установлен с возможностью вращения обремененный ролик. Агрегат направляется по междурядью так, чтобы датчик момента удара касался штамба.

Вследствие этого фиксатор освобождает поворотный рычаг, который под действием пружины ускоренно поворачивается и ударяет роликом по штамбу, обеспечивая съем плодов. Пружинные стряхиватели оснащаются двумя поворотными рычагами, которые наносят удары по штамбам на разных высотах посредством роликов или плоских бичей, оснащенных эластичными подушками.

Основное преимущество процесса съема плодов с использованием ударных стряхивателей состоит в обеспечении ускорений плодоносных ветвей, достаточных для достижения агротехнически необходимой полноты съема урожая, при меньших амплитудах колебаний и затратах энергии в сравнении с вибрацией.

Условия и требования защиты плодовых деревьев от механических повреждений зависят от способов, средств и

режимов механизированного съема урожая. В соответствии с уровнем существенности повреждений деревьев основное внимание уделяется созданию средств защиты коры в местах взаимодействия с рабочими органами стряхивателей плодов.

Оборудование плодуборочных машин захватными приспособлениями, которые после охвата и зажима дерева фиксируются в закрытом положении специальными замками, обеспечивает уменьшение нагрузок коры вследствие устранения ударов непосредственно по ней. Также уменьшается затухание колебаний во время их передачи плодовым деревьям.

Таким образом, по способу возбуждения и передачи колебаний деревьям различают вибрационные стряхиватели плодов с принудительными и кинематическими, гидравлическими и пневматическими, инерционными возбудителями колебаний, а также виброударные и ударные устройства.

В серийных плодуборочных машинах наиболее широко применяются инерционные линейные и дебалансные стряхиватели. При условии изыскания способов и средств повышения возмущающих сил инерционных линейных стряхивающих устройств, указанные устройства могут иметь преимущественное применение в сравнении с дебалансными, как такие, что позволяют уменьшить нагрузку и повреждения коры в месте захвата. Виброударный съем плодов способствует улучшению условий их отделения аналогично случаю ударного стряхивания деревьев, защита которых от повреждений - важный фактор улучшения состояния и урожайности многолетних насаждений.

## **1.4 Состояние исследований механизированного съема плодов стряхиванием**

Обоснованием механизированных плодуборочных работ, которое включает исследование многолетних насаждений, изучение взаимодействия стряхивающих устройств с деревом и отделения плодов, занимались Варламов Г. П., Демидко М. Е., Утков Ю. А., Беренштейн И. Б., Хайлис Г. А., Хачатрян Х. А., Зельцер В. Я., Кульчиев Б. Х., Брутер И. М., Черников В. А., Четвертаков А. В., Цымбал А. А., Кротов А. М., Бычков В. В. и другие ученые.

Проведенные исследования многолетних насаждений освещают такие свойства деревьев, как расположение, размерно-разветвляющие, распределение урожая, механические, а также свойства плодов, в частности, размерные, механические, расположение. Размерно-разветвляющие показатели и показатели расположения деревьев, распределение урожая устанавливались по общепринятым методикам, используя стандартные средства для определения массы, линейных размеров и углов с необходимой точностью. Важными применительно к механизации плодуборочных работ являются показатели механических свойств деревьев, в частности, приведенные масса и коэффициент жесткости деревьев; демпфирование и частота колебаний; коэффициенты передачи частоты и перемещения колебаний в кронах; предельный угол отклонения стволов; предел прочности коры.

Основные характеристические параметры периодического колебательного процесса — это перемещение и частота, по значениям которых в месте приложения возмущающего усилия и в разных точках кроны можно оценивать охват дерева колебаниями.



Теоретические исследования позволяют установить закономерность изменения колебаний вдоль ствола. Допустив, что их параметры постоянны для всех точек поперечного сечения кроны, оценивается передача колебаний в разные точки подвеса плодов.

Аналогичную оценку можно выполнить на основании теоретически полученных результатов, считая параметры колебаний разных точек отдельной основной ветви постоянными и идентичными закономерности перемещений определенной сосредоточенной массы модели дерева.

В результате сопоставления указанных параметров вертикальной консоли, моделирующей штаб, и сосредоточенных масс устанавливается распространение колебаний в кроне. Более точные результаты, учитывающие разнообразие плодовых деревьев, получаются экспериментальным путем.

В частности, исследования закономерностей распространения волн в стволе и ветвях деревьев при съеме плодов стряхиванием, выполненные посредством скоростной киносъемки, свидетельствуют об образовании стоячих волн в стволе и ветвях на установившихся режимах работы стряхивателя. В местах образования узлов ствол и ветвь практически не получают колебаний, поэтому расположенные рядом плоды не отделяются. Более точные результаты исследования распространения колебаний достигаются при одновременной регистрации колебательного процесса в месте приложения возмущающего усилия и разных точках кроны посредством акселерометров[5].

Взаимодействие стряхивателей плодов с деревом наиболее полно отражается на основании системного анализа; в качестве

отдельных элементов системы рассматриваются модели дерева и стряхивателей.

Простотой и точностью полученных результатов отмечается модель плодового дерева в виде сосредоточенной массы с одной или двумя степенями свободы, например, массы, расположенной на свободном конце невесомого упругого стержня, другой конец которого защемлен.

Физическая модель системы "инерционный линейный стряхиватель - дерево", которая обеспечивает учет воздействия на процесс колебаний каждого отдельного элемента системы, представлена в виде приведенной массы дерева  $m$ , связанных с деревом частей стряхивателя  $m_1$  и его подвижных частей  $m_2$ . Массы осуществляют линейные перемещения, направленные перпендикулярно к продольной оси ствола, который характеризуется коэффициентами жесткости  $C$  и вязкого сопротивления  $C_B$ ; аналогичные коэффициенты захвата -  $C_1, C_{B1}$  стряхивателе кривошипно-шатунного типа радиус кривошипа составляет  $r$ , длина шатуна -  $l$ , расстояние от плоскости крепления подушек захвата к пальцу шатуна -  $L$ .

При условии выполнения стряхивающего устройства на базе линейного гидродвигателя, приняв  $\alpha=r/l$  равным нулю и рассматривая  $z$  как половину хода гидродвигателя с возвратно-поступательным движением штока, системе "инерционный линейный стряхиватель - дерево" соответствует идентичная физическая модель.

В обоих случаях дифференциальные уравнения движения системы записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2 x &= a_2 R - b_2 \ddot{x}_1; \\ \ddot{x}_1 + 2n_1\dot{x}_1 + k_1^2 x_1 &= a_1 R - \ddot{x}, \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

(1.1)

где  $x$  - отклонение штамба;  
 $n = c_B / 2m$  - коэффициент демпфирования дерева;  
 $k = \sqrt{c/m}$  - частота свободных колебаний дерева;  
 $a_2, b_2, a_1$  - соотношение масс ( $a_2 = m_2 / (m + m_1 + m_2)$ ,  $b_2 = (m_1 + m_2) / (m + m_1 + m_2)$ ,  $a_1 = m_2 / (m_1 + m_2)$ );  
 $R$  - функция, характеризующая привод стряхивателя;  
 $x_1$  - деформация подушки захвата;  
 $n_1 = C_{B1} / 2m_1$  - коэффициенты демпфирования подушек;  
 $k_1 = \sqrt{c_1/m_1}$  - частота свободных колебаний связанных с деревом частей стряхивателя.

Функция  $R$  составляет:

$$R = r\omega^2 (\cos \omega t + \lambda \cos 2\omega t), \quad (1.3) \quad (1.2)$$

где  $\omega$  - угловая скорость (циклическая частота) привода;  $t$  - время в заданный момент работы стряхивателя.

Пятью степенями свободы характеризуется физическая модель системы "дебалансный стряхиватель - дерево", учитывающей деформацию подушек захвата, отличие в двух взаимно перпендикулярных направлениях приведенных характеристик дерева, упругих и диссипативных показателей подушек, а также круговые колебания стряхивателя.

Модель системы представлена массами дерева, дебалансов и стряхивателя без учета дебалансов; движение системы описывается пятью дифференциальными уравнениями. Физические модели системы "импульсный стряхиватель - дерево" могут

базироваться на оценке только дерева и силовых импульсов или, кроме этого, учитываются подушки рабочего органа.

В обоих случаях модель дерева представляется в виде приведенной массы  $m$ , расположенной на консольно закрепленном упругом стержне и совершающей линейные перемещения. Учитывая деформацию  $x$  подушек рабочих органов уравнение движения штамба в месте нанесения удара:

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2 x = 2n_1\dot{x}_1 + k_1^2 x_1. \quad (1.4)$$

(1.3)

На основании теоретического анализа систем "стряхиватель - дерево" определяются их параметры: кинематические - амплитуда (перемещение) и частота колебаний; динамические - возмущающее усилие, напряжение коры. Теоретический анализ напряжений коры в месте взаимодействия со стряхивателем сводится к решению контактной задачи на основании уравнения Гельмгольца. Для этого предварительно устанавливаются размеры участка контакта эластичной подушки стряхивателя с цилиндрической поверхностью коры. Всесторонние исследования процесса отделения плода вследствие вибрации дерева, начиная с установления закономерности движения точки подвеса, впервые проведены Варламовым Г. П.

Плод рассматривался как простой физический маятник, точка подвеса которого независимо от расположения в кроне осуществляет гармонические колебания, направленные вдоль горизонтальной линии. Учитывая переносное и относительное движение маятника и приняв за обобщенную координату угол  $\varphi$  его отклонения от вертикали, на основании уравнения Лагранжа

второго рода записываем дифференциальное уравнение колебаний плода:

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = \frac{av^2}{l} \sin \omega t, \quad (1.5)$$

(1.4)

где  $a$ ,  $V$  - амплитуда и циклическая частота колебаний точки подвеса;

$l$  - приведенная длина плода как физического маятника;

$\omega = \sqrt{g/l}$  - циклическая частота колебаний плода.

Решение уравнения записывается в виде:

$$\varphi = \frac{av^2}{l(\omega^2 - v^2)} \left( \sin vt - \frac{v}{\omega} \sin \omega t \right). \quad (1.6)$$

(1.5)

Закономерность углового перемещения плода является результатом сложения свободных и вынужденных гармонических колебаний, которые имеют в общем случае разные амплитуды, частоты и фазы. Нормальная и тангенциальная силы инерции, которые соответствуют относительному движению плода, равняются:

$$\Phi_n = \frac{m}{l} \left[ \frac{av^3}{\omega^2 - v^2} (\cos vt - \cos \omega t) \right]^2; \quad (1.7)$$

$$\Phi_\tau = \frac{mav^3}{\omega^2 - v^2} (\omega \sin \omega t - v \sin vt). \quad (1.8)$$

(1.6-1.7)

Сопоставляя полную силу инерции  $\Phi = \sqrt{\Phi_n^2 + \Phi_t^2}$  со статическими усилиями отделения плодов, устанавливаются оптимальные режимы колебаний деревьев. Исследования Варламова Г. П. нашли продолжение в работах, в которых рассматривается уравнение движения простого физического маятника.

Углубленный анализ отделения плода вибрационным способом базируется на гипотезах о наличии упругой связи между плодами и ветвью и об изгибе плодоножки. Также рассматривается влияние на эффективность процесса съема параметров круговых горизонтальных и эллиптических вертикальных колебаний точек подвеса.

Оригинальность подходов к обоснованию режимов механизированного съема ягод стряхиванием, модель которых представляется в виде физического маятника, заключается в направленном съеме урожая на улавливатель, повышении эффективности съема замерзших ягод. Исследование более сложных моделей плодов обеспечивает получение данных, которые отличаются от результатов, соответствующих модели плода в виде физического маятника.

Поэтому при исследовании вибрационного съема урожая многолетних насаждений, а также съема виброударным и ударным способами необходимо уточнение модели физического маятника.

## **2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СТЯХИВАТЕЛЯ**

### **2.1 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СТЯХИВАТЕЛЯ**

Для расчета электромагнитного поля линейного электродвигателя могут быть применены следующие методы:

- цепной метод расчета;
- метод конечных разностей;
- метод интегральных элементов;
- метод конечных элементов.

Многочисленные аналитические подходы не обеспечивают должной точности, а во многом дают противоречивые результаты. Поэтому для расчета устройств сложной конфигурации особенно эффективен метод конечных элементов (МКЭ). Благодаря универсальности метода, решение можно получить и для линейного электродвигателя садовой ножовки.

Суть метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину (индукция или напряженность магнитного поля) можно аппроксимировать моделью, состоящей из отдельных элементов (участков). На каждом из этих элементов исследуемая непрерывная величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, которая строится на значениях исследуемой величины в некоторых внутренних точках области («узлы»). Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области.

В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна, и нужно определить значения этой величины в некоторых внутренних точках области. Однако, если сначала предположить, что числовые значения этой величины в каждой внутренней точке области известны, то очень легко построить дискретную модель. После этого можно перейти к общему случаю. Итак, при построении дискретной модели непрерывной величины поступают следующим образом:

1. Область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области.

2. В рассматриваемой области фиксируется конечное число точек. Эти точки называются узловыми точками или просто узлами.

3. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке первоначально считается известным, однако необходимо помнить, что эти значения в действительности еще предстоит определить путем наложения на них дополнительных ограничений в зависимости от физической сущности задачи.

4. Используя значение исследуемой непрерывной величины в узловых точках и ту или иную аппроксимирующую функцию, определяют значение исследуемой величины внутри области.

Главным недостатком метода конечных элементов является необходимость в составлении вычислительных программ и применении вычислительной техники. При использовании МКЭ, вычисления которые требуется проводить, слишком громоздки для ручного счета даже в случае решения очень простых задач. В случаях решения более сложных задач необходимо использовать



быстродействующие ЭВМ. Тогда решение задачи с применением МКЭ состоит из следующих основных этапов:

1. Идентификация задачи, присвоение ей имени; создание чертежа конструкции расчетного узла;
2. Создание геометрии модели, пригодной для МКЭ;
3. Разбиение модели на сетку конечных элементов;
4. Приложение к модели граничных условий;
5. Численное решение системы уравнений (автоматически);
6. Анализ результатов.

Этапы 1, 2, 3, 4 относятся к препроцессорной стадии, этап 5 — к процессорной стадии, этап 6 — к постпроцессорной стадии.

Построенная модель делится на конечные элементы достаточно простой формы. Имеются несколько типичных форм конечных элементов, в которых поле смещений определяется по смещениям узлов с помощью некоторых интерполяционных функций. По вычисленным таким образом смещениям определяются поля напряжений и деформаций.

Правильное приложение граничных условий представляет определенные трудности и требует определенной квалификации инженера.

## **2.2 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ELCUT 6.3 ПРИ РАСЧЕТЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

### **2.2.1 Общие сведения программного обеспечения ELCUT 6.3**

На сегодняшний день, изучая рынок программных средств, можно найти множество расчетных комплексов, работающих на МКЭ. Российской разработкой в этой области является ELCUT –

программа, работающая на методе конечных элементов для моделирования двумерных полей, разработанная и представленная на рынке петербургской компанией TOP с 1991 года.

ELCUT позволяет решать двумерные краевые задачи математической физики, описываемые эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной или однокомпонентной векторной функции (потенциала).

ELCUT – это интегрированная диалоговая система программ, позволяющая решать плоские и осесимметричные задачи следующих типов:

Расчет электрического поля:

- Электростатическое поле.
- Электрическое поле постоянных токов.
- Электрическое поле переменных токов.
- Нестационарное электрическое поле.

Расчет магнитного поля:

- Магнитостатическое поле.
- Магнитное поле переменных токов (с учетом вихревых токов).
- Магнитное нестационарное поле (с учетом вихревых токов и нелинейных материалов).

Задачи теплопередачи (расчет температурного поля):

- Стационарная теплопередача
- Нестационарная теплопередача (тепловые переходные процессы).

Задачи механической прочности:

- Линейный анализ напряженно-деформированного состояния.

Мультидисциплинарные (связанные) задачи.

Плоскопараллельные постановки используют декартову систему координат  $x, y, z$ , причем предполагается, что геометрия расчетных областей, свойства сред и параметры, характеризующие источники поля, неизменны в направлении оси  $z$ . Вследствие этого описание геометрии, задание свойств, граничных условий и источников, а также обработку результатов можно проводить в плоскости  $xy$ , называемой плоскостью модели. Принято, что ось  $x$  направлена слева направо, а ось  $y$  - снизу вверх.

Осесимметричные задачи решаются в цилиндрической системе координат  $z, r, \theta$ . Порядок следования осей выбран для общности с плоскопараллельными задачами. Физические свойства и источники поля предполагаются не зависящими от угловой координаты. Работа с моделью проводится в плоскости  $zr$  (точнее в полуплоскости  $r \geq 0$ ). Ось вращения  $z$  направлена слева направо, ось  $r$  - снизу вверх.

Расчет линейного электродвигателя садовой ножовки производится в осесимметричной постановке[6].

С помощью ELCUT возможно в течение короткого времени:

- описать задачу, геометрию, свойства сред, источники поля, граничные условия;
- решить задачу с высокой точностью;
- проанализировать решение с помощью средств цветной графики;
- сохранить результаты в форме, пригодной для подготовки отчетов или для дальнейшего анализа.

Моделируя в программном обеспечении ELCUT, работа производится с разными типами документов: задачи, геометрические модели, библиотеки свойств материалов и др. Внутри главного окна ELCUT можно открыть каждый документ в

своём отдельном окне, при этом одновременно можно открыть любое число любых окон. Переходя из окна в окно, мы переключаемся с одного документа на другой, но также необходимо учитывать, что только одно окно является активным в каждый момент времени. Используя позиции меню, расположенного вверху главного окна ELCUT, мы можем изменять содержание активного документа. Для документов разных типов содержание меню различно.

Также возможно, вызвав нажатием правой кнопки мыши на интересующем вас объекте в окне, использование панели инструментов и контекстного меню.

ELCUT использует следующие типы документов: Описание задачи. Этот тип документов соответствует каждой физической задаче, решаемой при помощи ELCUT. Документ содержит такие общие характеристики, как тип задачи ("Электростатика", "Магнитостатика", "Теплопередача" и пр.), класс модели (плоская или осесимметричная) и тому подобные, а также имена других документов, ассоциированных с данной задачей.

Геометрическая модель содержит полное описание геометрии задачи, метки различных её частей и расчетную сетку конечных элементов. Разные задачи могут использовать общую модель (это, в частности, полезно при решении связанных задач)[7].

Физические свойства, или Данные, различаются для разных типов задач (Свойства для электростатики, свойства для магнитного поля переменных токов и т.д.). Эти документы содержат значения свойств материалов, источников поля и граничных условий для разных помеченных геометрических объектов модели. Документ свойств может быть использован как библиотека материалов для различных задач.

Электрическая цепь содержит схему присоединенной электрической цепи и параметры входящих в цепь элементов. Совместное решение задачи расчета магнитного поля с уравнениями присоединенной электрической цепи возможно в задачах следующих типов:

- Магнитное поле переменных токов
- Нестационарное магнитное поле.

Чтобы решить задачу, нужно ассоциировать с ней имена как минимум двух документов: модели и физических свойств. Для большего удобства задача может ссылаться на два документа свойств одновременно: один из них, называемый справочник свойств, содержит свойства часто используемых материалов (библиотека материалов), а другой документ содержит данные, специфичные для данной задачи или группы задач.

В процессе решения задачи ELCUT создает еще один файл - файл результатов. Этот файл всегда имеет расширение .res, имя, совпадающее с именем файла описания задачи, и помещается в ту же папку, в которой находится файл описания задачи.

Между сеансами работы ELCUT документы сохраняются в файлах по одному файлу для каждого документа. В ходе сеанса вы можете создавать новые документы, открывать и сохранять существующие.

Использование этой гибкой архитектуры позволит вам весьма быстро описать и решить вашу задачу или серию задач.

Типичная последовательность шагов при решении новой задачи представлена на блок-схеме (рисунок 2.1):



Рисунок 2.1 - Блок-схема последовательности шагов при решении задачи

Расчет магнитного поля применяется при проектировании и исследовании различных устройств, таких как соленоиды, электрические машины, магнитные экраны, постоянные магниты, реакторы, и тому подобные. Обычно при расчетах магнитного поля представляют интерес такие величины, как магнитная индукция, напряженность магнитного поля, магнитные силы и моменты, индуктивность, а также потокосцепления с различными обмотками.

Пакет ELCUT может применяться для решения линейных и нелинейных задач магнитостатики в плоской и осесимметричной постановке. Используется формулировка задачи относительно

векторного магнитного потенциала. При постановке задачи мы можем использовать следующие возможности:

- свойства сред: воздух, изотропные и ортотропные материалы с постоянной магнитной проницаемостью, изотропные ферромагнетики, проводники с током, линейные и нелинейные постоянные магниты. Кривые намагничивания ферромагнитных материалов вводятся и редактируются при помощи окна работы с кривыми.

- источники поля: распределенные и сосредоточенные токи или плотность тока, однородное внешнее поле и постоянные магниты.

- граничные условия: заданное значение потенциала (условие Дирихле), заданные значения касательной составляющей индукции (условие Неймана), условие постоянства потенциала (нулевого потока) на поверхностях сверхпроводников.

- результаты расчета: магнитный потенциал, магнитная индукция, напряженность магнитного поля, силы, моменты, энергия магнитного поля, потокосцепления, собственные и взаимные индуктивности.

- специальные возможности: Интегральный калькулятор может вычислять различные интегральные значения на определенных вами линиях и поверхностях. Мастер индуктивности помогает вычислять собственную и взаимную индуктивность проводников и катушек. Магнитное состояние вещества, рассчитанное с учетом кривых намагничивания материалов, может быть запомнено для использования при решении последующих задач. Это позволяет, в частности, вычислять собственные и взаимные дифференциальные индуктивности многообмоточных систем.

Структура базы данных задачи состоит из нескольких частей. Центральной частью этой базы данных является описание задачи, которое при записи на диск помещается в файл с расширением .rbm. Описание задачи содержит общую информацию о задаче: характер предметной области, разновидность постановки, класс точности расчета и т.д. Кроме этого, описание задачи содержит имена остальных файлов, составляющих базу данных задачи. К их числу относятся файл геометрии модели, имеющий стандартное расширение .mod или .m3d, файл присоединенной электрической цепи (для цепно-полевых задач) с расширением .qcr, и файлы физических параметров, имеющие одно из расширений .dms, .dhe, .des, .dcf, .dec, .dtv, .dht, или .dsa, в зависимости от предметной области задачи.

Для создания новой задачи необходимо из меню «Файл» выбрать позицию «Создать». Появится окно создания новой задачи (рисунок 2.2).



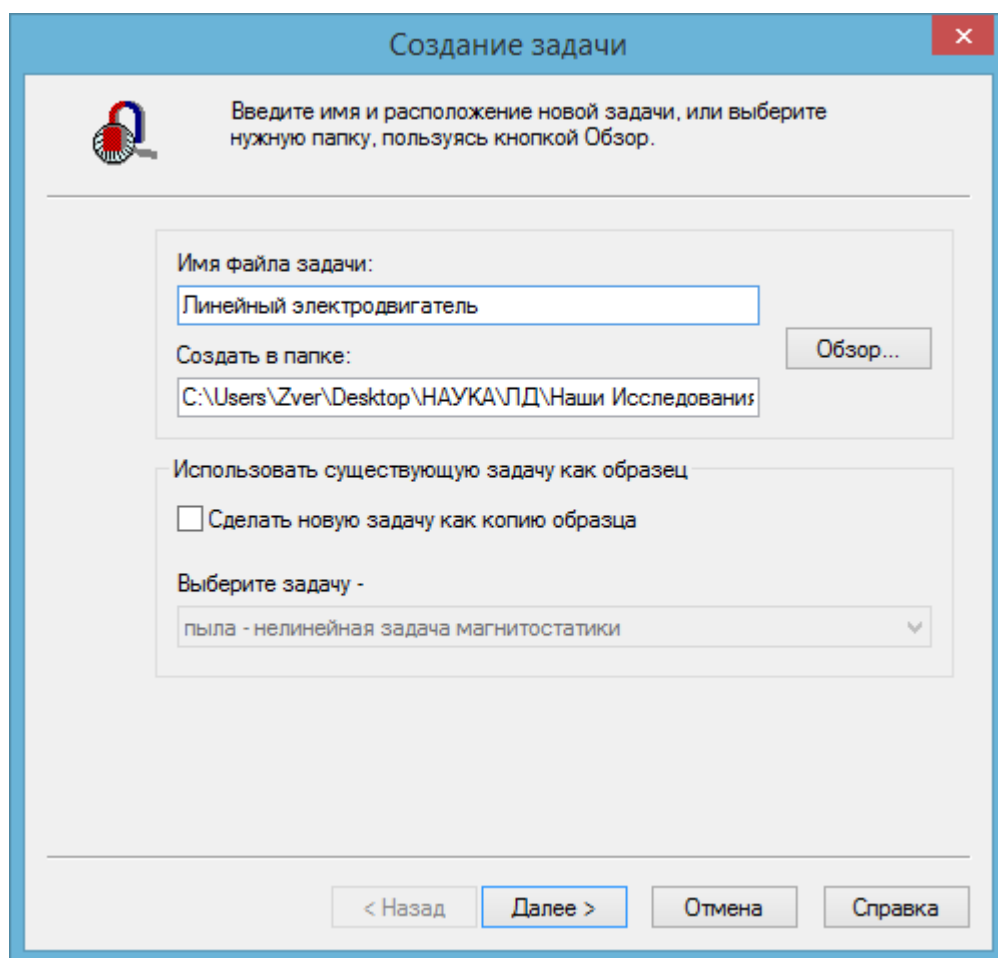


Рисунок 2.2 - Окно создания новой задачи

Появится окно создания задачи, где необходимо будет присвоить имя создаваемой задачи, и указать ее расположение.

Далее необходимо будет выбрать параметры задачи (рисунок 2.3), такие как тип задачи, класс модели, единицы длины, координаты и вид расчета[8].

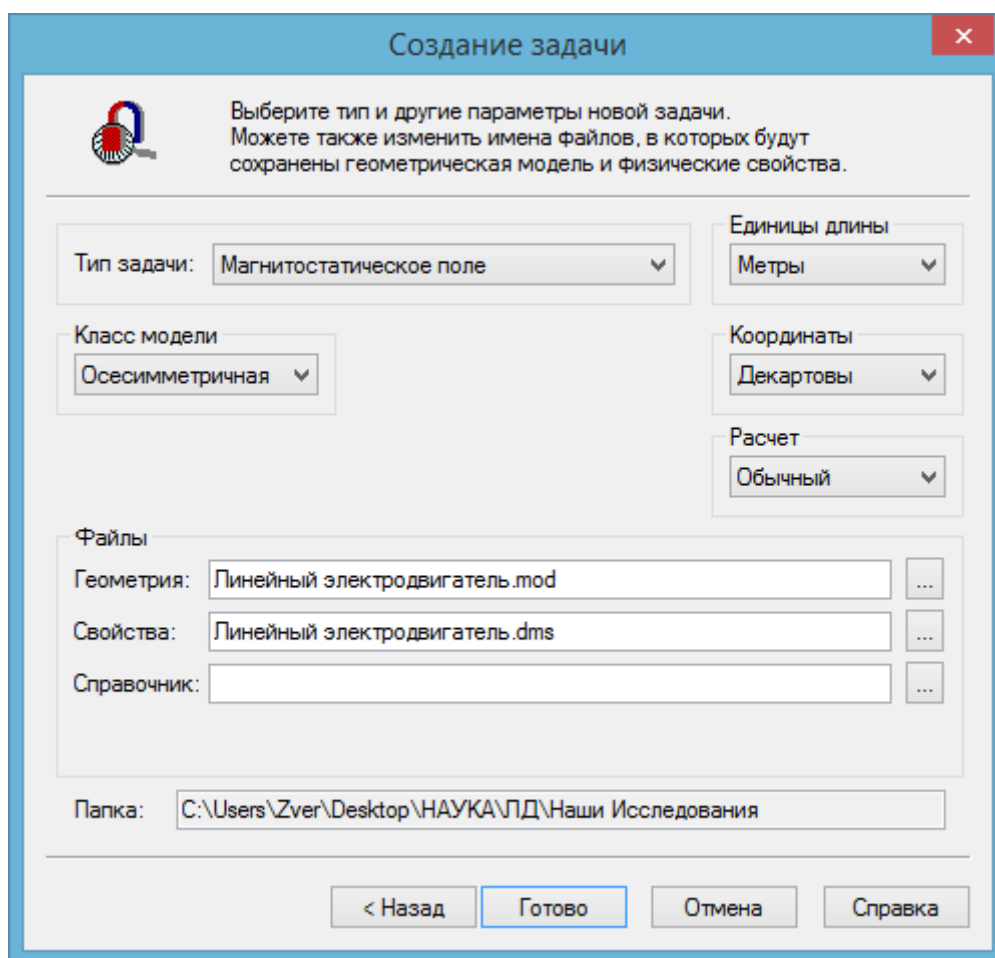


Рисунок 2.3 - Окно ввода параметров новой задачи

Также можно открыть ранее созданную задачу. Для этого необходимо из меню «*Файл*» выбрать позицию «*Открыть*».

Рабочее окно программы (рисунок 2.4) состоит из меню, панели инструментов, окна свойств модели и окна структуры задачи.

В рабочем окне программы созданное изображение можно масштабировать с помощью кнопок крупнее и мельче. Чтобы увеличить изображение, необходимо нажать кнопку крупнее и переместить прямоугольник выделения в нужную область чертежа. Для того, чтобы увидеть модель целиком, необходимо нажать кнопку «*Показать все*»[9].

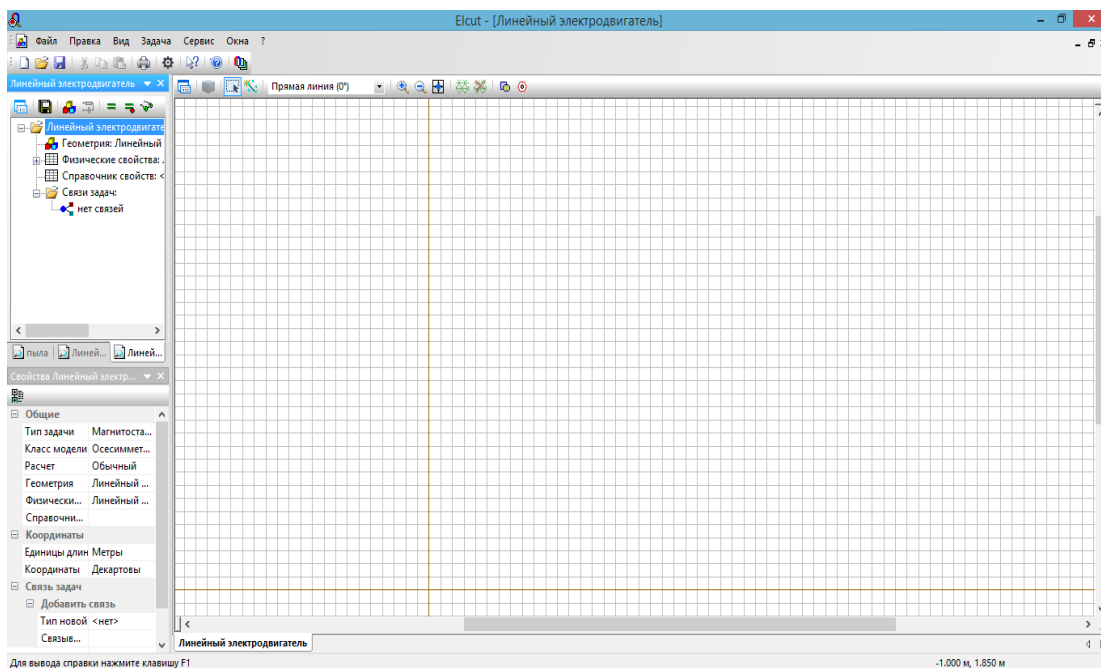


Рисунок 2.4 - Рабочее окно программы

В рабочем окне программы также можно настроить сетку привязки (рис 2.5). В окне «*Сетка привязки*» можно настроить шаги сетки, привязать модель к сетке и указать позицию начальной точки. Также можно настроить сетку таким образом, чтобы с масштабированием рабочего окна сетка также масштабировалась[10].

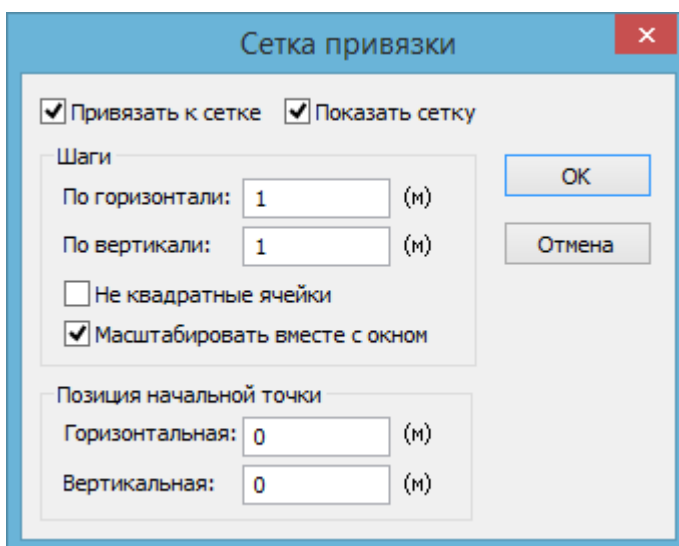


Рисунок 2.5 - Окно настройки привязки сетки

### 2.2.2 Создание геометрической модели

Создание модели, как правило, происходит в три этапа:

- Ввод геометрических объектов и манипулирование ими;
- Задание свойств сред, источников поля и граничных условий;
- Построение сетки конечных элементов во всех блоках, входящих в расчетную область.

Основные типы геометрических объектов в ELCUT считаются вершина и ребро. Используя эти объекты можно построить большую часть моделей. Также можно вставить такие объекты как окружность, прямоугольник и эллипс.

Вершиной считается точка на плоскости, координаты которой введены пользователем или вычислены автоматически при пересечении ребер.

Ребром считается отрезок прямой или дуга окружности, соединяющая две вершины и не пересекающая другие ребра модели.

При описании геометрии модели сначала создаются вершины и ребра, ограничивающие блоки с различными физическими свойствами. Для корректировки положения и формы объектов используются операции перемещения и копирования. Для выполнения операции над несколькими объектами одновременно, эти объекты перед операцией нужно выделить.

Чтобы создать новое ребро, необходимо:

1. Выбрать команду *Режим вставки* в меню *Правка* или команду *Вставка вершин/ребер* в контекстном меню (правая кнопка мыши), либо нажать кнопку на панели инструментов *Вставлять вершины и ребра* или клавишу INS, чтобы перейти в режим вставки.

2. Указать раствор нового ребра в окне *Раствор дуги* инструментальной панели. Выбрать одно из значений,

находящихся в выпадающем списке или ввести новое значение. Для создания прямолинейного ребра выбрать нулевой угол.

3. В начальной точке создаваемого ребра: либо нажать левую кнопку мыши и, не отпуская ее, перетащить указатель мыши к конечной точке, либо нажать клавишу SHIFT и, не отпуская ее, передвинуть указатель к конечной точке с помощью клавиш со СТРЕЛКАМИ. Если один или оба конца нового ребра не совпадают с уже существующими вершинами, недостающие вершины будут автоматически добавлены к модели перед созданием ребра. Если не выключать включенный по умолчанию режим привязки к решетке, новые вершины будут создаваться только в узлах координатной решетки. При перемещении указателя с помощью клавиатуры использование клавиши CTRL позволяет позиционировать его точнее.

Чтобы создать новую вершину (рисунок 2.6), необходимо:

1. Выбрать команду *Режим вставки* из меню *Правка* или команду *Вставка вершин/ребер* из контекстного меню, либо нажать клавишу INS или кнопку *Вставлять вершины и ребра* на панели инструментов, чтобы перейти в режим вставки.

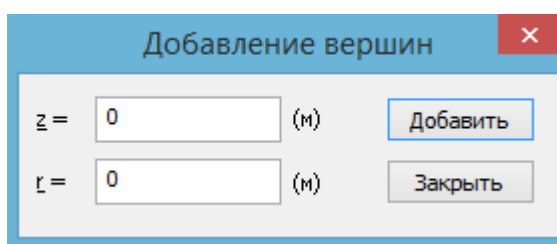


Рисунок 2.6 - Добавление вершин

2. Убедиться, что текущие параметры сетки привязки подходят для ввода координат создаваемых вершин.

3. Используя мышь или клавиши со стрелками, передвинуть указатель в точку, где нужно создать новую вершину, и нажать левую кнопку мыши или клавишу ENTER.

Также можно вставить готовые фигуры (рисунок 2.7), такие как эллипс, прямоугольник и круг, при этом указав их позицию и геометрические размеры.

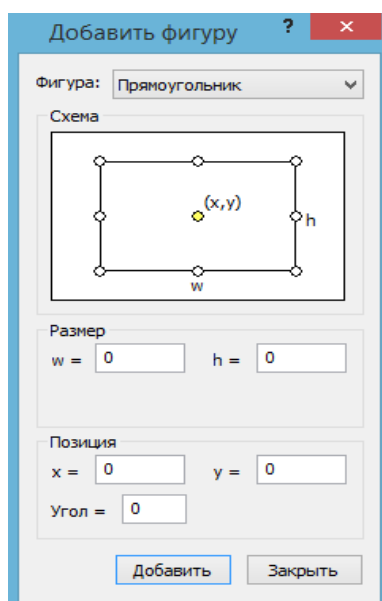


Рисунок 2.7 - Окно добавления новой фигуры

Свойства сред, источники и граничные условия задаются путем присваивания меток, имеющих соответствующие свойства, к геометрическим объектам.

Метка необходима для установления соответствия между геометрическими объектами.

Сетку конечных элементов можно создавать автоматически. При этом, с учетом размеров геометрических объектов, будет построена гладкая сетка с плавным переходом от мелких элементов к более крупным. Для этого не требуется вводить какую-либо информацию.

Вместо автоматического построения сетки можно регулировать размеры конечных элементов сетки вручную. Для этого необходимо указать шаги дискретизации в одной или нескольких вершинах. Значения шагов дискретизации в остальных вершинах будут автоматически построены так, чтобы получить достаточно гладкую сетку.

Для выделения объектов необходимо щелкнуть мышью объекты, которые необходимо выделить и удерживая клавишу CTRL перемещать рамку до тех пор, пока нужные объекты не окажутся в рамке выделения(рисунок 2.8).

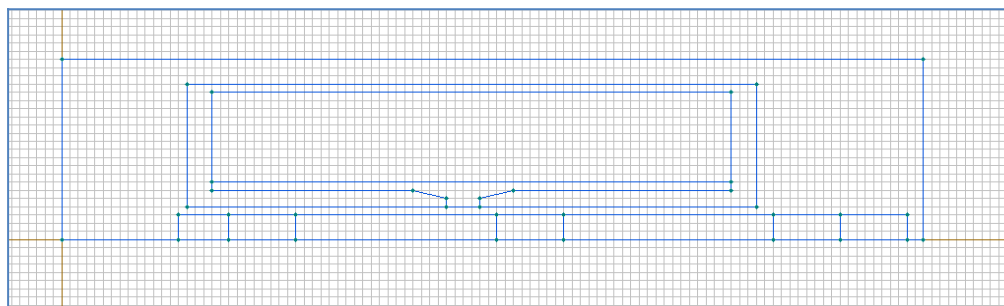


Рисунок 2.8 - Выделение объекта

Геометрические объекты с регулярными координатами можно легко создавать путем копирования или перемещения(рисунок 2.9). Чтобы сделать копию, необходимо:

1. Выделить любой набор объектов (вершин, рёбер и блоков) для копирования.

2. Выбрать команду Дублировать выделенное из меню Правка или контекстного меню.

3. Когда на экране появится диалог для ввода параметров, выбрать метод преобразования, ввести его параметры и нажать ОК.

4. Новые объекты будут встроены в модель и выделены. Со всех остальных объектов модели выделение будет снято. Операция копирования сохраняет все явно заданные свойства исходных объектов, включая метки и шаги дискретизации. Не копируется только сетка конечных элементов - в новых блоках ее не будет.

Первая копия любого объекта модели всегда является результатом выбранного преобразования, примененного к самому объекту. При одновременном создании нескольких копий, каждая из последующих копий является результатом этого преобразования, примененного к предыдущей копии.

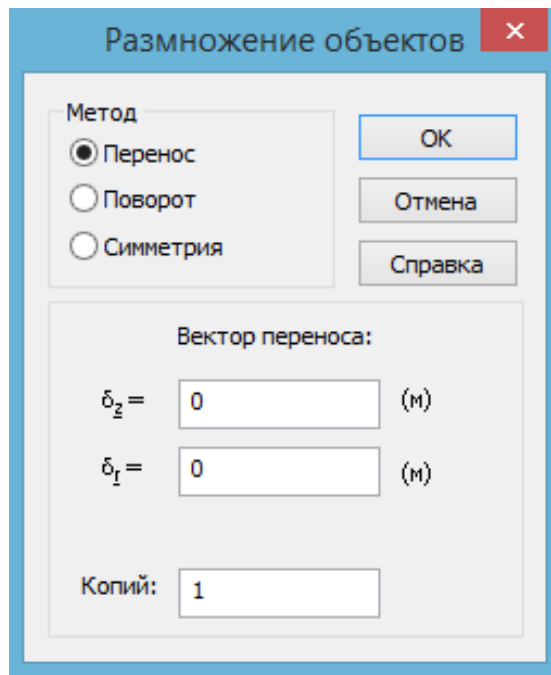


Рисунок 2.9 - Копирование и перемещение объектов

### 2.2.3 Ввод параметров задачи

Для того, чтобы решить задачу, необходимо описать свойства сред, указать источники поля и определить граничные условия. Эти параметры задачи хранятся в файле описания свойств. Связь физических свойств с геометрическими объектами устанавливается путем присвоения меток геометрическим объектам при редактировании модели.

В окне описания задачи содержатся метки, присвоенные элементам модели. Значки, помещенные слева от меток, означают следующее (Рисунок 2.10):














	Двумерные задачи	Трехмерные задачи
	Метка блока с заданными свойствами материала	Метка тела с заданными свойствами материала
	Метка ребра с заданными значениями граничных условий	Метка грани с заданными значениями граничных условий
	Метка вершины с заданным значением источника поля или граничного условия	Метка ребра с заданными значениями граничных условий
	- нет -	Метка вершины с заданным значением источника поля или граничного условия
 	Упомянутая в модели метка, для которой еще не заданы значения свойств	
 		
	Пустая метка блока. Соответствующий блок исключается из расчета поля	
  	Метка с естественными граничными условиями и нулевыми источниками поля	

Рисунок 2.10 - Значки меток

Для создания метки (Рисунок 2.11), необходимо:

1. Выбрать Метку блока, или Метку ребра, или Метку вершины в меню. Вставить или перейти к нужной группе меток в дереве и выберите Создать метку в контекстном меню (правая кнопка мыши).
2. В нужной ветви дерева появится новая метка, приглашая ввести имя, которое ей нужно присвоить.
3. Просто набрать имя метки и нажать клавишу ENTER

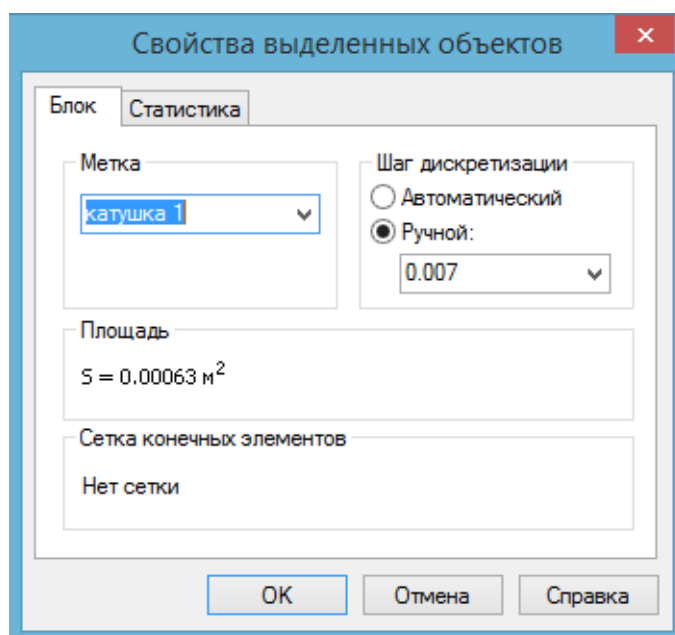


Рисунок 2.11 - Окно присвоения меток геометрическому объекту

После создания метки блока необходимо задать свойства блока (Рисунок 2.12). В окне Свойства метки блока задаются следующие параметры:

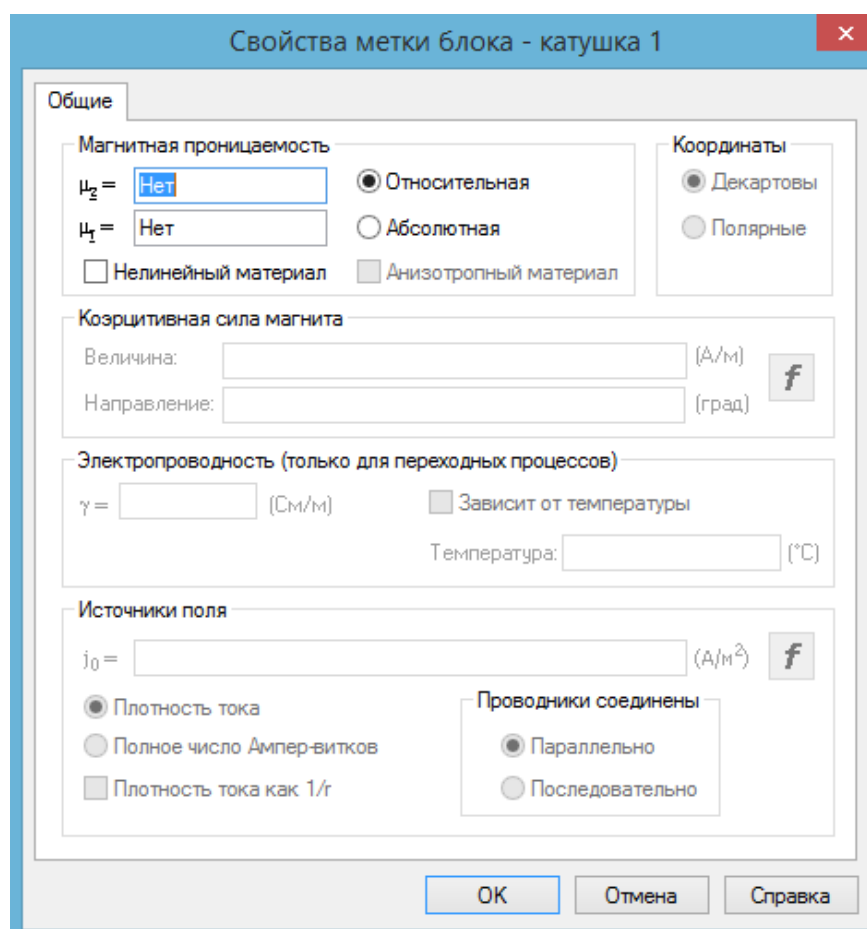


Рисунок 2.12 - Окно задания свойств метки блока

- Указать магнитную проницаемость материала. Магнитная проницаемость материала может быть задана единичным числом или же кривой (Рисунок 2.13)

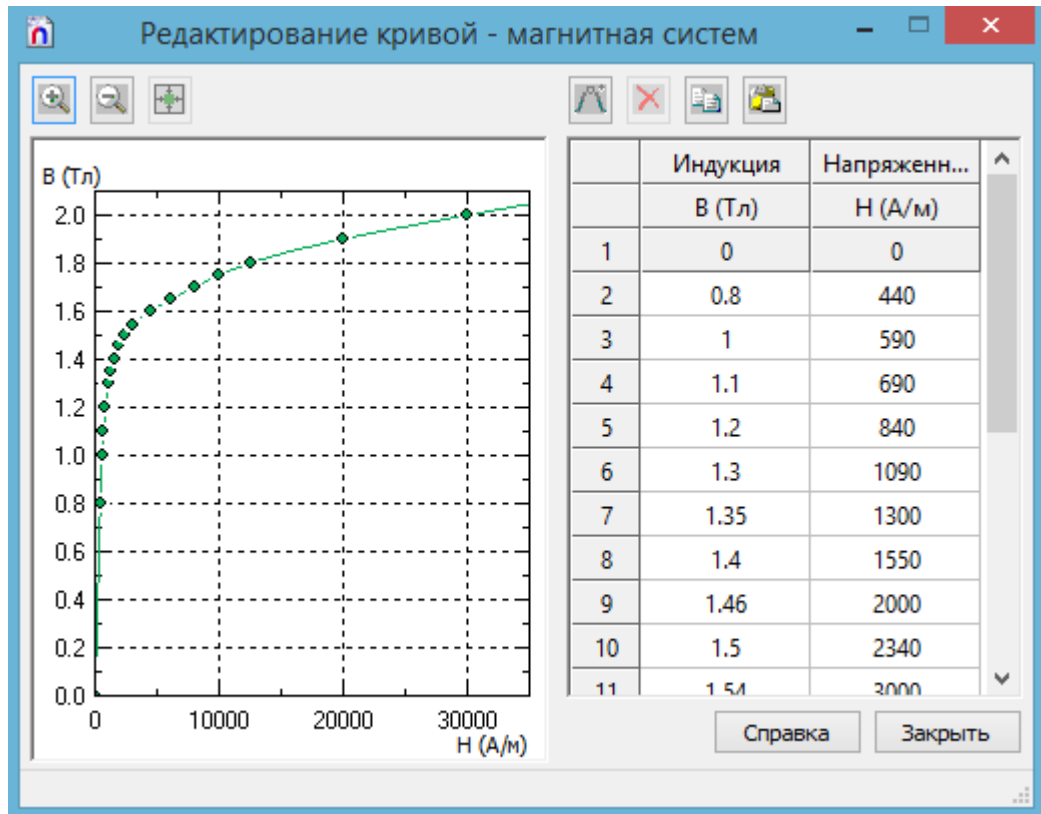


Рисунок 2.13 - Кривая магнитной проницаемости стали

- Значение электропроводности, которое необходимо для переходных процессов.

- Указать источники поля, плотность тока или полное число Ампер-витков. Необходимо учесть то, что значение плотности тока указывается в  $A/m^2$ . После задания свойств геометрических объектов для корректной постановки задачи необходимо задать граничные условия с нулевым потенциалом (Рисунок 2.14), так как ELCUT не считает в бесконечности.

Условие Дирихле задается на части границы наперед известный векторный магнитный потенциал в вершине или на ребре модели. Это граничное условие определяет поведение нормальной составляющей индукции на границе.

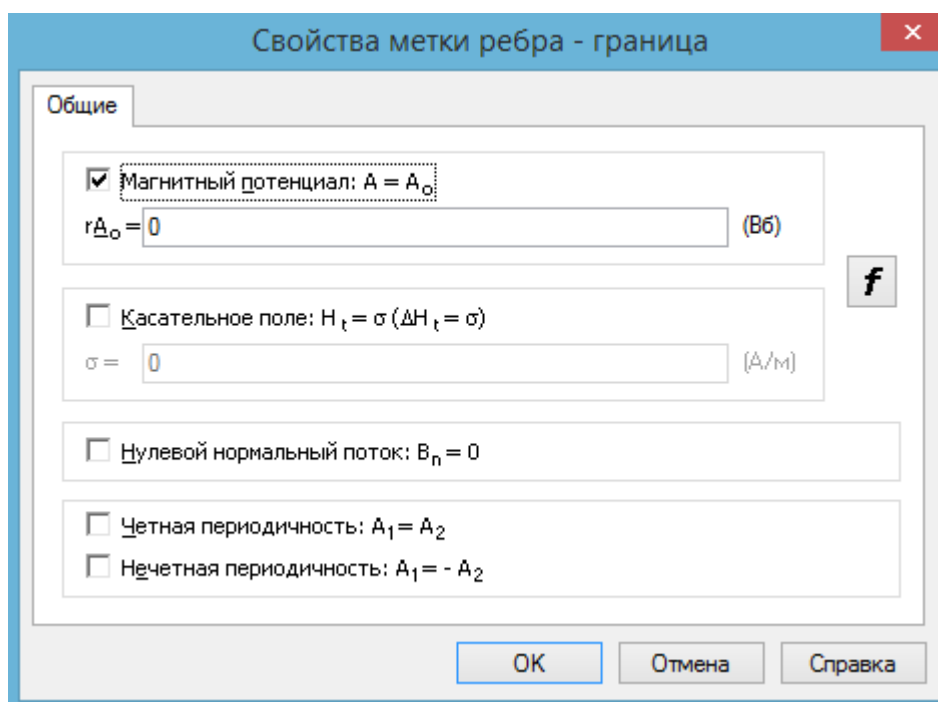


Рисунок 2.14 - Задание граничных условий

После задания граничных условий необходимо построить конечно-элементную сетку(Рисунок 2.15)

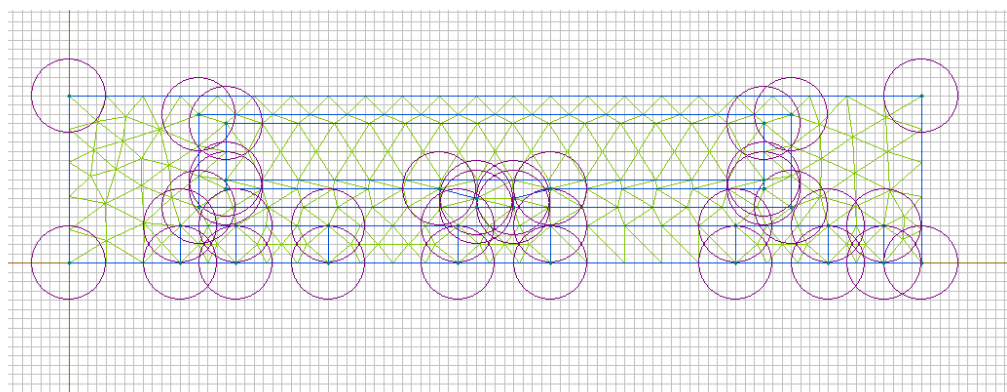


Рисунок 2.15 - Построение сетки конечных элементов

Густота сетки непосредственно влияет на точность решения в тех или иных частях расчетной области. Сетка должна быть особенно густой в тех местах расчетной области, где требуется получить наивысшую точность.

Сетку конечных элементов можно создавать автоматически. При этом, с учетом размеров геометрических объектов, будет построена гладкая сетка с плавным переходом от мелких

элементов к более крупным. Для этого не требуется вводить какую-либо информацию.

Вместо автоматического построения сетки можно регулировать размеры конечных элементов сетки вручную. Для этого нужно указать шаги дискретизации в одной или нескольких вершинах.

Значения шагов дискретизации в остальных вершинах будут автоматически построены так, чтобы получить достаточно гладкую сетку.

#### 2.2.4 Решение задачи и анализ результата

Для того чтобы задача могла быть решена, должны быть выполнены следующие условия:

- В документе описание задачи заданы тип задачи, класс модели, точность расчета и прочие свойства задачи.

- Документ геометрическая модель должен содержать законченную модель с построенной сеткой конечных элементов и метками.

- Свойства каждой метки, использованной в модели, должны быть определены в документе физические свойства данной задачи.

Если задача использует результат решения другой, связанной задачи, в качестве исходных данных, то задача-источник должна быть решена.

Для решения задачи необходимо в панели инструментов (Рисунок 2.16) нажать на кнопку «Решить задачу».

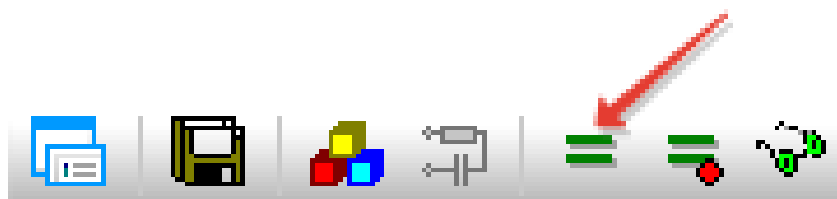


Рисунок 2.16- Панель выбора кнопок

ELCUT позволяет представить решение задачи несколькими способами:

- картины поля;
- локальные полевые значения;
- интегральные величины;
- мастера вычисления параметров;
- графики и таблицы в пространстве;
- графики и таблицы во времени;
- таблицы и графики напряжений и токов в элементах
- присоединенной электрической цепи;
- экспорт таблиц, картинок и всего конечно-элементного решения в другие программы;
- траектории заряженных частиц;
- анимация картины поля.

Анализ решения начинается с того, что ELCUT открывает новое окно, в котором изображается картина вычисленного поля(Рисунок 2.17)

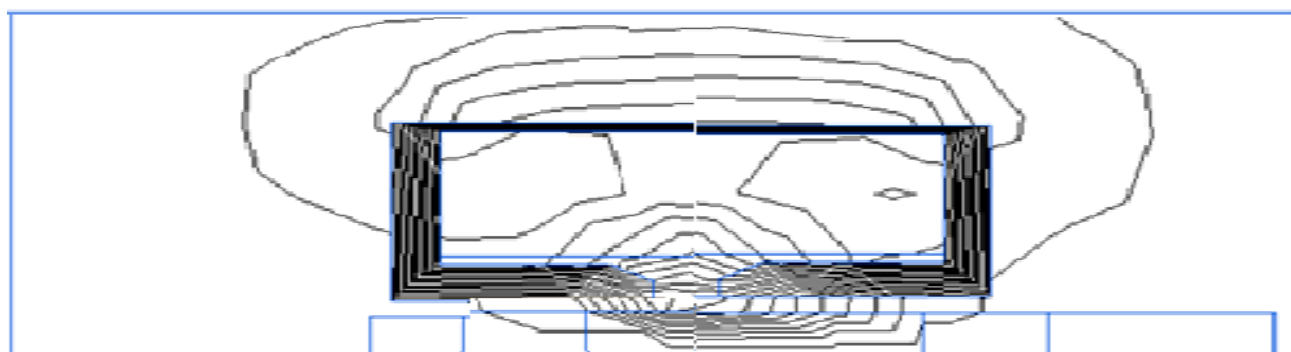


Рисунок 2.17 - Картина вычисленного поля

Поначалу, поле изображается методом, наиболее адекватным типу решенной задачи. Возможно использовать всю палитру средств визуализации поля, произвольно комбинируя их между

собой. Для настройки картины используется команда Вид > Свойства картины поля (Рисунок 2.18).

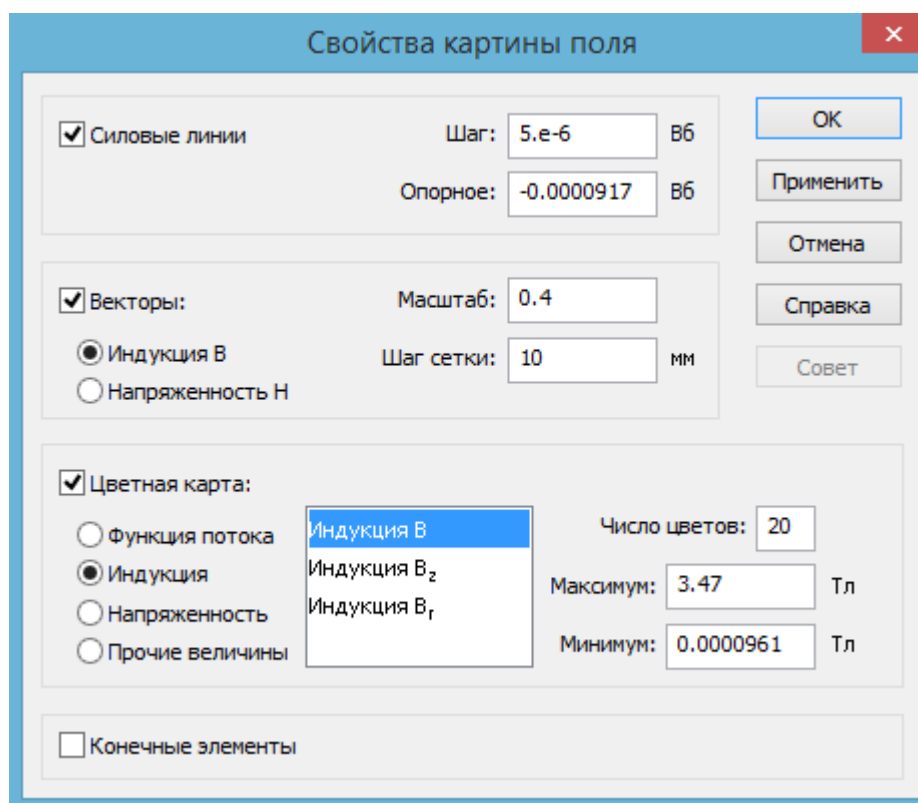


Рисунок 2.18 - Окно свойства картины поля

Для выбора желаемого вида картины поля, необходимо отметить соответствующий флажок. Можно выбрать любую комбинацию видов изображения картины поля. Если не выбран ни один из видов, на экране будут нарисованы только контуры геометрической модели. Здесь также возможно указать пределы изменения физической величины и число цветов, используемых при построении цветной карты. При выборе какого-либо поля редактирования пределов можно воспользоваться кнопкой Совет для установки наиболее подходящего значения предела. Важно помнить, что наиболее подходящие величины для полей минимум и максимум вычисляются для видимой в данный момент на экране части изображения.

В задачах переменных токов линии равного потенциала и векторы рисуются при заданной фазе. Возможно самим можно задать значение фазы.

Также в окне свойств картины поля можно указать необходимый масштаб силовых линий, указать величину и направление электрического или магнитного поля в виде векторов и изобразить пространственное распределение выбранной величины в виде цветной карты.

Масштабирование картины поля выполняется аналогично масштабированию в окне модели.

Чтобы сделать изображение крупнее:

1. Необходимо нажать кнопку Крупнее на панели инструментов.

2. Перемещая мышь с нажатой левой кнопкой, выделить прямоугольник, который после отпускания кнопки займет окно целиком.

Чтобы увидеть более обширную часть изображения:

- Нажать кнопку Мельче на панели инструментов модели.

- Или нажать кнопку «Показать всё на панели инструментов», чтобы увидеть картину поля целиком так крупно, как это возможно.

В вкладке Вид > Калькулятор отображена панель в виде нескольких деревьев, корневые элементы которых соответствуют различным видам числовых данных.

Среди них:

- Локальные значения отображают различные полевые характеристики в указанных Вами точках расчетной области (Рисунок 2.19);



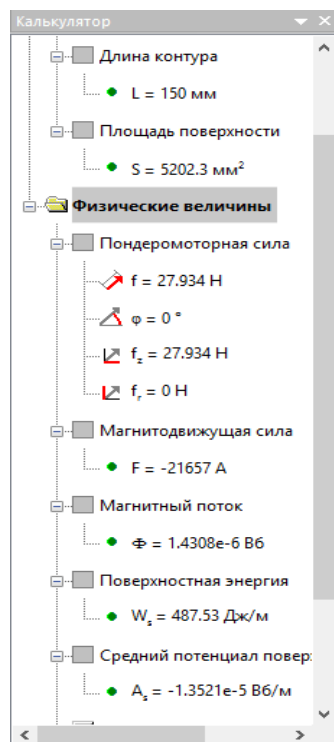


Рисунок 2.19 - Локальные значения в тонкой стенке катушки

- Интегральный калькулятор перечисляет характеристики, которые могут быть вычислены интегрированием по заданной линии, поверхности или объему;

- Мастер индуктивности запускает мастер, который поможет вам вычислить собственную или взаимную индуктивность катушек или проводников.

Для получения результатов вычисления в виде графика или таблицы необходимо построить контур.

Контуром называется направленная ломаная линия, состоящая из отрезков прямых и дуг окружностей (включая рёбра модели).

Контур в ELCUT используются для:

- Построения графиков физических величин вдоль контура;  
 - Вычисления линейных, поверхностных и объемных (для замкнутых контуров);

- Табличного вывода распределения поля вдоль контура на экран, в буфер обмена и в текстовый;

- Гармонического анализа пространственного распределения поля вдоль контура.

Направление контура имеет значение в следующих случаях:

- При вычислении объемных интегралов область интегрирования берется слева от контура.

- При вычислении поверхностных интегралов положительная нормаль направлена направо от контура.

- Начальная точка контура имеет нулевую координату по оси абсцисс при построении графиков и выводе в таблицу.

- Если изображаемая на графике или интегрируемая величина определена с обеих сторон контура и при этом принимает различные значения слева и справа от него, используется значение с правой стороны.

Распределение физических величин поля вдоль контура может быть изображено на графике (Рисунок 2.20). Чтобы открыть окно графика, необходимо выбрать команду *График* в меню *Вид* или контекстном меню окна картины поля, в котором мы уже задали контур.

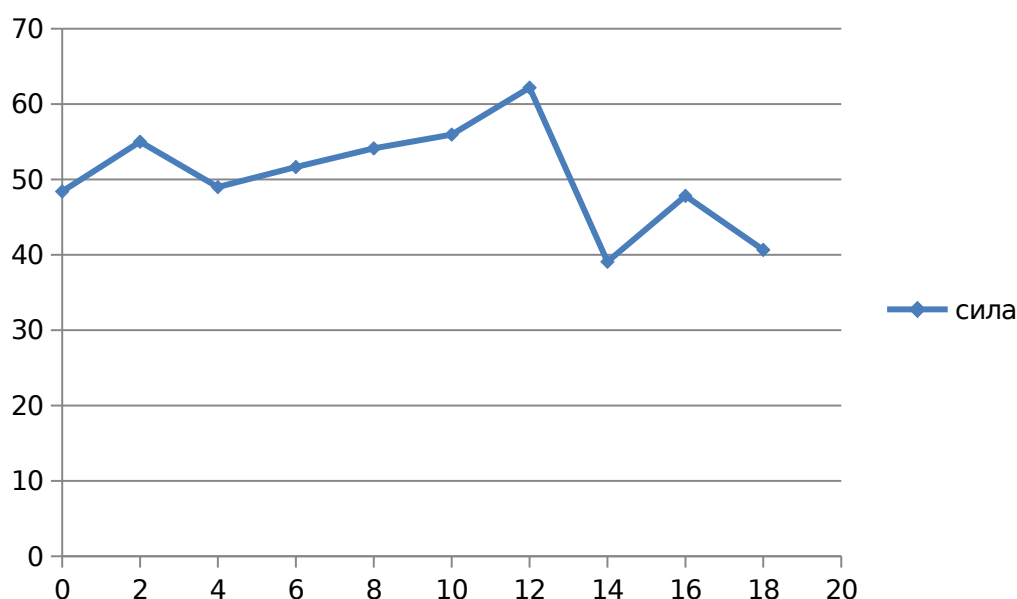


Рисунок 2.20 - Окно графика

В окне графика мы можем:

- Выбирать отображаемые величины при помощи команды *Свойства* графика из меню *Вид* или контекстного меню.
- Изменять масштаб изображения.
- Выводить на экран или принтер таблицу соответствия между цветом кривой на графике и изображаемой физической величиной (легенду).
- Копировать изображение из окна графика в буфер обмена. - Открывать несколько окон графиков для одного контура.

На графике могут быть изображены несколько физических величин с одинаковыми единицами измерения. Также можно установить (Рисунок 2.21) максимальное и минимальное значение оси ординат и добиться наиболее приемлемого вида с помощью манипулирования флажками *Маркировать линии* и *Показать координатную сетку*.

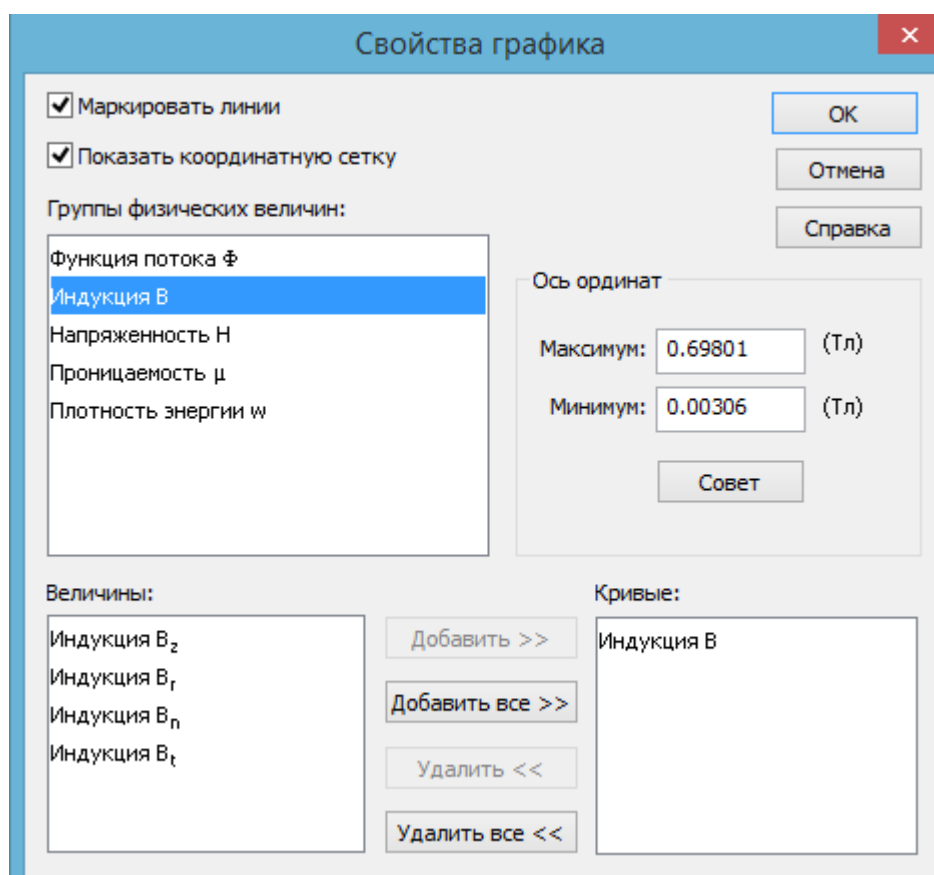


Рисунок 2.21 - Окно задания свойств графика

Полученные данные результата решения задачи можно вывести в таблицу. Для выведения результатов в табличной форме необходимо на панели инструментов (Рисунок 2.22) выбрать кнопку *Таблица*.



Рисунок 2.22 – Выбор кнопки таблицы

Значения вдоль контура будут выведены в таблицу числовых значений (Рисунок 2.23) и могут быть скопированы в буфер обмена или выведены с помощью надстройки программы в удобный вид, позволяющий в дальнейшем использовать полученные результаты в ходе исследования наиболее удачной конструкции.

L (мм)	z (мм)	r (мм)	N <sub>x</sub>	N <sub>y</sub>	Φ (Бб)	B (Тл)	B <sub>z</sub> (Тл)	B <sub>r</sub> (Тл)	B <sub>φ</sub> (Тл)	B <sub>r</sub> (Тл)	H (А/м)	H <sub>z</sub> (А/м)	H <sub>r</sub> (А/м)	H <sub>φ</sub> (А/м)	H <sub>r</sub> (А/м)
0	40.3732	0	0.999433	-0.0336676	0	0.0250313	-0.0250271	4.62556e-4	-0.0250285	-3.80307e-4	19919.3	-19915.9	368.09	-19917	-302.639
7.49999	42.4158	5.64691	0.00137268	-0.999999	-4.2067e-7	0.0240712	-0.022915	0.00737056	-0.00740201	-0.0229048	19155.2	-18235.2	5865.3	-5890.33	-18227.1
15	49.9158	5.6572	0.00137268	-0.999999	-9.62635e-7	0.0612927	-0.0532369	0.0303747	-0.0304478	-0.0531952	48775.2	-42364.6	24171.4	-24229.6	-42331.4
22.5	57.4158	5.6675	0.00137268	-0.999999	-3.71181e-6	0.311146	-0.212454	0.227322	-0.227613	-0.212142	247602	-169065	180897	-181129	-168817
30	64.9157	5.67779	0.00137268	-0.999999	-1.93891e-5	0.600597	-0.455739	0.391176	-0.391801	-0.455202	477940	-362666	311288	-311785	-362238
37.5	72.4157	5.68809	0.00137268	-0.999999	-3.69571e-5	0.55718	-0.554204	0.0575077	-0.0582684	-0.554125	443390	-441022	45763.2	-46368.5	-440958
44.9999	79.9157	5.69838	0.00137268	-0.999999	-2.69296e-5	0.358032	-0.17978	-0.309623	0.309376	-0.180205	284913	-143064	-246390	246193	-143402
52.4999	87.4157	5.70868	0.00137268	-0.999999	-1.20484e-5	0.310048	-0.123388	-0.284438	0.284269	-0.123778	246729	-98189.2	-226349	226214	-98499.8
59.9999	94.9157	5.71897	0.00137268	-0.999999	-3.03885e-6	0.167881	-0.159249	-0.0531385	0.0529199	-0.159322	133595	-126727	-42286.3	42112.3	-126784
67.4999	102.416	5.72927	0.00137268	-0.999999	-4.72908e-6	0.214211	-0.142937	0.159548	-0.159744	-0.142718	170464	-113746	126964	-127120	-113571
74.9999	109.916	5.73956	0.00137268	-0.999999	-1.85934e-5	0.311235	-0.0810023	0.300509	-0.30062	-0.0805897	247673	-64459.6	239137	-239226	-64131.3
82.4999	117.416	5.74986	0.00137268	-0.999999	-3.15169e-5	0.421248	-0.283126	0.311912	-0.3123	-0.282698	335218	-225305	248212	-248521	-224964
89.9999	124.916	5.76015	0.00137268	-0.999999	-4.36523e-5	0.649759	-0.648362	0.0425874	-0.0434774	-0.648303	517062	-515950	33890	-34598.2	-515903
97.4999	132.416	5.77045	0.00137268	-0.999999	-3.45654e-5	0.513535	-0.416334	-0.30064	0.300069	-0.416746	408658	-331308	-239242	238787	-331636
105	139.916	5.78074	0.00137268	-0.999999	-1.7812e-5	0.364087	-0.0802277	-0.355138	0.355027	-0.0807151	289731	-63843.2	-282610	282522	-64231
112.5	147.416	5.79104	0.00137268	-0.999999	-3.71626e-6	0.215653	-0.129486	-0.172452	0.172274	-0.129723	171612	-103042	-137233	137091	-103230
120	154.916	5.80133	0.00137268	-0.999999	-1.10274e-6	0.0668883	-0.0481968	-0.0463801	0.0463139	-0.0482605	53228	-38353.8	-36908.1	36855.4	-38404.5
127.5	162.416	5.81163	0.00137268	-0.999999	-5.87529e-7	0.0273814	-0.0242053	-0.0128001	0.0127668	-0.0242229	21789.4	-19262	-10186	10159.5	-19275.9
135	169.916	5.82193	0.00137268	-0.999999	-5.08726e-7	0.014541	-0.0136841	-0.0049179	0.00489911	-0.0136909	11571.4	-10889.5	-3913.54	3898.59	-10894.8
142.5	177.415	5.83222	0.00137268	-0.999999	-9.73721e-8	0.00803436	-0.00280353	-0.00752935	0.0075255	-0.00281386	6393.54	-2230.98	-5991.67	5988.6	-2239.2
150	179.081	0	-1	-0	0	0.00306284	-0.00306284	0	0.00306284	0	2437.33	-2437.33	0	2437.33	-0
150	179.081	0	-1	-0	0	0.00306284	-0.00306284	0	0.00306284	0	2437.33	-2437.33	0	2437.33	-0

Рисунок 2.23 - Таблица значений результатов решения

## 2.3 ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СТЯХИВАТЕЛЯ

Моделирование линейного электродвигателя начинается с расчета магнитных полей, основной характеристикой которых является магнитная индукция, представляющая собой векторную величину.

Стяхиватель (Рисунок 2.24) состоит из захвата 1, соединенного при помощи винта 2 с якорем 3, который устанавливается при помощи нижнего подшипника скольжения 4 в линейном электродвигателе 5, и верхнего подшипника скольжения 6 в корпусе 7, кнопки включения 8, прерывателя 9 и аккумуляторной батареи 10 установленной в корпусе 7, возвратной пружины 11, расположенной в защитном стакане 12, который закреплен на корпусе 7 при помощи винтов 13 и 14. Предлагаемый стяхиватель работает следующим образом: при нажатии кнопки включения 8 на линейный электродвигатель 5 подается напряжение 24 В через прерыватель 9 от аккумуляторной батареи 10. Якорь 3 соединенный при помощи винта 2 с захватом 1, под действием электромагнитных сил, возникающих в линейном электродвигателе 5, приходит в движение и перемещается в нижнее положение, с помощью нижнего подшипника скольжения 4 и верхнего подшипника скольжения 6, с усилием не менее 500 Н (на фигуре не показано). При достижении якорем 3 нижнего положения, прерыватель 9 отключает питание линейного электродвигателя 5 от аккумуляторной батареи 10, при этом исчезает электромагнитная сила, действующая на якорь 3, под действием возвратной пружины 11 закрепленной при помощи

винтов 13 и 14 в защитном стакане 12, возвращается в верхнее положение. Далее процесс работы стряхивателя повторяется с частотой работы прерывателя 9 равной 4 Гц, до тех пор, пока не будет отключена кнопка включения 8. При возврате кнопки включения 8 в начальное положение, отключается питание прерывателя 9 и линейного электродвигателя 5 от аккумуляторной батареи 10 и якорь 3 под действием возвратной пружины 11, закрепленной при помощи винтов 13 и 14 в защитном стакане 12 возвращается в верхнее положение. За счет использования захвата 1, связанного винтом 2 с якорем 3 и приводящим его в движение линейным электродвигателем 5, питающимся через прерыватель 9 от аккумуляторной батареи 10, упрощается трансмиссионная передача, как следствие повышается надежность и производительность а так же снижается вибрация и массогабаритные показатели стряхивателя. Для питания линейного электродвигателя 5 необходимо напряжение 24 В от источника постоянного тока. Линейный электродвигатель 5 стряхивателя, преобразует электрическую энергию в усилие стряхивания не менее 500 Н, которое необходимо для сбора урожая.

По сравнению с прототипом и другими известными техническими решениями предлагаемый стряхиватель на основе линейного электродвигателя имеет ряд преимуществ:

- за счет использования линейного электродвигателя, повышается надежность стряхивателя;
- за счет применения линейного электродвигателя повышается производительность;

- за счет применения линейного электродвигателя упрощается трансмиссионная передача и как следствие снижается массогабаритных показателей;

- за счет применения линейного электродвигателя снижается вибрация стряхивателя.

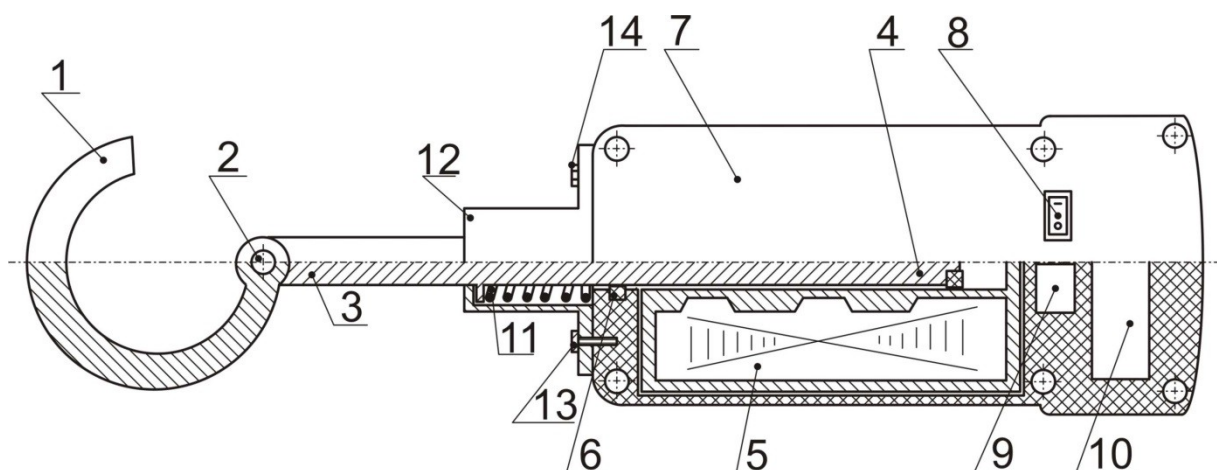


Рисунок 2.24 – Стряхиватель на основе линейного электродвигателя

Энергоэффективность – это один из важных показателей характеризующих ручной электрифицированный инструмент. При проектировании линейного электродвигателя необходимо получить максимальное усилие с минимальным расходом электрической энергии.

Мощность – это основной параметр электродвигателя. Разные условия работы рабочих механизмов формируют различные режимы работы электропривода. Основными режимами работы считаются – длительный, кратковременный и повторно-кратковременный. Согласно рекомендациям при проектировании электрических машин, для длительного режима работы (S1) рекомендована плотность тока 3-4 А/мм<sup>2</sup>, кратковременного режима работы (S2) – плотность тока 10-12 А/мм<sup>2</sup>, и повторно-кратковременного режима работы (S3) – плотность тока 6-8 А/мм<sup>2</sup>. Ток, проходящий по обмотке электродвигателя вызывает нагрев

его частей. Допустимый нагрев электродвигателя определяется нагревостойкостью изоляционных материалов. Большая нагревостойкость изоляции позволяет уменьшить размеры электродвигателя, или при сохранении размеров увеличить его мощность.

Учитывая конструктивные параметры линейного электродвигателя, рассмотренного в статье [8] проведем расчет магнитной системы электродвигателя в программе ElCut, для трех режимов работы. В результате получаем картину распределения магнитной индукции (Рисунок 2.25).



Рисунок 2.25 - Картина распределения магнитной индукции линейного электродвигателя

Характеристикой отражающей силу магнитного поля в любой точке пространства является магнитная индукция. Изменение магнитной индукции в воздушном зазоре между якорем и магнитной системой катушки характеризует меру воздействия на якорь созданного магнитного поля. В Таблице 2.1 представлены результаты расчета магнитной индукции вдоль якоря линейного электродвигателя для трех режимов (S1, S2, S3).

Таблице 2.1 - Результат расчета магнитной индукции линейного электродвигателя, Тл

Режим работы электродвигателя	Длина якоря, мм											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
<b>S1 (длительный)</b>	1,6	0,1	0,3	0,4	0,3	0,2	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1



	5	8		5	2	5	5	3	2	3		
<b>S2 (кратковременный)</b>	3,3	0,5 5	0,7 7	1,1 8	0,8	0,7	1,1 2	1,1	0,7	0,2 7	0,2	0,2
<b>S3 (повторно-кратковременный)</b>	2,6 4	0,4	0,5 7	0,8 8	0,6 4	0,5	0,8 1	0,7 5	0,5	0,2	0,1 6	0,1 6

Для создания усилия требуемого для отделения плода от ветки, необходима сила тяги действующая на якорь не менее 75,39 Н. Выполняя расчет магнитной системы программой ElCut, получим силу тяги действующую на якорь(Рисунок 2.26).

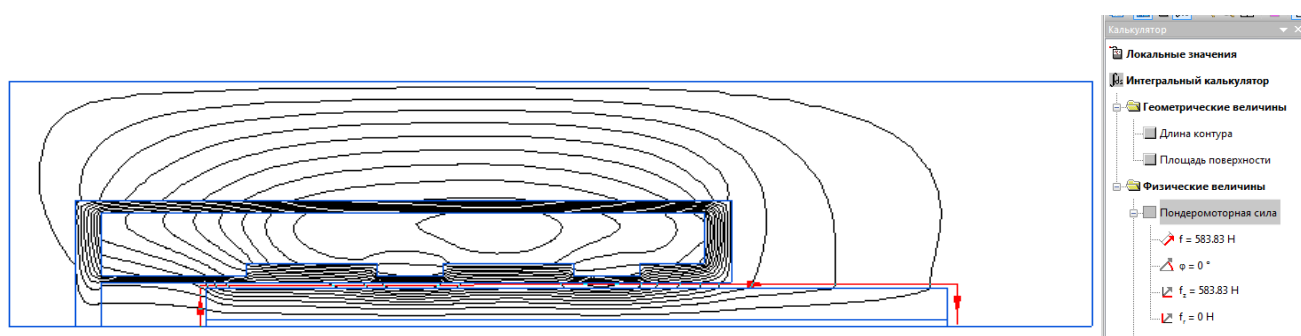


Рисунок 2.26 - Определение силы действующей на якорь линейного электродвигателя

Характеристики линейного электродвигателя в различных режимах работы (S1, S2, S3) приведены на рисунке 2.27.



Рисунок 2.27 - Сила магнитного поля, действующая на якорь линейного электродвигателя: 1 – длительный режим (S1); 2 –

кратковременный режим (S2); 3 – повторно - кратковременный режим (S3)

Рассматривая полученные данные можно сказать о том, что наибольшее значение силы тяги якоря линейного электродвигателя получается для кратковременного режима работы.

Так же было проведено экспериментальное исследование для определения влияния ширины немагнитной вставки статора на силу тяги якоря. Изменение ширины немагнитной вставки варьировалось в пределах длины хода якоря, принятой 18мм, от 10 мм и до 2 мм. Были составлены таблицы экспериментов для катушки намагничивания линейного электродвигателя, в которых указывается ширина немагнитной вставки и значение силы тяги якоря[13].

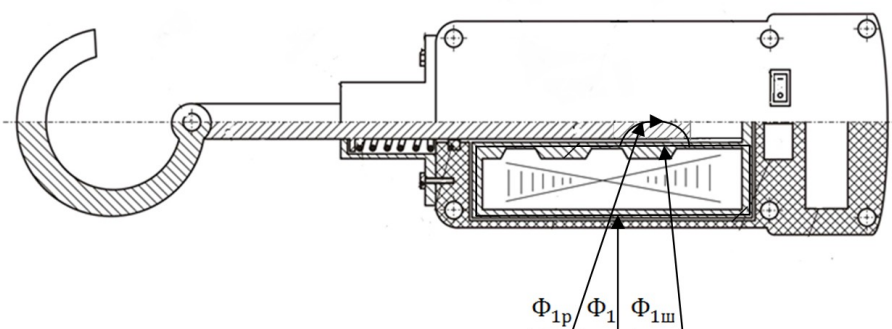


Рисунок 2.28 – Разрез стряхивателя с нанесением основных магнитных потоков в крайнем правом положении работы намагничивающей катушки

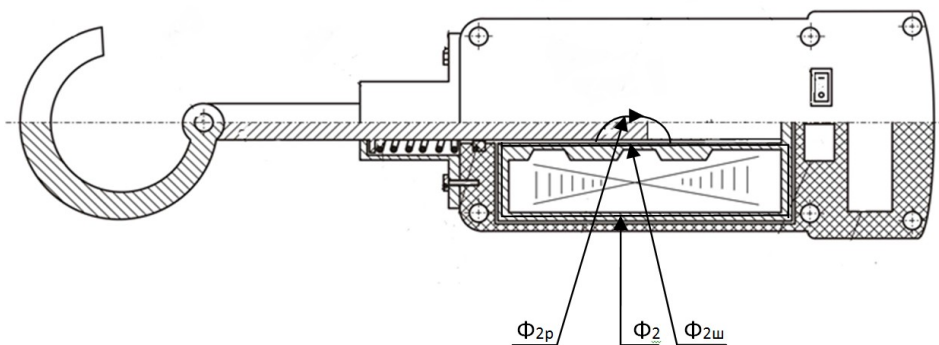


Рисунок 2.29 – Разрез стряхивателя с нанесением основных магнитных потоков в середине работы намагничивающей катушки

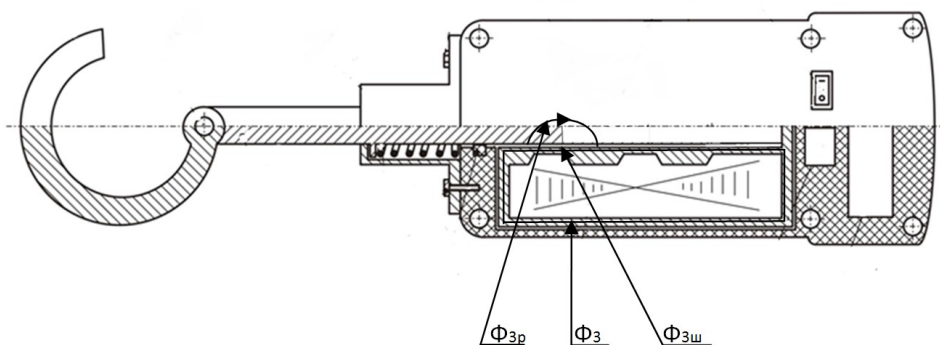


Рисунок 2.30 – Разрез стряхивателя с нанесением основных магнитных потоков в крайнем левом положении работы намагничивающей катушки

Таблица 2.1 – Таблица значений силы тяги якоря при изменении расположения катушки и якоря.

Изменение силы тяги якоря катушки			
L, мм а, °	25°	40°	60°
2 мм	24,1 62	20,8 76	18,5 17
6 мм	27,1 26	28,4 35	31,1 89
10 мм	38,5 12	43,5 91	39,2 73

По полученным значениям были построены поверхностные диаграммы, изображенные на рисунке 2.31.

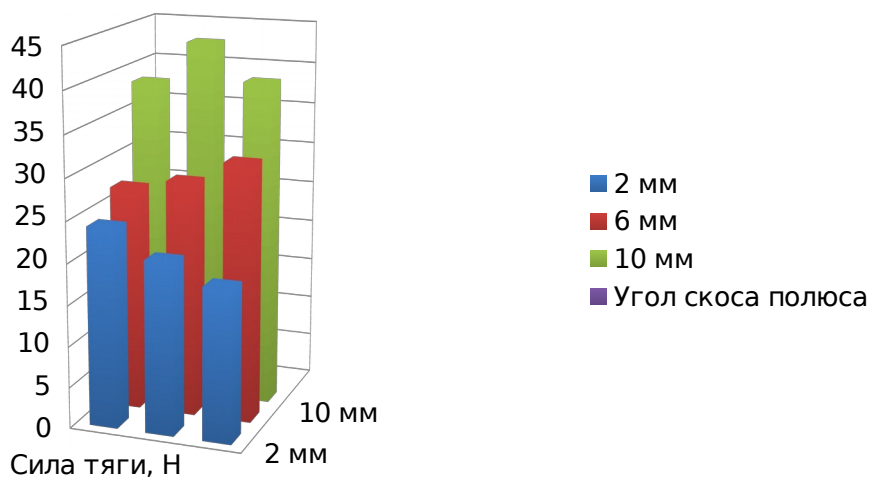


Рисунок 2.31 - Поверхностная диаграмма изменения силы тяги якоря, при изменении расположения катушки и якоря

## **ВЫВОДЫ**

Результатами проведенной работы являются обзор литературы по проблеме электрифицированного сбора плодов и ягод, обзор существующих способов и аппаратов для сбора, выбор метода расчета магнитного поля линейного электродвигателя стряхивателя, расчет магнитного поля с использованием программного обеспечения Elcut 6.3, а также оптимизационные исследования параметров магнитной системы. Для расчета электромагнитного поля был применён метод конечных элементов. Рассмотрена возможность применения программного комплекса ElCut для моделирования магнитной системы линейного электродвигателя стряхивателя. Приведен алгоритм проведения расчета магнитной системы от построения конструкции магнитной системы, до анализа результатов расчета. В результате расчета были получены картины распространения магнитного поля и графики сравнения магнитного поля при различных параметрах магнитной системы. Проведены оптимизационные исследования магнитной системы стряхивателя. В ходе оптимизационных исследований были составлены таблицы экспериментов с изменением ширины немагнитной вставки и угла скоса полюсов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевчук Р.С. Процессы и средства механизации съема плодов. Учебное пособие: Московский рабочий, 2000 – 23 с.
2. Потапов В. А. Плодоводство: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. А Потапов, В. В. Фаустов, Ф. Н. Пильщиков.: Под ред. В. А. Потапова, Ф. Н. Пилщикова. – М.: Колос, 2000. – 432 с.
3. Тавасиев Р. М. Средства малой механизации для плодовых насаждений крестьянских (фермерских) хозяйств : дисс. ... доктора техн. наук. Владикавказ, 2009. 277 с.
4. Машины для садоводства / Ф. Е. Аниферов, Л. И. Ерошенко, И. З. Теплинский.- 2-е изд., перераб. и доп.- Л.: Агропромиздат. Ленингр. отделение, 1990.- 304 с.
5. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. Превод с англ. И. И. Талалова. М. : Энергия, 1970. 376 с.
6. Фисенко В. Г. Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов. М. : Издательство МЭИ, 2002. 44 с.
7. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов, - М.: Издательство «Мир», 1979. – 392с.
8. ELCUT. Руководство пользователя. – Производственный кооператив ТОР, Санкт-Петербург, 2015. - 257 с.
9. ELCUT. Руководство пользователя. – Производственный кооператив ТОР, Санкт-Петербург, 2016.
10. Антонов, С.Н. Проектирование систем электрификации: учебное пособие / С.Н. Антонов. – Ставрополь: АГРУС. – 2015. – 92 с

11. Антонов, С.Н. Проектирование электропривода сельскохозяйственного назначения: учебное пособие / С.Н. Антонов, Д.В. Данилов. – Ставрополь: АГРУС, 2010. – 272 с.
12. Антонов, С.Н. Расчет магнитных систем с помощью программы ElCut / С.Н. Антонов, Г.В. Атанов //Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК: мат. V Российской науч. – практ. конф. – Ставрополь, 2009. – С. 11-14.
13. Антонов С. Н. Опыт моделирования магнитных систем с использованием САПР / Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК: материалы III Российской науч. –практ. конф. (Ставрополь, 20-22 апреля 2005 г.) / Ст.ГАУ. – Ставрополь, 2005. – С. 41-43.
14. Антонов С. Н., Шарипов И. К., Шемякин В. Н., Адошев А. И. Моделирование магнитных систем с использованием систем автоматизированного проектирования / Достижения науки и техники АПК – 2010. — № 10. – С. 75-78.
15. Проектирование магнитных систем электротехнических устройств: Учебное пособие по дисциплине «Проектирование систем электрификации» / С. Н. Антонов, Д. Е. Кофанов; ФГОУ ВПО СтГАУ. – Ставрополь: АГРУС, 2011. – 240 с.

# СОДЕРЖАНИЕ

У	
АННОТАЦИЯ.....	3
КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (бакалаврской работы).....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	6
1.1 Агротехнические требования к уборке плодов.....	6
1.2. Способы и технические средства для уборки плодов.....	10
1.3. Анализ стряхивателей плодов.....	17
1.4 Состояние исследований механизированного съема плодов стряхиванием.....	25
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СТЯХИВАТЕЛЯ.....	31
2.1 МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СТЯХИВАТЕЛЯ.....	31
2.2 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ELCUT 6.3 ПРИ РАСЧЕТЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.....	33
2.2.1 Общие сведения программного обеспечения ELCUT 6.3.....	33
2.2.2 Создание геометрической модели.....	41
2.2.3 Ввод параметров задачи.....	45
2.2.4 Решение задачи и анализ результата.....	50
2.3 ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СТЯХИВАТЕЛЯ.....	57
ВЫВОДЫ.....	64
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	65
СОДЕРЖАНИЕ.....	67