

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)

11.03.04 Электроника и микроэлектроника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электроника и робототехника
(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Вибропривод для химических технологий

Студент

Н.Ф. Амонбеков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент А.В. Прядилов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультант

к.т.н., доцент М.М. Бажутина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2022

Аннотация

Объем 45 с., 11 рис., 1 табл., 33 источника

Вибропривод, грануляция

Объектом исследования является вибропривод для химических технологий.

Цель работы: разработка вибропривода для химических технологий, состоящего из магнитной системы и системы электропитания

Задачи работы:

- обзор вариантов,
- расчет и моделирование магнитопровода,
- разработка силовой части схемы,
- разработка системы управления,
- выбор элементов.

Данные задачи решены в 3 главах работы.

В ходе написания ВКР было использовано специализированное программное обеспечение:

- в программе Elcut были промоделированы магнитные поля и посчитаны силовые характеристики электромагнита.
- с помощью программы MathCad производились математические расчеты по известным формулам.

Степень внедрения: теоретически рассчитаны параметры системы, разработаны схемы и выбраны элементы, проведено математическое моделирование магнитной системы

Областью применения данной работы являются химические технологии по грануляции.

Актуальность работы обуславливается возможностью оперативного изменения частоты колебаний и размера гранул.

Эта работа представляет интерес для химической промышленности, занимающейся грануляцией на основе описанной во введении конструкции.

Abstract

The title of the graduation work is «Vibration drive for chemical technologies».

The senior paper consists of an introduction, 3 parts, a conclusion, 11 picture, 4 tables, list of references including 6 foreign sources and the graphic part on 6 A1 sheets.

The object of research is vibration drive for chemical technologies.

The aim of the graduation work is to develop of a vibration drive for chemical technologies.

We start with the statement of the problem and then logically pass over to its possible solutions. We then analyze the literature concerning our problem.

We give a review of possible solutions and choose the most suitable ones, develop an electrical circuit diagram, carry out theoretical calculations and select elements.

In conclusion we'd like to stress that theoretically calculated system parameters, developed a scheme, selected elements. Mathematical modeling of the magnetic system is carried out.

The key issue of the graduation work is the ability to quickly change the frequency of vibrations and the size of granules

This work is of interest to readers involved in electronics and manufacturers of granular chemicals.

Nevertheless, more experimental data are required.

Содержание

Введение.....	5
1. Состояние вопроса.....	8
1.1. Формулирование актуальности, цели и задач проекта	8
1.2. Анализ исходных данных и известных решений	8
2. Разработка электромагнитного привода.....	11
2.1. Выбор и расчет конструкции.....	11
2.2. Математическое моделирование магнитной системы	22
3. Разработка системы питания	27
3.1. Силовая часть	27
3.1.1. Обзор существующих решений.....	27
3.1.2. Описание принципа работы схемы.	29
3.1.3. Выбор элементов схемы.....	30
3.1.4. Расчет зарядного дросселя	34
3.2. Система управления.....	36
3.2.1. Разработка структурной схема системы управления.....	36
3.2.2. Система управления выпрямителем.	38
3.2.3. Система управления тиристорами	38
3.2.4. Система управления из защит.	40
Заключение	42
Список используемой литературы	43

Введение

В настоящее время в различных отраслях промышленности, особенно в химической, широко используются гранулированные продукты. Это объясняется преимуществом гранул по сравнению с порошкообразной, жидкой и пастообразной формами веществ. Большое внимание уделено исследованиям, разработке теории процессов гранулирования [17,18], а также созданию и совершенствованию оборудования для приготовления гранул – грануляторов.

Производительность грануляционного оборудования и качество получаемых гранул в значительной степени определяется как конструкцией грануляторов, так и режимами их работы. В основу конструкций данных устройств положено свойство струи жидкости распадаться на равномерные капли, что достигается периодическим изменением скорости ее истечения из отверстий перфорированной или пористой оболочки. Данный режим работы наиболее эффективно обеспечивает вибрационная техника. Использование вибрационных грануляторов позволяет получить в большинстве технологических процессов экономически более выгодные и высококачественные результаты.

Общий вид одного из вариантов конструкций виброгрануляторов с перфорированной вращающейся оболочкой представлен на рис. 1. Основным элементом конструкции гранулятора является чашеобразное перфорированное днище 1, плоская центральная неперфорированная часть 2 которого соединена при помощи стержня 3 с виброприводом 4. Подача гранулируемого вещества в полость перфорированного днища 1 осуществляется через трубу 5, связанную с кольцевым каналом 6, переходящим в распределитель 7. Для сепарирования пузырьков воздуха и предотвращения засорения отверстий истечения случайными твердыми частицами после распределителя 7 устанавливается сетка 8. Для выхода воздуха при сепарировании в корпусе гранулятора 9 имеются отверстия 10.

Гранулятор размещается в камере 11, в которой предусмотрены отверстия для выхода гранулированного вещества 12 и вентиляции 13, а также установлены вентиляторы 14.

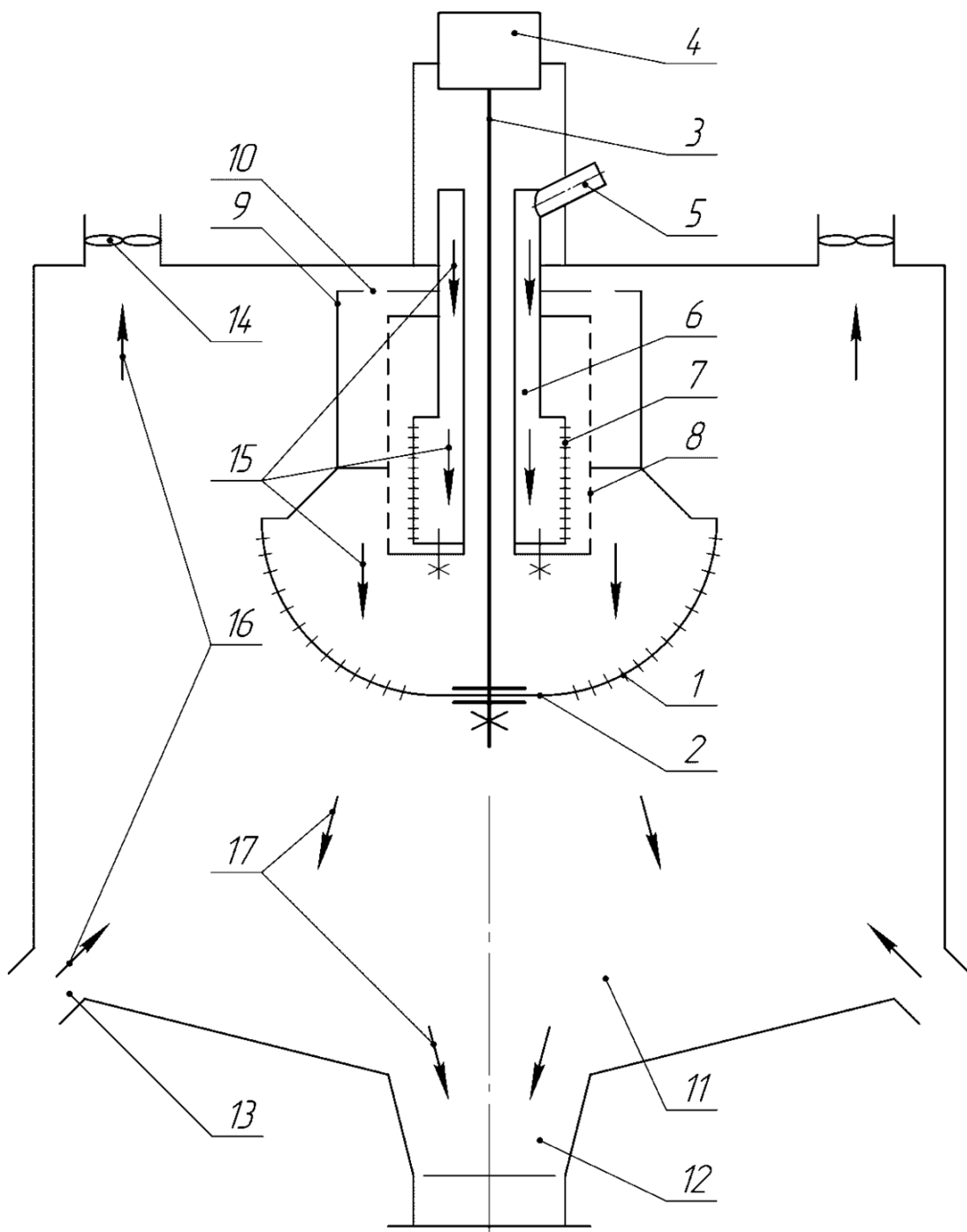


Рисунок 1. - Общий вид виброгрануляционного аппарата

Устройство работает следующим образом. Вещество, предназначенное для гранулирования, подается в направлении 15 и заполняет полость днища 1. Далее оно проходит через отверстия истечения днища 1, создавая струи вещества в пространстве камеры 11. При работе вибропривода 4 днище 1 совершает колебательное движение, в результате которого происходит дробление струй на равномерные капли. Падая в камере 11 навстречу потоку охлаждающего воздуха 16, капли застывают и превращаются в гранулы. Гранулы осыпаются на наклонную (воронкообразную) поверхность днища камеры в направлении 17 попадают в отверстие для выхода гранулированного вещества 12.

В зависимости от последующего применения гранулированного сырья, к нему предъявляются различные требования [17]. Основным является получение максимально равномерных по размерам капель: большинство гранул (90%) должны иметь строго определенный диаметр (целевая фракция 2-3мм); гранулы диаметром меньше 1 мм считаются мелкими, а больше 4 мм – крупными и в совокупности должны составлять не более 10%. Наиболее типичными среди крупных гранул являются гранулы с удвоенной массой, что свидетельствует о столкновении и слиянии гранул в полете. Причиной такого столкновения может быть некоторая разность скоростей капель, обусловленная истечением вместе с плавом мелких частиц шлама, спонтанной электризацией капель разноименными зарядами при распаде струй, но существенным фактором является нестабильность работы вибропривода. Таким образом, выбор типа и конструкции вибропривода играет решающую роль.

1. Состояние вопроса

1.1. Формулирование актуальности, цели и задач проекта

Актуальность работы обусловлена возможностью точного задания частоты вибрации в случае использования предлагаемого решения.

Цель работы: разработка вибропривод для химических технологий, состоящего из магнитной системы и системы электропитания

Задачи работы:

- обзор вариантов,
- расчет и моделирование магнитопровода,
- разработка силовой части схемы,
- разработка системы управления,
- выбор элементов.

1.2. Анализ исходных данных и известных решений

«На сегодняшний день наиболее распространены некоторые виды вибраторов:

- Электромагнитные (вибрация за счет притягивания индуктора к якорю при подаче электрического тока на его обмотку);
- Гидравлические (вибрация за счет работы гидросистем, управляемых системой электроклапанов);
- Индукционно-динамические (сила появляется за счет взаимодействия магнитного потока с током, индуцированным им в короткозамкнутом проводнике);
- Пьезоэлектрические (основаны на свойстве пьезокристаллов изменять свои размеры под действием электричества);

- Эксцентрикковые (вращение оси с закрепленным на ней эксцентриком (дебалансом)).»[6,12]

«На данный момент в качестве вибратора используется пневматический дебалансный вибратор. Крыльчатка с эксцентриком (дебалансом, получаемым просверливанием в крыльчатке отверстий) вращается под действием потока воздуха, подаваемого к ней по специальной трубке и вибрирует, передавая вибрацию чаше. Направление вибрации не имеет значения для устойчивого каплеобразования. Частота вибрации, соответствующая частоте вращения крыльчатки, регулируется изменением напора воздуха. Отработанный воздух выбрасывается вместе с расплавом в трубу. У такого вибратора два основных недостатка.

Первый – это недолговечность подшипников, которым приходится на частоте 300-600Гц передавать усилие на чашу. Даже появление малейшей царапины (каверны) на поверхности подшипника приводит к его быстрому выходу из строя. Качественные подшипники могут выдержать бесперебойную работу между плановыми ремонтами (2-3 месяца), но некачественные ломаются за несколько часов или недель. Цена самого подшипника невелика, однако его замена подшипника невозможна без остановки производства, что приводит к большим потерям. Заранее отличить хороший подшипник от плохого практически очень сложно. На практике его качество выявляется уже в процессе эксплуатации, причем если он оказывается плохим – то это приводит к его поломке и остановке производства.

Вторым недостатком обуславливается требованиями техники безопасности. Для смазки подшипника используется малое количество смазки (2-3 капли в минуту), подаваемое вместе со сжатым воздухом в крыльчатку. Как уже было сказано, отработанный воздух вместе с маслом выбрасывается в общую трубу вместе с гранулируемым веществом.» [18]

«Часто такие установки используют для гранулирования селитры. А селитра (а так же некоторые другие вещества) в сочетании со смазочным маслом становится взрывоопасным веществом. В принципе, концентрация масла в конечном продукте очень мала (граммы и доли грамма масла на тонны вещества) и не приводит к катастрофическим последствиям, однако с точки зрения техники безопасности даже такая низкая концентрация является нежелательной. Отводить отработанный воздух с маслом во вне трубы нет возможности, т.к. все пространство под разбрызгивателем находится под непрерывным «дождем» из расплава и установить там воздухопровод весьма проблематично. Без смазки подшипники ломаются очень быстро» [18]

В данной ВКР принято решение о разработке электромагнитного вибропривода, лишенного указанных недостатков.

2. Разработка электромагнитного привода

2.1. Выбор и расчет конструкции

Чаша с расплавом, на которую передаются вибрации, вращается для устойчивого разбрызгивания расплава. Соответственно и шток вибропривода, передающий на нее вибрации – так же должен вращаться. Для реализации такой возможности шток вибропривода соединим с якорем, а саму конструкцию электромагнита разработаем осесимметричной (цилиндрической формы), изображенной на рис. 2. Индуктор (корпус) вибропривода будет закреплен неподвижно.

Для создания вибраций индукторов будет два: один будет расположен сверху, а другой снизу якоря. В индукторы поочередно будем подавать импульсы тока, притягивая якорь то к верхнему, то к нижнему индуктору (разряжая на обмотки предварительно заряженный конденсатор С). Частота задаваемых вибраций будет определяться частотой (периодом) подаваемых импульсов. Согласно заданию, предполагается регулировка от 300 до 1000 Гц. Такие частоты затрудняют использование шихтованных магнитопроводов. Кроме того, предполагаемые (согласно проведенным в главе 3 расчетам) размеры слишком большие для изготавливаемых ферритовых броневых сердечников. В связи с этим, было решено использовать магнитный материал типа КММ, выполняемый из прессованного ферромагнитного порошка.

Выбранная конструкция вибропривода, изображенная на рис. 2, является фигурой вращения (вокруг вертикальной оси) и похожа на сердечник броневоего типа. На рисунке обозначены:

Два индуктора – 1 и 2, якорь 3, воздушный зазор между якорем и индуктором 4, обмотки индукторов 5 и 6, полюса индуктора 9 и 10, самое узкое (нагруженное) место для магнитного потока – спинка индуктора 8.

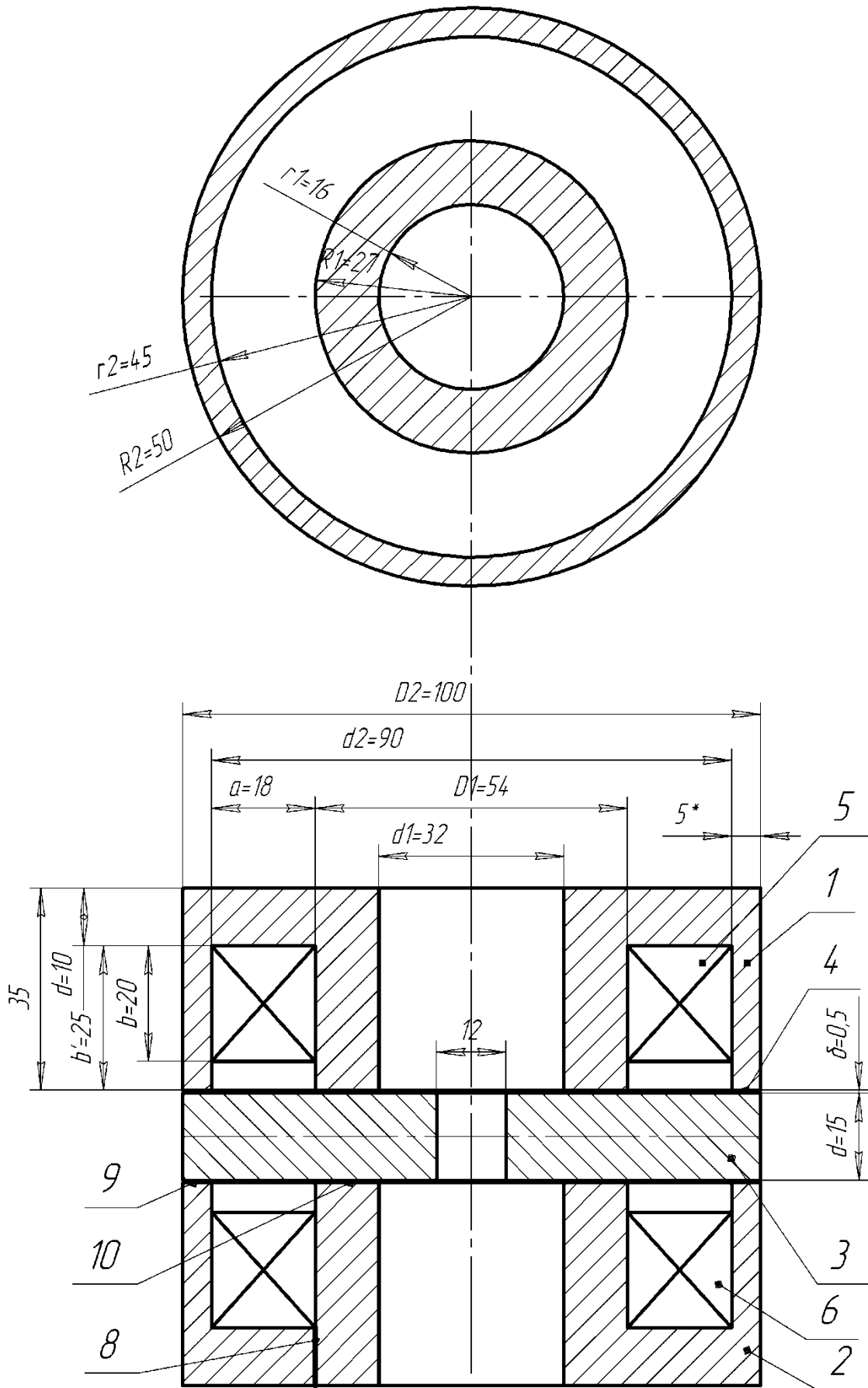


Рисунок 2 – Ферромагнитная часть конструкции

Рассчитаем конструкцию по формулам для магнитных систем.

Электромагнит должен создавать усилие в 1000 Н (исходя из задания). Для выбранного ферромагнитного материала типа КММ индукция насыщения составляет $B=1$ Тл при относительной магнитной проницаемости $\mu=100$.

Пондеромоторная (электромагнитная) сила может быть рассчитано:

$$P = \frac{B^2 \cdot S}{2\mu_0} \quad (2.1),$$

где P – сила, Н;

B – магнитная индукция, Тл;

S – площадь полюса;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – относительная магнитная проницаемость.

Это дает возможность выбрать площадь полюса S :

$$S = \frac{2P \cdot \mu_0}{B^2} = \frac{2 \cdot 1000 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}{1^2} = 25,133 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (2.2)$$

Наша конструкция имеет два полюса, поэтому площадь каждого из них будет в два раза меньше рассчитанной.

$$: \frac{S}{2} = 12,566 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Подберем размеры магнитопровода (рис.2) таким образом, что бы площадь полюса была немного больше рассчитанной:

$$r_1 = 16 \text{ мм},$$

$$R_1 = 27 \text{ мм},$$

$$r_2 = 45 \text{ мм}$$

$$R_2 = 50 \text{ мм},$$

Далее более точно рассчитаем значения площадей S_1 и S_2 :

$$S_1 = \pi(R_1^2 - r_1^2) = 3,14 \cdot ((27 \cdot 10^{-3})^2 - (16 \cdot 10^{-3})^2) = 14,86 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (2.3)$$

$$S_2 = \pi(R_2^2 - r_2^2) = 3,14 \cdot ((50 \cdot 10^{-3})^2 - (45 \cdot 10^{-3})^2) = 14,923 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (2.4)$$

Рассчитаем площадь спинки магнитопровода

$$S_3 = 2\pi \cdot R1 \cdot c = 2 \cdot 3,14 \cdot 27 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 16,965 \text{ см}^2 \quad (2.5),$$

где $c=10\text{мм}$ – высота спинки.

Выберем размеры паза, в которое будет помещена обмотка:

$$a=r2 - R1=18 \text{ мм};$$

$$b=25 \text{ мм}.$$

Рассчитаем его площадь

$$S_a = \pi(r2^2 - R1^2) = 3,14 \cdot ((45 \cdot 10^{-3})^2 - (27 \cdot 10^{-3})^2) = 40,715 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (2.6)$$

С учетом необходимости установки клина, удерживающего обмотку, на ее площадь останется площадь окна обмотки:

$$S_{ок} = a \cdot (b - 5\text{мм}) = 1,8 \cdot (2,5 - 0,5) = 3,6 \text{ см}^2 \quad (2.7),$$

где 5мм – зазор, необходимый для установки фиксирующего клина.

Объем индуктора:

$$\begin{aligned} V_{II} &= \pi [[(R2^2 - r1^2) \cdot (b + c)] - [(R1 + a)^2 - R1^2] \cdot b] = \\ &= 3,14 \cdot [[(5^2 - 1,6^2) \cdot (2,5 + 1)] - [(2,7 + 1,8)^2 - 5] \cdot 2,5] = 144,953 \text{ см}^3 \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$m_{II} = V_{II} \cdot \gamma = 144,953 \cdot 10^{-6} \cdot 6,65 \cdot 10^3 = 0,964 \text{ кг} \quad (2.9),$$

где $\gamma = 6,65 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – удельный вес стали типа КММ.

Выбрали размер якоря: $d=15 \text{ мм}$, нашли его объем и массу:

$$\begin{aligned} V_{Я} &= \pi(R2^2 - (12\text{мм})^2) \cdot d = 3,14 \cdot ((50 \cdot 10^{-3})^2 - (12 \cdot 10^{-3})^2) \cdot 15 \cdot 10^{-3} = \\ &= 111,024 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \end{aligned} \quad (2.10),$$

где 12 мм – центральное отверстие.

$$m_{Я} = V_{Я} \cdot \gamma = 111,024 \cdot 10^{-6} \cdot 6,65 \cdot 10^3 = 0,738 \text{ кг} \quad (2.11)$$

Итого суммарный объем:

$$V_M = 2V_{II} + V_{Я} = 144,953 \cdot 10^{-6} \cdot 2 + 111,024 \cdot 10^{-6} = 400,93 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \quad (2.12)$$

Итого суммарная масса стали:

$$m_M = V_M \cdot \gamma = 400,93 \cdot 10^{-6} \cdot 6,65 \cdot 10^3 = 2,666 \text{ кг} \quad (2.13)$$

Магнитный поток проходит в стали расстояние:

$$l_{cm} = 2(b+a) + c + d = 2 \cdot (2,5 + 1,8) + 1 + 1,5 = 11,1 \text{ см} \quad (2.14)$$

Значение потока можно вычислить исходя из размеров полюсов и магнитной индукции:

$$\Phi = B \frac{S_1 + S_2}{2} = 1 \cdot \frac{(14,86 \cdot 10^{-4} + 14,923 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^{-4}}{2} = 1,489 \text{ мВб} \quad (2.15)$$

Магнитное сопротивление воздушного зазора:

$$R_\delta = \frac{2 \cdot \delta}{\mu_0 \cdot S'} = \frac{2 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 14,891 \cdot 10^{-4}} = 5,344 \cdot 10^5 \text{ Гн}^{-1} \quad (2.16),$$

где
$$S' = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{14,86 \cdot 10^{-4} + 14,923 \cdot 10^{-4}}{2} = 14,891 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Магнитное сопротивление стали:

$$R_{cm} = \frac{l_{cm}}{\mu_0 \mu \cdot S'} = \frac{11,1 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 14,891 \cdot 10^{-4}} = 5,932 \cdot 10^5 \text{ Гн}^{-1} \quad (2.17)$$

Из формул (2.16) и (2.17) выразим итоговую магнитную проводимость:

$$G = \frac{1}{R_\delta + R_{cm}} = \frac{1}{(5,344 + 5,932) \cdot 10^5} = 8,869 \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \quad (2.18)$$

Для создания выше рассчитанного магнитного потока Φ необходима намагничивающая (магнитодвижущая) сила:

$$F_m = \frac{\Phi}{G} = \frac{1,489 \cdot 10^{-3}}{8,869 \cdot 10^{-7}} = 1,679 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (2.19)$$

В реальных конструкциях медь (обмотка) занимает не всю площадь окна. Для учета этого факта используется коэффициент заполнения. Среднее значение этого коэффициента для катушек, изготавливаемых вручную составляет $K_3=0,5$.

Для пересчета формы импульсов тока к стандартным синусоидальным

вомпользуемся коэффициентом формы: $K_f = \frac{1}{\sqrt{2}}$;

Амплитудное значение плотности тока:

$$J_m = \frac{F_m}{K_f \cdot S_{ок}} = \frac{1,679 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 3,6 \cdot 10^{-4}} = 9,328 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2} \quad (2.20)$$

С учетом скважности Q рассчитаем действующую плотность тока:

$$J' = J_m \frac{K_f}{\sqrt{Q}} = 9,328 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{4}} = 3,298 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2} \quad (2.21)$$

Действующее значение магнитодвижущей силы (МДС):

$$F = F_m \frac{K_f}{\sqrt{Q}} = 1,679 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{4}} = 593,6 \quad A \quad (2.22)$$

Уточненные значения индукций:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{1,489 \cdot 10^{-3}}{14,86 \cdot 10^{-4}} = 1,002 \quad \text{Тл} \quad (2.23)$$

- в первом полюсе:

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{1,489 \cdot 10^{-3}}{14,923 \cdot 10^{-4}} = 0,998 \quad \text{Тл} \quad (2.24)$$

- во втором полюсе:

Уточненные значения электромагнитных сил притяжения полюсов:

$$P_1 = \frac{B_1^2 \cdot S_1}{2\mu_0} = \frac{1,002^2 \cdot 14,86 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 593,753 \quad \text{Н} \quad (2.25)$$

- первый полюс

$$P_2 = \frac{B_2^2 \cdot S_2}{2\mu_0} = \frac{0,998^2 \cdot 14,923 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 591,253 \quad \text{Н} \quad (2.26)$$

- второй полюс

Итоговая уточненная сила, развиваемая электромагнитом:

$$P = P_1 + P_2 = 1185 \quad \text{Н} \quad (2.27)$$

Итоговая энергия магнитного поля, запасенная в магнитной системе:

$$W = G \cdot \frac{F_m^2}{2} = 8,869 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1,679 \cdot 10^3}{2} = 1,25 \quad \text{Дж} \quad (2.28)$$

Напряжение на емкостном накопителе: $U = 380 \cdot 1,41 \cdot 0,9 = 483,7 \text{ В}$

Зададимся временем формирования одной полу синусоиды тока: $t_{II}=250$ мкс.

Для восполнение потерь в магнитной системе необходимо дозаряд разрядного конденсатора через дополнительный зарядный конденсатор емкостью:

$$C = \frac{2 \cdot W}{U^2} = \frac{2 \cdot 1,25}{483,7^2} = 10,689 \text{ мкФ} \quad (2.29)$$

Округляем до значения $C=10$ мкФ.

Рассчитаем число витков обмотки:

$$w = \frac{t_{II}}{\pi \sqrt{C \cdot G}} = \frac{250 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot \sqrt{10 \cdot 10^{-6} \cdot 8,869 \cdot 10^{-7}}} = 26,722 \quad (2.30)$$

Округлим до ближайшего значения $w=27$. В этом случае значение индуктивности одной обмотки составит

$$L = w^2 \cdot G = 27^2 \cdot 8,869 \cdot 10^{-7} = 64,6 \text{ мГн} \quad (2.31)$$

Ток обмотки:

Амплитудное значение тока:

$$I_m = \frac{F_m}{w} = \frac{1679}{27} = 62 \text{ А} \quad (2.32)$$

Действующее значение тока:

$$I_d = I_m \frac{K_f}{\sqrt{Q}} = 62,188 \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{4}} = 22 \text{ А} \quad (2.33)$$

Среднее за период значение тока:

$$I_{cp} = I_m \frac{0,64}{\sqrt{Q}} = 62,188 \cdot \frac{0,64}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{4}} = 20 \text{ А} \quad (2.34)$$

В первом приближении площадь сечения провода должно составить:

$$S_{cu}' = \frac{S_{ok} \cdot K_3}{w} = \frac{0,5 \cdot 3,6 \cdot 10^{-4}}{27} = 6,667 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (2.35)$$

И соответствующей ему диаметр провода:

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4S_{cu}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,667 \cdot 10^{-6}}{3,14}} = 2,913 \text{ мм} \quad (2.36)$$

Из стандартного ряда существующих обмоточных проводов принимаем: $d_{cu}=2,36$ мм.

Теперь можно рассчитать реальную площадь провода:

$$S_{cu} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{cu}^2 = \frac{3,14 \cdot (2,913 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 4,374 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (2.37)$$

Проанализировав размеры окна под обмотку и диаметр провода сделали вывод о сложности намотки 27 витков. Будет проще намотать $w=24$ витка. Для учета этого фактора необходимо повторно рассчитать значения, выше рассчитанные по формулам (2.31) – (2.34).

Для принятого значения $w=24$ индуктивность составит:

$$L = w^2 \cdot G = 24^2 \cdot 8,869 \cdot 10^{-7} = 51,1 \text{ мГн} \quad (2.38)$$

Амплитудное значение тока:

$$I_m = \frac{F_m}{w} = \frac{1679}{24} = 70 \text{ А} \quad (2.32)$$

Действующее значение тока:

$$I_d = I_m \frac{K_f}{\sqrt{Q}} = 69,962 \cdot \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{4}} = 25 \text{ А} \quad (2.33)$$

Среднее за период значение тока:

$$I_{cp} = I_m \frac{0,64}{\sqrt{Q}} = 69,962 \cdot \frac{0,64}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{4}} = 22 \text{ А} \quad (2.34)$$

Действующее значение плотности тока:

$$J_d = \frac{I_d}{S_{cu}} = \frac{24,735}{4,37 \cdot 10^{-6}} = 5,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \quad (2.42)$$

Сопротивление обмотки:

$$R = \rho_{cu} \frac{l_{cp} \cdot w}{S_{cu}} = 1,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{22,62 \cdot 10^{-2} \cdot 24}{4,347 \cdot 10^{-6}} = 0,022 \text{ Ом} \quad (2.43),$$

где $l_{cp} = 2\pi \frac{(r2 + R1)}{2} = 22,62$ см – средняя длина пути магнитного поля в индукторе,

$\rho_{cu} = 1,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – справочное значение удельного сопротивления меди.

Найдем энергию потерь в схеме за один период :

- в одной обмотке:

$$W_{cu} = R \cdot \frac{I_m^2}{2} \cdot t_H = 0,022 \cdot \frac{69,962}{2} \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 13,667 \text{ мДж} \quad (2.44),$$

Полученное значение является $\frac{W_{cu}}{W} = \frac{13,667 \cdot 10^{-3}}{1,25} = 1,093$ % от энергии магнитной системы

- в тиристоре:

$$W_{VS} = U_{t0} \cdot I_m \cdot 0,64 \cdot t_H = 2,5 \cdot 69,962 \cdot 0,64 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 27,985 \text{ мДж} \quad (2.45),$$

где $U_{t0} = 2,5$ В – среднее значение напряжения на тиристоре;

$$0,64 = \frac{\int_0^{\pi} \sin(t) dt}{\pi} \quad \text{– поправочный коэффициент для синусоидального}$$

тока.

Потери в тиристоре составили 2,238 % от всей энергии, запасаемой в поле.

Постоянная времени системы обмотка-магнитное поле:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{5,108 \cdot 10^{-4}}{0,022} = 22,868 \text{ мс} \quad (2.46)$$

В нашей системе два электромагнита, работающих поочередно. Сумма потерь в них за один период составит:

$$W_2 = 2 \cdot (W_{cu} + W_{VS}) = 2 \cdot (13,667 + 27,985) = 83,3 \text{ мДж} \quad (2.50)$$

Соответственно, при $f=1000$ Гц среднее значение мощности потерь:

$$P_{cu2}=f \cdot 2 \cdot W_{cu}=1000 \cdot 2 \cdot 13,667 \cdot 10^{-3}=27,335 \text{ В} \cdot \text{А} \quad (2.51),$$

$$P_{vs2}=f \cdot 2 \cdot W_{vs}=1000 \cdot 2 \cdot 27,985 \cdot 10^{-3}=55,97 \text{ В} \cdot \text{А} \quad (2.52)$$

$$P_2=f \cdot W_2=1000 \cdot 83,3 \cdot 10^{-3}=83,3 \text{ В} \cdot \text{А} \quad (2.53)$$

«Во время работы схемы питания электромагнитного вибровозбудителя предварительно заряженный конденсатор С перезаряжается то на одну, то на другую обмотку. При этом напряжение на конденсаторе уменьшается. После прохождения тока по обмоткам, необходимо восполнение потерь напряжения на конденсаторе С. Это обеспечивается колебательным подзарядом конденсатора через дроссель L3 от накопительного конденсатора C_ϕ до первоначального напряжения за время подзаряда $t_p=150$ мкс. Необходимо определить, какой средний ток I_p должен протекать в цепи при длительности подзаряда $t_p=150$ мкс и каким должен быть амплитудный ток I_{pm} , с учетом синусоидальности происходящего процесса.»[18]

Восполнение потерь мощности происходит средним током заряда, протекающим в течении $t_p=150$ мкс:

$$I_p = \frac{W \cdot 0,5}{t_p \cdot U} = \frac{1,25 \cdot 0,5}{150 \cdot 10^{-6} \cdot 483,66} = 8,6 \text{ А} \quad (2.54)$$

Тогда его амплитудное значение составит:

$$I_{pm} = \frac{I_p}{0,64} = \frac{12,924}{0,64} = 13,5 \text{ А} \quad (2.55)$$

Произведем проверку правильности расчетов.

«При проверке пойдем от обратного: предположим, что нам известен ток, протекающий по обмотке I и величина зазора δ (рис.2) Необходимо определить силу P, действующую в виброприводе.

$$P = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (2.62),$$

Сила находится по формуле:

где S – площадь рабочей зоны электромагнита;

B – магнитная индукция.

По закону Ома для магнитной цепи определяем магнитный поток:

$$\Phi = \frac{F}{R_{\delta 1} + R_{cm1} + R_{\delta 2} + R_{cm2}} \quad (2.63),$$

где F – намагничивающая сила;

$R_{\delta 1}, R_{\delta 2}$ - магнитные сопротивления зазора;

R_{cm1}, R_{cm2} - магнитные сопротивления стали якоря и индуктора соответственно.

Для равномерного поля: $\Phi = B \cdot S$, тогда с учетом $F = I \cdot w$ находим магнитную индукцию:

$$B = \frac{I \cdot w}{S / 2 \cdot \sum R} \quad (2.64),$$

где $S/2$ – площадь одного полюса индуктора,

$$\sum R = R_{\delta} + R_{cm} = R_{\delta 1} + R_{\delta 2} + R_{cm1} + R_{cm2}.$$

$R_{\delta 1}, R_{\delta 2}$ и R_{cm1}, R_{cm2} определяется как:

$$R_{\delta 1} = \frac{\delta}{\mu_0 S_1}; R_{\delta 2} = \frac{\delta}{\mu_0 S_2}; R_{cm1} = \frac{1}{\mu_0 \mu_{cm}} \cdot \frac{l_{cm1}}{S_{cm1}}; R_{cm2} = \frac{1}{\mu_0 \mu_{cm}} \cdot \frac{l_{cm2}}{S_{cm2}},$$

$$R_{\delta} = R_{\delta 1} + R_{\delta 2} = \frac{2\delta}{\mu_0 S}$$

Суммарное сопротивление зазоров: (2.65);

$$R_{cm} = R_{cm1} + R_{cm2} = \frac{1}{\mu_0 \mu_{cm}} \cdot \frac{l_{cm}}{S_{cm}}$$

Суммарное сопротивление стали: (2.66). »[21]

Подставляем в (1.62) и находим силу P:

$$P = \left(\frac{I \cdot w}{S / 2 \cdot (R_{\delta} + R_{cm})} \right)^2 \cdot \frac{S}{2\mu_0} = \left(\frac{I \cdot w}{(R_{\delta} + R_{cm})} \right)^2 \cdot \frac{4}{2\mu_0 S}$$

Подставив в полученную формулу значения из вышеприведённых расчетов получим:

$$P = \left(\frac{I \cdot w}{R_{\delta} + R_{cm}} \right)^2 \cdot \frac{4}{2\mu_0 S} = \left(\frac{70 \cdot 24}{(5,344 + 5,932) \cdot 10^5} \right)^2 \cdot \frac{4}{2 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 25,133 \cdot 10^{-4}} = 1406 \text{ Н}$$

Полученное значение превышает заданное значение в 1000Н. Это объясняется тем, что размеры магнитопровода были взяты с запасом. Полученное значение 1406Н нас устраивает, так как говорит о возможности создания выбранной конструкцией минимально необходимого значения усилия в 1000Н.

2.2. Математическое моделирование магнитной системы

«Осуществим проверку правильности произведенных расчетов с помощью программного пакета расчета магнитных полей Eсult.

Расчет производился с использованием программного комплекса Eсult, разбивающего расчетную область на несколько десятков тысяч конечных элементов, что обеспечивало достаточную точность результатов.

В программе создали геометрическую модель вибропривода. Задание геометрии и разбиение расчетной области на конечные элементы проиллюстрировано на рис.3. Задали свойства магнитного материала, расчетные значения намагничивающей силы. Графический результат моделирования приведен на рис. 4.

Параметры вибропривода, рассчитываемые при помощи программного комплекса Eсult:

- I – ток, протекающий через 24 витка обмотки вибропривода;
- F – намагничивающая сила, развиваемая при токе I;
- W – энергия магнитного поля;
- W_{co} – коэнергия;
- Φ_{об} – потокосцепление на один виток обмотки
- Φ_{изм} – поток во внутреннем полюсе индуктора (в месте намотки потокоизмерительных витков)
- P_я – пондеромоторная сила, действующая на якорь
- P_и – пондеромоторная сила, действующая на индуктор
- P_{ио} – пондеромоторная сила, действующая на индуктор с обмоткой
- P – сила (средняя между силами якоря и индуктора):
$$P = \frac{P_{я} + P_{и}}{2}$$

Программа произвела расчет параметров вибропривода для зазора между якорем и индуктором $\delta=0,5\text{мм}$. »[16]

Результаты расчета свели в таблицу 1.

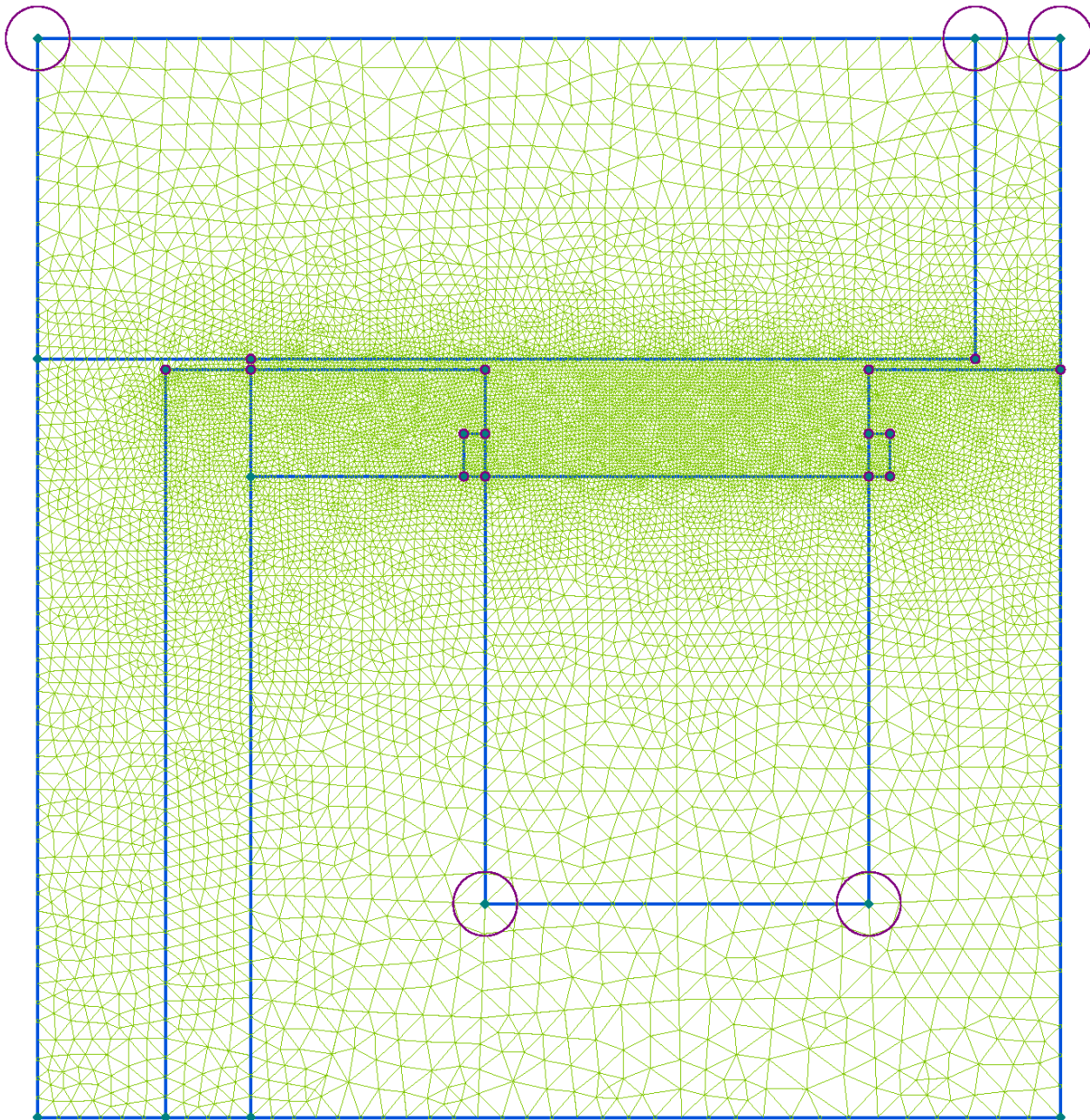


Рисунок 3 - Геометрия магнитной системы и ее разбиение на конечные элементы

ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

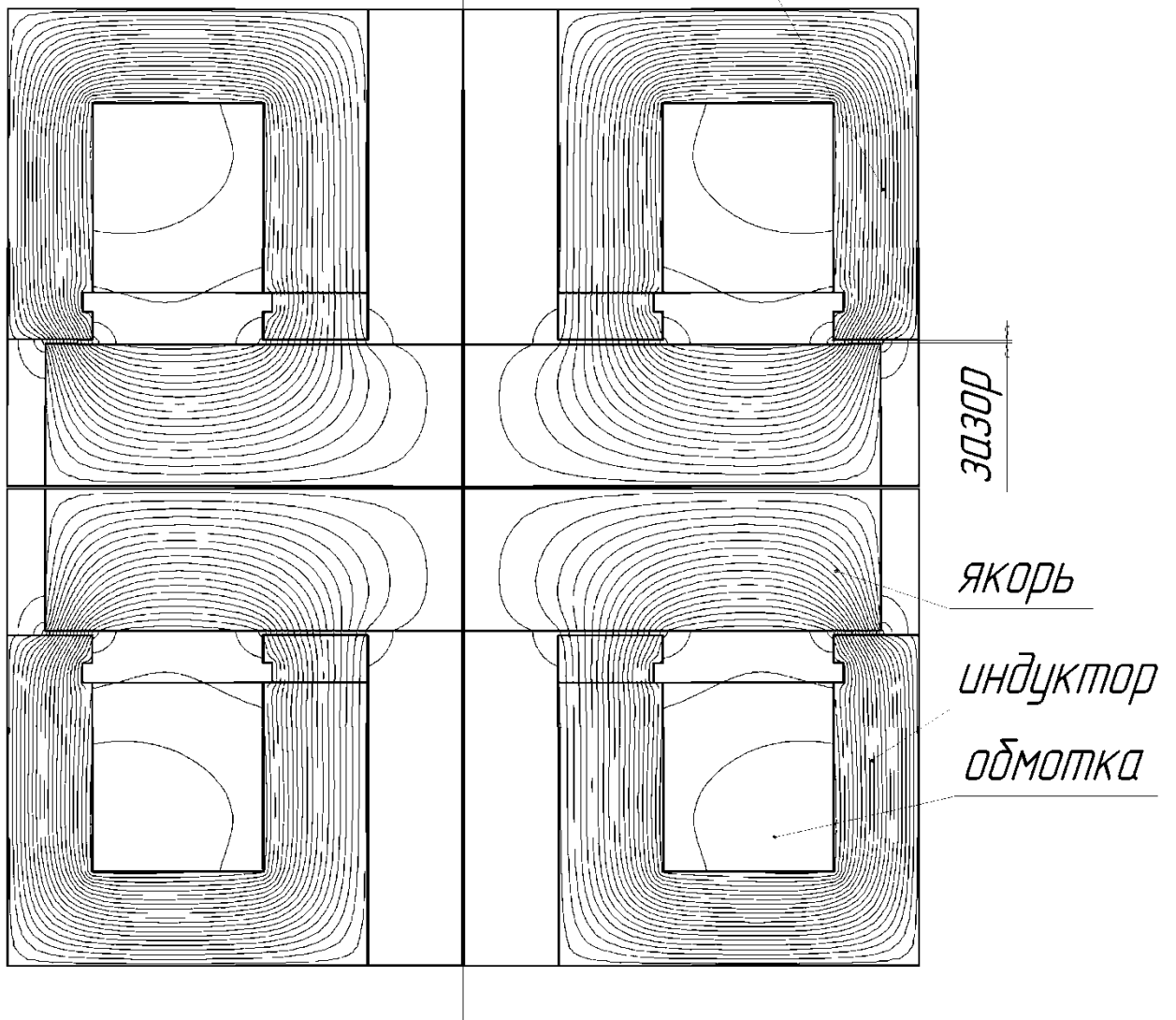


Рисунок 4 – Результаты моделирования в программе Elcut.

Таблица 1 – Основные физические величины, полученные в Elcut для $\delta=0,5\text{мм}$

I, А	Физическая величина						
	F, А	W, Дж	W _{со} , Дж	Фоб, Вб	Ря, Н	Ри, Н	Р, Н
0	0	0	0	0	0	0	0
4,2	100	0,0085	0,00864	0,0001735	9,306	9,343	9,344
12,5	300	0,0683	0,07440	0,0004803	71,02	71,42	71,22
20,8	500	0,1646	0,1944	0,0007247	160,7	162,02	161,3
29,2	700	0,2893	0,3580	0,0009349	265,9	268,6	267,2
41,7	1000	0,5187	0,6753	0,001208	441,41	447,2	444,3
54,2	1300	0,7572	1,064	0,001419	604,2	613,8	609,4
70,8	1700	1,072	1,664	0,00163	791,61	807,2	799,4
83,3	2000	1,331	2,161	0,001773	928,05	949,2	938,6
104,2	2500	1,764	3,074	0,001968	1130,3	1162,2	1146,2
125	3000	2,162	4,081	0,002114	1289,8	1333,1	1311,4
166,7	4000	2,884	6,275	0,002324	1528	1594,5	1561,2

Анализ результатов математического моделирования подтверждает возможность создания выбранной конструкцией усилия в 1000Н.

3. Разработка системы питания

3.1. Силовая часть

3.1.1. Обзор существующих решений.

«Система питания должна подавать ток то в одну, то в другую обмотку индуктора. Это можно осуществить при помощи различных схем силовой части системы питания. Одна из них, выполненная на транзисторах, представлена на рис. 5.» [16]

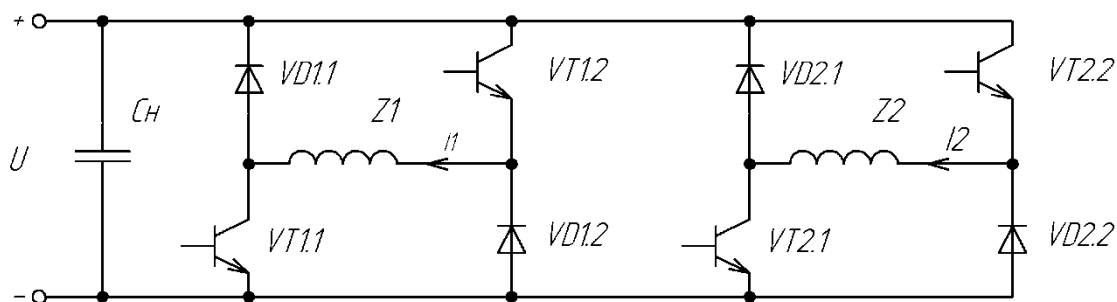


Рисунок 5 – Полумостовая схема.

«Она состоит из двух однофазных полууправляемых конвертеров. Первый конвертер содержит следующие силовые приборы: транзисторы $VT_{1.1}$ и $VT_{1.2}$, диоды $VD_{1.1}$ и $VD_{1.2}$, второй: транзисторы $VT_{2.1}$ и $VT_{2.2}$, диоды $VD_{2.1}$ и $VD_{2.2}$. Индуктивности Z_1 и Z_2 являются обмотками электромагнитов.

Ток I_1 , создаваемый в обмотке Z_1 , приводит к появлению силы, тянущей якорь вибропривода в одну, а ток I_2 , создаваемый в обмотке Z_2 – в другую сторону.» [21]

«Каждый конвертер в определенный момент времени может работать в одном из трех режимов (режимы показаны на примере первого конвертера):

1. «накачка» - транзисторы VT1.1 и VT1.2 – открыты, энергия из накопительного конденсатора C_n поступает в нагрузку Z1, ток I_1 , протекая по цепи $+C_n - VT1.2 - Z1 - VT1.1 - C_n$, быстро возрастает.

2. «полка» - один из транзисторов VT1.1 или VT1.2 открыт, а другой – закрыт, например VT1.1, тогда ток I_1 , протекая по цепи $Z1 - VD1.1 - VT1.2 - Z2$, медленно спадает из-за активных потерь в полупроводниковых приборах и обмотке.

3. «рекуперация» - оба транзистора закрыты. Энергия из нагрузки Z1 рекуперирована в накопительный конденсатор, ток I_1 в нагрузке Z1, протекая по цепи $-C_n - VD1.2 - Z1 - VD1.1 - +C_n$, быстро спадает.» [32]

Схема, представленная на рис.6 обладает большой управляемостью, универсальностью, но она нам не подходит, т.к. изготавливается на транзисторах, что усложняет работу системы [27].

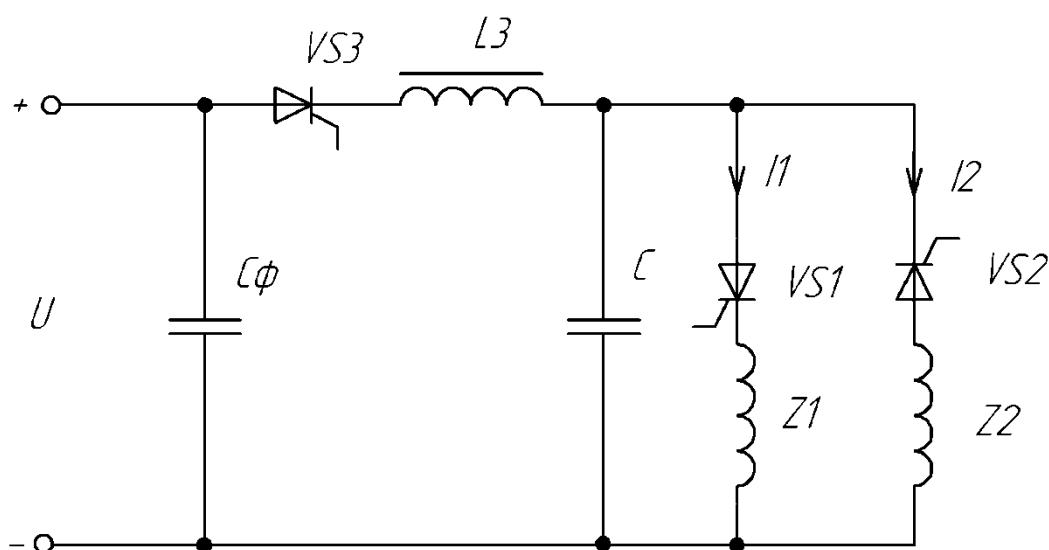


Рисунок 6 – Схема на тиристорах

Нам необходимо выбрать наиболее легкую в исполнении схему. Самая простая, из рассмотренных нами схем питания вибропривода, построенная на тиристорах представлена на рис.6. [3,7]

3.1.2. Описание принципа работы схемы.

«Предположим, что до момента времени 0 все тиристоры закрыты, конденсатор С заряжен до определенного значения U_1 (рис.3.3). В момент времени 0 открываем тиристор VS1, ток I_1 протекает по цепи: +С – VS1 – Z1 – С (рис.6). При этом происходит процесс колебательного разряда конденсатора С на нагрузку Z1 (первую обмотку вибропривода), значение напряжения U_c при этом изменяется от U_1 до U_2 (рис.7) и возникает сила, тянущая якорь к верхнему индуктору, содержащему первую обмотку. Когда конденсатор С перезарядится, тиристор VS1 закроется и будет восстанавливать свои запирающие свойства в течение времени t_{pv1} .» [16]

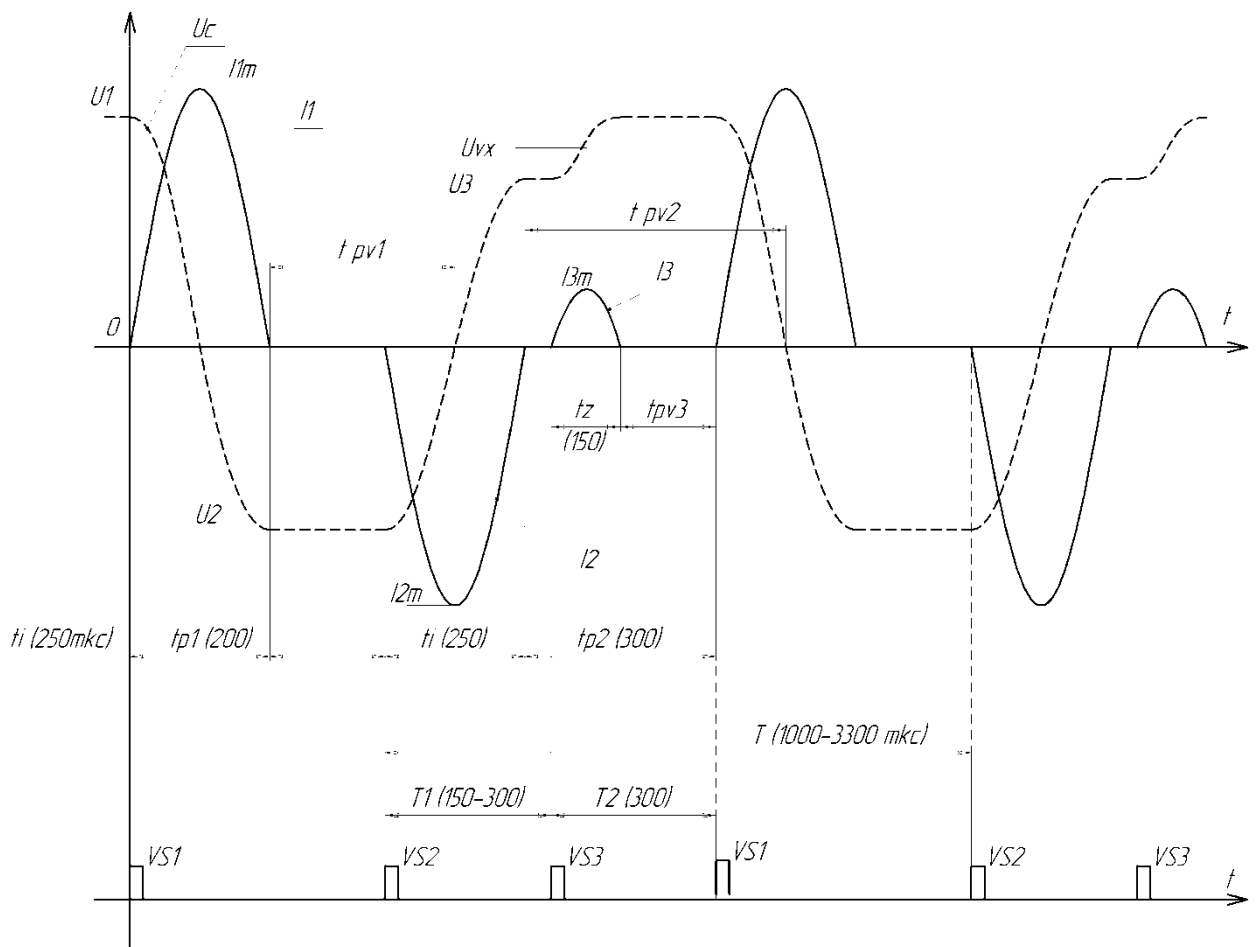


Рисунок 7 – Временные диаграммы работы формирователя импульсов тока на тиристорах

«Далее импульсом управления VS2 открываем тиристор VS2, ток I2 протекает по второй обмотке Z2, вследствие чего возникает сила, тянущая якорь в противоположную сторону. Конденсатор C перезаряжается по цепи: C – VS2 – Z2 – C до значения U3, тиристор VS2 закрывается и восстанавливает свои запирающие свойства в течение периода времени t_{pv2} . Реальное направление тока I2 не совпадает с направлением на схеме, поэтому на диаграмме он имеет отрицательное значение.

В процессе прохождения тока по обмоткам теряется часть энергии конденсатора C, из-за чего $U3 < U1$ (рис.8) . Для восстановления этих потерь импульсом управления VS3 открывается зарядный тиристор VS3, и ток I3 протекает по цепи: $+C_{\phi} - VS3 - L3 - C - C_{\phi}$. Фильтрующий конденсатор C_{ϕ} необходим для зарядки конденсатора C. Конденсатор C дозаряжается от значения U3 до первоначального значения U1. В связи с колебательным процессом зарядного дросселя это напряжение больше входного напряжения $U_{вх}$, к тиристору VS3 прикладывается обратное напряжение и он закрывается, восстанавливает свои запирающие свойства в течение момента времени t_{pv3} . Далее все процессы повторяются.

Обратим внимание, какое время отведено каждому тиристорному на восстановление запирающих свойств: тиристорам VS1, VS2 – до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не станет нулевым ($U_C=0$), а для VS3 – до тех пор, пока не откроется первый тиристор VS1.» [16]

3.1.3. Выбор элементов схемы.

Силовая часть схемы электропитания изображена на рис.8.

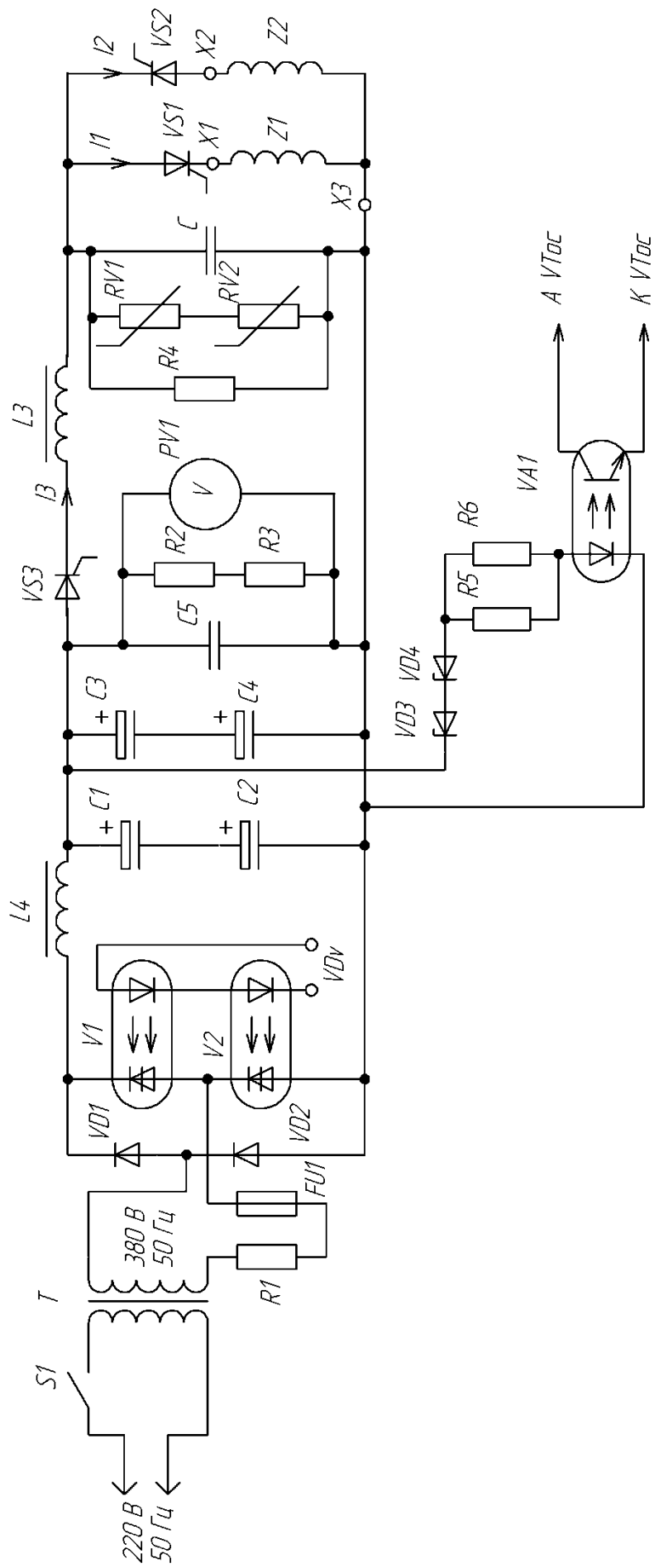


Рисунок 8 – Силовая схема системы питания.

Для обеспечения безопасности схемы на ее входе поставили гальвано развязывающий трансформатор Т [11,24]. Его дополнительной функцией будет повышение напряжения с 220 до 380В. Выбрали однофазный трансформатор на мощность 0,63кВА.

Далее напряжение выпрямляется диодным мостом (диоды VD1 и VD2 и оптотиристоры V1 и V2). Выбрали диодный модуль МДД 80-12 и оптотиристорный модуль : МТО ТО1-80-15-3, содержащий по два прибора сразу. Допустимый ток модулей составляет 80А (с запасом на возможные импульсы тока при первом включении). Модули рассчитаны на 1200 В диодный и 1500 В оптотиристорный. Дополнительно для ограничения тока и возможности его измерения добавили сопротивление R1: ПЭ-75-4,70м±5% [20]. Для защиты схемы выбрали предохранитель FU1 типа ПП-61. Для включения/отключения питания поставили и автоматический выключатель S1: ВА47-29 С16 [26, 17].

Элементами Z1 и Z2 обозначены обмотки.

В главе 2 были рассчитаны: амплитудный ток обмоток $I_m=62A$, и напряжение на накопительном конденсаторе С: $U=484 В$. Исходя из этих значений выбрали тиристоры VS1 и VS2 типа ТБ151-63-9-454 [21,5,4], рассчитанные на: $I_m=63 А$, $U_m=900В$.

Рассчитаем зарядную цепочку. Зарядный ток тиристора VS3 составляет 12А, а амплитуда напряжения на нем $U_{vs3}=1074В$. Из временных диаграмм определили необходимое время восстановления запирающих свойств тиристора $t_{пв3}=200мкс$. Далее с некоторым запасом выбрали тиристор Т122-25-12, рассчитанный на средний ток и амплитудной напряжение: $I_m=25 А$, $U_m=1200 В$.

Емкостной накопитель С должен выдерживать $U=484 В$ и иметь емкость $C=10мкФ$ и допускать перезаряд до отрицательного напряжения. Выбрали конденсатор типа МБГО-600В-10мкФ±10% [9, 6].

Емкость $C5$ должна работать на частоте 1000 Гц и при этом иметь значительную емкость. В таких случаях используют параллельное соединение неполярного высокочастотного конденсатора (выбрали $C5$: К57-17-1кВ-50мкФ) и электролитических конденсаторов (выбрали $C1 - C4 - JACON-350В-470мкФ$). Последовательное использование конденсаторов $C1-C4$ обусловлено тем, что не были найдены конденсаторы на необходимое полное напряжение [7,15,16, 20].

Варисторы типа TVR204-31-430В служат для защиты от перенапряжения. Выбрали их исходя из амплитудного значения выходного напряжения трансформатора $T1$: $380 \cdot 1.41 = 537В$ [1,29,28].

С целью обеспечения безопасности (разряда конденсаторов при выключении входного автомата) параллельно им подключили резисторы $R2 - R4$. Для разряда емкости C использовали резистор $R4$ типа: МЛТ-2-150кОм \pm 10% [20], а для разряда конденсатора $C5 -$ два резистора $R2, R3$ типа: МЛТ-2-150кОм \pm 10% [10,29,32].

С целью индикации напряжения поставили вольтметр PV1, рассчитанный на постоянное напряжение до 600 В.

С целью ограничения импульсов входного тока добавили индуктивность $L4$. Ее предполагается изготовить самостоятельно, намотав на ферритовое кольцо два витка провода.

3.1.4. Расчет зарядного дросселя

Зарядный дроссель рассчитали согласно известной методики [6, 12].

«Зарядный дроссель L3 представляет собой кольцо, выполненное из магнитного материала той же марки, что и магнитопровод, т.е. магнитодиэлектрика типа КММ с намотанными n витками изолированного провода.

Зарядный дроссель необходим для обеспечения колебательного процесса при дозарядке конденсатора C , чтобы конденсатор плавно заряжался до необходимого напряжения. Рассчитаем необходимые параметры для дросселя.

Принимаем значения: внешний диаметр кольца – $D=54$ мм;

внутренний диаметр кольца – $d=28$ мм;

высота кольца – $h=10$ мм;

максимальная магнитная индукция – $B_m=1,3$ Тл.

Находим площадь кольца:

$$S = \frac{D-d}{2} \cdot h = \frac{54-28}{2} \cdot 10 = 130 \text{ мм}^2 \quad (3.1)$$

Средняя длина пути прохождения магнитного потока:

$$l_{cp} = \pi \cdot \frac{D+d}{2} = 3,14 \cdot \frac{54+28}{2} = 128,7 \text{ мм} \quad (3.2)$$

Объем кольца:

$$V = S \cdot l_{cp} = 130 \cdot 10^{-6} \cdot 128,7 \cdot 10^{-3} = 16,745 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \quad (3.3)$$

Исходя из того, что мы не знаем точного значения магнитной проницаемости материала μ , проведем исследования. Намотали на кольцо 75 витков ($w=75$) и разрядили на него с перезарядом конденсатор емкостью $C=50\text{мкФ}$, заряженный до напряжения 23В. В результате получили синусоидальный ток с амплитудой $I_m=7\text{А}$, время нарастания тока от нуля до максимума $t=0,2\text{мс}$.

Из-за того, что $t=0,2\text{мс}$ – это четверть периода, весь период колебаний равен: $T=4\cdot 0,2\cdot 10^{-3}$ » [22, 8, 11]

«Период колебаний вычисляется по формуле:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

Исходя из этой формулы найдем индуктивность дросселя:

$$L = \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot C} = \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 0,324 \text{ мГн} \quad (3.4)$$

При помощи формулы: $L=w^2 \cdot G$ рассчитаем магнитную проводимость:

$$G = \frac{L}{w^2} = \frac{0,324 \cdot 10^{-3}}{75^2} = 5,76 \cdot 10^{-8} \text{ Гн} \quad (3.5)$$

При помощи формулы, определяющей магнитную проводимость:

$$G = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{S}{l_{cp}}, \text{ рассчитываем магнитную проницаемость } \mu:$$

$$\mu = \frac{G \cdot l_{cp}}{S \cdot \mu_0} = \frac{5,76 \cdot 10^{-8} \cdot 0,129}{1,3 \cdot 10^{-4} \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 45,4 \quad (3.6)$$

Теперь, зная истинную магнитную проницаемость, рассчитаем необходимые параметры зарядного дросселя.

Находим индуктивность дросселя:

$$L = \frac{t_p^2}{\pi^2 \cdot C} = \frac{150 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 0,282 \text{ мГн} \quad (3.7),$$

где t_p – время, в течение которого протекает ток по зарядному дросселю, т.е время импульса зарядного тиристора (рис.8).

Зная необходимую индуктивность, рассчитаем число витков дросселя:

$$w = \sqrt{\frac{L}{G}} = \sqrt{\frac{0,282 \cdot 10^{-3}}{5,76 \cdot 10^{-8}}} = 60 \text{ витков}$$

Рассчитываем ток насыщения дросселя:

$$I_m = \frac{B_m \cdot l_{cp}}{\mu \cdot \mu_0 \cdot w} = \frac{1,3 \cdot 0,129}{45 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 60} = 49,4 \text{ А} \quad (3.8)$$

Максимальная запасаемая энергия в дросселе: » [22]

$$W_m = \frac{B_m^2 \cdot l_{cp} \cdot S}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} = \frac{1,3^2 \cdot 0,129 \cdot 130 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 45 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 0,25 \text{ Дж} \quad (3.9)$$

Таким образом, были рассчитаны энергетические показатели системы.

3.2. Система управления

3.2.1. Разработка структурной схема системы управления

Структурная схема системы управления изображена на рис.9.

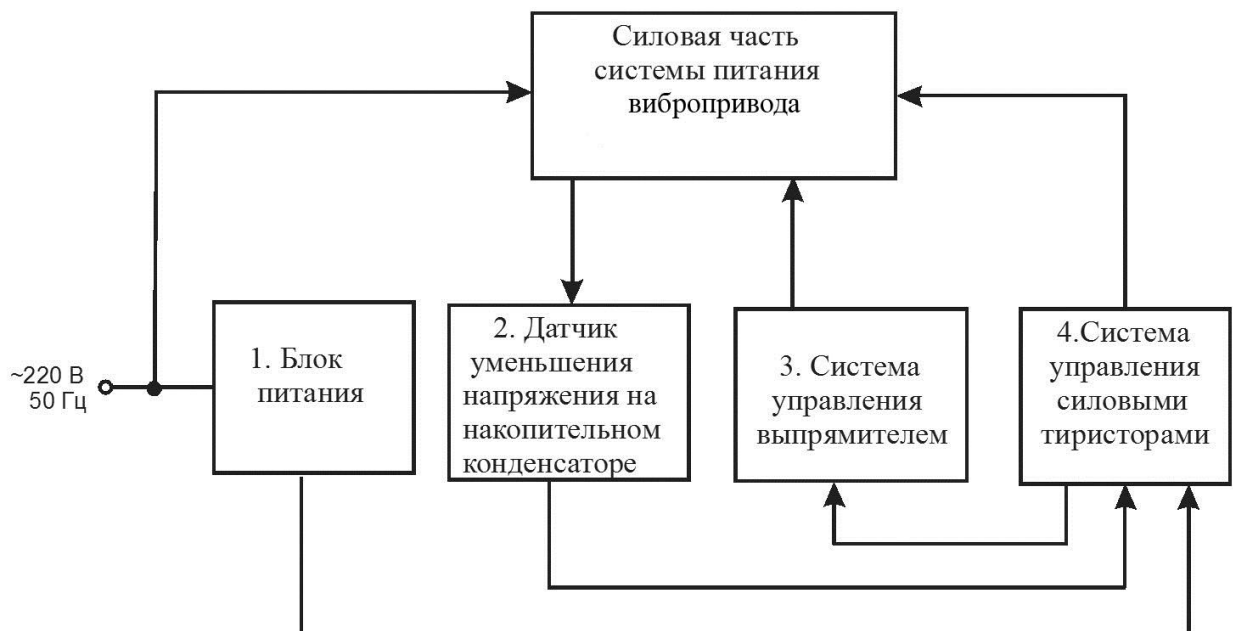


Рисунок 9 – Структурная схема системы управления.

Существует возможность построения системы управления на отдельных элементах или на микроконтроллере. В данной ВКР было решено использовать отдельные элементы. Для лучшего понимания, разрабатываемая система управления изображена на рис. 10.

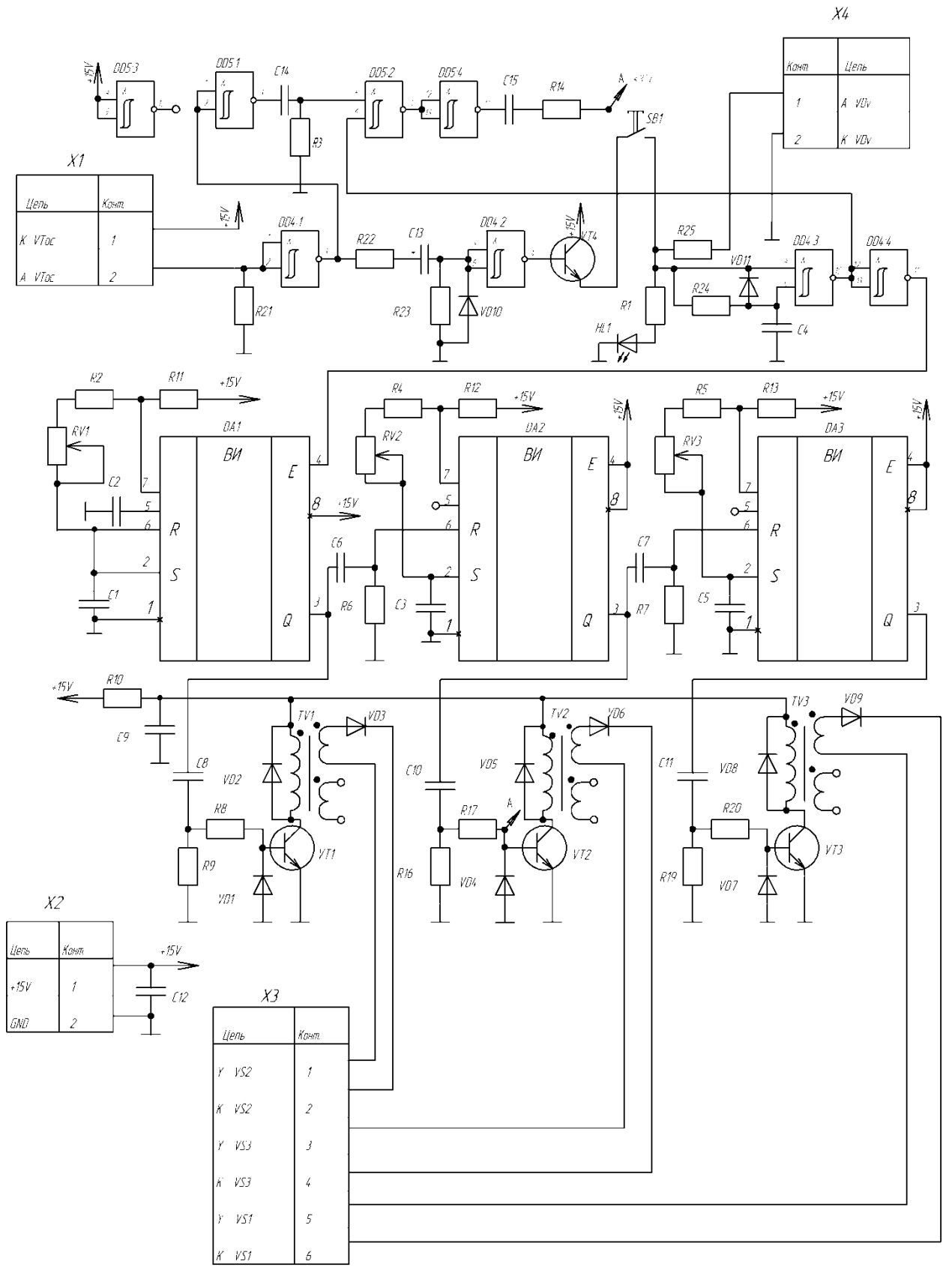


Рисунок 10 – Система управления.

Для питания системы постоянным напряжением в +15В выбрали сетевой адаптер: БПС 15-0.8 (штекер 5.5x2.5, Б) с параметрами: (15В, 0.8А, 12Вт), напряжение питания: 220В, 50Гц.

3.2.2. Система управления выпрямителем.

Систему управления выпрямителем разрабатывали по аналогии с уже существующими системами (рис.10).

На вход силовой части подается 220В, 50 Гц. Это напряжение выпрямляется мостовым выпрямителем. Для включения выпрямителя на оптопару VA1 оптотиристора подается управляющий ток. Емкость C1 заряжается: 220В – VD1 – R1 – VA1 – R2 – RV1 – C1 – VD4 – 220В. При отсутствии управляющего сигнала выпрямитель будет закрыт, емкости заряжаться не будут.

Опасным состоянием для силовой схемы является состояние, если открыт тиристор VS1 в момент времени, когда зарядный тиристор VS3 еще не закрылся. В этом случае произойдет короткое замыкание, ограниченное только дросселями и полупроводниковыми приборами. Напряжение на емкости C5 уменьшится. Ток перестанет протекать через стабилитроны и оптопару датчика уменьшения напряжения. Выход оптопары, подключенный к системе управления сообщит ей о аварийной ситуации. Система управления перестанет подавать напряжение на оптотиристор выпрямителя и он закроется.

3.2.3. Система управления тиристорами

Для формирования временных интервалов и периодов часто используются интегральные таймеры, например микросхема КР6ВИ1 [8, 2]. В сети интернет существует огромное количество примеров ее использования.

«Для управления силовыми тиристорами в схеме используются три интегральных таймера КР1006ВИ1. При подаче разрешающего импульса с DD4(11) схема управления начинает работу. Первый таймер DA1 задает период $T_1=1000 - 3300$ мкс (рис.11). По положительному фронту импульса первого таймера в момент времени t_1 (рис.11) запускается второй таймер DA2, выдавая на выходе “0” на время работы $T_1=150 - 300$ мкс. А по положительному фронту второго таймера, в момент времени t_2 запускается третий таймер DA3, на выходе которого в течение работы $T_2=300$ мкс, удерживается “0”. Положительный фронт таймеров DA1, DA2, DA3 приводит к подаче управляющих импульсов на тиристоры VS2, VS3, VS1 соответственно. [25,1,14].

Рассмотрим работу первого таймера DA1.

На выводы 2, 6 таймера DA1 подается напряжение с конденсатора C1. Когда оно станет меньше, чем $U=+5$ В, конденсатор C1 начинает заряжаться по цепи +15, R11, R2, RV1, C1. Когда он зарядится до напряжения $U=+10$ В, конденсатор C1 начинает разряжаться по цепи C1, RV1, R2, DA1(7). На выходе таймера DA1(3) появляется ступенчатый сигнал логической единицы “1”(рис. 11). Ток протекает через конденсатор C8, резистор R8, открывая транзистор VT1. Тогда ток, проходя через гальваноразвязывающий трансформатор TV1, подается на выходы управления силовым тиристором VS2. RC – фильтр R10, C9 необходим для фильтрации напряжения. Для ограничения больших токов ставим R8. Для защиты транзистора VT1 от пробоя ставим обратные диоды VD1, VD2 [15,16,32]. Вращение подстроечного резистора RV1 позволяет регулировать частоту открытия тиристора VS1.»[8,23,4,6,1]

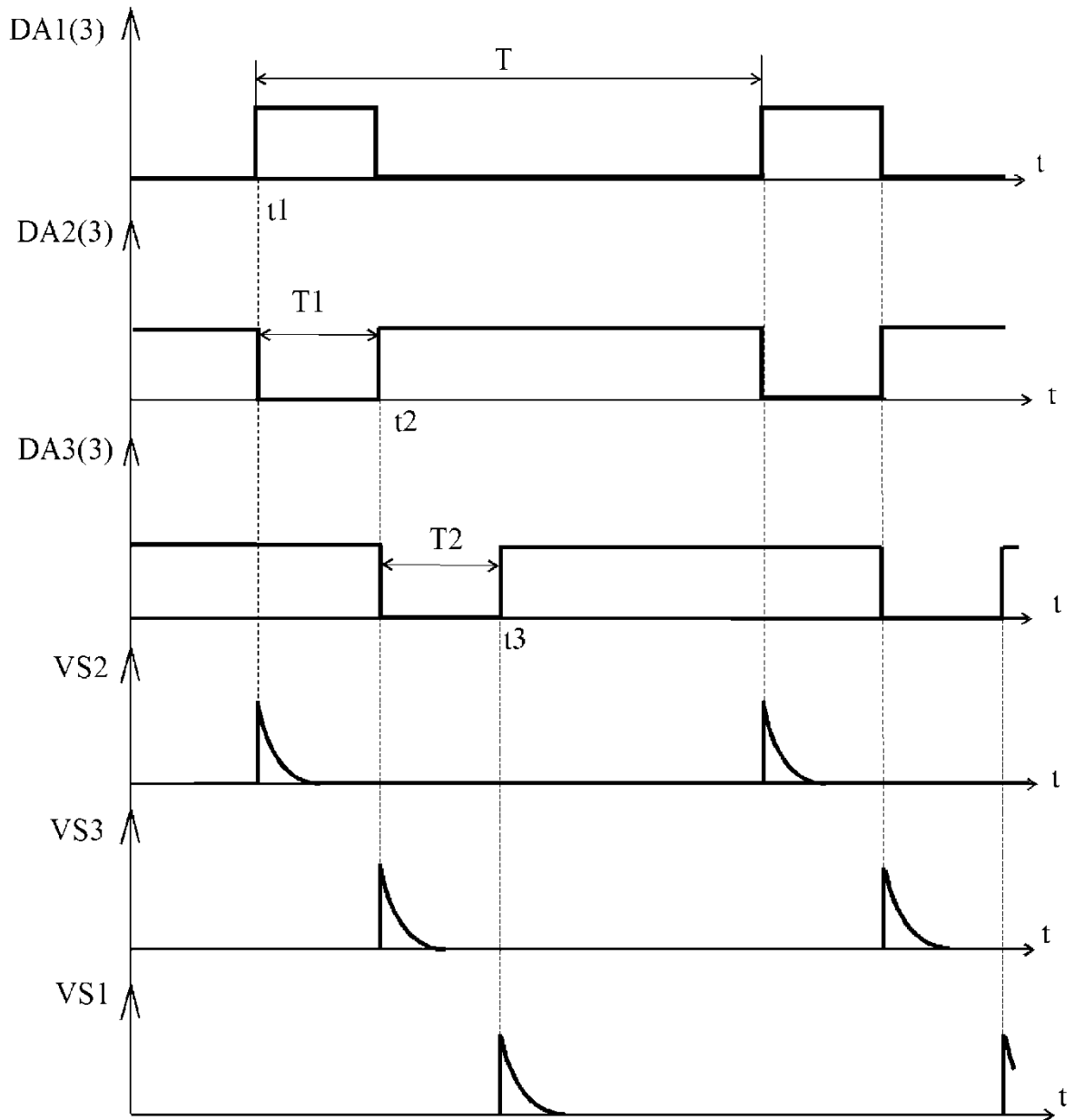


Рисунок 11 – Временные диаграммы работы системы управления.

Второй и третий таймеры работают аналогично первому.

3.2.4. Система управления из защит.

Поясним работу системы управления, изображенной на рис. 12.

Для отслеживания низкого уровня напряжения на емкости $C5$ служит оптопара $VA2$. Если напряжение низкое, то на 3 выводе микросхемы $DD4(3)$ присутствует единица (+15В). Через время укорачивающую схему $C13, R23$, единица кратковременно подается на 5й вывод микросхемы $DD4$. Ноль

подается на токоусилительный транзистор VT4. В этом случае вне зависимости от состояния SB1 на выходе 11 микросхемы DD4 будет низкий уровень напряжения и работа тиристоров будет запрещена.

Для защиты от дребезга кнопки SB1, использовали элементы C13, R23 и C4.

Одной из возможных проблем в выбранной силовой схеме (рис. 8) является первое включение схемы, при разряженном накопителе С. В этом случае зарядный ток, протекающий через индуктивность L3 может достигнуть больших значение, превышающих ток насыщения дросселя. Для предотвращения такой ситуации с выходов 1 и 2 DD5 подадим сигнал к входу 3 DD4, а выход 6 DD5 – ко входам 12,13 микросхемы DD4. Далее использовали R-С цепочки, подключенные к базе VT2, управляющего тиристором VS3. Такое подключение позволяет однократно открыть тиристор VS3 в процессе заряда входных конденсаторов (когда они еще не успеют зарядиться до номинального напряжения). При этом через L3 протечет однократный ток, заряжающий накопительную емкость С до напряжения порядка 250В.

Заключение

В данной ВКР произведена разработка электромагнитного вибрационного привода и системы его электропитания. Вибропривод предназначен для химических технологий (например, гранулирования селитры). Разработанный вибропривод лишен ряда недостатков, присущих ныне используемых пневматическим дебалансным виброприводам.

Были выполнены следующие задачи:

- обзор вариантов,
- расчет и моделирование магнитопровода,
- разработка силовой части схемы,
- разработка системы управления и выбор элементов

В работе осуществлен подробный расчет магнитной системы. Далее произведено ее математическое моделирование в программе Elcut, подтвердившее правильность выбранных геометрических размеров.

В качестве силовых приборов использованы надежные элементы – тиристоры. Система запитывается от стандартной сети 220В, 50 Гц.

Система управления построена на надежных и хорошо себя зарекомендовавших интегральных таймерах - КР1006ВИ1. Данное решение является более помехоустойчивым по сравнению с применением микроконтроллеров [33].

Для силовой схемы и системы управления выбраны элементы, сведенные в перечень элементов.

В ходе написания ВКР было использовано специализированное программное обеспечение:

- в программе Elcut были промоделированы магнитные поля и посчитаны силовые характеристики электромагнита.
- с помощью программы MathCad производились математические расчеты по известным формулам.

Список используемой литературы

1. Аксенов А.И., Нефедов А.В. Отечественные полупроводниковые приборы. Справочное пособие., М.: СОЛОН., 1999 г.
2. Б.В. Тарабрин, С.В. Якубовский, Н.А. Барканов и др.: справочник по интегральным микросхемам. – М.: Энергия, 1980. – 816 с., ил.
3. Воронин, П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение/ П.А. Воронин. - М.:Издательский дом “Додека-XXI”, 2001. – 384 с.
4. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. – М.: Высш. шк.1991. – 622 с.
5. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. 1988. – 304 с.
6. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М.: Высш. Школа, 1982. 496 с.
7. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: учеб.пособ./ Зиновьев, Г.С. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. - 664с.
8. Интегральные микросхемы: Справочник / Б.В. Тарабрин, Л.Ф. Лунин, Ю.Н. Смирнов и др.; Под ред. Б. В. Тарабрина. – 2-е изд., испр. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 528 с., ил.
9. Каталог электронных компонентов [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.platan.ru](http://www.platan.ru) (дата обращения: 07.05.2022)
10. Каталог электронных компонентов [Электронный ресурс]. URL: [http:// www.chip-dip.ru](http://www.chip-dip.ru) (дата обращения: 07.05.2022)
11. Кузнечиков С.Ю. Магнитопроводы из композиционных магнитомягких порошковых материалов.// Электротехника 1994г. №8, С.54
12. 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.

13. Микросхемы и их применение: Справочное пособие / В.А. Батушев, В.И. Вениаминов и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1984 – 272с.,ил.
14. Миловзоров О. В. Электроника : учеб. для вузов / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. - Изд. 4-е, стер. ; Гриф МО. - М. : Высш. шк., 2008. - 288 с.
15. Мощные полупроводниковые приборы: Диоды: Справочник / Б.А. Бородин, Б.В. Кондратьев, В.М. Ломакин и др.; Под ред. Голомедова. – М.: Радио и связь, 1985. – 400 с.
16. Намитоков К.К. и др. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств/ К.К. Намитоков, Н.А. Ильина, И.Г. Шкловский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
17. Поллер З. Химия на пути в 3-е тысячелетие. – М.: Мир,1991. – 246с.
18. Процессы гранулирования в промышленности. Вилесов Н.Г., Скрипко В.Я., Ломазов В.Л., Танченко И.М. – Киев: «Техника», 1976. – 192с.
19. Резисторы: справочник / Ю. Н. Андреев, А. И. Антонян, Д. М. Иванов и др.; Под ред. И. И. Четверткова. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 352 с.
20. Силовые полупроводниковые приборы. Пер. с англ. Под ред. В.В. Токарева. Первое издание. – Воронеж: «Элист», 1995 г. – 664 с.
21. Справочник разработчика и конструктора РЭА. Элементная база/ Масленников М.Ю., Соболев Е.А., Соколов Г.В. и др.; Под ред. Масленникова М.Ю. М.: Радио и связь,1996.
22. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир,1982. – 512 с.,ил.
23. Транзисторы малой мощности: Справочник/Под ред. А. В. Голомедова.- М.: Радио и связь,1989.

24. Трансформаторы и преобразователи «Электроагрегат». Каталог. – Санкт Петербург.: Электроагрегат, 2003 г. 38 с.
25. Шило В.Л. Популярные микросхемы КМОП. Справочник. – М.: Изд-во «Ягуар», 1993. – 64 с.
26. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник /В.П. Берзан, Б.Ю. Геликман, М.Н. Гураевский и др.: Под ред. Г.С. Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 656 с., ил.
27. Ямпурин Н. П. Электроника [Электронный ресурс] : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. П. Ямпурин, А. В. Баранова, В. И. Обухов. - М. : Академия, 2011.
28. Diodes Incorporated [Электронный ресурс]. URL: <https://www.diodes.com> (дата обращения: 27.05.2022)
29. Electrical resistance and conductance [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistance_and_conductance (дата обращения: 17.05.2022)
30. Electronic Components Datasheets [Электронный ресурс] URL: <http://www.datasheets.ru> (дата обращения: 17.02.2022)
31. IRF640N Datasheet (PDF) - Fairchild Semiconductor [Электронный ресурс]. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/152088/FAIRCHILD/IRF640N.html> (дата обращения: 27.06.2022)
32. Resistor [Электронный ресурс]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Resistor> (дата обращения: 17.05.2022)
33. S.M Islam, G.M sharif, "microcontroller based sinusoidal PWM inverter for photovoltaic application" First International Conference development in renewable energy technology,p 1-4,December 2009, IEEE.