

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»
(наименование)

11.04.04 Электроника и наноэлектроника
(код и наименование направления подготовки)

Электронные приборы и устройства
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Вибрационная установка для создания продольных колебаний

Обучающийся

С.А. Угаров

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, А. В. Прядилов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Содержание

Введение.....	3
1 Обзорная часть	5
1.1 Обзор классификации вибростендов.....	8
1.2 Обзор вибростендов	9
2. Разработка электромагнитной системы.....	16
2.1 Обзор электромагнитных систем.....	17
2.2 Конструктивная схема установки.....	22
3. Силовая часть систем питания	25
4. Математическое моделирование и расчеты.....	30
4.1 Расчет магнитных полей.....	30
4.2 Моделирование электрической и механической систем.....	38
4.3 Моделирование электрической части	53
4.4 Моделирование электромеханической части	56
4.5 Анализ результатов	59
5. Выбор электромагнитной и силовой части	67
5.1 Выбор элементов силовой части.....	67
5.2 Алгоритм работы системы управления.....	77
Заключение	81
Список используемой литературы	82
Приложение А Перечень выбранных силовых элементов схемы	86

Введение

На сегодняшний день вибрационная техника получила широкое распространение во многих сферах жизни современного человека [7, 19, 25, 28, 34]. Так, например, при построении современных домов используют бетонные плиты, полученные при использовании систем виброутряски [29]: бетонная масса с добавлением необходимых примесей заливается в специальную форму (в которую может уложен арматурный каркас), которую укладывают на вибростол и после утрамбовки сушат в течении суток. «Помимо этого, в настоящее время для механизированной укладки и уплотнения бетонной смеси применяют вибрирование, виброштампование, вибропрокат, вибровакуумирование, центрифугирование и пр. Вибрирование можно сочетать с другими способами уплотнения, что значительно увеличивает эффект уплотнения. В процессе уплотнения бетонной смеси на виброплощадке, например, изделие можно дополнительно прессовать путем укладки на него сверху тяжелой плиты (вибрирование с пригрузом). При оборудовании пригрузочной плиты вибратором смеси уплотняются одновременно вибрацией сверху и снизу. Виброштампование — одновременное воздействие на уплотняемую бетонную смесь колебаний и нагрузки вибратора-штампа. Сущность виброштампования состоит в том, что вибрирующий штамп, установленный на поверхность бетонной смеси, в процессе работы разжижает ее и, погружаясь в бетонную смесь, выштамповывает изделие, имеющее очертание формы и штампа.»[28]. Или, например, некоторые автовладельцы, в случае подозрения неисправности или износа амортизаторов, доставляли свой автомобиль в СТО для проверки подвески на вибростенде [7] — как правило, гидравлическом либо электродинамическом вибраторе — для формирования колебаний подобных имеющимся при передвижении машины.

Так же высока роль вибротехники в промышленности, где она используется практически повсеместно: в атомной, химической, горнодобывающей, легкой, пищевой и других отраслях промышленности. В том числе вибрация используется для перемещения материалов. Это так называемые виброконвейеры.

В настоящем проекте производится выбор электромагнитной схемы вибростенда и системы питания для нее. Для этого проведен обзор существующих моделей, сравнение с аналогами, сравнение и анализ выбранных схем, моделирование сравниваемых схем для выбора наилучшей, а также выбор элементов.

Вибростенд – устройство для проверок на вибропрочность и виброустойчивость, на многократные и одиночные удары электронных, машиностроительных механизмов, проведения технологической вибрации и отбраковки и прочих видов испытаний различных объектов. Также вибростенд применяют для исследования воздействия вибрации на процесс затвердевания расплавленных металлов и сплавов, для калибровки различной аппаратуры.

1 Обзорная часть

«Вибрационная техника [19] - совокупность методов и средств возбуждения механических колебаний (вибрации) в диапазоне частот порядка от 10 МГц до 10 КГц, а также способы управления вибрацией, измерения и контроля её, борьбы с вредной вибрацией. К средствам вибрационной техники относятся: вибрационные машины, вибрационные стенды, приборы, аппараты, устройства с преднамеренным возбуждением вибрации для выполнения полезных функций (например, при уплотнении грунта и бетонной смеси, при испытаниях); аппаратура для управления вибрацией и измерения её; средства антивибрационной техники, т. е. устройства для предотвращения, подавления, гашения и изоляции вредной вибрации.

В вибрационной технике используются следующие эффекты, возникающие при вибрировании: создание одностороннего направленного движения штучных изделий и насыпных грузов, ударно-вибрационное внедрение и извлечение труб, шпунта и свай, перекачка жидкостей; поддержание циркуляционного движения обрабатываемого материала или частые соударения твёрдых элементов вибрируемой среды (вибрационная обработка, помол, перемешивание); множественное возобновление и нарушение контактов между частицами вибрируемой среды (тепло- и массообменные процессы — нагрев, сушка, охлаждение); создание интенсивных перемещений твёрдых частиц или частиц эмульсии относительно жидкой вибрируемой среды (экстракция, растворение, выщелачивание, окрашивание); удары, передаваемые рабочим органом на вибрируемую среду (ударно-вибрационное дробление, трамбование, очистка поверхности фильтров); снижение сопротивления среды действию малых постоянных сил за счёт вызванного вибрацией проскальзывания частиц

среды или её слоев (уплотнение, заполнение тары, резание грунта и т.д.)»[19]

«Наиболее распространёнными видами вибрационного привода рабочих органов средств вибрационной техники являются центробежный, возбуждающий колебания до 500 *гц*, электромагнитный (50—100 *гц*), поршневой (5—80 *гц*), кривошипно-шатунный (1—20 *гц*). Измерением параметров вибраций (перемещений, скоростей и ускорений, частот, фаз, амплитуд) занимается виброметрия, к средствам которой относятся виброметры и акселерометры. Различают 2 метода измерения вибрационных перемещений, скоростей и ускорений: измерение величин относительно не зависимой от колеблющегося тела системы отсчёта; измерение деформации упругого звена с помощью инерционного элемента, связанного с колеблющимся телом. Современная виброизмерительная аппаратура состоит из датчиков, преобразователей, анализаторов, показывающих и регистрирующих приборов, сигнализирующих устройств. Для обеспечения точности измерений виброизмерительная аппаратура подвергается калибровке.

Одной из задач вибрационной техники является защита людей, приборов, машин, сооружений от действия вредной вибрации. Помимо обычной пассивной виброизоляции, не требующей дополнительных источников энергии, применяют статическую и динамическую балансировку, подбор инерционных и упругих параметров, исключающих работу в зонах резонансов, введение демпфирующих элементов при невозможности работы вдали от области резонанса, динамическое гашение вибрации путём присоединения специально настроенных вибрационных (масса на пружине, маятник) или ударно-вибрационных (шарики, ударяющиеся о стенки) устройств, установку гироскопов для гашения угловых колебаний; средства активной виброизоляции (автоматическое подавление колебаний). Динамическое управление вибрацией может преследовать цели гашения,

усиления или стабилизации колебаний. Динамическое усиление колебаний осуществляется настройкой системы на резонансный режим.»[19]

«При некоторых настройках в двух- и многомассных системах возможно осуществление динамической стабилизации амплитуды вынужденных колебаний, которая становится почти не зависящей от изменения вибрируемых масс или жёсткости некоторых элементов.

Также в настоящее время в промышленности широко применяются виброконвейеры. Движение материала при вибрационном транспортировании осуществляется путем микробросков от колебаний с заданными частотой, амплитудой и углом грузонесущего органа [6]. Внутри грузонесущих органов вибрационных конвейеров, выполненных в виде труб или желобов, отсутствуют какие-либо движущиеся конструкции. Ограничением для применения виброконвейеров является склонность транспортируемых материалов к налипанию. Кроме того, требуется тщательный выбор параметров вибрации при транспортировании легких мелкодисперсных материалов типа цемента.

Основными достоинствами вибрационного транспорта являются:

- значительное улучшение санитарно-гигиенических условий труда и уменьшение загрязнения окружающей среды за счет возможности выполнения вибротранспортных машин в пылеплотном или герметичном исполнениях (места пересыпок материала уплотняются резиновыми герметизаторами);
- исключается возможность загрязнения транспортируемого материала посторонними веществами и его потери с просыпями и пылью;
- малый износ грузонесущего органа даже при транспортировке абразивных материалов;- возможность совмещения процесса

- транспортирования с просеиванием, подогревом, охлаждением, отмывкой, смешиванием и другими технологическими операциями;
- простота конструкции. » [19]

«Вибрационные конвейеры выгодно отличаются от скребковых и винтовых (шнеков) значительно меньшими металло- и энергоемкостью, надежностью в работе, низкими эксплуатационными затратами. В решении задач охраны труда и окружающей среды конкурентом вибротранспорту могут быть трубчатые конвейеры с гибким тяговым органом внутри трубы, но они уступают виброконвейерам по надежности и ремонтпригодности.»[19]

1.1 Обзор классификации вибростендов

Различают следующие виды виброустановок [19] по устройству (рисунок 1):

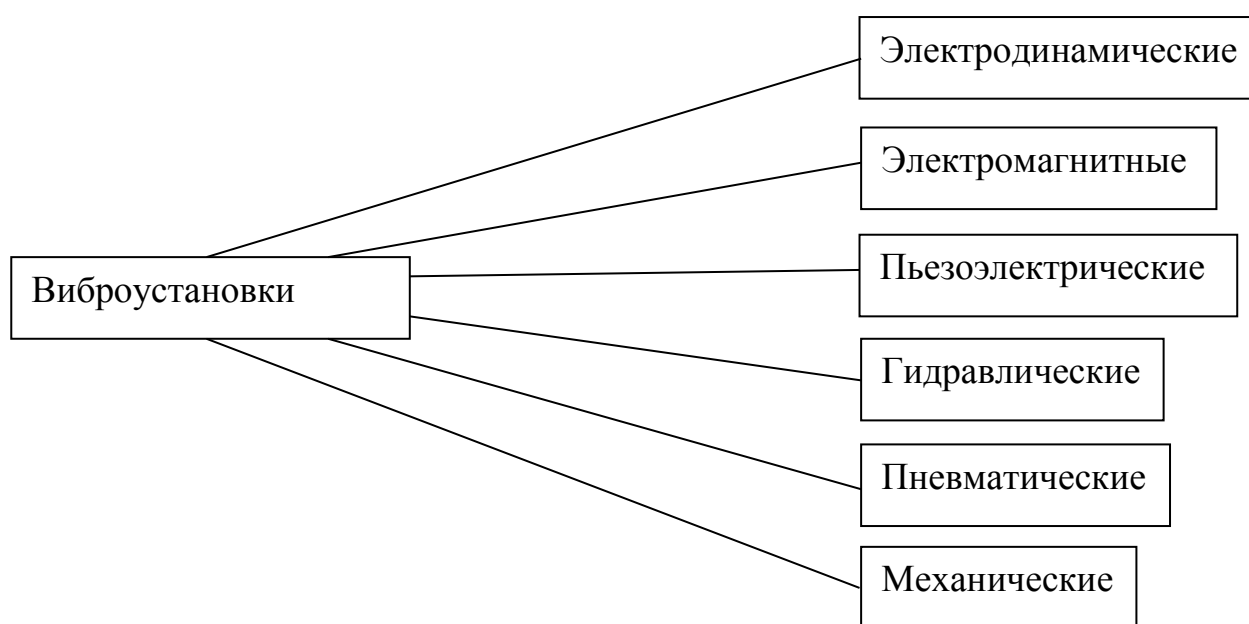


Рисунок 1 - Виды виброустановок

По назначению виброустановки предназначаются для [36]

- Испытаний,

- Калибровки,
- Транспортировки,
- Сейсморазведки [35],
- Исследований (вибростенды).

«Вибростенды [36] чаще всего применяются двух типов: электромеханические и электродинамические. В электромеханических стендах вибрация площадки создается благодаря вращению разбалансированных дисков, приводимых во вращение электродвигателем. Эти стенды не позволяют получить большой диапазон частот и ускорений. В электродинамических стендах вибрация создается при взаимодействии магнитных полей неподвижного постоянного магнита и подвижной катушки, в обмотку которой подается переменный ток нужной частоты и напряжения. Эти стенды позволяют получить вибрационные воздействия на испытуемые диоды в широком диапазоне частот и ускорений» [3].

1.2 Обзор вибростендов

В настоящем пункте приведен обзор существующих вибростендов, выпускающихся современной промышленностью. Каждый занимают свою позицию в представляемой нише. Так же здесь отображено многообразие типов вибростендов, в зависимости от их назначения.

Механический вибростенд SY-80



Рисунок 2 – Механический вибростенд SY-80, модификации

Механический вибростенд SY-80 (рисунок 1) отличается рационально разработанной конструкцией, надежной работой, простой эксплуатацией и удобным управлением. Подходит для использования при испытаниях на виброустойчивость в вертикальном положении электронных компонентов, приборов, механических и электрических изделий и прочих образцов в лабораториях и на производственных линиях.

Вибростенды электродинамические ВС-133

Вибростенды ВС-133 (Рисунок 2) предназначены для калибровки и поверки вибродатчиков и виброметров. Управление осуществляется с помощью анализатора спектра ZET017 в автоматическом режиме.

Дополнительная погрешность измерения параметров вибрации (на базовых частотах 45 и 80 Гц) при изменении питающего напряжения в пределах $\pm 10\%$ относительно номинального значения не более $\pm 0,5\%$.

Дополнительная погрешность измерения параметров вибрации (на базовых частотах 45 и 80 Гц) при изменении температуры окружающей

среды в пределах рабочего диапазона температур от значения при номинальной температуре (+20°C) не более $\pm 0,5 \%$



Рисунок 3 – Вибростенд ВС-133

Электрическое сопротивление изоляции между корпусом и изолированными по постоянному току электрическими цепями усилителя мощности в нормальных условиях применения не менее 20 МОм.

Виброустановка – изделие восстанавливаемое, ремонтируемое. Среднее время восстановления работоспособности не более 6 часов.

Установленная безотказная наработка не менее 1000 час при доверительной вероятности 0,95. Полный средний срок службы не менее 10 лет.

Гидравлический вибростенд SY-70



а) Гидравлический вибростенд SY-70



б) – Формовочный вибросто

Рисунок 4 - Вибростенды

Вибростолы для производства тротуарной плитки серий ВС-700 и ВС-1300

Формовочные вибростолы (Рисунок 4б) предназначены для производства вибролитьевой тротуарной плитки, элементов архитектурного декора, заборов и подобных бетонных изделий методом вибролитья.

Особенности и достоинства тротуарной плитки сделали этот материал популярной альтернативой асфальтовому покрытию. Этому способствуют не только сравнительная простота укладки, ремонта и демонтажа плиточных мостовых, их декоративные свойства или экологические достоинства, но и доступность этого материала для частных лиц.

Широкому распространению тротуарной плитки способствует и тот факт, что производить ее может любое, даже очень небольшое предприятие.

Оборудование для производства тротуарной плитки отличается простотой в обслуживании и эксплуатации, экономичностью и небольшими габаритами, позволяющими разместить станок для производства плитки в

помещении с ограниченной площадью или на открытом участке. Наиболее популярной является технология изготовления тротуарной плитки вибролитьевым методом, который позволяет значительно снизить пористость камня.

Вибростол «ВС-1300» для производства тротуарной плитки

Технические характеристики вибростола для тротуарной плитки:

- Габаритные размеры вибростола (Д*Ш*В): 130*110*85 см.
- Тип установленного вибратора: ВП-250, с вертикальным направлением вибрации
- Установленная мощность вибростола: 0,25 Квт
- Рабочее напряжение: 220В
- Масса, не менее: 100 кг.
- Объем вибростола для без учёта жёсткой упаковки: 1,25 м3

Схема вибростола для тротуарной плитки ВС-1300 (Рисунок 5):

- Опора стола
- Виброплощадка
- Разъём электропитания
- Вилка электропитания
- Выключатель вибраторов
- Резиновые виброопоры
- Вибраторы электромеханические

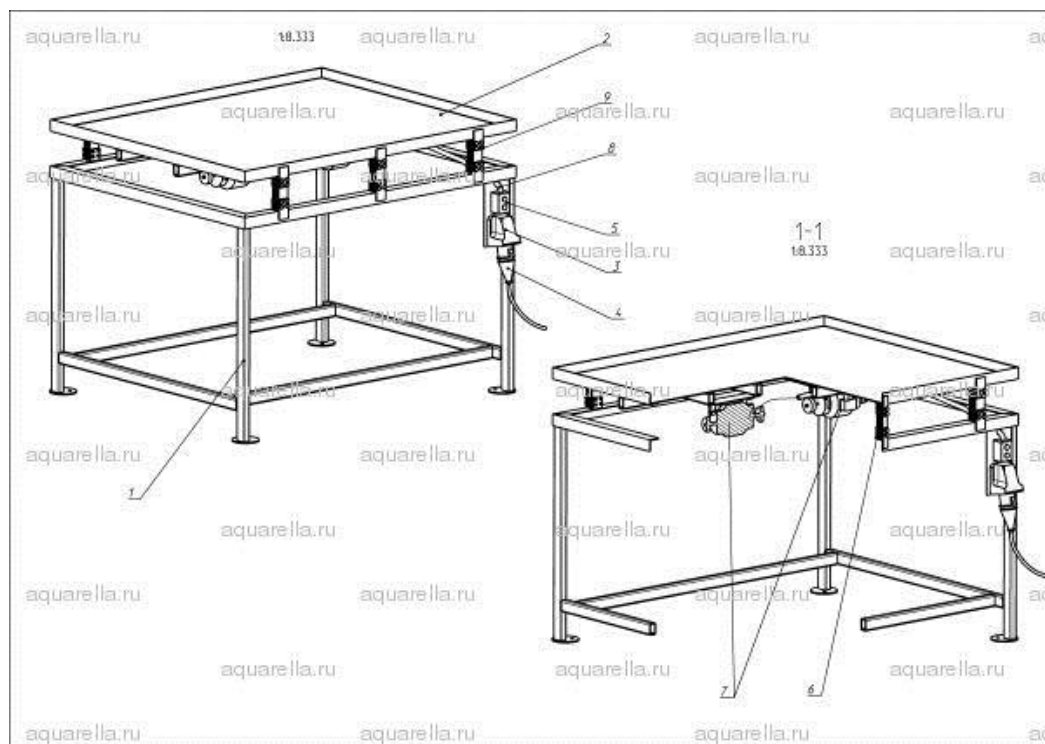


Рисунок 5 – Схема вибростола

Сборный вибростенд ВС-6000 (9000) для формования ж/б балок.

Сборный вибростенд для производства ж/б балок-перекрытий (Рисунок 6) длиной до 9 м. Вибростенд состоит из модулей, ВС-6000 включает в себя 3 модуля, ВС-9000 - 4 модуля. Размеры балок: Д*Ш*В 6000(9000)*120*40 мм.

Технические характеристики модуля:

- Производительность: 48 м/п в смену
- Количество одновременно формируемых балок: 7 шт.
- Рабочее напряжение: 220В/50Гц
- Мощность вибратора : 0,35 кВт
- Габаритные размеры модуля (Д*Ш*В): 225*107*60 см.
- Габаритные размеры направляющих (Д*Ш*В): 6000(9000)*25*40 мм.
- Масса, не более: 100 кг

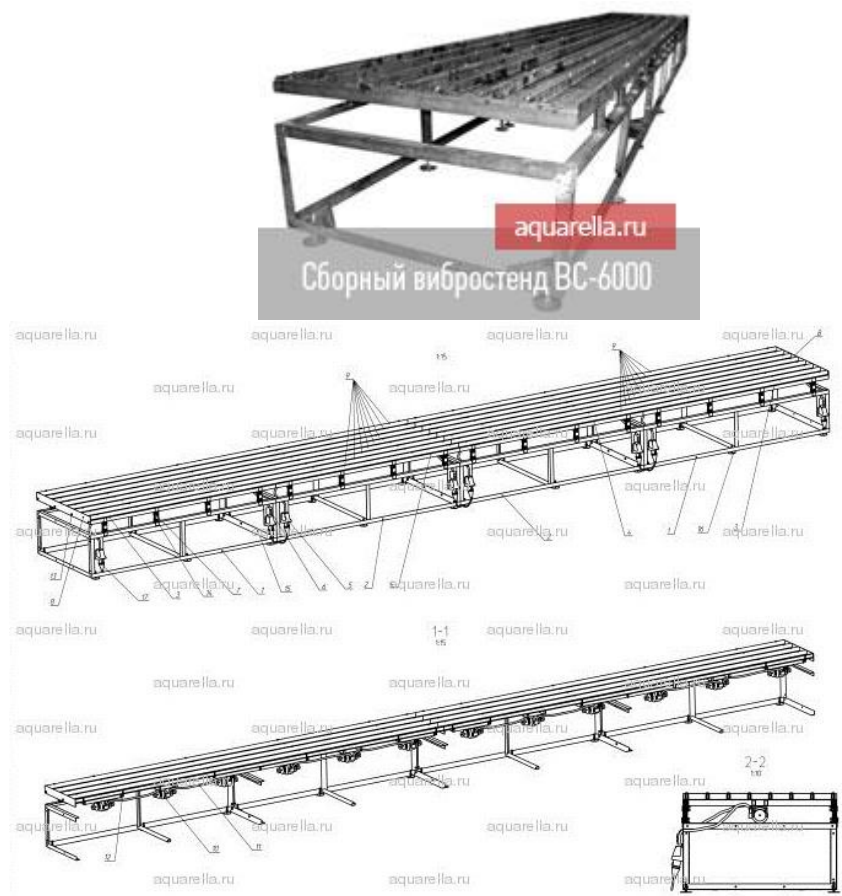


Рисунок 6 – Сборный вибростенд для производства ж/б балок-перекрытий

Вывод по разделу.

В первой главе изложены основные понятия, приведена классификация виброустановок, проведен обзор существующих вибростендов.

2 Разработка электромагнитной системы

Электромагнитные вибраторы содержат якорь и индуктор [4,5], взаимные колебания которых происходят при подаче импульсов тока в обмотки возбуждения. Электромагнитные вибраторы являются наиболее простыми по конструктивному исполнению и эксплуатации, легко управляемыми, а следовательно, и более надежными. Однако отсутствие элементной базы – полностью управляемых силовых приборов, способных коммутировать токи порядка сотен ампер и напряжений в несколько киловольт - до недавнего времени сдерживало развитие и применение мощных электромагнитных вибраторов. Областью их применения были промышленные вибротехнологии и вибрационная сейсморазведка полезных ископаемых. [2, 16, 17, 18]

Увеличение эффективности работы выше отмеченных вибраторов достигается использованием их в составе механических систем, работающих в резонансных режимах. Уход от резонансного режима при изменении частоты силового воздействия или параметров нагрузки сопровождается появлением реактивной составляющей в потребляемой вибратором мощности. При этом для поддержания на заданном уровне амплитуды колебаний или силового воздействия на нагрузку требуется использование вибраторов с большей габаритной мощностью. Нерезонансный режим работы ведет к сдвигу фаз между возбуждающей силой и колебательной скоростью движущихся частей, что приводит к рассогласованию в работе нескольких одновременно работающих на общую нагрузку вибраторов. Выше рассмотренные факторы приводят к уменьшению эффективности работы виброустановки.

Для изменения частоты работы при сохранении резонансного режима необходимо регулировать собственную частоту колебательного контура механической системы. Обычно это осуществляется путем

использования добавочных масс или изменения жесткости пружин, что связано с техническими трудностями (остановкой производства, использованием ручного труда). Перспективным направлением решения этой задачи является создание колебательной системы с применением в ней упругого элемента, функции которого выполняет электромагнитный преобразователь. Источник питания создает в нем начальное магнитное поле, а кинетическая энергия движущихся масс колебательной системы на каждом полупериоде колебаний преобразуется в энергию электромагнитного поля и обратно. Таким образом, из источника потребляется энергия, расходуемая только на восполнение потерь в колебательной системе.

2.1 Обзор электромагнитных систем

«Самой распространенной конструкцией электромагнитного преобразователя, работающего на продольном магнитном потоке, является конструкция, представленная на рисунке 7, г (так называемый плоский магнит, конструкция со стопом). Эта конструкция обладает наилучшими удельными силовыми характеристиками (механическая сила магнита, отнесенная к его массе). Однако в такой конструкции возможно возникновение ударных режимов работы, при которых происходят удары якоря об индуктор, приводящие к разрушению магнитопроводов. Использование такой конструкции требует применения сложной системы авторегулирования и реализации специальных алгоритмов управления для системы питанием магнита для получения необходимого закона изменения силы.

Наиболее распространенной конструкцией, работающей на поперечном магнитном потоке, является конструкция, изображенная на

рисунке 7, а. Другой (альтернативной) конструкцией магнитной системы может быть втяжная конструкция (рисунок 7, б).»[19]

«Конструкция по рисунку 7, а может быть модернизирована заменой паразитного зазора дополнительной зоной энергопреобразования (рисунок 7, в). Данный принцип известен и широко применяется в магнитных преобразователях.»[19]

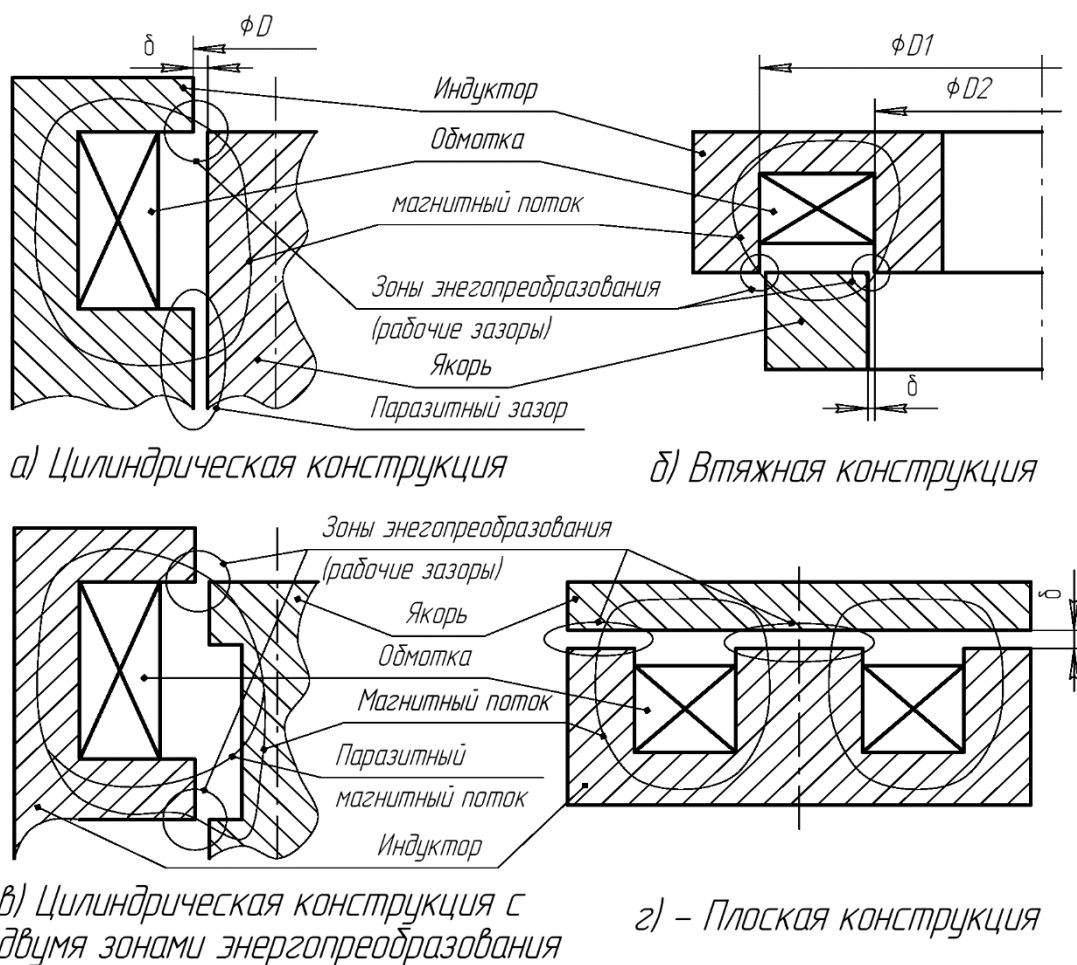


Рисунок 7 – Конструкции электромагнитного преобразователя вибратора.

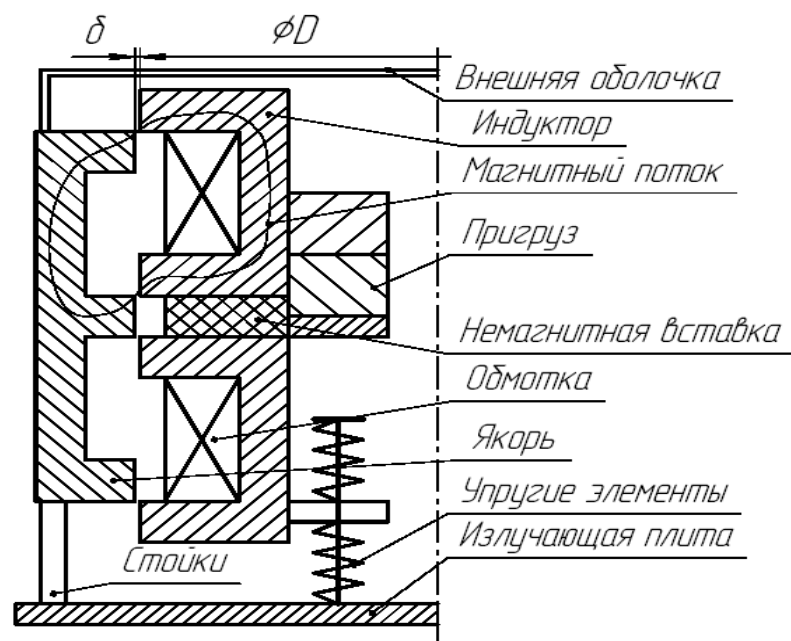


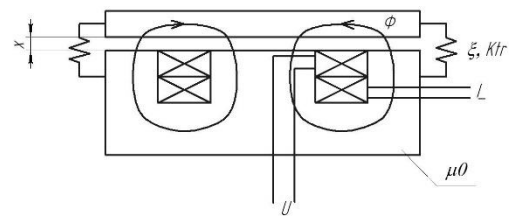
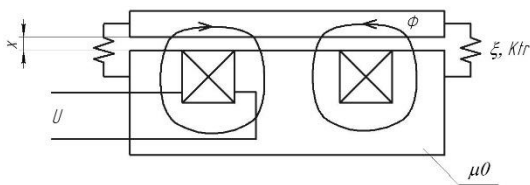
Рисунок 8 – Цилиндрическая обращенная конструкция
(с двумя зонами энергопреобразования).

«Вышеприведенные конструкции изображены в прямом исполнении, однако они могут быть выполнены и в обращенном исполнении (рисунок 8), когда индуктор содержится внутри якорных частей.»[19]

Наиболее подходящей для разрабатываемой схемы посчитали схему, обладающую наилучшими силовыми характеристиками, поэтому выбрали плоский электромагнит.

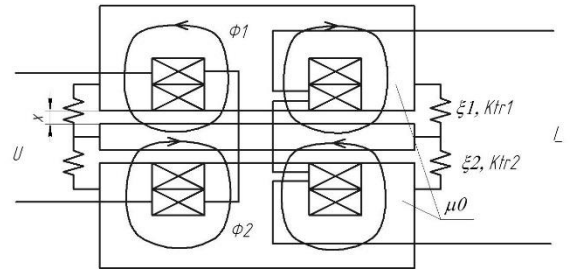
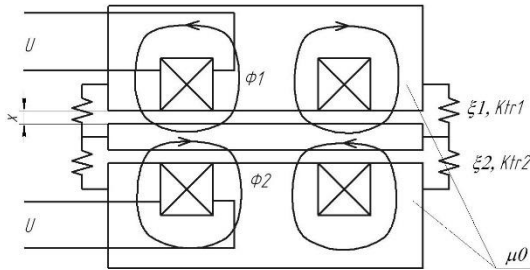
Конструкция плоских электромагнитов может отличаться, как, например, в рассмотренных ниже системах :

- Однотактной без подмагничивания (Рисунок 9, а)
- Однотактной с подмагничиванием (Рисунок 9, б)
- Двухтактной без подмагничивания (Рисунок 9, в)
- Двухтактной с подмагничиванием (Рисунок 9, г)



а) Однотактная без подмагничивания

б) Однотактная с подмагничиванием



в) Двухтактная без подмагничивания

г) Двухтактная с подмагничиванием

Рисунок 9 – Конструктивные схемы анализируемых виброустановок

Рисунок 9, а – самая простая схема – однотактная без подмагничивания. Индуктор содержит пазы с обмоткой, на которую подается напряжение 220В с пониженной частотой $f=25$ Гц. Якорь закреплен на индукторе - подвешен с помощью пружин для создания упругой силы, удерживающей его над индуктором. При подаче напряжения в систему якорь начинает попеременно притягиваться к индуктору – при поступлении управляющего импульса – и отталкиваться от него – при отсутствии импульса.

Рисунок 9, б – однотактная схема с подмагничиванием, - отличается от первой тем, что в пазах присутствует дополнительная обмотка подмагничивания. Частота напряжения в данном случае 50 Гц.

Рисунок 9, в - двухтактная схема без подмагничивания, отличается от однотактной наличием второго индуктора, из-за чего увеличивается масса системы. Якорь в данном случае закрепляется пружинами между двумя индукторами. Пружинами устанавливается исходное положение якоря.

Рисунок 9, г - двухтактная с подмагничиванием – помимо наличия дополнительных обмоток подмагничивания отличается от предыдущей необходимостью подачи удвоенного напряжения.

Следует отметить, что для формирования тока в системах без подмагничивания требуется более простая схема инвертора, в отличие от требуемой для систем с подмагничиванием, в то же время для двухтактных систем без подмагничивания требуется 2 инвертора, в то время как для систем с подмагничиванием достаточно одного. Однако при этом стоимость силовых приборов в системах с подмагничиванием будет ниже за счет более низкой потребляемой мощности. К минусам однократных систем можно отнести вероятность удара во время работы, склонность к схлопыванию, что в двухтактных системах маловероятно.

Выбрали геометрические размеры электромагнита, свели их в таблицу 1 (Рисунок 10).

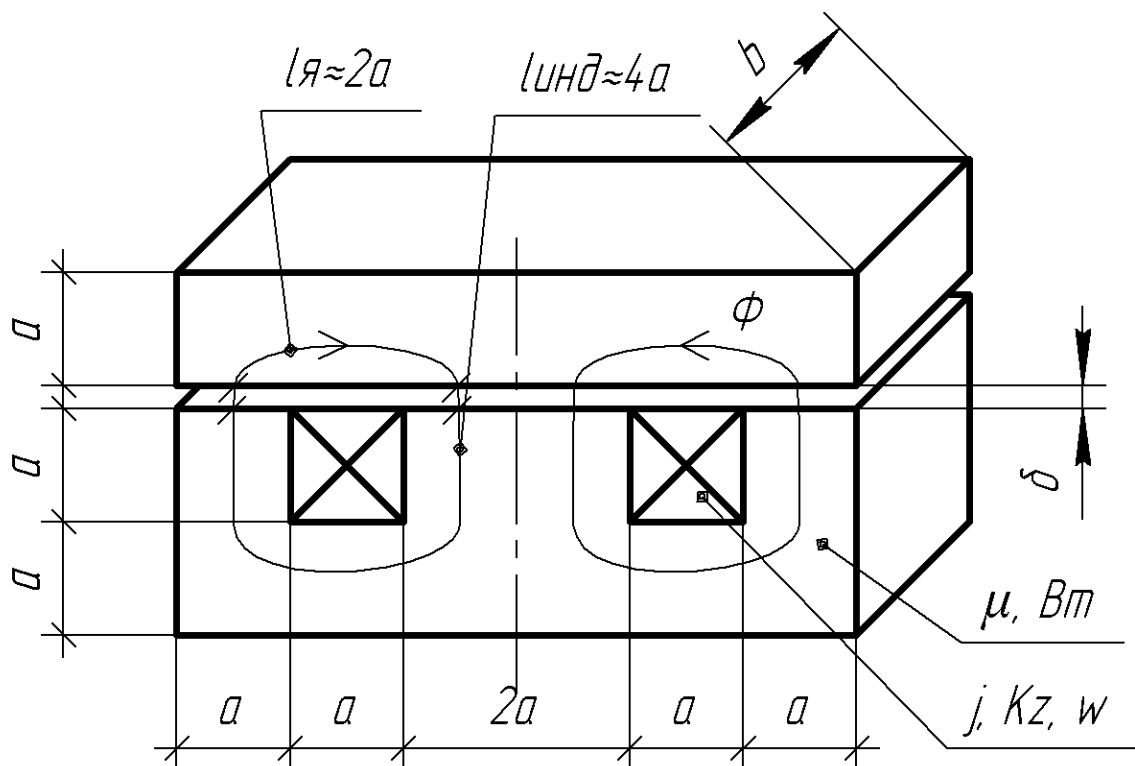


Рисунок 10 – Геометрические размеры электромагнита.

Таблица 1 – Геометрические размеры электромагнита

а, мм	в, мм	δ, мм	Kz	w	μ
50	300	5	0.5	50	1000

Где

- геометрические размеры: а (мм), в(мм), δ (мм);
- параметры обмотки: коэффициент заполнения окна Kz, число витков w.

2.2 Конструктивная схема установки

Зная геометрические размеры электромагнита, можно уделить внимание конструктивной схеме установки (Рисунок 11). Электромагнит располагается в корпусе. Индукторы неподвижны и жестко закреплены на корпусе. Якорь подвешен на пружинах между индукторами. Поддон жестко скреплен с якорем. В пазах индукторов уложено по две обмотки гальванически не связанные между собой обмотки – питания и подмагничивания.

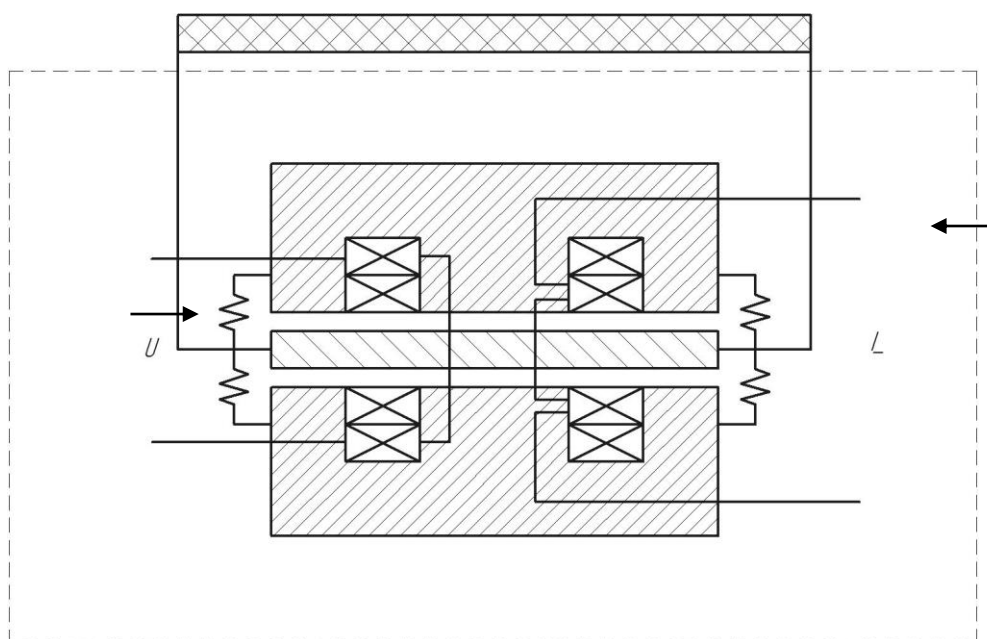


Рисунок 11 – Конструктивная схема установки

Следующий рисунок демонстрирует работу электромагнитной системы. В данном случае через обмотку течет максимальное значение тока, вследствие чего на якорь действует максимальная намагничивающая сила, зазор при этом минимальный ($x = 0.001$ м), а скорость якоря равна нулю. Согласно описанию работы схемы, в следующий момент начнется перекачка энергии, ток будет снижаться, что повлечет снижение намагничивающих сил. Под действием упругих сил пружины начнут тянуть якорь в исходное положение. Зазор начнет увеличиваться, как и скорость якоря.

Пограничное состояние системы при минимальном зазоре представлено на рисунке 12. Ниже приведен график зависимости электромагнитной силы от величины тока в системе, в зависимости от перемещения (Рисунок 13).

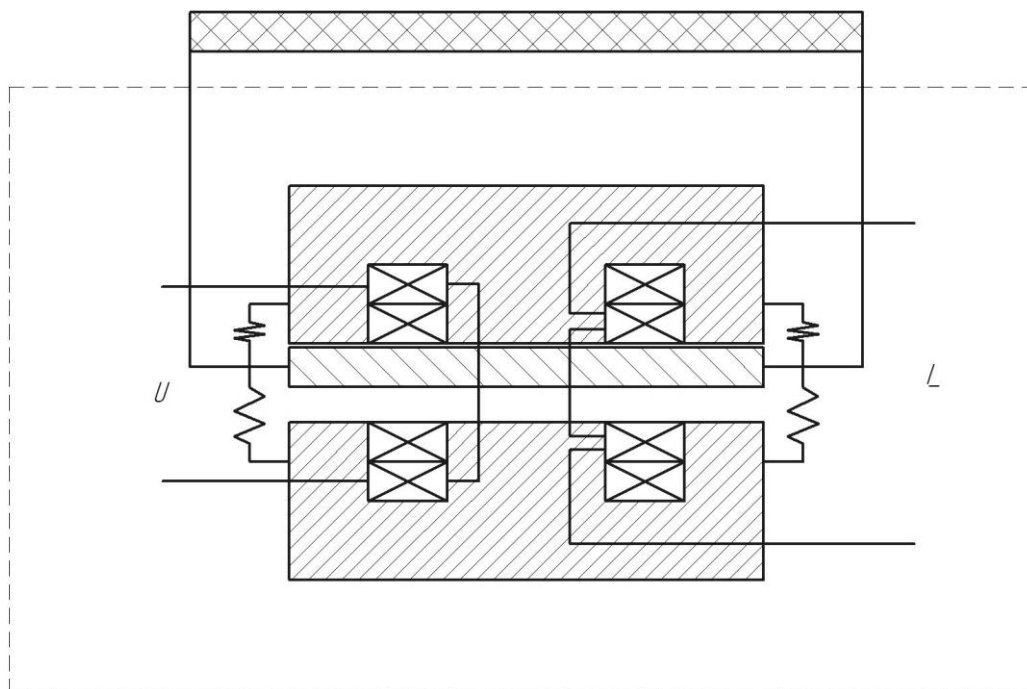


Рисунок 12 – Система при подаче напряжения в первую обмотку

График, соответствующий положению системы, показанному на рисунке 12, помечен как $x=0.001$. Для начального, исходного положения системы служит график $x=0$. Значения перемещения указаны в метрах.

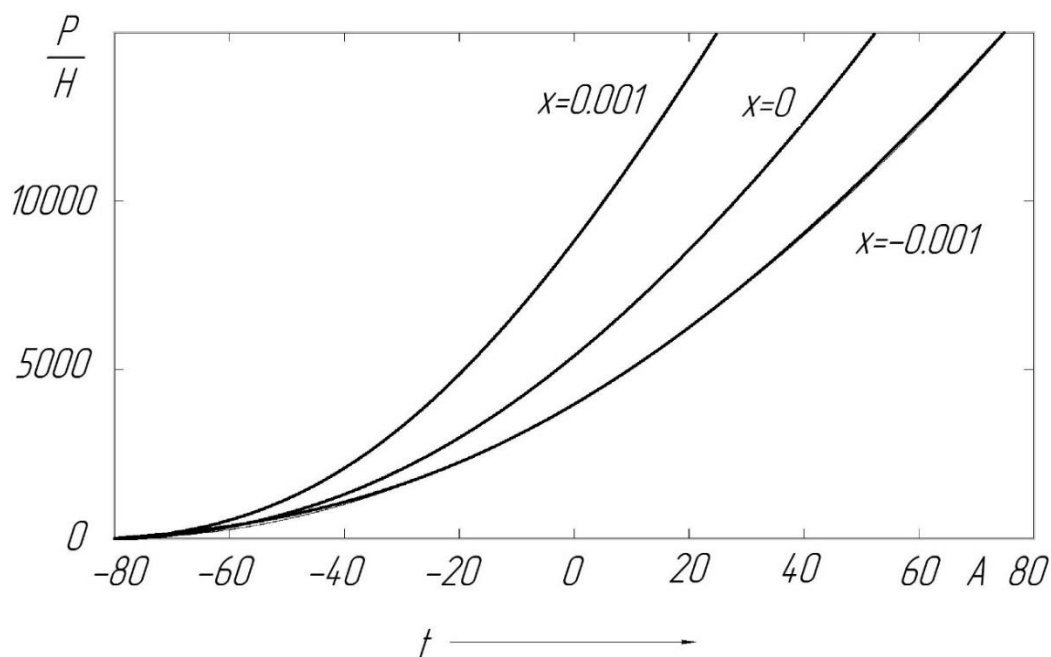


Рисунок 13 – График зависимости электромагнитной силы от тока

Выводу по разделу.

Вторая глава посвящена разработке электромагнитной системы. В ней рассматриваются существующие электромагнитные системы, производится выбор наиболее подходящей для разрабатываемого устройства. Производится выбор габаритных размеров электромагнита и его конструкция

3 Силовая часть систем питания

Для упрощения выбора системы питания определились с алгоритмом работы. Блок-схема установки (Рисунок 14):

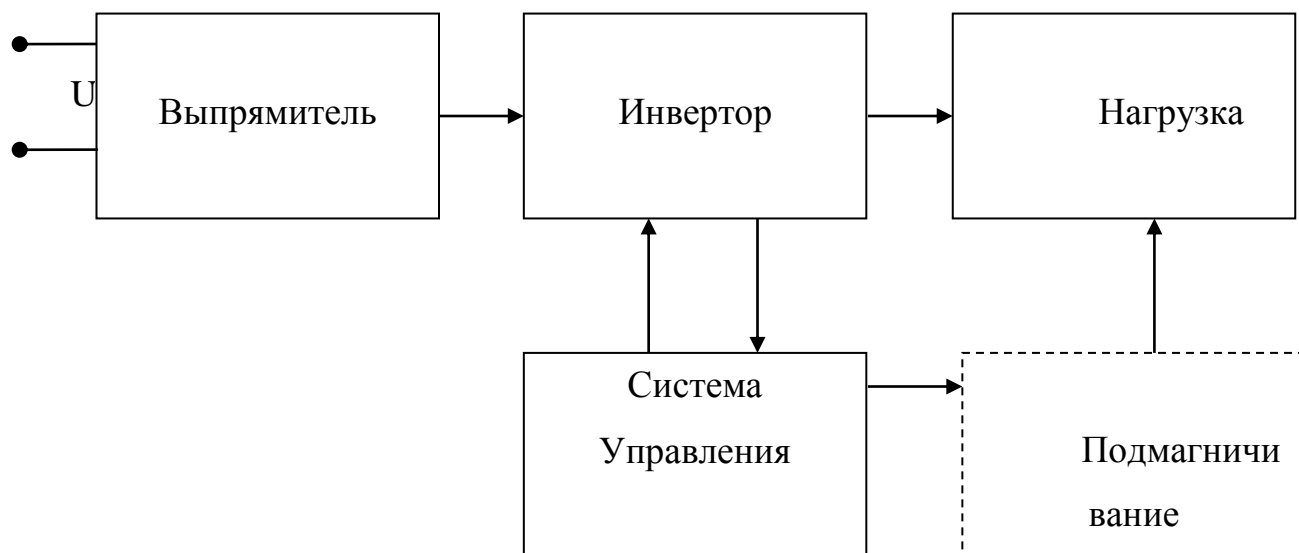
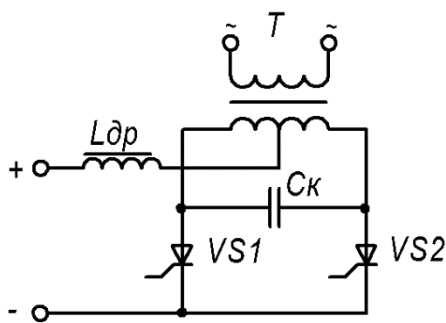


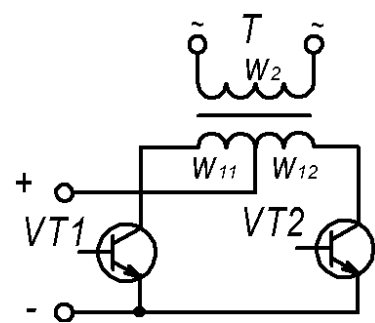
Рисунок 14 – Блок-схема работы системы питания

Согласно алгоритму работы установка содержит выпрямитель, предназначенный для обработки сетевого напряжения и подачи на инвертор постоянной составляющей сигнала.[30] В случае с двухтактной установкой с подмагничиванием в блок выпрямителя включается блок «трансформатор» для повышения напряжения, поскольку данная установка требует удвоенного напряжения питания. Мостовой инвертор, управляемый системой управления, формирует переменное напряжение на нагрузке. Блок подмагничивание выделен пунктиром, подразумевающим отсутствие его в системах без подмагничивания.

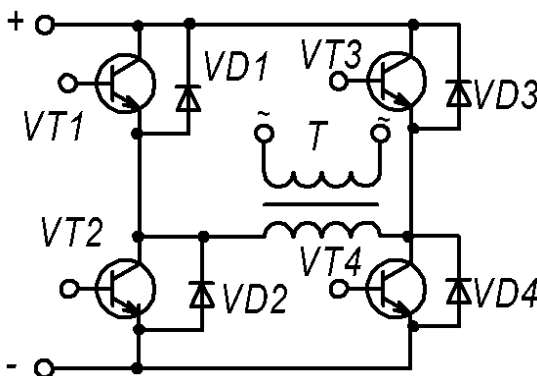
«Инверторами напряжения называются автономные преобразователи, в которых переменное напряжение на нагрузке образуется в результате ее периодического подключения с помощью ключей к источнику постоянного напряжения, причем с помощью ключей обеспечивается чередующаяся полярность импульсов напряжения на нагрузке. Инверторы напряжения (Рисунок 15) выполняются на полностью управляемых приборах (транзисторах, двухоперационных тиристорах, однооперационных тиристорах, снабженных цепями коммутации).»[13, 14, 15]



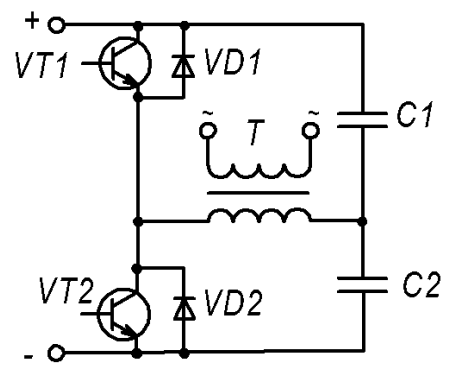
а) Двухтактная схема тиристорного инвертера с нулевой точкой



б) Двухтактная схема транзисторного инвертера с нулевой точкой



в) Мостовая схема транзисторного инвертера



г) Полумостовая схема транзисторного инвертера

Рисунок 15 – Инверторы

Наиболее подходящей схемой для исследуемой установки будет мостовая схема транзисторного инвертора, поскольку она наиболее полно отвечает требованиям, выдвинутым к системе питания. Рассмотрим инвертор, работающий на трех состояниях (Рисунок 16).

Формирование тока на положительной волне тока I_z происходит при помощи переключения только диагональных ключей VT1, VT4, остальные ключи остаются выключены весь этот промежуток (на поле графика, обозначено состояние ключей VT1 и VT4). При этом переключение одного ключа (например VT4) из 0 в 1 и обратно идет при пересечении уровней $I_z - \Delta$ и, соответственно, уровня I_z , а второго (VT1) только при пересечении уровней $I_z + \Delta$ и I_z , следовательно используются три компаратора для управления этими ключами. Парная работа блоков “Relational Operator” и “Relational Operator1”, а также “Relational Operator1” и “Relational Operator2” во многом аналогична работе в двухпозиционном регуляторе.

Смена полярности I_z приводит к запрету формирования управления ключей VT1, VT4 и разрешению работы VT3, VT2, для симметричного формирования тока в нагрузке отрицательной полярности. Для этих целей используется блок “Relational Operator3” полярности I_z и стробирующие элементы на выходе регулятора.

Особенностью управления также является то, что со сменой полярности тока I_z нижний порог тока $I_z - \Delta$ становится верхним, а верхний $I_z + \Delta$ - нижним, что потребовало смены полярности входов у компараторов, управляющих VT3, VT2.

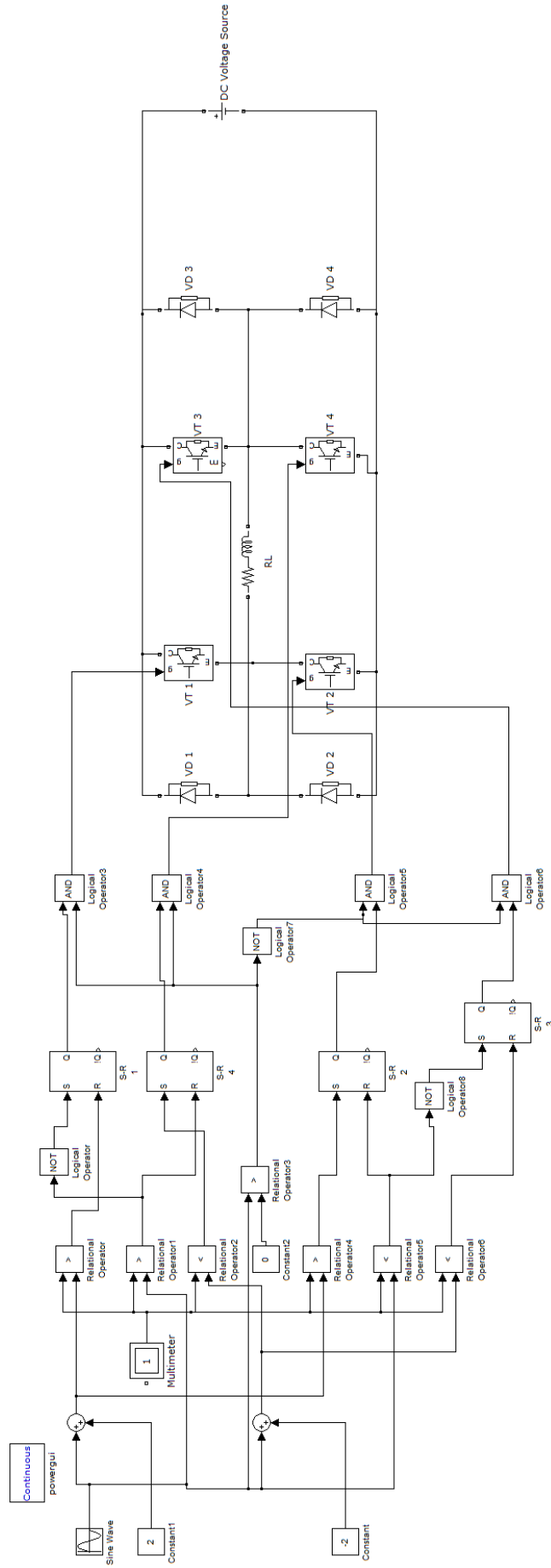


Рисунок 16 – Имитационная модель регулятора на мостовой схеме для трех состояний

«Основные преимущества трехпозиционного регулирования:

- частота коммутаций ниже чем в двухпозиционном, а следовательно ниже и потери в ключевых элементах;
- сквозные токи возникают только в одном плече при каждом переключении, в том плече, где ключи переключаются с верхнего на нижний или наоборот, это уменьшает динамические потери в преобразователе в два раза;
- в магнитопроводе нагрузки потери также уменьшаются, т.к. они примерно зависят от квадрата напряжения (квадрата скорости нарастания потока в магнитопроводе), а в случае двухполярного напряжения (двух состояниях управления) он выше, т.к. в трехпозиционной есть промежутки с нулевым напряжением.»[15]

Выводы по разделу.

Третья глава посвящена силовой части систем питания. В ней представлена блок-схема установки, проведен небольшой обзор различных систем питания. Выбрана система питания для виброустановки – однофазная мостовая схема транзисторного инвертора.

4 Математическое моделирование и расчеты

В данном разделе будет проведен анализ выбранных схем с использованием САПР. Для упрощения расчетов механическая и электрическая схемы моделировались и отлаживались отдельно, и в дальнейшем были объединены. Моделирование позволит сравнить между собой и выбрать наилучшую из исследуемых схем, опираясь на результаты расчетов и полученные диаграммы.

Математическое моделирование проводилось в программных пакетах MATLAB Simulink – моделирование электрической и механической систем, и Elcut – моделирование магнитных полей. Моделирование дало понимание проведенных расчетов, а так же позволило проверить их верность (Elcut).

4.1 Расчет магнитных полей

Расчет магнитных полей производился для проверки верности вычислений посредством программы Elcut. ELCUT [1] – это интегрированная диалоговая система программ, позволяющая решать плоские и осесимметричные задачи.

Алгоритм работы программы можно увидеть на рисунке 17.

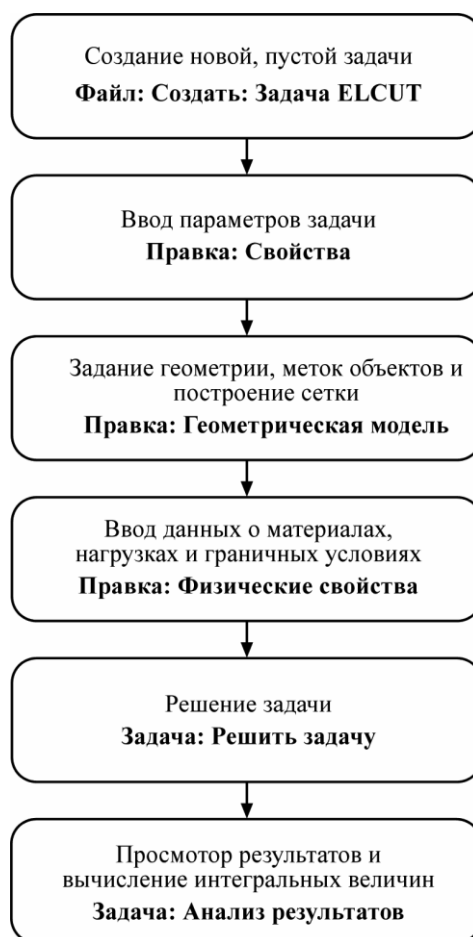


Рисунок 17 – Алгоритм работы программы Elcut

В настоящей работе проводился расчет магнитного поля – магнитостатическое поле.

Главное окно программы представлено на рисунке 18.

Проводилось моделирование всех 4-х систем – одно- и двухтактных с подмагничиванием и без. Ниже представлено моделирование двухтактной системы с подмагничиванием. Геометрическая модель, построенная в программе Elcut, представлена на рисунке 18. 1 инд и 2 инд – первый и второй индуктор соответственно, обм о – обмотка основная, обм п - обмотка подмагничивания.

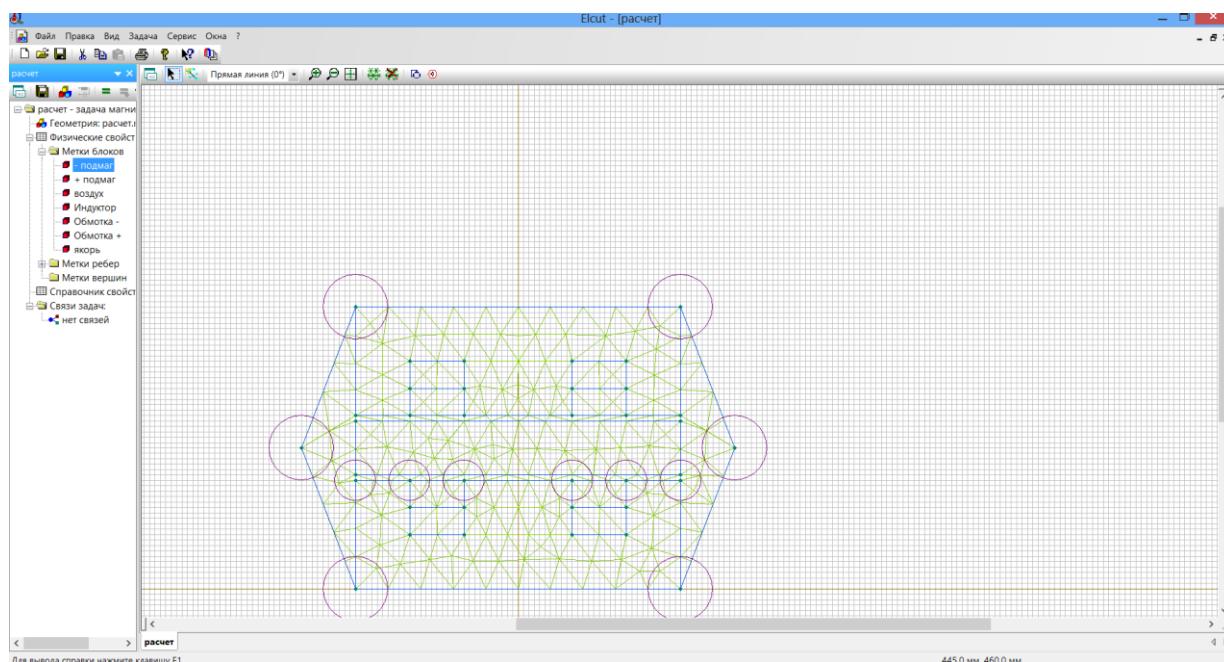


Рисунок 18 – Диалоговое окно программы Elcut,
где 1 – рабочее поле, 2 – дерево задач.

Знаки + и – обозначают полярность тока в обмотке. Пружины не учитывались в расчетах, поскольку моделирование проводилось с целью исследовать характер поведения магнитного поля в системе. Окружности обозначают ограничение в построении сетки конечных элементов. Моделирование проводилось в студенческой версии Elcut, поэтому, для увеличения точности измерений в исследуемой зоне увеличили шаг сетки в зонах, не влияющих на исход моделирования.

«Параметры системы описали в дереве задач (Рисунок 18, 2), ограничив область моделирования периметром фигуры. В свойствах метки блока обмоток основной и подмагничивания в разделе описания источников поля выразили ток количеством Ампер-витков. Для моделирования составили геометрическую модель установки в программе Elcut (Рисунок 19).»[1]

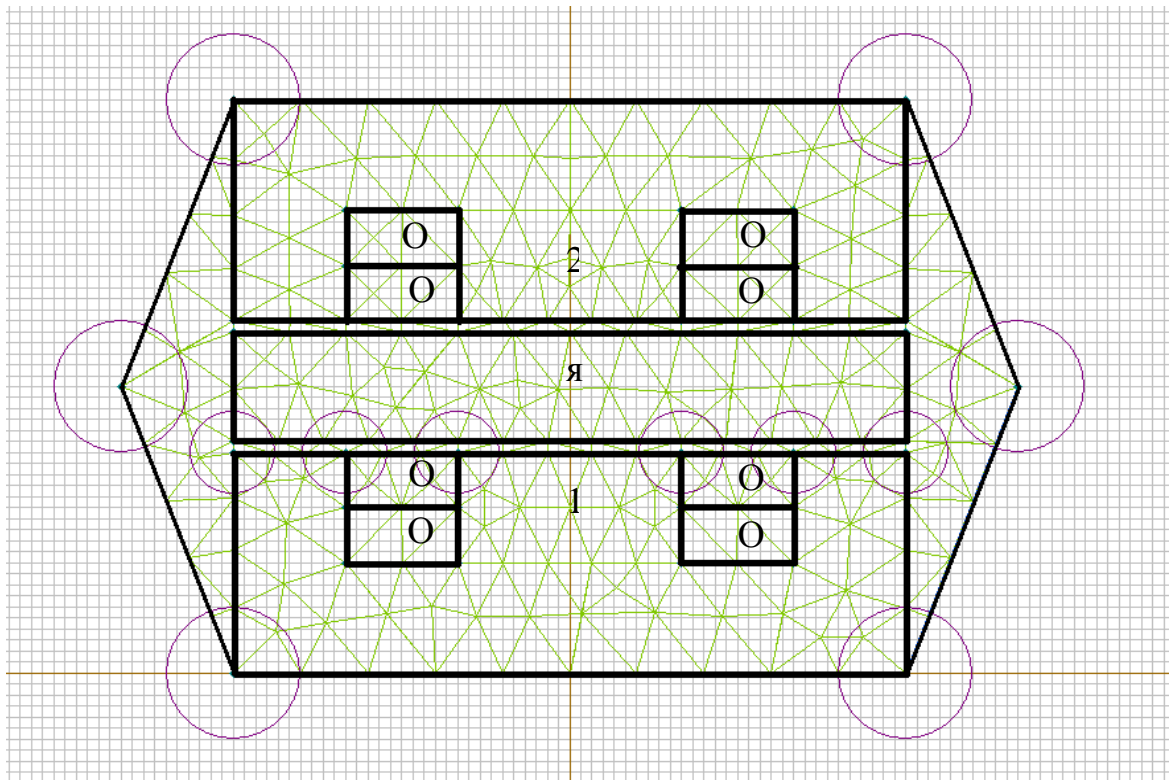


Рисунок 19 – Геометрическая модель электромагнита

Промоделировав данную геометрическую модель в рассматриваемой программе, получили картину магнитного поля (Рисунок 20), показывающую распределение линий магнитного поля в системе во время ее работы. Как видно на картине поля потоки образуются в нижнем индукторе, поля складываются благодаря совпадению полярностей обмоток, в верхнем же поля взаимокомпенсируются, как это было описано выше, за счет разной полярности основной обмотки и обмотки подмагничивания.

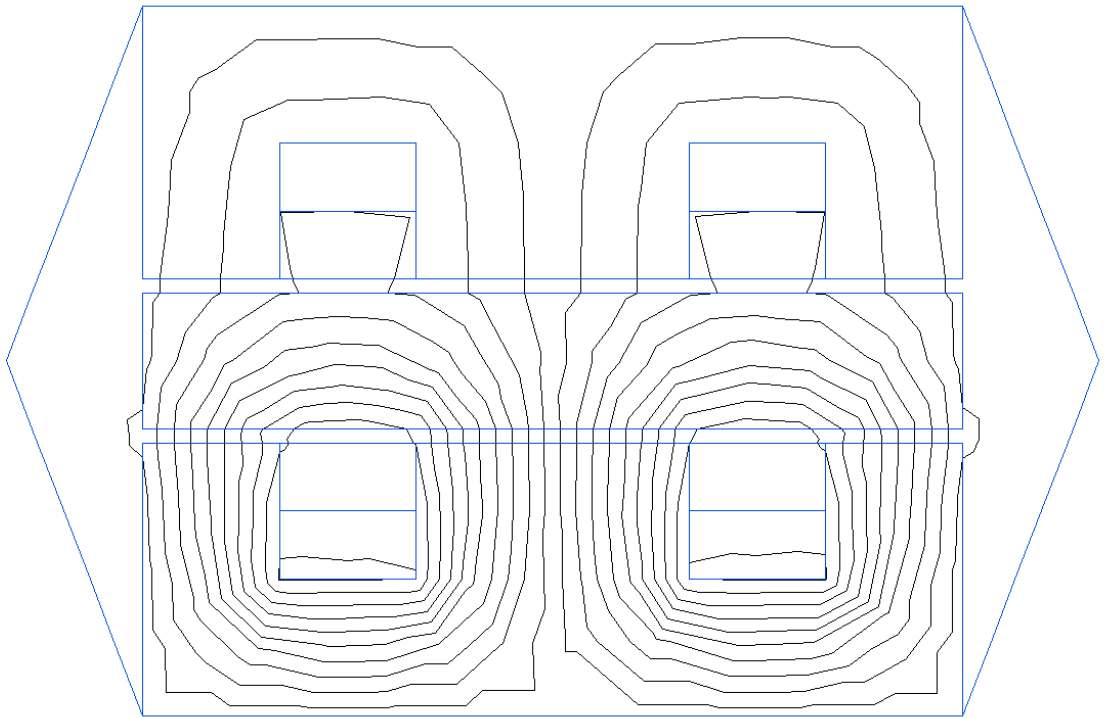


Рисунок 20 – Картина поля

С помощью инструментария, предлагаемого программой, определили интересные нас величины, например, магнитный поток (Рисунок 21).

- Локальные значения
- Интегральный калькулятор
- Геометрические величины
- Физические величины
 - Пондеромоторная сила
 - Вращающий момент
 - Магнитодвижущая сила
 - Магнитный поток**
 - $\Phi = 0.019207 \text{ Вб}$
 - Поверхностная энергия
 - Средний потенциал поверхность
 - Интеграл от индукции по контур
 - Поверхностный интеграл от нап
- Мастер индуктивностей

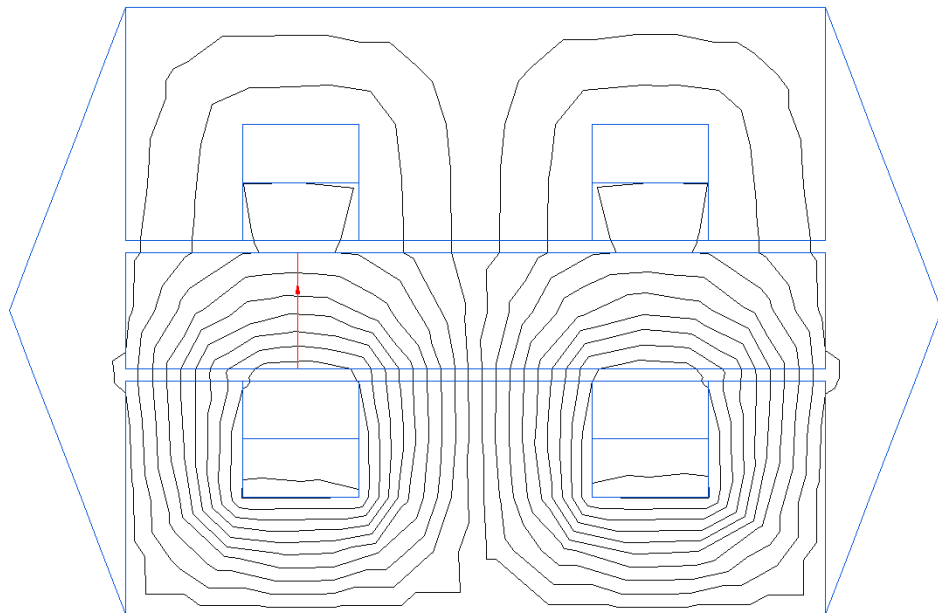


Рисунок 21 – Определение магнитного потока

«Согласно рисунку 21, $\Phi=0.019207$ Вб, это значение близко к величине амплитуды потока, полученного в результате моделирования, описанного ниже. Измерили электромагнитную силу, называемую в программе пондеромоторной (Рисунок 22).»[1]

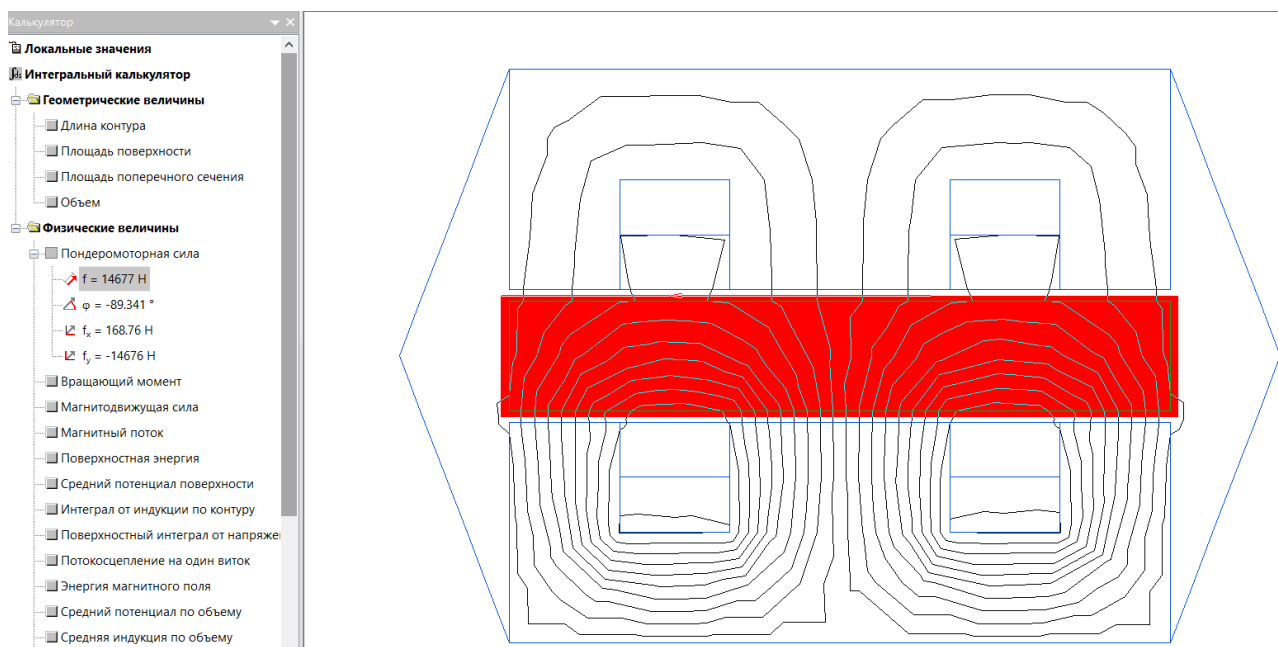


Рисунок 22 – Определение электромагнитной силы

«Электромагнитная сила, согласно расчетам $f = 14677$ Н. Это значение близко к полученному при моделировании электромеханической системы, представленном ниже.

Вычислили индуктивность нагрузки с помощью мастера индуктивностей (Рисунок 23). Для этого был выбран пункт (исходя из запасенной энергии).»[1]

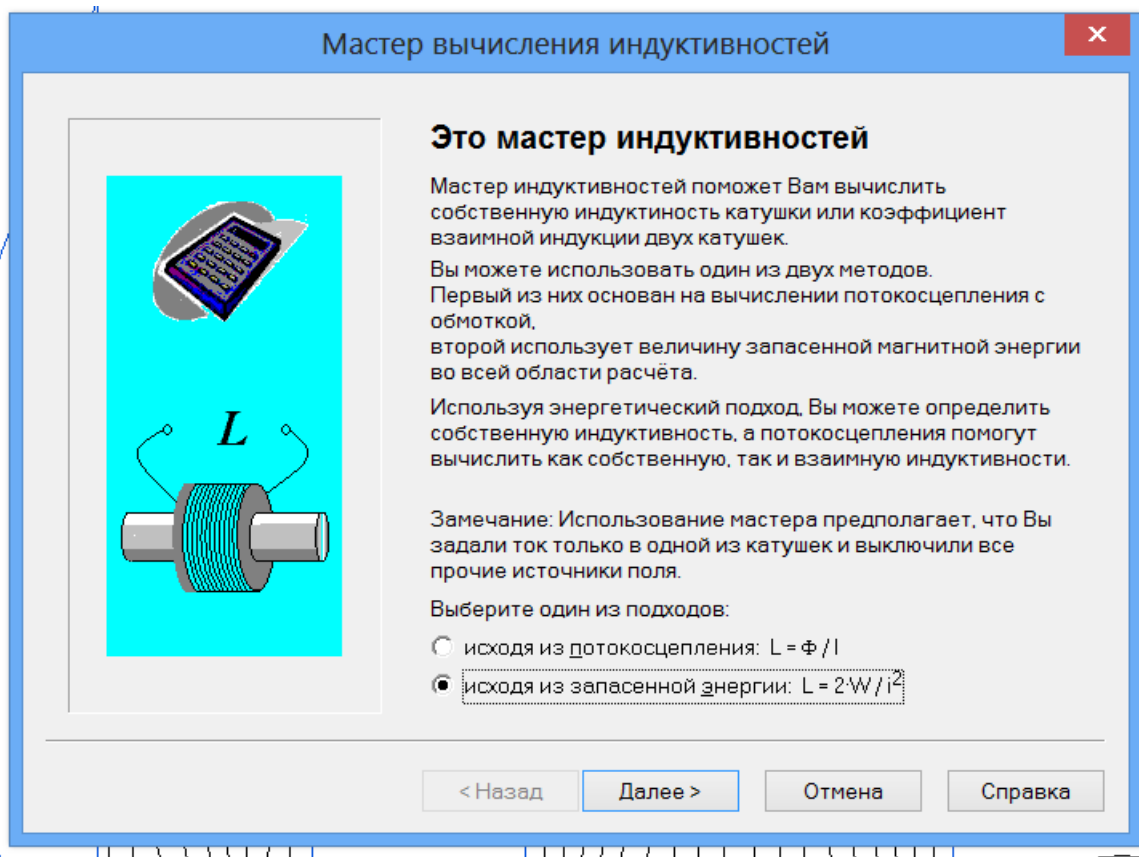
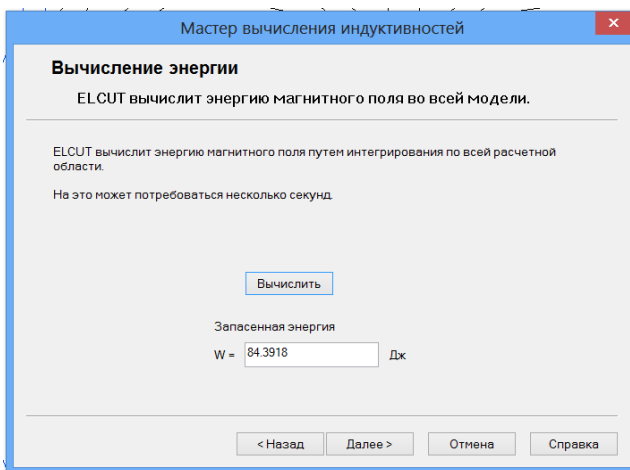


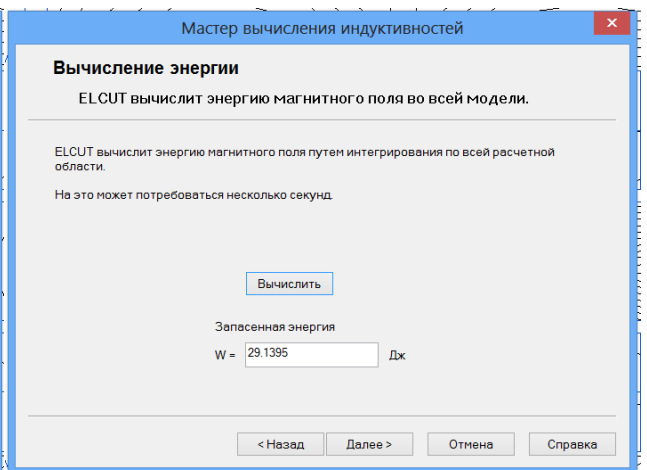
Рисунок 23 – Основное окно мастера индуктивностей

В следующем окне программа рассчитывает запасенную энергию в системе. Для этого служит кнопка «выполнить». Результат отображается в окне после нажатия на кнопку (Рисунок 24, для основной обмотки – А), для обмоток подмагничивания – Б).

«Далее вычисляется ток, возбуждающий магнитное поле. Для этого выбирается обмотка, относительно которой требуется выполнить расчет, вводится количество витков в соответствующее окно (Рисунок 25). Поскольку расчет производится исходя из запасенной энергии всей модели, рассчитываем индуктивность для основных обмоток и обмоток подмагничивания отдельно.»[1]

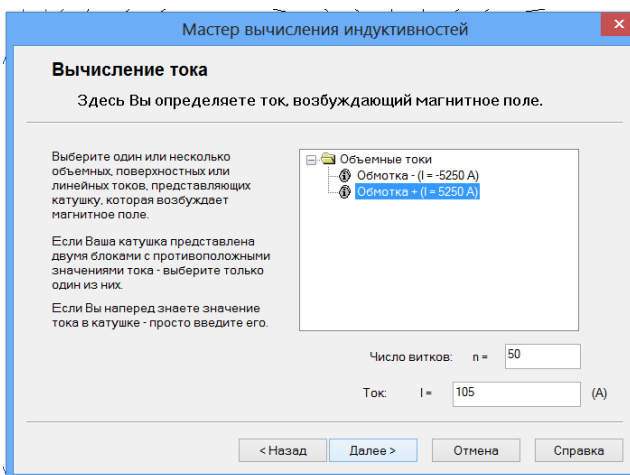


а)

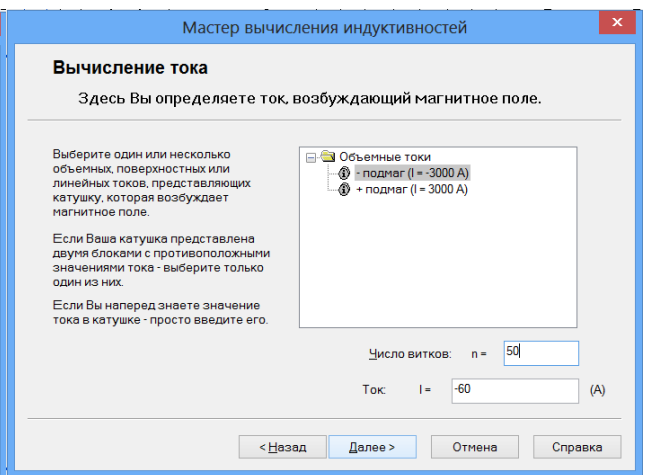


б)

Рисунок 24 – Вычисление запасенной энергии

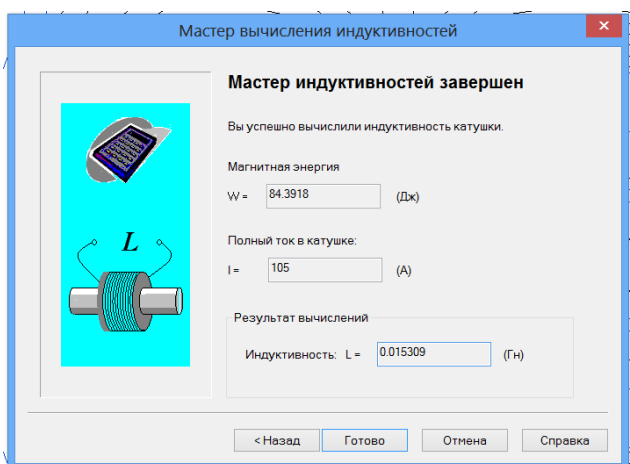


а)

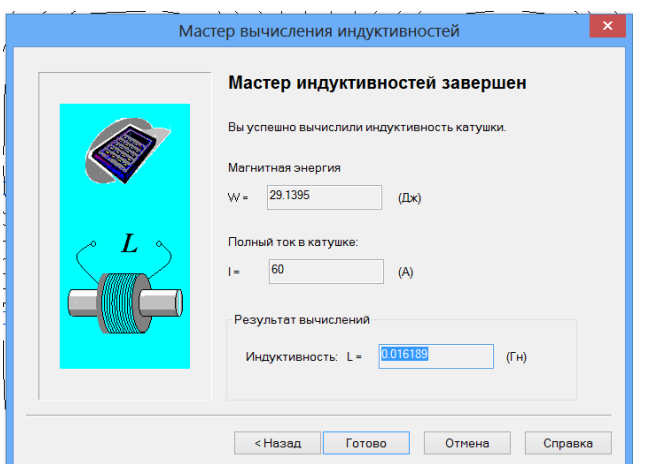


б)

Рисунок 25 – Определение тока



а)



б)

Рисунок 26 – Результат вычислений индуктивности

Результаты вычислений представлены на рисунке 26 а, б. Для основной обмотки $L=0.015309$ Гн, для обмотки подмагничивания $L=0.016189$ Гн.

Результаты расчетов с небольшой погрешностью совпали с данными, полученными при расчетах по формулам, что позволяет считать их достаточно достоверными.

4.2 Моделирование электрической и механической систем

Моделирование механической и магнитной систем проводилось в программном пакете MATLAB Simulink. Для этого были составлены системы уравнений для выбранной для анализа системы, переведены в программную среду с использованием имеющихся инструментов. Используя блоки вывода информации в графическом виде получили искомые графики и диаграммы.

Системы уравнений, полученные при анализе выбранных схем, представлены ниже. Данные уравнения были внесены в специальные блоки функций с учетом синтаксиса программного пакета Simulink.

Для одноконтурной схемы без подмагничивания (Рисунок 27) использовали следующие уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \int \frac{dV}{dt}, \text{ для перемещения якоря;} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{m} \left(-\frac{2 \cdot \Phi^2}{2 \cdot S \cdot \mu_0} - k \cdot (x - \delta) - Ktr \cdot V \right), \text{ для скорости якоря;} \\ \frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{w} \left(U(t) - \left(\frac{\Phi \cdot \left(\frac{2 \cdot x}{\mu_0 \cdot S} + Rm \right)}{w} \right) \cdot R \right), \text{ для потока в системе.} \end{array} \right.$$

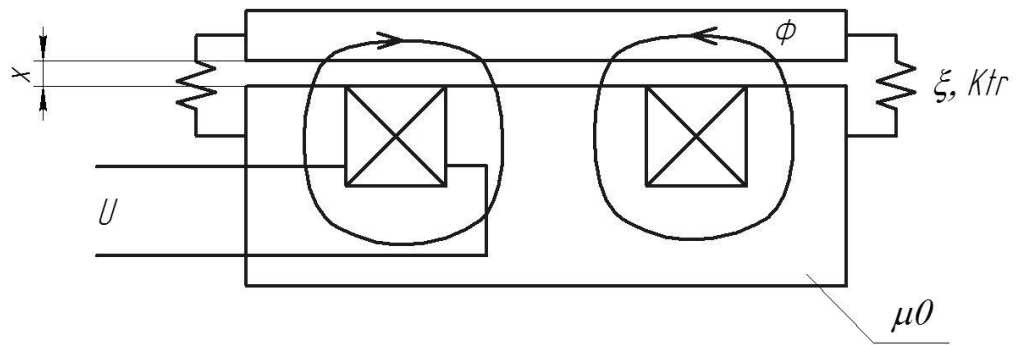


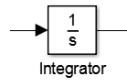
Рисунок 27 – Однотактная виброустановка без подмагничивания

Имитационная модель для данной схемы представлена на рисунке 28.

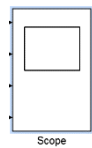
$$(1/m) * (-u(5)) - (k * (u(1) - d)) - (Ktr * u(2))$$

Блок dV/dt является

функциональным, необходим для реализации формулы в модели.



Блок - блок интегрирования, необходим для решения



уравнения. Блок - блок вывода графической информации, в данном случае графиков рассчитываемых величин.

Переменные и константы для данной системы представлены на рисунке 29.

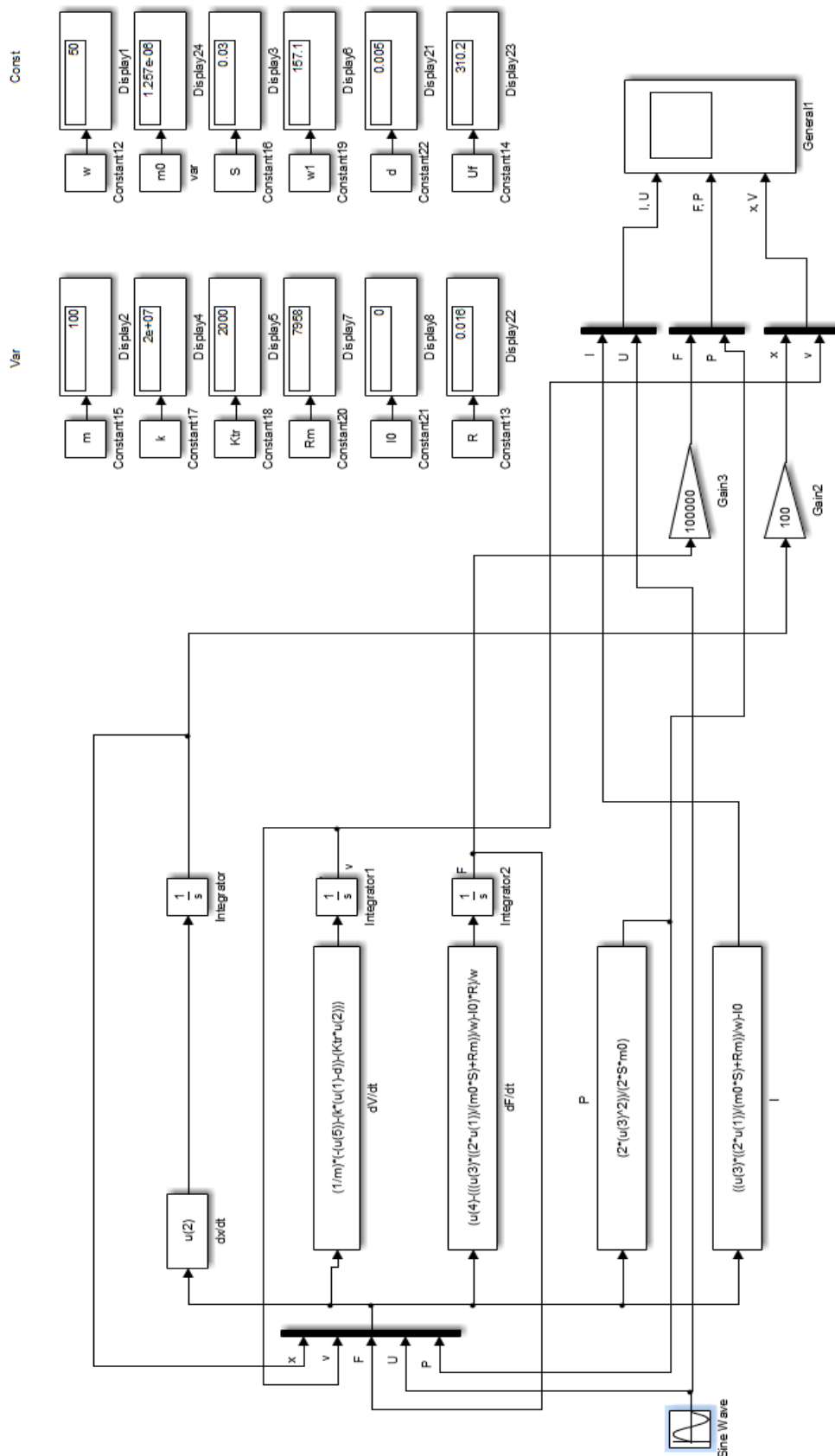


Рисунок 28 – Однотактная схема баз подмагничивания, имитационная

МОДЕЛЬ

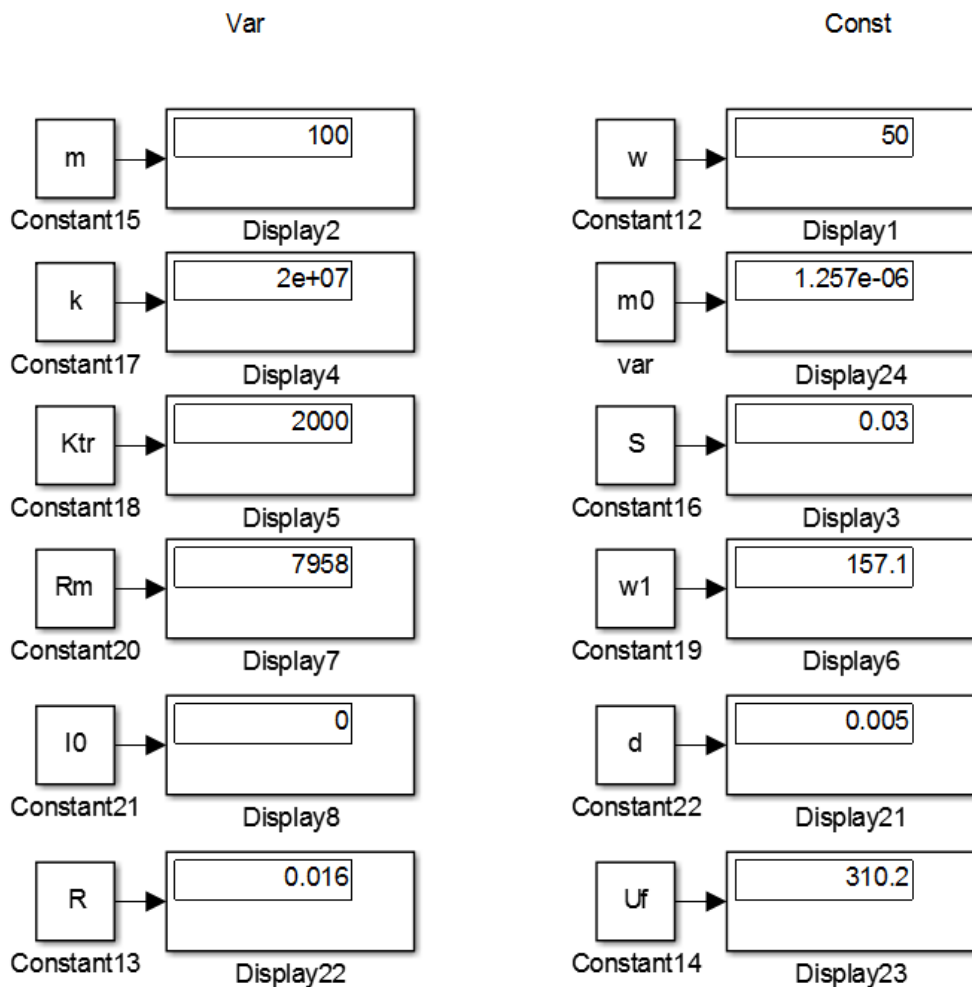


Рисунок 29 – Переменные и константы для однофазной системы без подмагничивания,

где в левом ряду указаны изменяемые параметры в зависимости от вида системы, а в правом – неизменяемые:

m – масса груза;

k – коэффициент натяжения пружин;

K_{tr} – коэффициент трения пружин;

R_m – магнитное сопротивление воздушного зазора;

I_0 – ток подмагничивания;

R – активное сопротивление обмотки;

w – число витков;

S – площадь сечения полюса;

- ω_1 – частота;
- d – зазор;
- U_f – напряжение питания;
- m_0 – магнитная проницаемость.

Используя вышеописанные уравнения, построили математическую модель данной системы в программном пакете MATLAB и получили следующие диаграммы для сравнения (Рисунок 30):

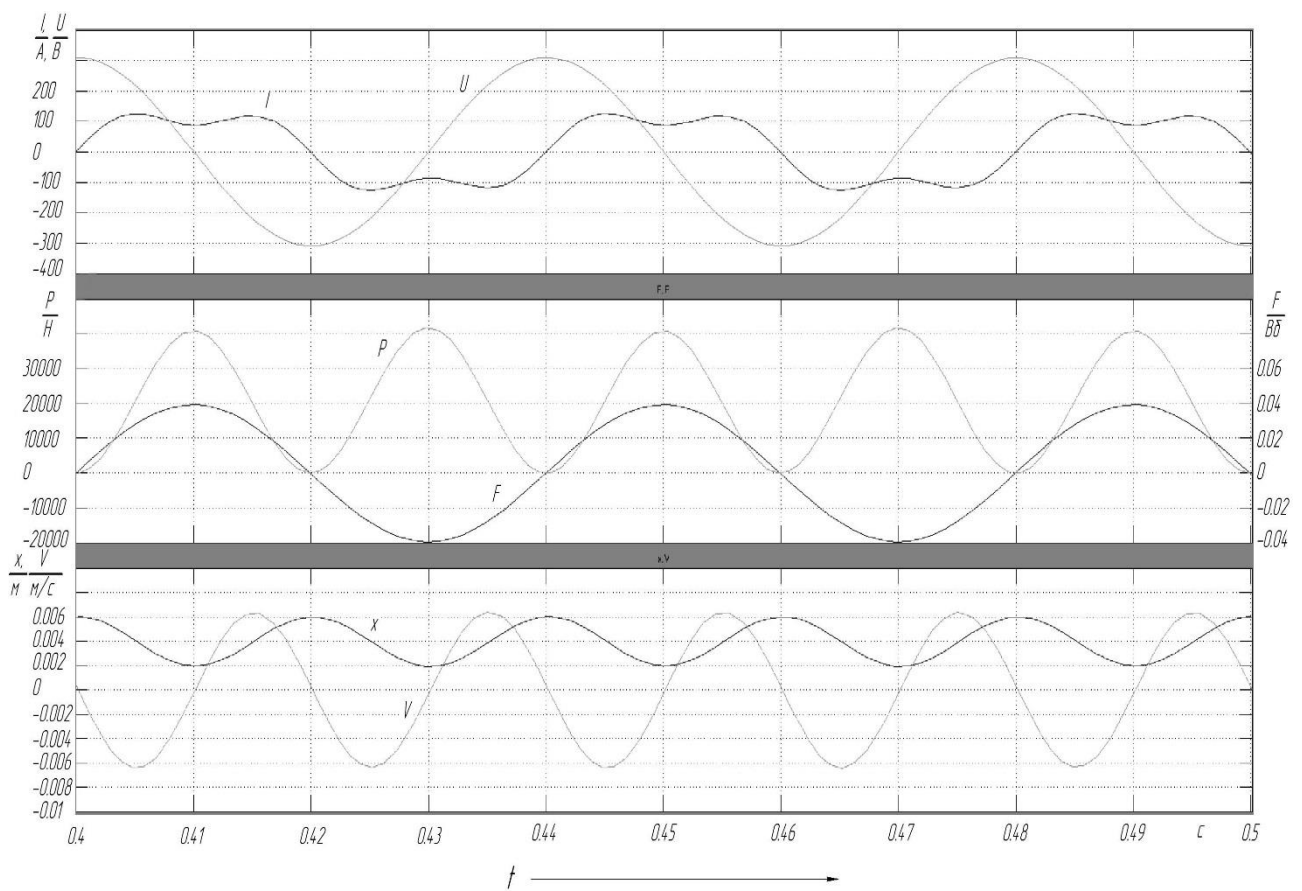


Рисунок 30 – Диаграммы для однотактной виброустановки без подмагничивания.

Однотактная виброустановка с подмагничиванием представлена на рисунке 31:

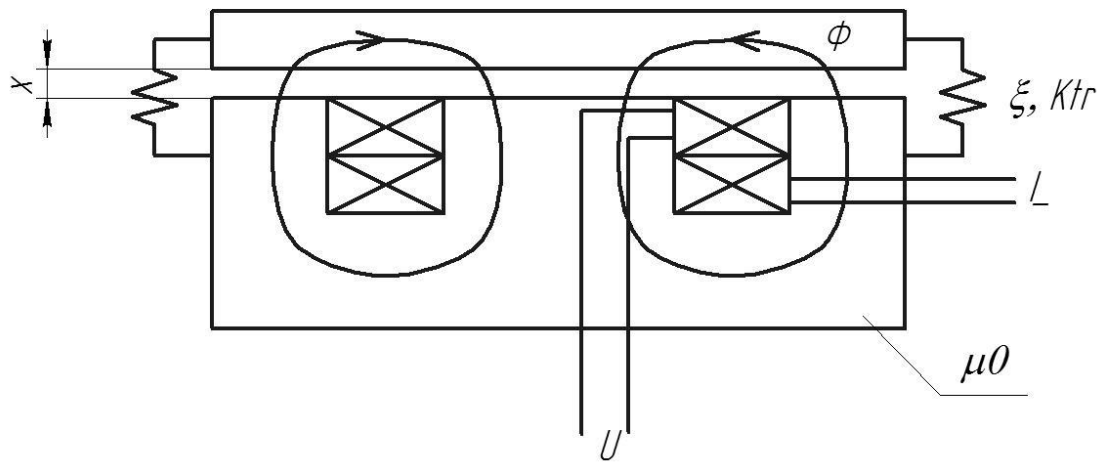


Рисунок 31 - Однотактная виброустановка с подмагничиванием

Система уравнений для данной установки выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \int \frac{dV}{dt}; \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{m} \left(-\frac{2 \cdot \Phi^2}{2 \cdot S \cdot \mu_0} - k \cdot (x - \delta) - Ktr \cdot V \right); \\ \frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{w} \left(U(t) - \left(\frac{\Phi \cdot \left(\frac{2 \cdot x}{\mu_0 \cdot S} + Rm \right)}{w} - I_0 \right) \cdot R \right). \end{array} \right.$$

Имитационная математическая модель представлена на рисунке 32.
Перечень переменных для нее указан на рисунке 33.

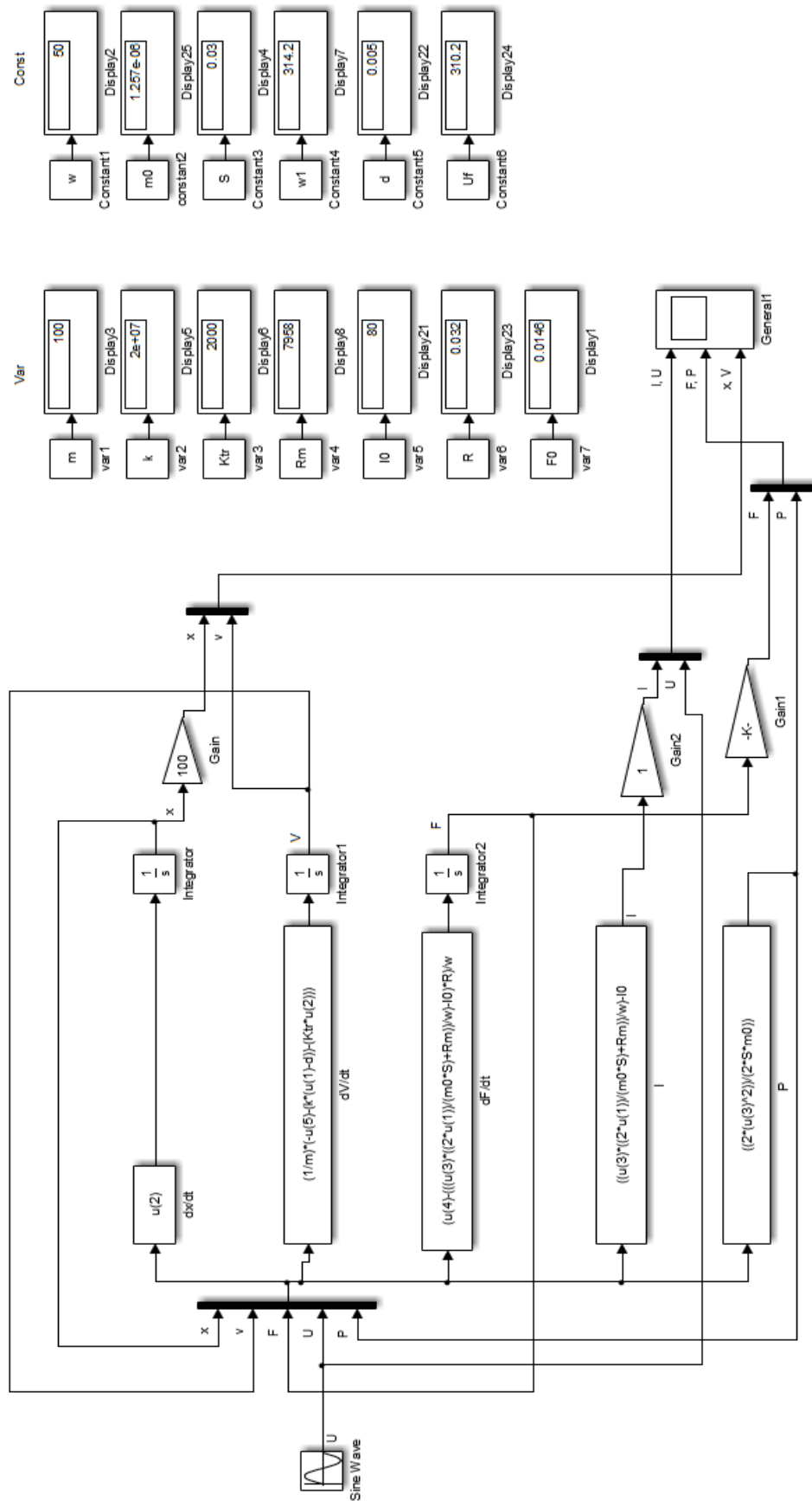


Рисунок 32 – Однотактная схем с подмагничиванием, имитационная модель
44

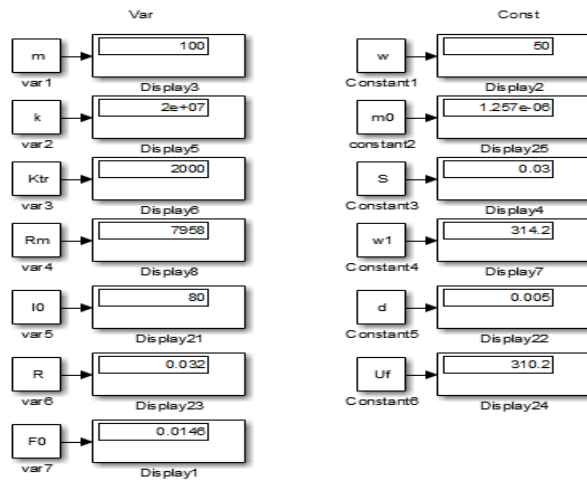


Рисунок 33 – Переменные для однотактной системы с подмагничиванием,

Диаграммы, полученные в результате вычисления математической модели данной системы в программном пакете MATLAB, представлены на рисунке 34:

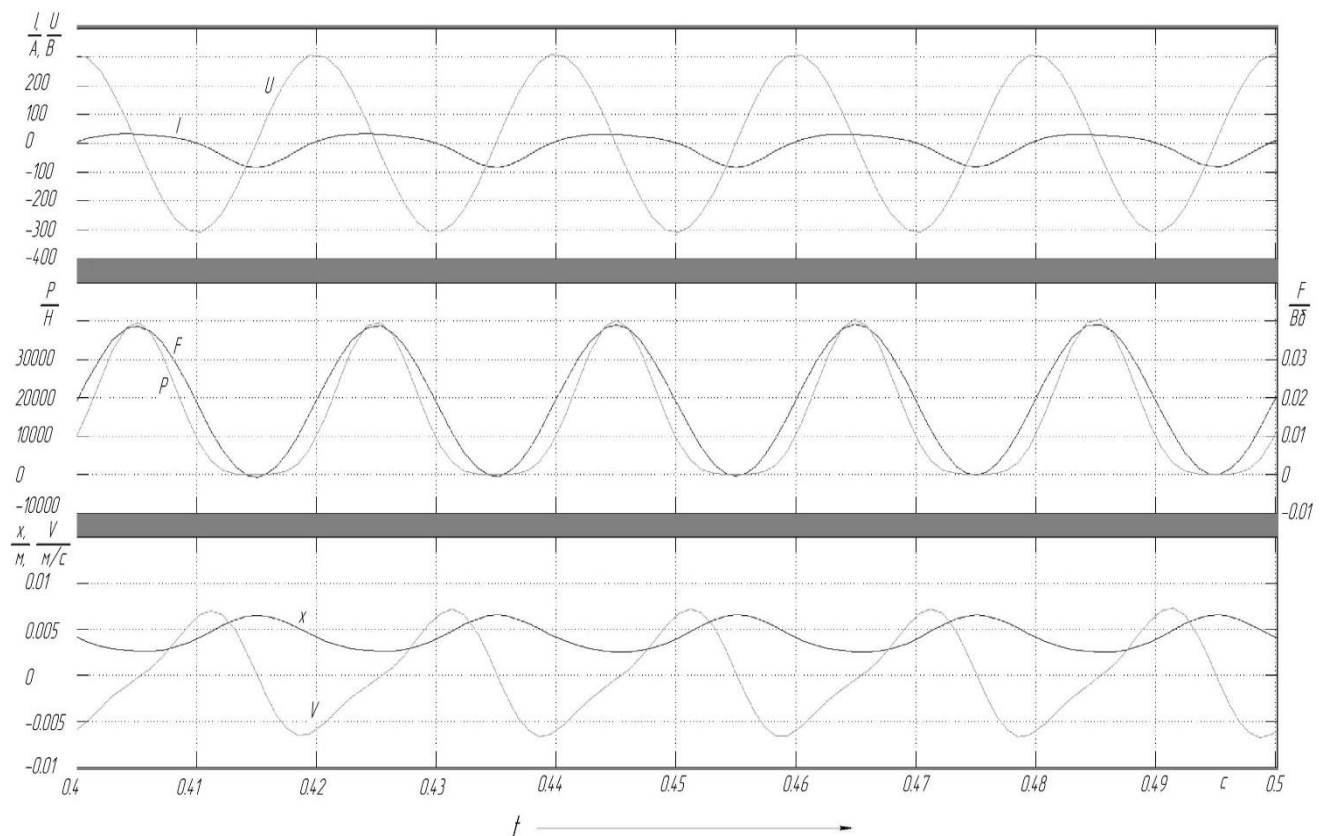


Рисунок 34 - Диаграммы для однотактной виброустановки с подмагничиванием

Далее рассмотрим двухтактные схемы. Для двухтактной виброустановки (Рисунок 35) без подмагничивания вывели следующие уравнения (уравнений для потока теперь 2, т.к. в систему добавился второй индуктор):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \int \frac{dV}{dt}; \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{2 \cdot m} \left(-\frac{2 \cdot \Phi_2^2}{2 \cdot S \cdot \mu_0} - 2 \cdot k \cdot x - 2 \cdot Ktr \cdot V + \frac{2 \cdot \Phi_1^2}{2 \cdot S \cdot \mu_0} \right); \\ \frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{1}{w} \left(U_1(t) - \left(\frac{\Phi_1 \cdot \left(\frac{2 \cdot (\delta - x)}{\mu_0 \cdot S} + Rm \right)}{w} - I_0 \right) \cdot R \right); \\ \frac{d\Phi_2}{dt} = \frac{1}{w} \left(U_2(t) - \left(\frac{\Phi_2 \cdot \left(\frac{2 \cdot (x + \delta)}{\mu_0 \cdot S} + Rm \right)}{w} - I_0 \right) \cdot R \right). \end{array} \right.$$

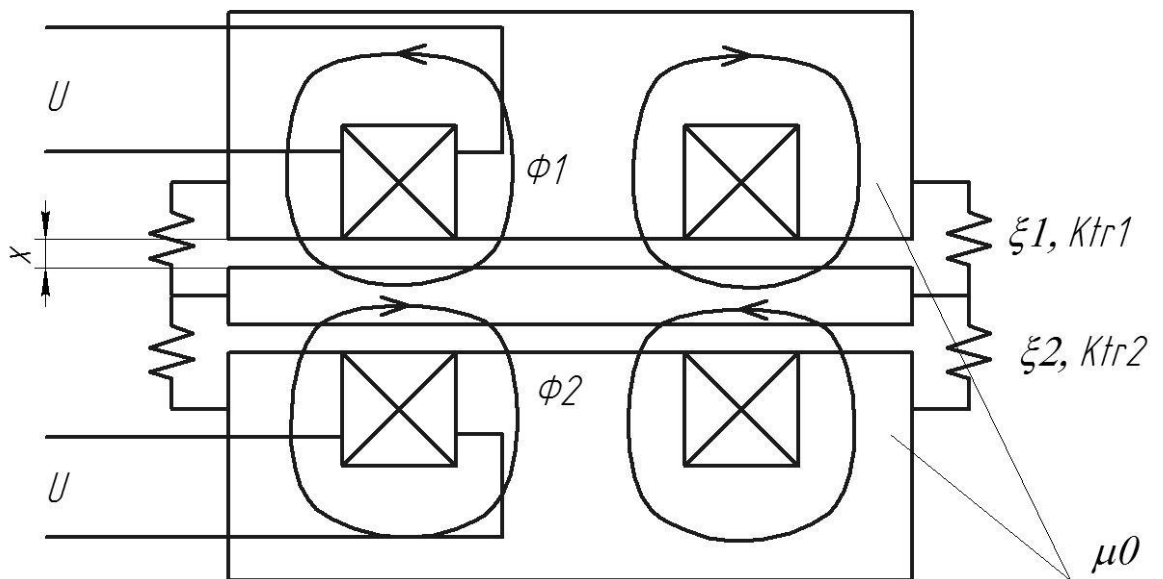


Рисунок 35 – Двухтактная виброустановка без подмагничивания

Имитационная модель данной установки представлена на рисунке 36.

Перечень переменных для нее на рисунке 37.

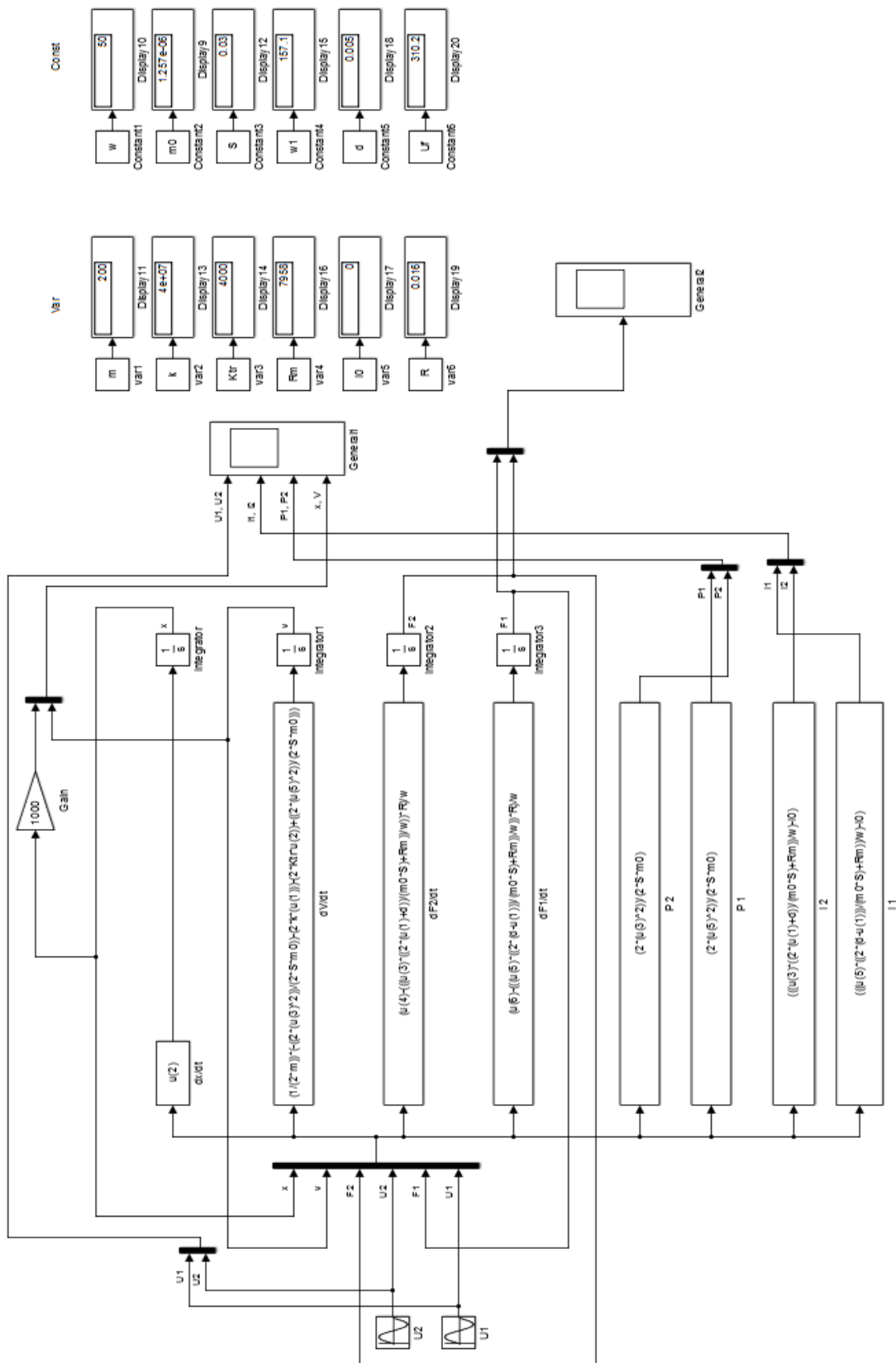


Рисунок 36 – Двухтактная схема без подмагничивания, имитационная

МОДЕЛЬ

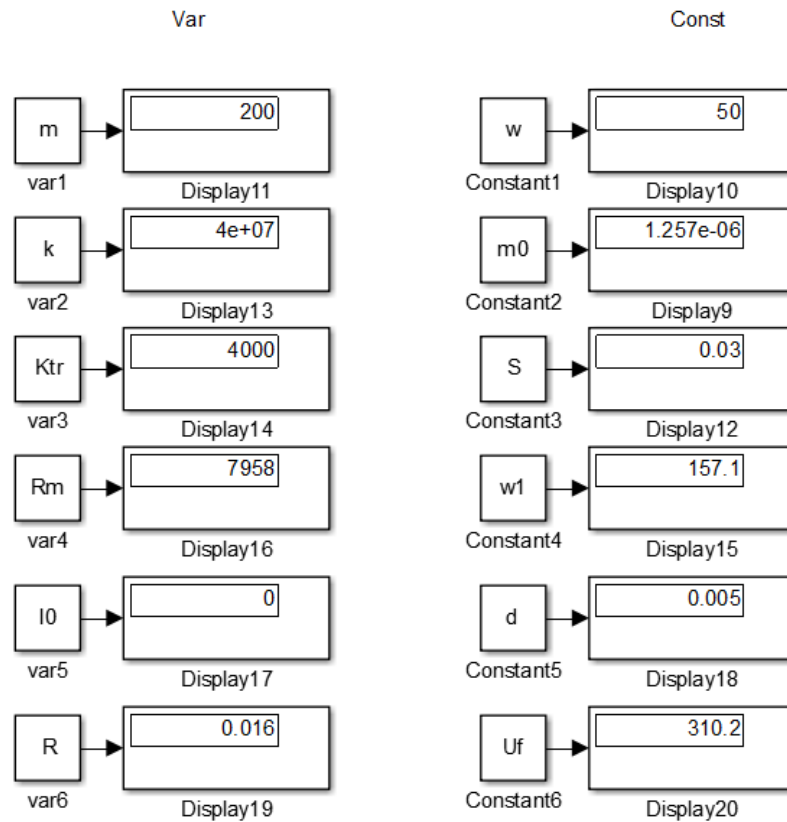


Рисунок 37 – Перечень переменных для двухтактной системы без подмагничивания,

где значения k и K_{tr} , а также массы удвоены.

Используя уравнения, представленные выше, построили математическую модель данной системы в программе MATLAB, получили следующие диаграммы для сравнения (Рисунок 38):

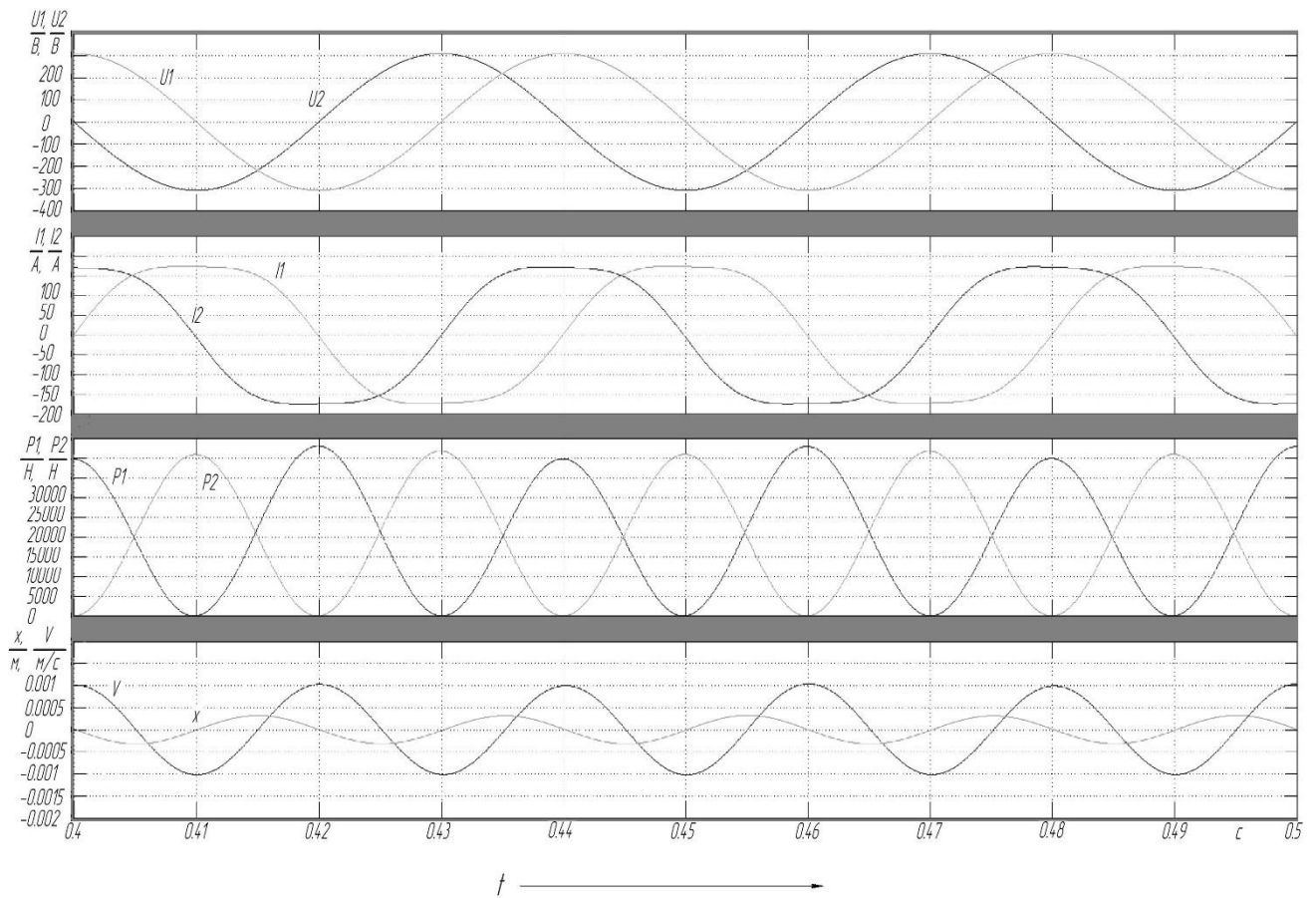


Рисунок 38 – Диаграммы для двухтактной виброустановки без подмагничивания

Наконец, рассмотрим двухтактную виброустановку с подмагничиванием (Рисунок 39) по уравнениям, представленным ниже:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \int \frac{dV}{dt}; \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{2 \cdot m} \left(-\frac{2 \cdot \Phi_2^2}{2 \cdot S \cdot \mu_0} - 2 \cdot k \cdot x - 2 \cdot Ktr \cdot V + \frac{2 \cdot \Phi_1^2}{2 \cdot S \cdot \mu_0} \right); \\ \frac{d\Psi}{dt} = U(t) - I \cdot 2 \cdot R. \end{array} \right.$$

где

$$I = \frac{\Psi}{w^2 \cdot \left(\frac{1}{Rm + \frac{2 \cdot (x + \delta)}{\mu_0 \cdot S}} + \frac{1}{Rm + \frac{2 \cdot (x - \delta)}{\mu_0 \cdot S}} \right)};$$

$$\Phi_1 = \frac{(I + I_0) \cdot w}{Rm + \frac{2 \cdot (x + \delta)}{\mu_0 \cdot S}} ; \quad \Phi_2 = \frac{(I - I_0) \cdot w}{Rm + \frac{2 \cdot (x - \delta)}{\mu_0 \cdot S}} .$$

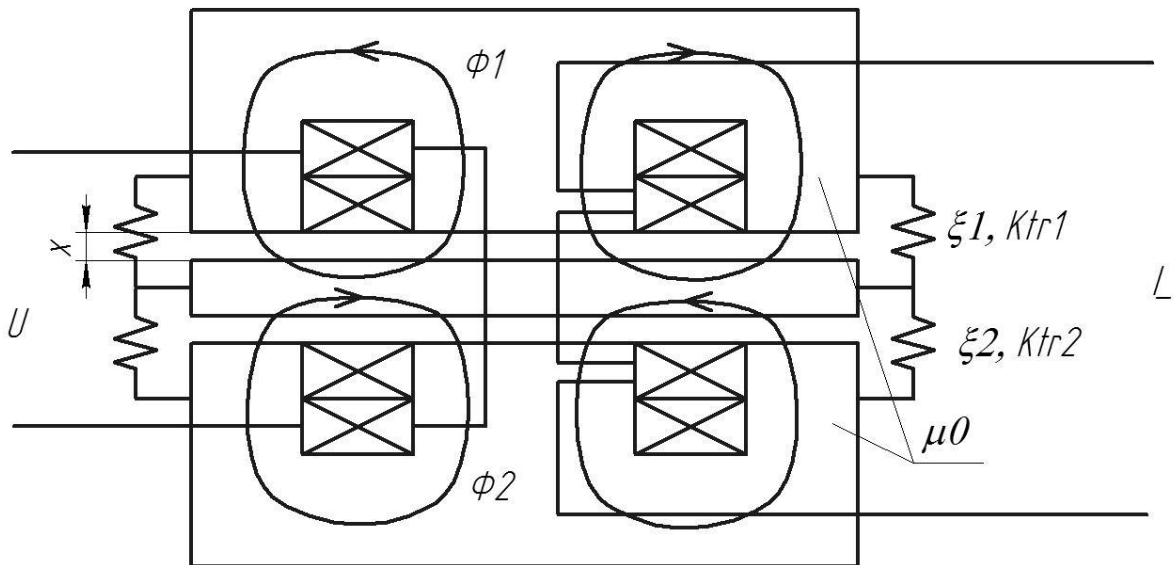


Рисунок 39 – Двухтактная виброустановка с подмагничиванием

Имитационная модель данной схемы представлена на рисунке 40.
Перечень переменных для нее на рисунке 41.

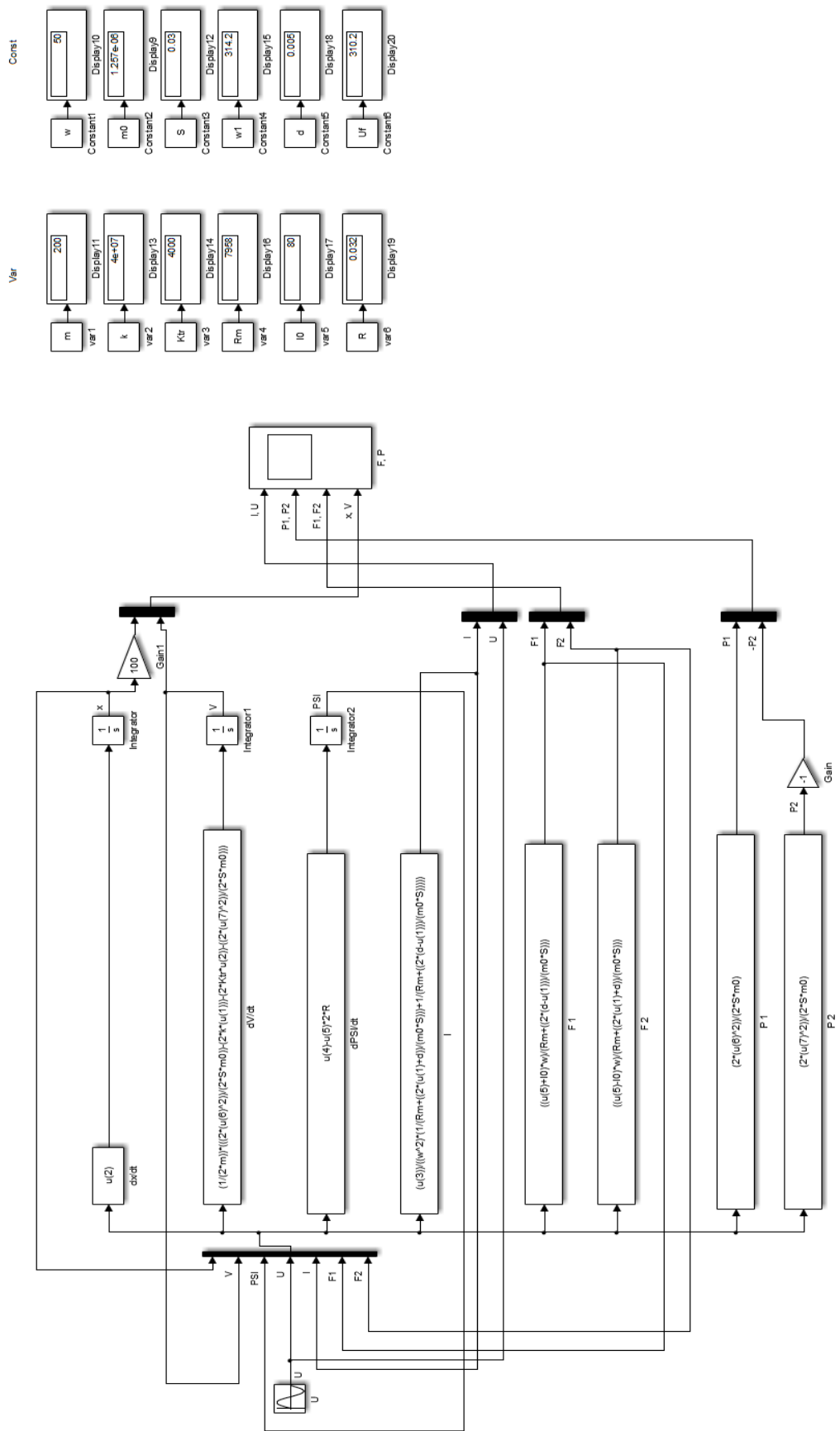


Рисунок 40 – Двухтактная система с подмагничиванием

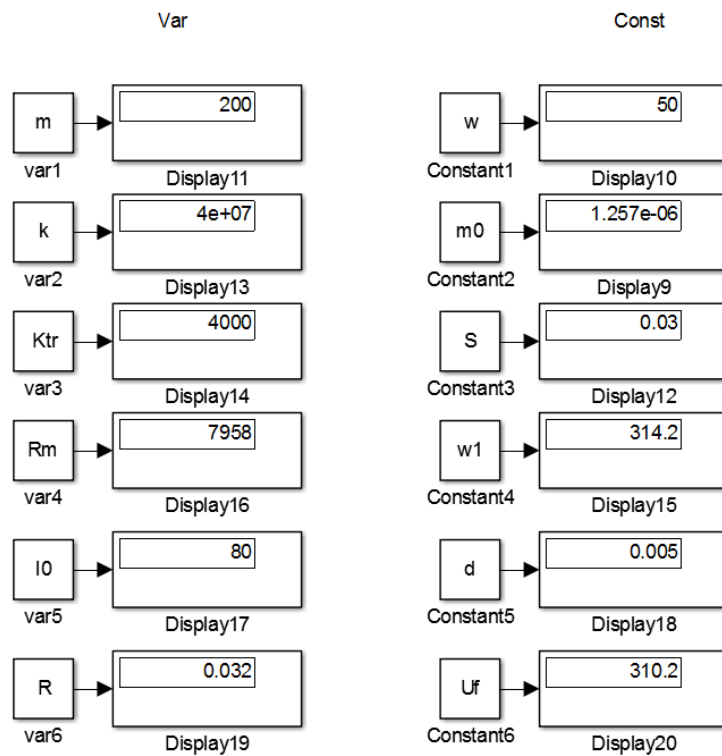


Рисунок 41 – Перечень переменных для двухтактной системы с подмагничиванием,

где значение напряжения $U_f=310,2$, однако в модели при расчете используется удвоенное значение U_f .

Диаграммы, полученные после моделирования полученных уравнений, представлены на рисунке 42.

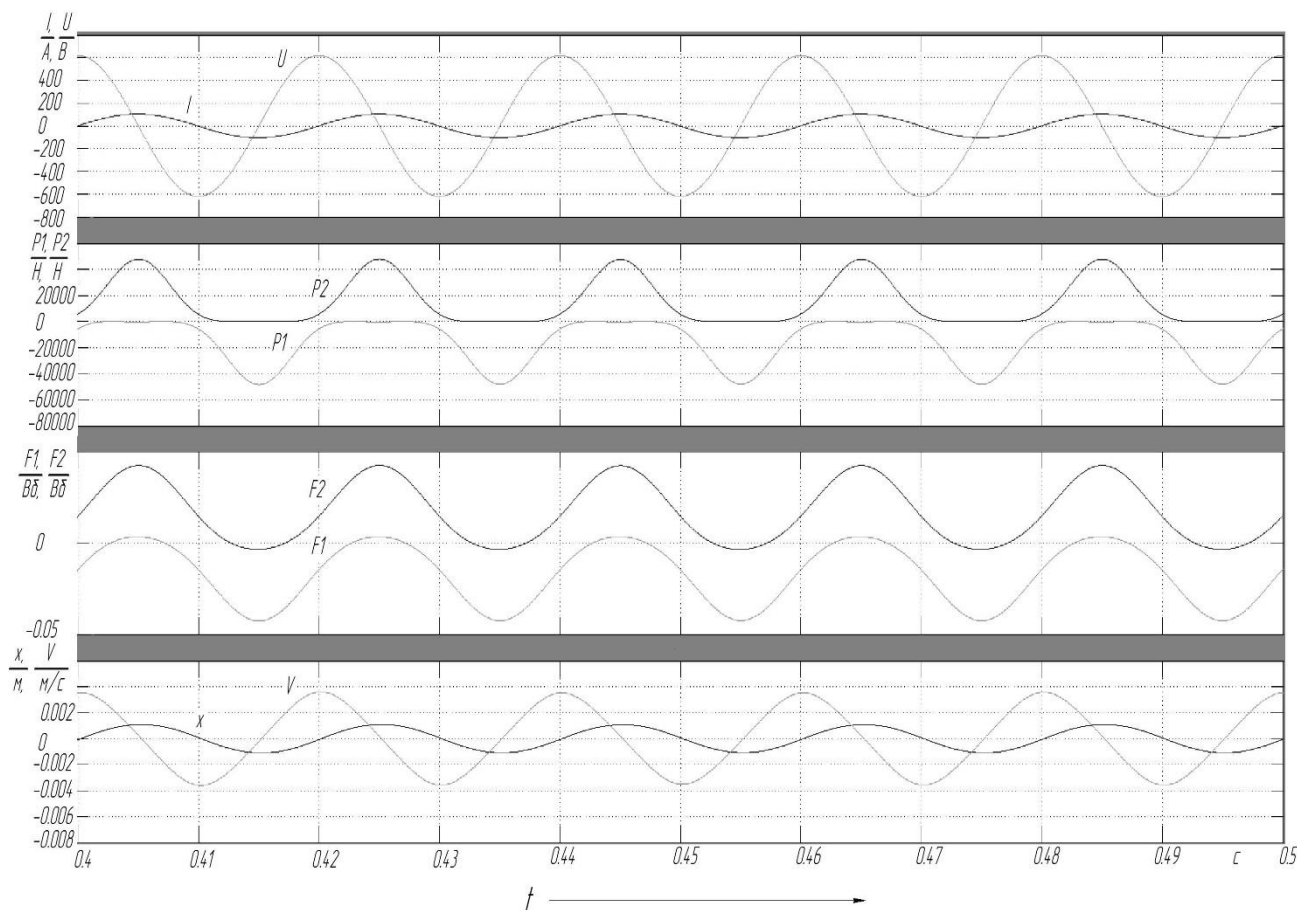


Рисунок 42 – Диаграммы для двухтактной виброустановки с подмагничиванием

4.3 Моделирование электрической части

Моделирование электрической части проводили, используя электрическую схему питания, а также систему управления, обеспечивающую необходимую и своевременную работу силовых ключей. За переключение транзисторов отвечают RS-триггеры, всего их в схеме 4, по количеству ключей. Пример модели для электрической части схемы представлен на рисунке 43.

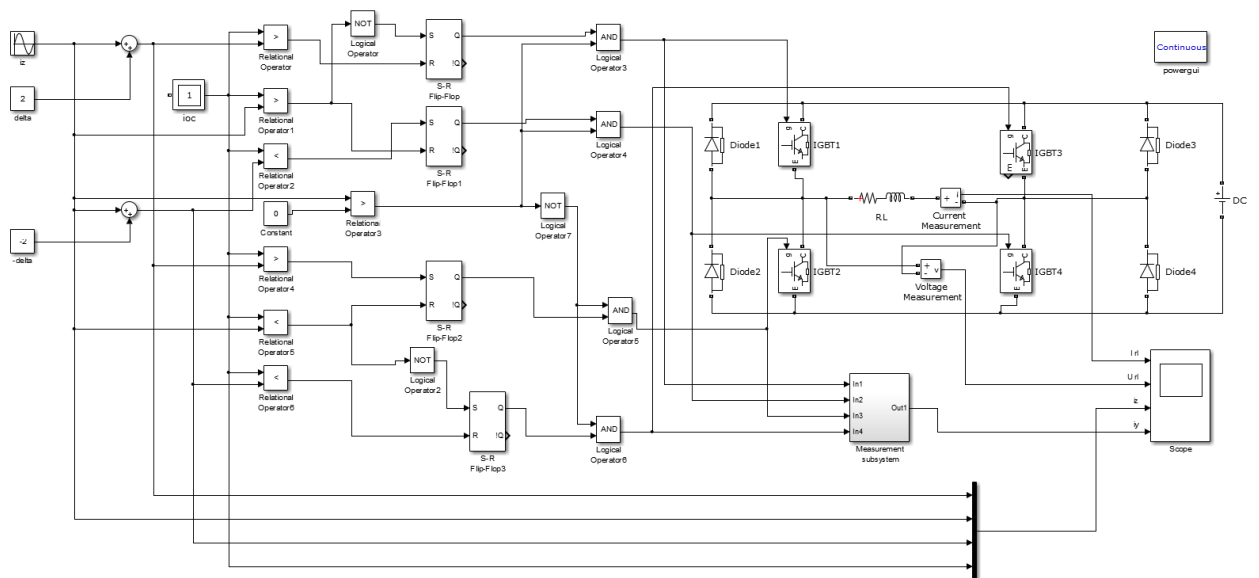
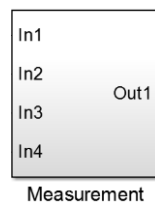


Рисунок 43 – Электрическая модель установки,



где блок введен для упрощения вида схемы, он содержит в себе следующую схему (Рисунок 44). Данные блоки не вносят изменений в расчеты, с их помощью на графике изменяется масштаб импульсов управления ключами.

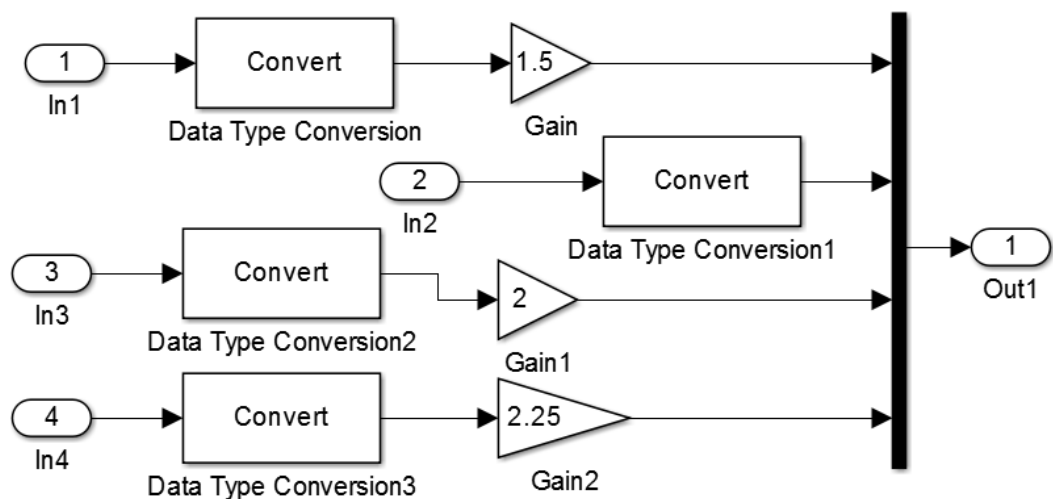


Рисунок 44 – Упрощенная схема

Диаграммы, полученные в результате моделирования, представлены на Рисунке 45.

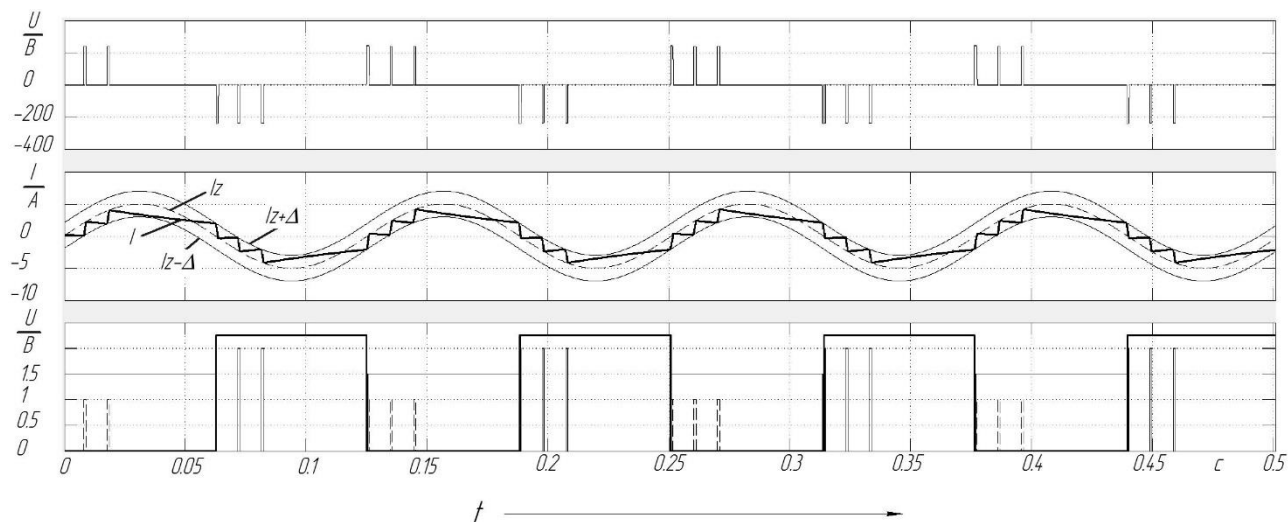


Рисунок 45– Диаграммы работы электрической схемы

Как видно из рисунка 45, форма тока I на нагрузке имеет ступенчатый характер. Такая особенность имеет место вследствие использования схемы мостового инвертора, работающего на трех состояниях (алгоритм работы системы управления рассмотрен в пункте 5.2). Частоту переключений, включение или выключение той или иной пары ключей можно увидеть на нижнем графике, показывающем управляющие импульсы, приходящие на базы транзисторов. Так, во время работы первой пары транзисторов формируется очередь положительных импульсов напряжения на нагрузке, при этом ток ступенчато возрастает. При включении второй пары транзисторов на нагрузку подается очередь отрицательных импульсов напряжения, при этом ток ступенчато снижается. При этом переключение одного ключа (например VT4) из 0 в 1 и обратно идет при пересечении уровней $I_{z-\Delta}$ и, соответственно, уровня I_z , а второго (VT1) только при пересечении уровней $I_{z+\Delta}$ и I_z , для чего используются три компаратора.

Смена полярности I_z приводит к запрету формирования управления ключей VT1, VT4 и разрешению работы VT3, VT2, для симметричного формирования тока в нагрузке отрицательной полярности. Для этих целей используется блок “Relational Operator3” полярности I_z и стробирующие элементы на выходе регулятора. Амплитуда тока $I_z=5$ А была взята произвольно, поскольку его значение на данном этапе расчетов не имеет значения.

4.4 Моделирование электромеханической части

Следующим шагом исследования было объединение механической и электрической схем в единую электромеханическую модель, позволяющую проанализировать работу систем питания с учетом ЭДС движения, возникающего в магнитной системе и работу магнитной системы с учетом получаемой ступенчатой формы формируемого тока.

Задача объединения была решена заменой нагрузки инвертора на источник тока, управляемый сигналом, рассчитываемым в модели магнитной системы. Полученная схема изображена на рисунке 46.

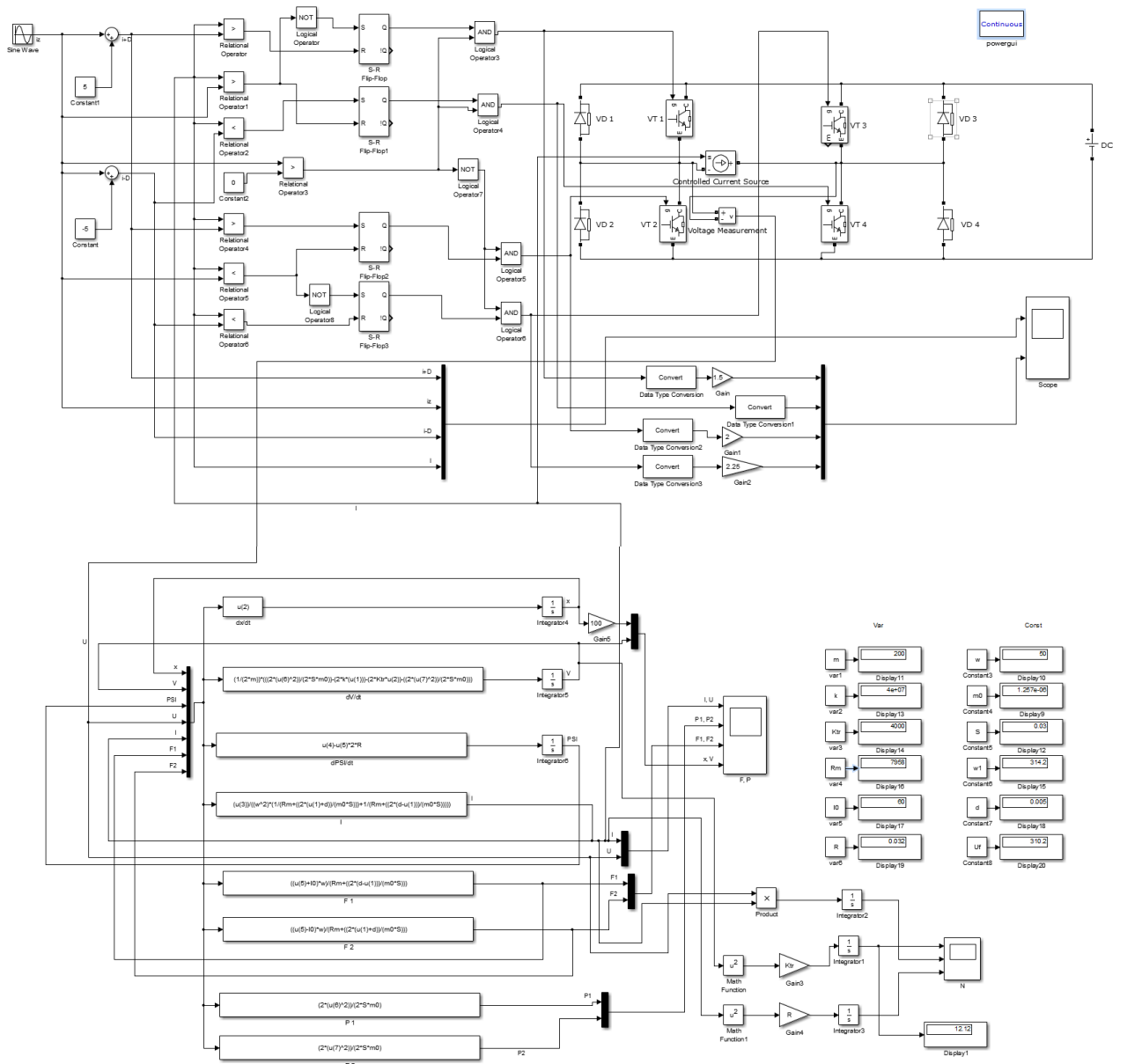


Рисунок 46 – Имитационная модель электромеханической схемы

Полученные при моделировании диаграммы представлены на рисунке

47.

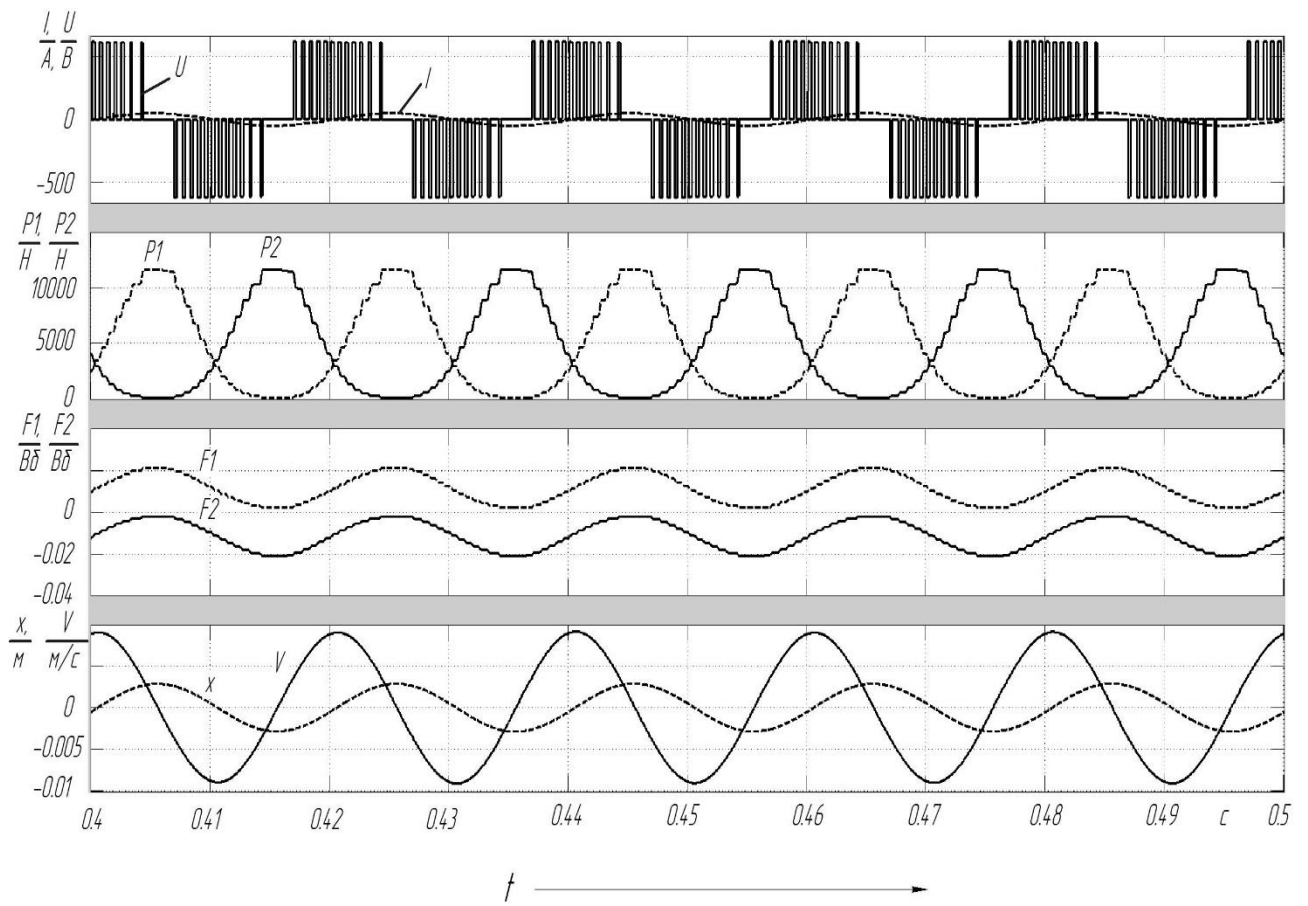


Рисунок 47 – Диаграмма работы электромеханической системы

На рисунке 47 можно увидеть, что форма тока на нагрузке имеет ступенчатый характер, как и при моделировании электрической модели, впоследствии чего ступенчато вырабатывается и сила, притягивающая якорь, и потоки магнитных полей.

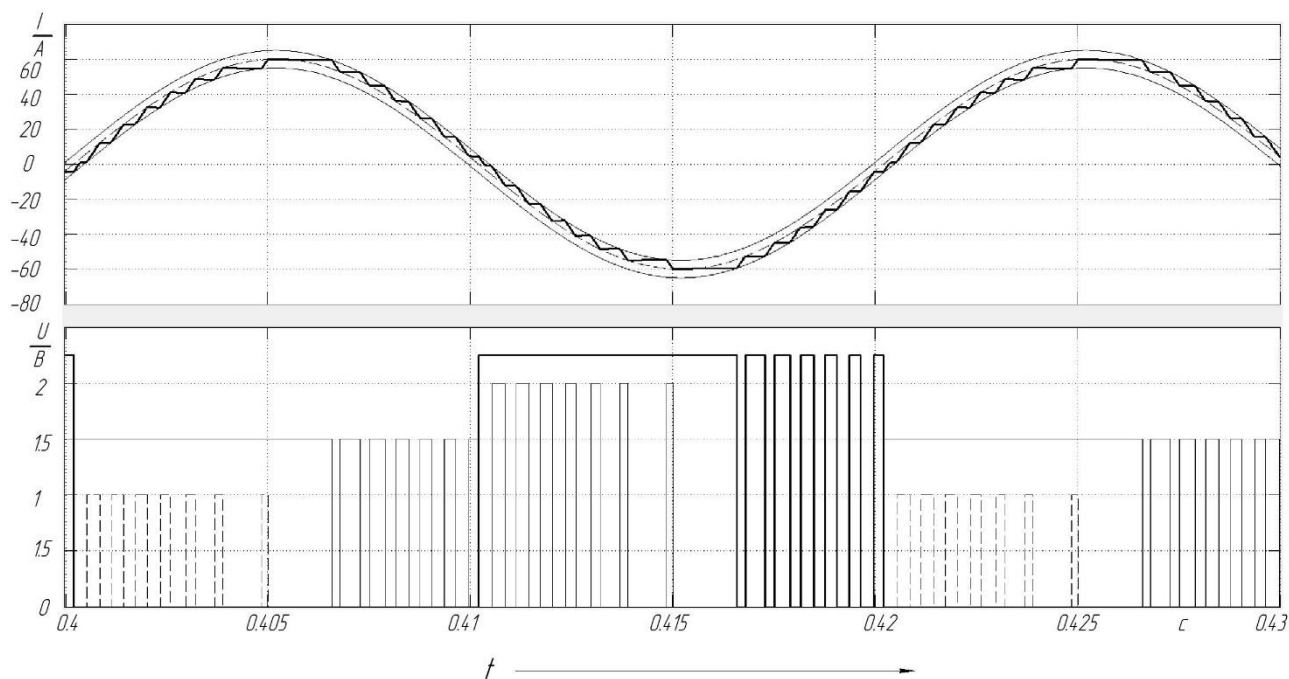


Рисунок 48 – Распределение тока на нагрузке

Работа системы управления на примере графика тока на нагрузке представлена на рисунке 48. Нижний график описывает работу ключей, попеременное их включение и выключение. Масштаб импульсов был изменен для наглядности. Здесь током задания i_z является ток подмагничивания, в данном случае он равен 60 А. Для задания допустимого порога приняли номинал ошибки $\Delta = 5$ А. При работе первой пары транзисторов формируется положительная полуволна тока, при работе второй пары – отрицательная. Алгоритм работы системы управления описан в пункте 5.2 настоящей диссертационной работы.

4.5 Анализ результатов

Вычисление коэффициента гармоник.

Следующим этапом после моделирования было проведено вычисление коэффициента гармоник для перемещения в рассматриваемых системах.

«Коэффициент нелинейных искажений (КНИ) [33] — величина для количественной оценки нелинейных искажений, равная отношению среднеквадратичной суммы спектральных компонентов выходного сигнала, отсутствующих в спектре входного сигнала, к среднеквадратичной сумме спектральных компонентов входного сигнала. КНИ — безразмерная величина, выражается обычно в процентах. Кроме КНИ уровень нелинейных искажений можно выразить с помощью коэффициента гармонических искажений.

Коэффициент гармонических искажений — величина, выражающая степень нелинейных искажений устройства (усилителя и др.), равная отношению среднеквадратичного напряжения суммы высших гармоник сигнала, кроме первой, к напряжению первой гармоники при воздействии на вход устройства синусоидального сигнала:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \quad (1).$$

Коэффициент гармоник так же как и КНИ выражается в процентах. Коэффициент гармоник [8] (КГ) связан с КНИ (КН) соотношением:

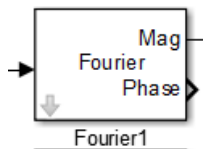
$$K_{\Gamma} = K_H / \sqrt{1 - K_H^2}.$$

Типовые значения КНИ

- 0 % — форма сигнала представляет собой идеальную синусоиду.
- 3 % — форма сигнала отлична от синусоидальной, но искажения не заметны на глаз.»[33]
- «5 % — отклонение формы сигнала от синусоидальной заметно на глаз по осциллограмме.
- 10 % — стандартный уровень искажений, при котором считают реальную мощность (RMS) УМЗЧ.
- 21 % — например, сигнал трапецеидальной или ступенчатой формы.

- 43 % — например, сигнал прямоугольной формы.»[33]

Использовали данную формулу (1) для расчета гармонических колебаний перемещения. Для этого разложили исследуемый сигнал на гармоники, от 1-ой до 10-ой, с помощью блока Фурье в программном пакете



Simulink MATLAB - . Затем, используя функциональный блок,

$$\frac{(\sqrt{u(2)^2+u(3)^2+u(4)^2+u(5)^2+u(6)^2+u(7)^2+u(8)^2+u(9)^2+u(10)^2})}{u(1)}$$

THD

записали уравнение ,
задействовав в нем полученные гармоники. В результате получили численные и графические значения вычислений.

Ниже приведем диаграммы и значения для каждой из исследуемых схем. Диаграммы КГИ для однофазной системы с подмагничиванием представлены на рисунке 49. Итоговое значение коэффициента гармоник для данной системы в установившемся режиме $K_{г1}=0.1275$, что, в процентном соотношении:

$$K_{г1} * 100\% = 0.1275 * 100\% = 12.75 \%,$$

согласно типовым значениям КНИ это соответствует стандартному уровню искажений (Кривая х на рисунке 34).

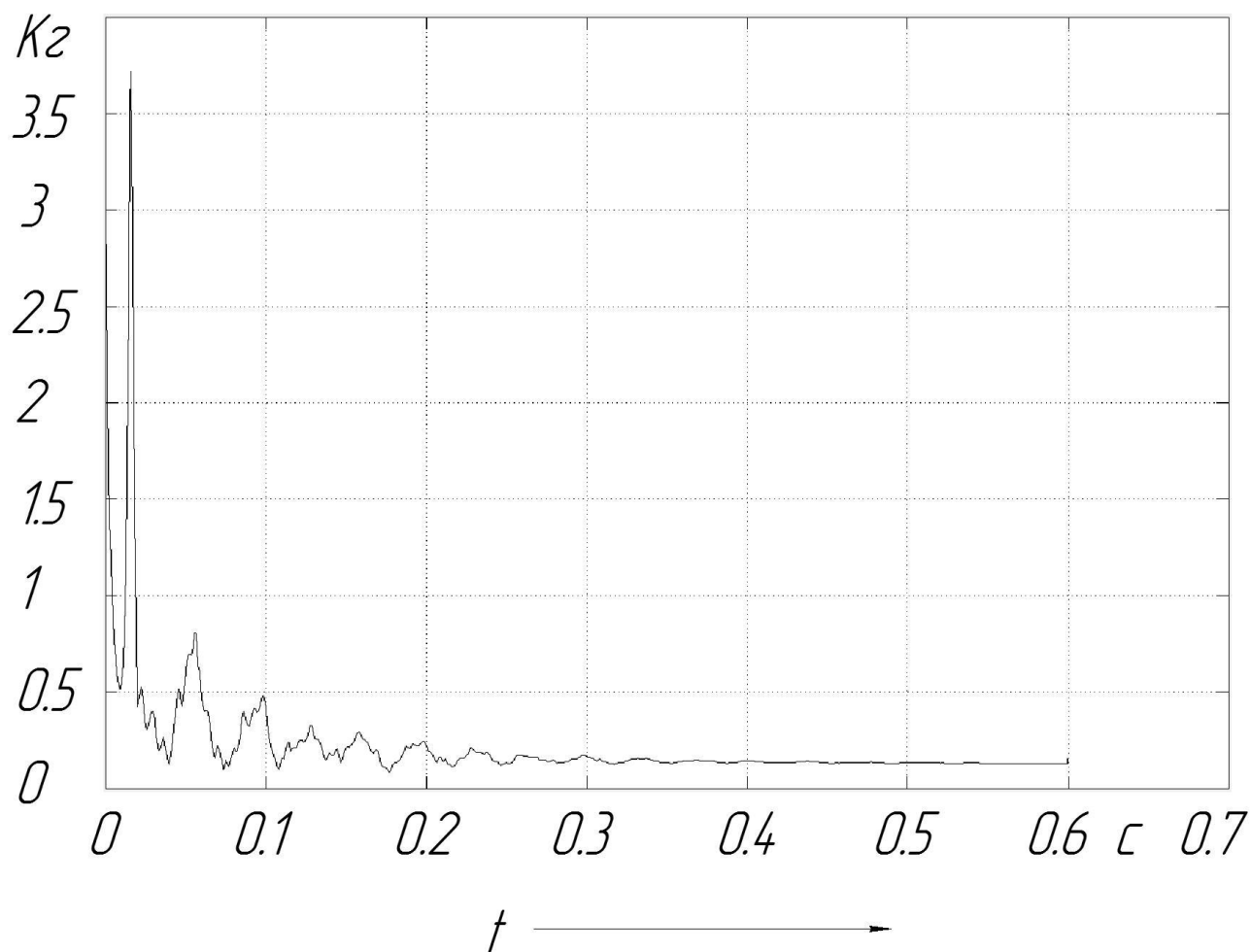


Рисунок 49 – Диаграмма КГИ для одноконтурной системы с подмагничиванием

Далее рассмотрим диаграммы КГИ для одноконтурной системы без подмагничивания (Рисунок 50). Итоговое значение коэффициента гармоник для данной системы в установившемся режиме $K_{Г12}=0.1262$, что, в процентном соотношении:

$$K_{Г12} \cdot 100\% = 0.1262 \cdot 100\% = 12.62 \%,$$

что полностью соответствует уровню искажений в одноконтурной системе с подмагничиванием (Кривая х на рисунке 30).

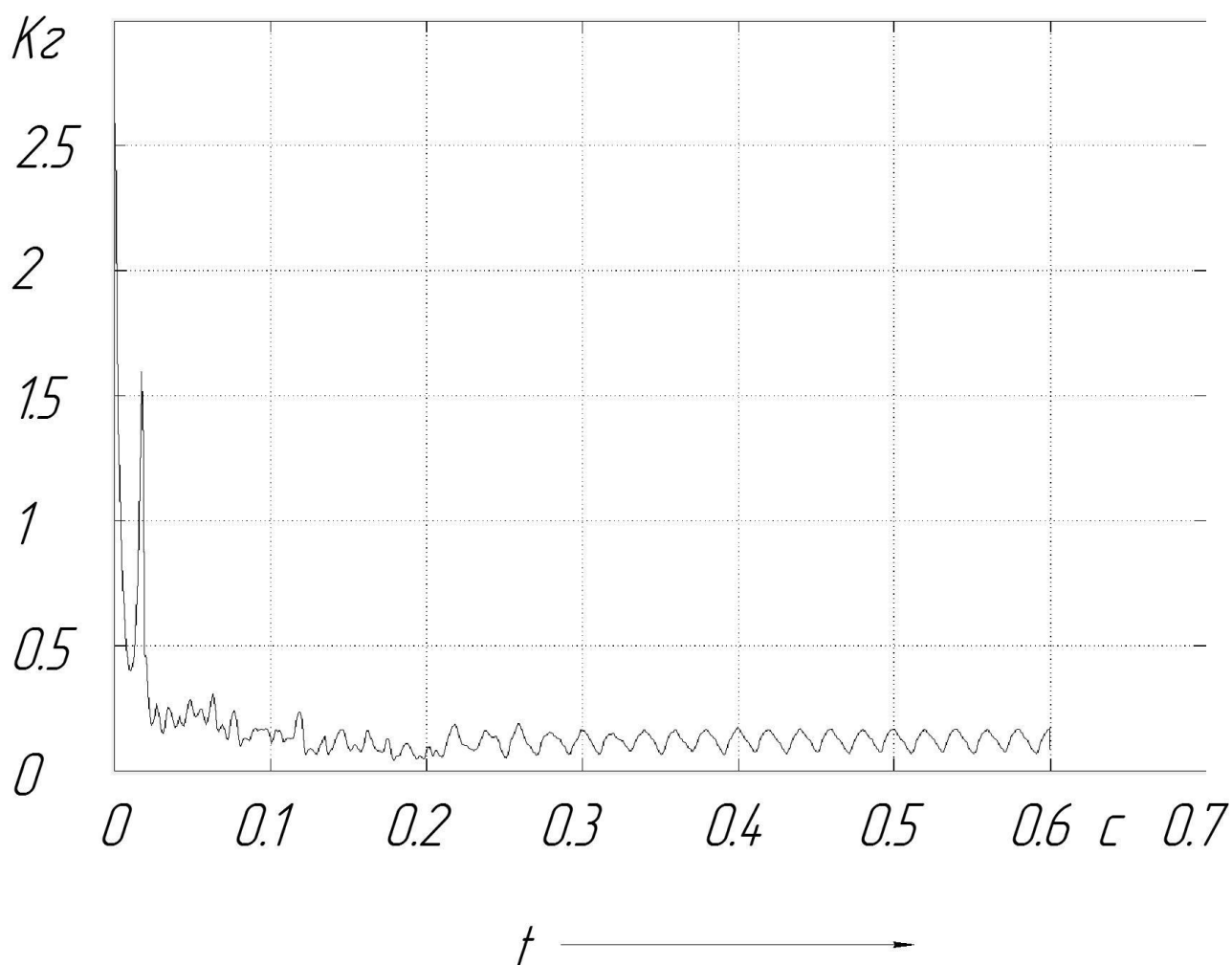


Рисунок 50 - Диаграмма КГИ для одноктактной системы без подмагничивания

Подобные диаграммы были получены и при анализе двухтактной системы без подмагничивания (Рисунок 51). Значение коэффициента в установившемся режиме составило примерно $K_{Г2}=0.03575$, что, в процентном соотношении:

$$K_{Г2} * 100\% = 0.03575 * 100\% = 3.57 \%,$$

что, согласно типовым значениям КНИ означает, что форма сигнала отлична от синусоидальной, но искажения не заметны на глаз (Кривая x на рисунке 38).

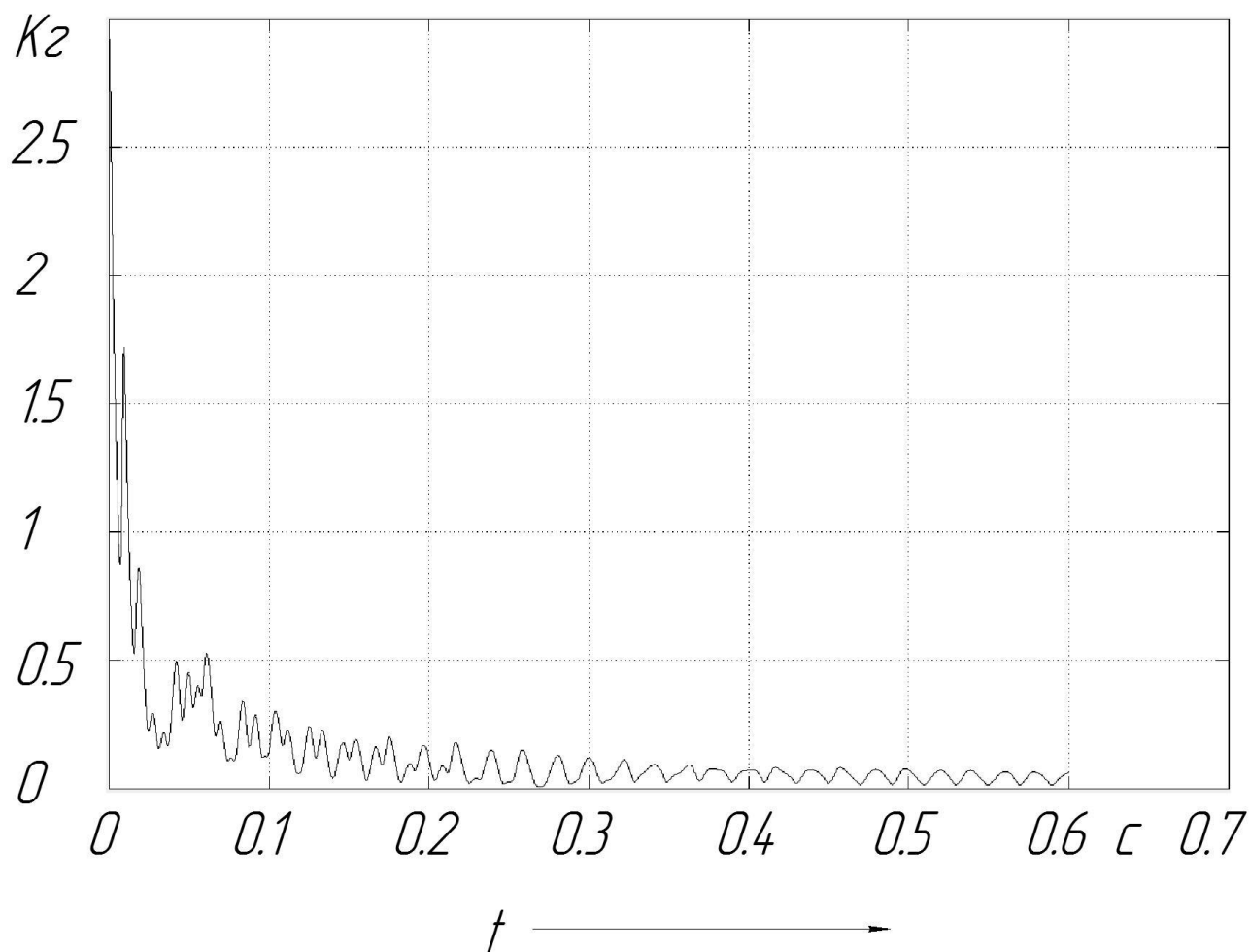


Рисунок 51 – Диаграмма КГИ для двухтактной системы без подмагничивания

Аналогичные диаграммы получили и в случае с двухтактной системой с подмагничиванием (Рисунок 52). Значение коэффициента в установившемся режиме составило $K_{Г22}=0.009893$, что, в процентном соотношении:

$$K_{Г22} * 100\% = 0.009893 * 100\% = 0.98 \%,$$

что, согласно типовым значениям КНИ означает, что форма сигнала отлична от синусоидальной, но искажения не заметны на глаз (Кривая x на рисунке 42).

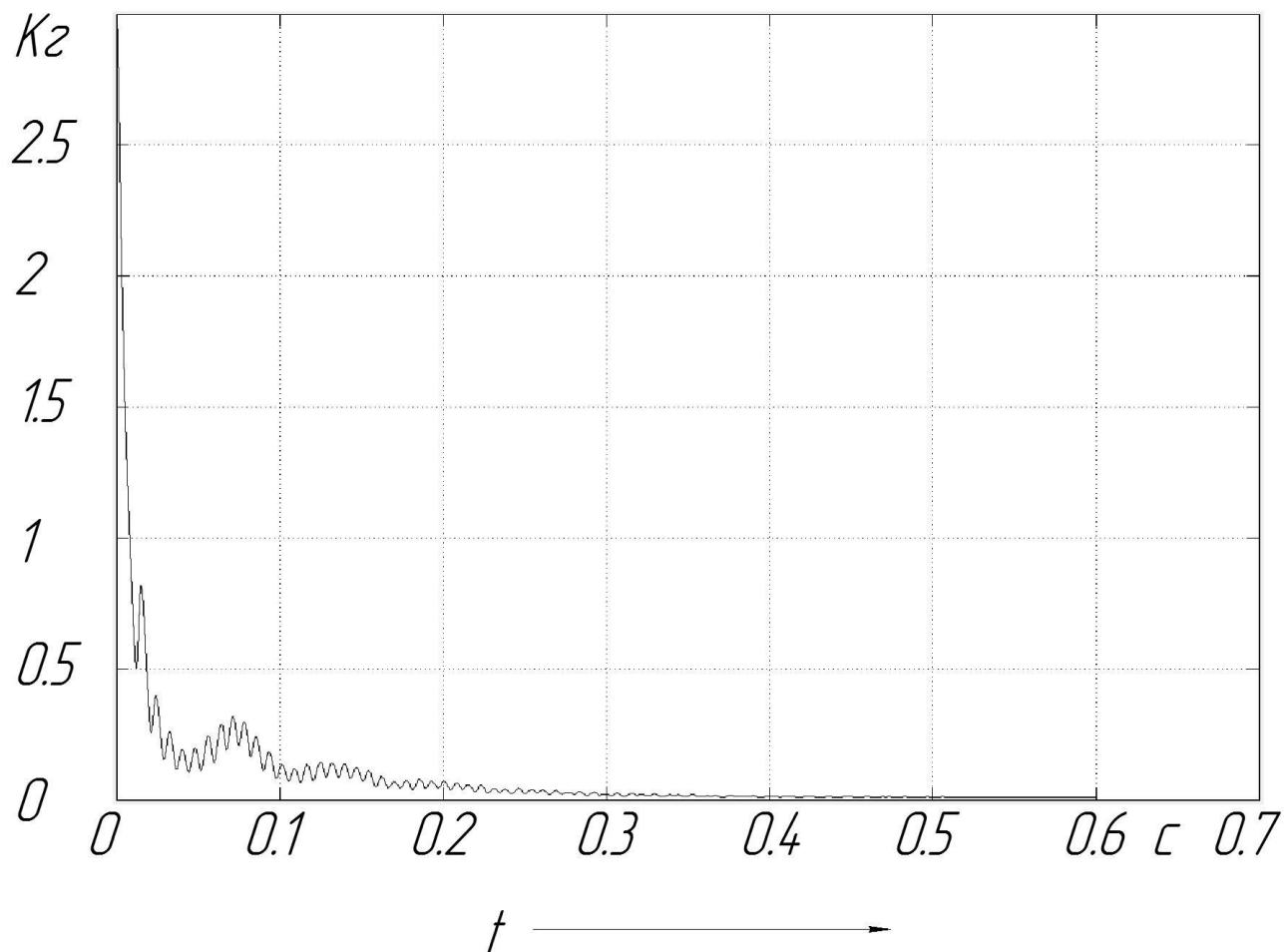


Рисунок 52 – Диаграмма КГИ для двухтактной системы с подмагничиванием

По полученным графикам можно увидеть, что колебания при старте носят несинусоидальный характер, значение КГИ поднимается выше 1, а затем форма сигнала становится ближе к синусоидальной.

Согласно вышеуказанным вычислениям и диаграммам наилучшей формой сигнала, наиболее близкой к синусоидальной, обладает двухтактная система с подмагничиванием.

Выводы по разделу.

В результате моделирования были получены диаграммы и графики, из которых были вынесена наиболее интересующая нас информация, а именно величины тока в системе I , потока Φ и перемещения x и коэффициента гармоник. Все эти величины занесли в таблицу 2.

Таблица 2 – Таблица амплитудных значений моделируемых величин

Название схемы	I , А	Φ , Вб	x , мм	$K_{гх}$, %
Однотактная без подмагничивания	120	0,04	2	12.62
Однотактная с подмагничиванием	105	0,04	2	12.75
Двухтактная без подмагничивания	180	0,04	1	3.57
Двухтактная с подмагничиванием	105	0,05	1,1	0.98

Исходя из полученных данных выяснили, что однотактные системы имеют наибольшее перемещение. Величина тока, проходящего через силовые приборы однотактной системы с подмагничиванием та же, что и у двухтактной системы с подмагничиванием. Однако коэффициент гармоник значительно ниже у последней, значит форма сигнала ближе к синусоидальной. Потому считаем двухтактную систему с подмагничиванием наиболее эффективной.

5 Выбор электромагнитной и силовой части

5.1 Выбор элементов силовой части

Электрическая схема установки выглядит следующим образом (Рисунок 53) – она представляет собой мостовой инвертор с RL нагрузкой с дополнительными обмотками подмагничивания.

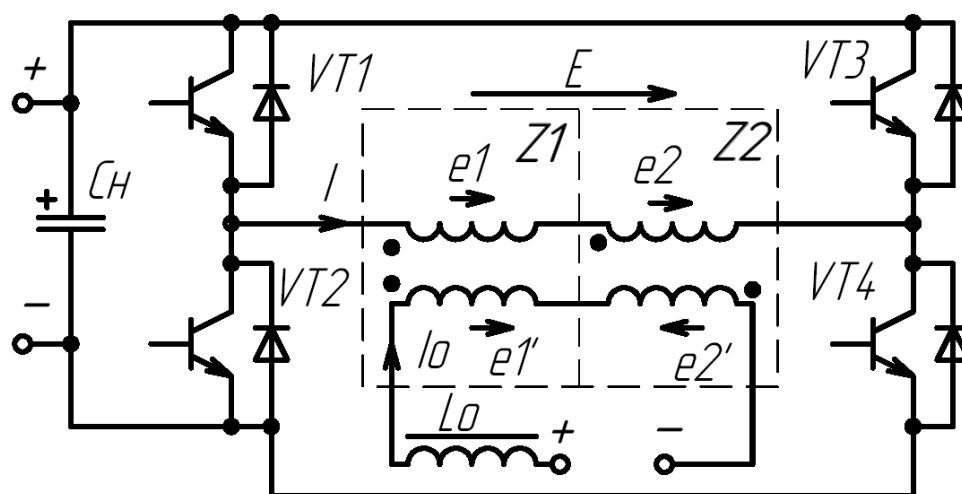


Рисунок 53 – Схема с одним инвертором и дополнительными обмотками подмагничивания

Полная схема содержит входной трансформатор, выпрямитель, инвертор, схему подмагничивания, защитные, демпфирующие цепи (Рисунок 54).

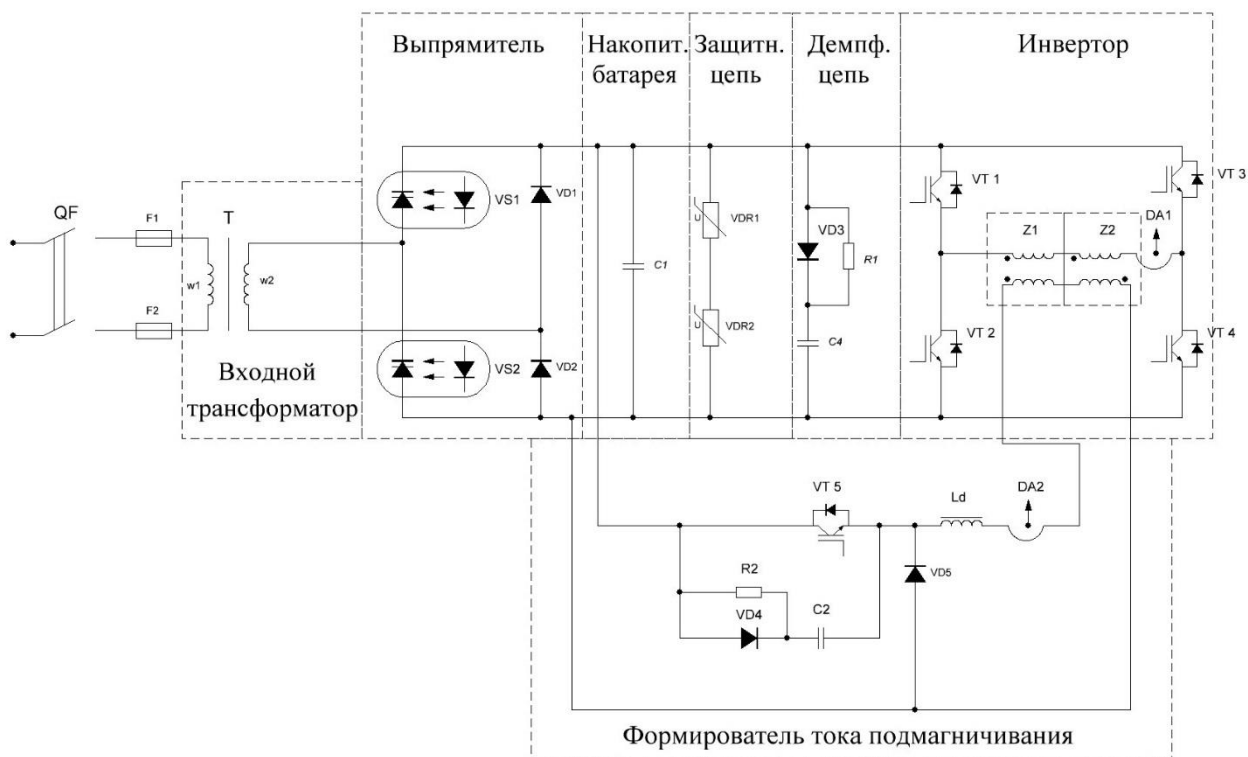


Рисунок 54 – схема питания установки

Для питания схемы требуется удвоенное сетевое напряжение, поэтому на входе схемы ставим повышающий трансформатор марки ОСМ – 0.63. Согласно расчетам математического моделирования, инвертор потребляет порядка 200 Вт, поскольку он является основным потребителем энергии, трансформатор взяли мощностью, превышающей данную хотя бы в 2 раза.

Трансформаторы ОСМ1, ОСМ и ОСМР

Однофазные сухие трансформаторы ОСМ1 и разделительные ОСМР предназначены для обеспечения необходимым напряжением питания устройств сигнализации, централизации и блокировки на железных дорогах, цепях управления, в осветительных системах и т. д. с высотой над уровнем моря не выше 1000 м, во взрывобезопасной среде при температуре от -45°C до $+40^{\circ}\text{C}$

Напряжение первичной обмотки ВН может принимать достаточно широкие значения в диапазоне от 100 до 660 В. Напряжения вторичной

обмотки НН так же может принимать самые различные значения от 5 до 660 В. Однофазные трансформаторы серии ОСМ и ОСМ1 полностью отвечает ГОСТ19294-84 (таблица 3).

- Климатическое исполнение УЗ, УХЛ по ГОСТ 15150_69.
- По безопасности трансформаторы ОСМ отвечают ГОСТ 12.2.007.2_75.
- По защите от поражения током трансформаторы относятся к 1 классу по ГОСТ 12.2.007.0_75.
- Степень защиты IP_00 по ГОСТ 14254_96.
- Класс нагревостойкости изоляции В по ГОСТ8865-93.

Таблица 3 – Основные характеристики трансформаторов напряжения ОСМ, ОСМ1, ОСМР

Наименование	Мощность, кВА	Количество обмоток, шт	Напряжение, В первичное	Напряжение, В вторичное	Габаритные размеры, ДхШхГ, мм	Масса, кг не более
ОСМ-0,63	0,63	до 4	до 660	до 660	144x120x152	9
ОСМ-1,0	1	до 4	до 660	до 660	180x117x185	11,5
ОСМ-1,6	1,6	до 4	до 660	до 660	180x160x185	14,3
ОСМ-2,5	2,5	до 4	до 660	до 660	270x160x225	19,8
ОСМ-3,0	3	до 4	до 660	до 660	270x160x225	25
ОСМ-4,0	4	до 4	до 660	до 660	275x180x225	33

Определившись с трансформатором, перейдем к выбору выпрямителя. Причем, пару диодов заменим оптотиристорами VS1, VS2 марки ТО-142 (Рисунок 55) для защиты схемы от перегрузок.

Оптотиристоры ТО 142 (таблица 4).

Таблица 4 – Технические характеристики оптотиристоров

Параметр	TO142-50	TO142-63	TO142-80
$U_{drm}, В$	200 - 1200		
$I_{tav}, А$	50	63	80
$I_{tсм}, А$	800	1200	1350
$U_{тп}, В$	1,85	1,75	
$R_{т}, °С/Вт$	0,36	0,30	0,24
$U_{изол}, В$	2000		

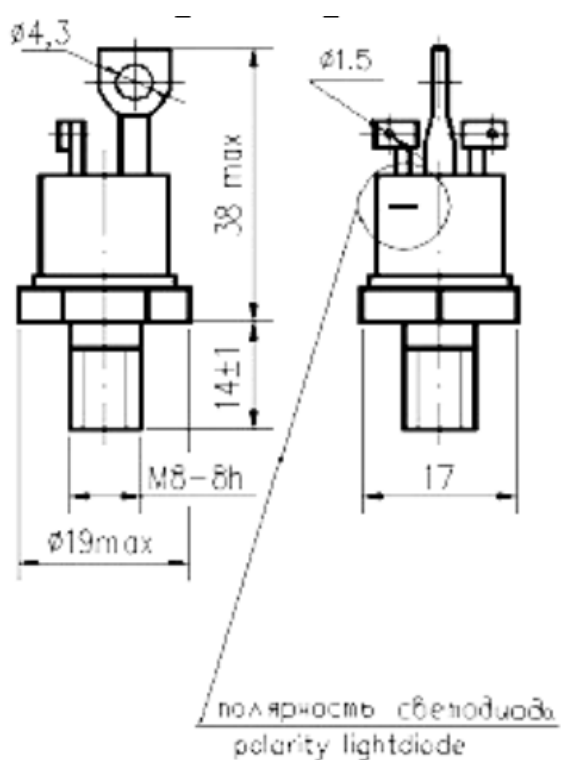


Рисунок 55 – Оптотиристор TO 142

В качестве пары диодов VD1,VD2 выбрали сдвоенный выпрямительный диод от фирмы IXYS - DSI2x55-12A (Рисунок 56, таблица 5) [37, 38].

Общее описание

- V_{RRM} : от 800 до 2200V
- $I_{f(avg)}$: от 2.3A to 150A
- Работа в лавинном режиме

- Надёжные, защищённые корпуса
- Оптимальны для частот 50/60 Hz
- Конфигурация: Single, Phase leg, Common Cathode и Dual Diode

Таблица 5 – Основные параметры

Кол-во диодов	2
V_{RRM}, B	1200
V_{RMS}, B	1300
$I_{F(RMS)}$ (макс.), A	120
$I_{F(AV)}, A$	56
При $T_C, ^\circ C$	80
I^2t, A^2c	2210
V_F (макс.), B	1.25
I_R (макс.), мкА	300
I_{FSM} (макс.), A	650
T_J (макс.), $^\circ C$	150
Корпус	SOT-227 B



miniBLOC, SOT-227 B



E72873

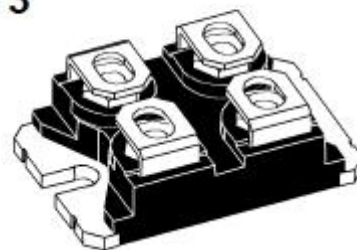


Рисунок 56 – Схема элемента и его внешний вид

Для защиты установки от импульсных напряжений в схеме используются варисторы (Рисунок 57) марки JVR-10N821K (FNR10K821).

Варисторы - компоненты с симметричной ВАХ, подобной характеристике двунаправленного стабилитрона [41].



Рисунок 57 – Варистор, внешний вид

Для защиты системы от сетевых перенапряжений на вход трансформатора ставим плавкие предохранители марки ВПБ6-10В (Рисунок 58) [20,21, 39, 40].



Рисунок 58 – Плавкий предохранитель

Далее выберем накопительную батарею. «Выбор накопительной конденсаторной батареи заключается в определении необходимой емкости, классификационном напряжении, числе и типе конденсаторов, ее составляющих. В качестве примера осуществим выбор конденсаторной батареи для формирователя тока на транзисторах на основе следующих рассуждений.»[23, 24, 26]

«Запасенная в магнитном поле энергия может быть рекуперирована в конденсаторную батарею, что приведет к увеличению напряжения на ней. Полученное напряжение не должно превышать предельно допустимых значений. Предположим, что рекуперация в С1 запасённой в поле электромагнита энергии должна привести к увеличению напряжения на С1 с $U_{\text{ВЫХ}}=620\text{В}$ до $(U_{\text{ВЫХ}}+\Delta U)=820\text{В}$, т.е на величину $\Delta U=200\text{В}\sim 30\%U_{\text{ВЫХ}}$. В системе согласно расчету магнитных цепей запасется энергия $W=111\text{Дж}$. Именно эта энергия будет рекуперироваться в конденсаторную батарею, приводя к увеличению напряжения на ней.»[23]

$$W = \frac{C1}{2} \cdot [(U_{\text{ВЫХ}} + \Delta U)^2 - U_{\text{ВЫХ}}^2] .$$

Отсюда выразим С1:

$$C1 = \frac{2 \cdot W}{[(U_{\text{ВЫХ}} + \Delta U)^2 - U_{\text{ВЫХ}}^2]} = \frac{111}{[(820)^2 - 620^2]} = 385.4 \text{ мкФ} .$$

Полученное значение округлим в большую сторону до 400 мкФ.

Энергия, запасаемая в батарее составит:

$$W_c = C1 \cdot U_{\text{ВЫХ}}^2 / 2 = 0.0004 \cdot 620^2 / 2 = 77 \text{ Дж} .$$

Для снижения стоимости конденсаторной батареи составим ее из нескольких конденсаторов – из 8 конденсаторов серии К 75-17, технические характеристики емкостного накопителя занесены в таблицу 6.

Таблица 6 – Технические характеристики

Серия	В43584
Номинальная емкость, мкФ	50
Номинальное напряжение, В	1000
Допуск номинальной емкости, %	10, 20
Рабочая температура, С	-60...+60
Тангенс угла потерь, %	Мах 0.008
Производитель	ОАО Мезон

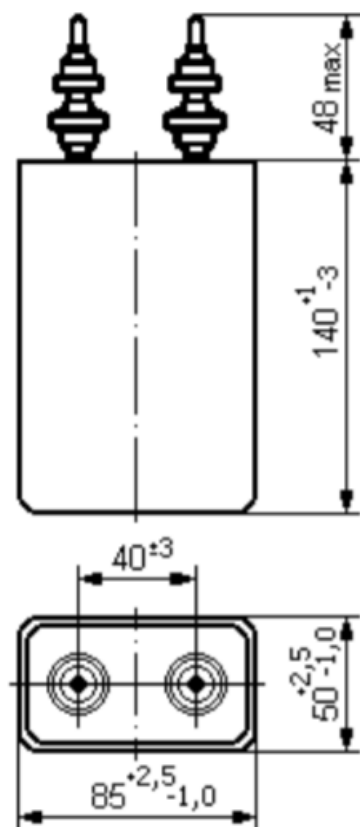


Рисунок 59 – Емкостной накопитель

В схеме присутствуют демпфирующие цепи. Расчет этих демпфирующих цепочек основан на знании величин паразитной индуктивности, которая нам неизвестна, поэтому их подбор рекомендуется производить экспериментально на реальной установке

В настоящее время на рынке силовых приборов идет конкурентная борьба между различными торговыми марками. IGBT транзисторы, модули, силовые диоды представлены в большом разнообразии, как в технических аспектах, так и в ценовом диапазоне. Отечественные приборы встречаются вместе с зарубежными повсеместно. Как правило, зарубежные компоненты менее габаритные, но более требовательные к обслуживанию [22].

Во избежание перегрева или выхода из строя приборов во время переходного процесса при коммутации использовать будем элементы с

характеристиками выше необходимых на $\Delta=30\%$. Тогда рассчитаем требования к току для транзисторов:

$I_{\text{макс}} = I_{\text{н}} * 1.3 = 136.5 \text{ А}$ – минимальная допустимая граница значения тока коллектора для транзисторов.

По аналогии рассчитаем предел параметра напряжения, необходимый для работы приборов в схеме :

$U_{\text{макс}} = U_{\text{н}} * 1.3 = 806 \text{ В}$ - минимальная допустимая граница значения пробивного напряжения.

Руководствуясь данными рекомендациями, выбрали следующие силовые IGBT модули (Рисунок 60):



Рисунок 60 – Силовой IGBT модуль

Наименование: SEMiX151GB12E4s

Производитель: Semikron (SMK)

Корпус: SEMiX 1s

Вес брутто: 180 г.

Внутренняя схема _____ GB

Напряжение К-Э _____ 1.2кВ

Рабочий ток при 25°C _____ 150А

Технология кристалла _____ IGBT 4 (Trench)

Кол-во ключей в модуле _____ 2

Всего необходимо закупить 2 модуля, т.к. количество ключей в каждом – 2 (Рисунок 61).

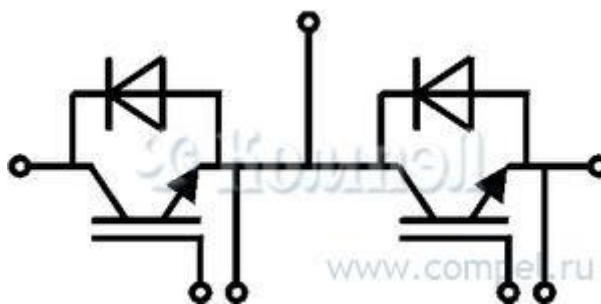


Рисунок 61 – Схема силового IGBT модуля

Для защиты установки от перегрузок и коротких замыканий поставим на вход схемы автоматический выключатель ABB SH202L C6 (Рисунок 62).

Модульный автоматический выключатель серии SH200L. Предназначен для защиты цепей от перегрузок и коротких замыканий, защиты индуктивных нагрузок с низким импульсным током. Монтируется на DIN-рейку.



Рисунок 62 – Автоматический выключатель

Формирователь токов включен по схеме стандартного ППН, расчет которого достаточно широко распространен в литературе, потому его детальная разработка не включена в состав данной работы.

Все выбранные элементы сведены в перечень элементов (Приложение А).

5.2 Алгоритм работы системы управления

Перед выбором системы управления определились с алгоритмом ее работы. В нашем случае требуется попеременная работа ключей для формирования переменного сигнала на нагрузке, для чего выбран регулятор с тремя состояниями (Рисунок 63), выходное напряжение изменяется по закону:

$$U_{\text{вых}} = \begin{cases} SW = 1, E; \\ SW = 0, 0; \\ SW = -1, -E. \end{cases}$$

То есть на нагрузке может быть напряжения трех уровней (+E, 0, -E), при этом изменение тока от действия этих напряжений может быть как форсированным (SW=-1 или SW=1), так и положим (SW=0).

Трехпозиционное регулирование имеет существенные преимущества перед двухпозиционным, несмотря на сложность реализации. Основные преимущества алгоритма регулирования:

- частота коммутаций ниже чем в двухпозиционном, а следовательно ниже и потери в ключевых элементах;
- сквозные токи возникают только в одном плече при каждом переключении, в том плече, где ключи переключаются с верхнего на нижний или наоборот, это уменьшает динамические потери в преобразователе в два раза;
- в магнитопроводе нагрузки потери также уменьшаются, т.к. они примерно зависят от квадрата напряжения (квадрата скорости

нарастания потока в магнитопроводе), а в случае двухполярного напряжения (двух состояниях управления) он выше, т.к. в трехпозиционной есть промежутки с нулевым напряжением.

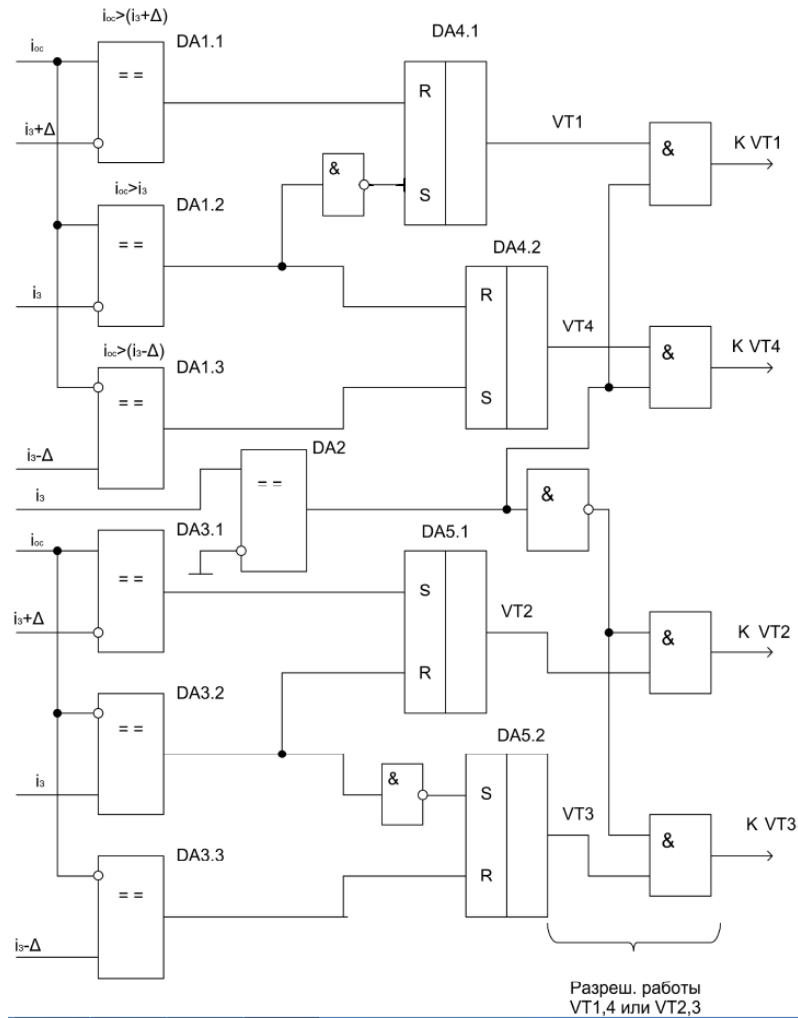


Рисунок 63 – Схема системы управления

Для системы управления использовали алгоритм работы системы управления (Рисунок 65).

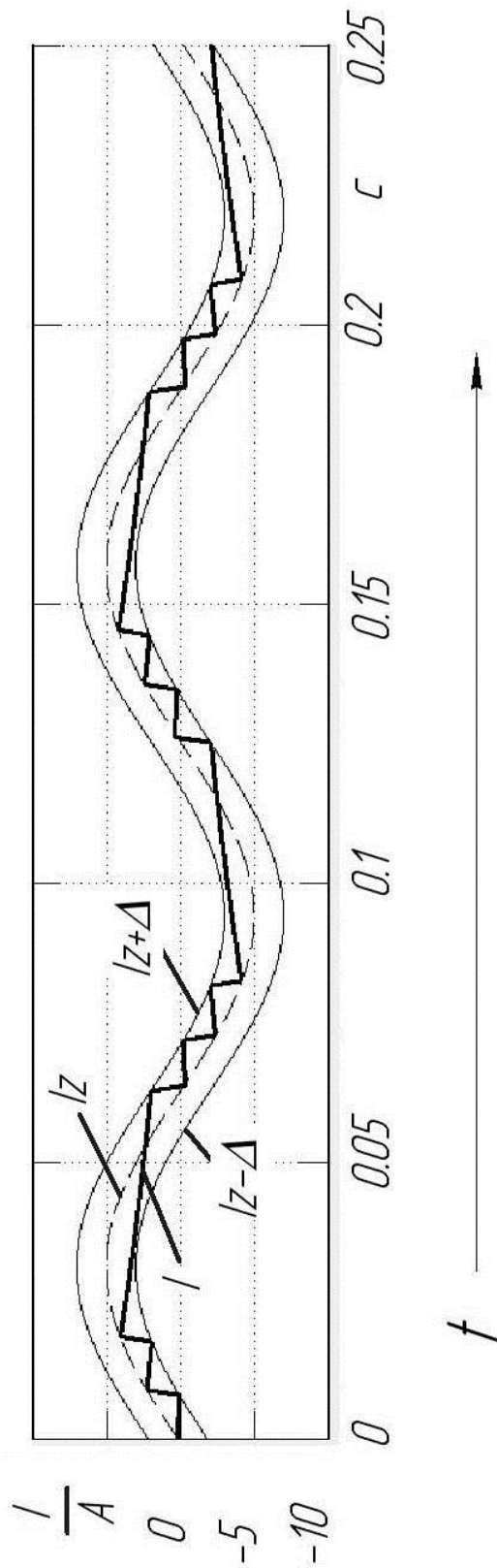


Рисунок 64 – Диаграммы формы тока на нагрузке

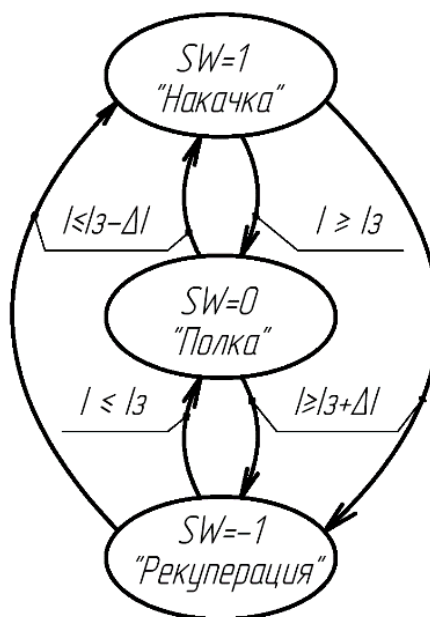


Рисунок 65 – Граф алгоритма системы управления

Проанализируем алгоритм. Система управления работает в трех состояниях – положение $SW=1$, или накачка, ток в системе повышается. Положение $SW=0$, или полка, образование полки при достижении током допустимых границ. Положение $SW=-1$, или рекуперация, повышение тока в обратном направлении. При выполнении условия $I \geq i_z$ накачка тока прекращается и образуется полка, при достижении полкой границы $I \leq i_z - \Delta i$, снова происходит накачка тока. И так продолжается до момента выполнения условия $I \geq i_z + \Delta i$, после чего ограничительные границы тока изменяются и начинает формироваться отрицательная полуволна. Алгоритм продолжает работать в цикле Рекуперация – полка до следующего момента прохождения током нуля, после чего выполняется условие $I \leq i_z - \Delta i$ и начинает работу цикл Накачка – полка и т.д.

Выводы по разделу.

В пятой главе произвели выбор элементов схемы питания, а также описан алгоритм системы управления.

Заключение

В настоящей работе был произведен выбор наилучшей системы питания для вибрационной установки для создания продольных колебаний посредством теоретических приемов, расчетов и моделирования. Был проведен анализ отрасли и сравнение с аналогами. К научной новизне можно отнести разработанную единую электромеханическую систему и сравнительный анализ четырех систем с плоскими электромагнитами.

Наилучшей из исследуемых величин по результатам расчетов и моделирования признана двухтактная система с подмагничиванием. Согласно расчетам, через силовые приборы схемы питания данной системы протекают наименьшие токи $I=105\text{A}$. Коэффициент гармонических искажений для перемещения у данной схемы самый низкий $K_{ГХ}=0.98\%$.

- Проведено моделирование и анализ его результатов для 4-х систем плоских электромагнитов, определена схема с наилучшими показателями.
- Наибольшее значение перемещения наблюдается у одноктактных систем.
- Коэффициент гармонических искажений ниже у двухтактных систем.
- Наименьший ток через силовые приборы наблюдается в системах с подмагничиванием.
- Разработана и реализована математическая модель электромеханической системы, включающая в себя магнитную систему и схему ее электропитания.
- Разработана система питания, позволяющая обеспечить регулирование амплитуды и частоты создаваемых виброустановкой колебаний путем формирования тока подмагничивания и переменного тока.

Оформление ВКР производилось с учетом [9,10,11,12,27,31,32].

Список используемой литературы

1. Elcut – Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методов конечных элементов; версия 6.0, Руководство пользователя.
2. Анкушев В.В., Гурьев С.В., Резвов В.И. ЗАО «ГЕОСЕЙС», г.Тюмень. Компания «ГЕОСЕЙС» представляет новый импульсный источник возбуждения «Геотон» // ж. «Приборы и системы разведочной геофизики», №01(03), 2003г.
3. Большая энциклопедия нефти газа [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ngpedia.ru/index.html> (дата обращения: 17.05.2024)
4. В.В. Ивашин, М.В. Позднов, А.В. Прядилов; Электромагнитный вибратор с управляемой частотой колебаний.
5. В.В. Ивашин, М.В. Позднов. К вопросу об энергопреобразовании в электромагнитном вибраторе.// Прогрессивные техпроцессы в машиностроении: Труды всероссийской конф. с междунар. участием: Тольятти, ТГУ, 2002.-С.120-125.Метод электромеханических аналогий.
6. Вибрационные конвейеры - технологически чистый вид промышленного транспорта, - Ю.А. Бродский, С.Л. Колосов, Б.С. Шалунов (ООО “Консит-А”) [Электронный ресурс]. URL: http://www.consit.ru/st_vibr_002.shtml - (дата обращения: 17.05.2024)
7. Вибростенды для диагностики подвески автомобиля [Электронный ресурс] <http://www.autoshcool.ru/5334-vibrostandy-dlya-dagnostiki-podveski-avtomobilya.html> (дата обращения: 17.05.2024)
8. Горохов П. К. Толковый словарь по радиоэлектронике. Основные термины — М: Рус. яз., 1993.
9. ГОСТ 2.105-95. Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам [Текст]. - Введ. 1996-07-01. - М.: Госстандарт РФ: Изд-во стандартов, 1994.- 19с.: ил.

10. ГОСТ 2.702-2011. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения схем.- Введ. 2012-01-01. - М.: Стандартинформ: Изд-во стандартов, 2011.- 22с.: ил.
11. ГОСТ 7.1-2003 Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – Введ. 2004-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 170 с.
12. ГОСТ 7.32-2001. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления [Текст]. - Введ. 2002-07-01. - М.: Госстандарт РФ: Изд-во стандартов, 2001.- 23с.
13. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. Пособие для приборостроит. Спец. Вузов. –М.: Высш. шк.1991.- 622 с.
14. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. –М: Высш. школа, 1982. -496 с.: ил.
15. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учеб.пособ./ Зиновьев, Г.С. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 664с.
16. Ивашин В.В. Импульсный электромагнитный привод источника сейсмических колебаний // Электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. Сб. науч. стат., ч.2, Екатеринбург, 2003г., С.141-144.
17. Ивашин В.В., Симкин С.А., Чичинин И.С. Энергетика электромагнитного резонансного вибратора в автоколебательном режиме.- Геология и геофизика, 1978, №10, С.119-129.
18. Ивашин, В.В. Электромагнитный вибратор с управляемой частотой колебаний / В.В. Ивашин, М.В. Позднов, А.В. Прядилов // Наука – производству. - 2004. - №4(72). - С.46-47.
19. Иориш Ю. И., Виброметрия, 2 изд., М., 1963; Вибрационная техника, М., 1966; Быховский И. И., Основы теории вибрационной техники, М., 1969.

20. Каталог электронных компонентов [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.chip-dip.ru](http://www.chip-dip.ru) (дата обращения: 17.05.2024)
21. Каталог электронных компонентов [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.platan.ru](http://www.platan.ru) (дата обращения: 17.05.2024) .
22. Компэл. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.compel.ru> (дата обращения: 17.05.2024)
23. Конденсаторы: Справочник / И. И. Четвертков, М. Н. Дьяконов, В. И. Присняков и др.: Под ред. И. И. Четверткова, М. Н. Дьяконова. – М.: Радио и связь. – 1993. – 392 с.: ил.
24. Конденсаторы: Справочник / Четверков И.И., Дьяконов М.Н, Присняков В.И. и др.: Под ред. Четверкова И.И., Дьяконова М.Н.-М.: Радио и связь. -1993. -392с.: ил.
25. Кострыгин Ю.П. Сейсморазведка на сложных сигналах. – Тверь: Издательство ГЕРЕС, 2002. - 416 с.
26. Масленников М.Ю. Справочник разработчика и конструктора РЭА. –М.: Радио и связь, 1988.-300с.: ил.
27. Методические указания по оформлению выпускных квалификационных работ по программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры : [Электронный ресурс]. URL: [https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_\(Diplom\)](https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_(Diplom)) / Оформление ВКР (Дата обращения: 18.02.2024)
28. Методы проектирования электромеханических вибровозбудителей. Божко А.Е., Пермяков В.И., Пушня В.А. Отв. Ред. А.Н. Подгорный; АН УССР Институт машиностроения. – Киев: Наук.думка, 1989. – 208с.
29. Оборудование для производства, производство, строительство, спецтехника, сырье, грузоперевозки и поиск груза, бизнес [Электронный ресурс]. URL: promplace.ru (дата обращения: 17.05.2024) .

30. Однофазные стабилизаторы напряжения [Электронный ресурс]. URL: <http://enstab.ru/cat/kategoriya/44> (дата обращения: 17.05.2024) .
31. Положение о выпускной квалификационной работе: утв. решен. учен. совет. от 21.11.2019 решение №254 : [Электронный ресурс]. URL: [https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_\(Diplom\)](https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_(Diplom)) / Положение о ВКР (Дата обращения: 18.02.2024)
32. Порядок обеспечения самостоятельности выполнения письменных работ в ТГУ : [Электронный ресурс]. URL: [https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_\(Diplom\)](https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q/BKP_(Diplom)) / Положение о Антиплагиате (Дата обращения: 18.02.2024)
33. Справочник по радиоэлектронным устройствам: В 2-х т.; Под ред. Д. П. Линде — М.: Энергия, 1978.
34. Холин Б.Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости. – М.: «Машиностроение», 1977. – 182 с.
35. Шнеерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная невзрывная сейсморазведка.- М.: Недра, 1988.-237с.
36. Яблонский А.А. и Норейко С.С. Курс теории колебаний. Учеб. пособие для студентов втузов. Изд.3-е, М., «Высш.школа», 1975, 248 с.
37. Diodes Incorporated [Электронный ресурс]. URL: <https://www.diodes.com> (дата обращения: 27.05.2024)
38. Electronic Components Datasheets [Электронный ресурс] URL: <http://www.datasheets.ru> (дата обращения: 17.02.2024)
39. Rajendra P. Fundamentals of electrical engineering. - PHI Learning Pvt. Ltd., 2014. P.1064
40. Sahdev S.K. Basic Electrical Engineering. Pearson India, 2015. P.768
41. TVR204 Datasheet, PDF - Datasheet Search Engine [Электронный ресурс].URL:http://www.alldatasheet.com/view_datasheet.jsp?Searchword=TVR204&sField=2 (дата обращения: 27.05.2024)

Приложение А

Перечень выбранных силовых элементов схемы

<i>Поз. обозначение</i>	<i>Наименование</i>	<i>Кол</i>	<i>Примечание</i>
	<i>Трансформатор</i>		
<i>T</i>	<i>ОСМ-0.63 220В/660В</i>	<i>1</i>	
	<i>Оптодиристоры</i>		
<i>VS1, VS2</i>	<i>ТО-142, 1200В</i>	<i>2</i>	
	<i>Диоды</i>		
<i>VD1, VD2</i>	<i>DS12x55-12A, 1200В</i>	<i>1</i>	
	<i>Варисторы</i>		
<i>VDR1, VDR2</i>	<i>JVR-10N821K, 820В</i>	<i>2</i>	
	<i>Плавкие предохранители</i>		
<i>FU1, FU2</i>	<i>ВЛБ6-10В, 2А, 250В</i>	<i>2</i>	
	<i>Накопительная батарея</i>		
<i>C1</i>	<i>K75-17-1000В-50мкФ-10%</i>	<i>8</i>	
	<i>IGBT-транзисторные модули</i>		
<i>VT1, VT2, VT3, VT4</i>	<i>SEMiX151GB12E4s, 1200В</i>	<i>2</i>	
	<i>Автоматический выключатель</i>		
<i>QF</i>	<i>ABB SHL202L C6, 6А</i>	<i>1</i>	