

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

Институт энергетики и электротехники  
(наименования института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»  
(наименование кафедры)

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

Промышленная электроника  
(направленность (профиль) / специализация)

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему СИСТЕМА ПИТАНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ

Студент	<u>С.З. Давлатов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Руководитель	<u>А.В. Прядилов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультант	<u>О.А. Парфенова</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент А.А. Шевцов  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

Тольятти 2019

## Аннотация

Объем 48 с., 21 рис., 6 табл., 25 источников

ВИБРАЦИОННЫЙ ПРИВОД, КОЛЕБАНИЯ, ЭЛЕКТРОМАГНИТ

Объектом исследования является система питания вибрационной установки с электромагнитным приводом.

Цель работы: разработка системы питания вибрационной установки с электромагнитным приводом

Задачи работы:

1. Обзор текущего состояния вопроса
2. Выбор и расчет магнитной системы
3. Обзор, выбор и расчет силовой схемы системы питания

Работа состоит из 2 глав, в которых решены упомянутые задачи.

Математическое моделирование магнитных полей производилось в программном пакете Elcut.

Степень внедрения: произведены теоретические разработка и расчеты.

Областью применения данной работы являются области использования вибрационных установок с возможностью изменения частоты колебаний.

В данной работе был произведен обзор ситуации, возможные решения конструкций магнитопроводов, разработана силовая часть системы питания.

Полученные результаты подтверждают возможность создания такой системы питания для электромагнитной вибрационной установки, создающей усилия 5 т.с. с изменяющейся частотой колебаний. Разработка системы сопряжена с решением большого числа вопросов, поскольку в силу новизны темы не существует методик проектирования подобных систем, однако проведённые расчеты подтверждают возможность создания такой установки.

Электромагнитные вибрационные установки на небольшие силы (5-10 т.с.) могут составить конкуренцию ныне распространенным гидравлическим вибраторам.

## Abstract

### VIBRATION ACTUATOR, VIBRATIONS, ELECTROMAGNET

The object of the study is the power supply system of the vibration unit with an electromagnetic drive.

Purpose: development of the power supply system of the vibration unit with electromagnetic drive

Work tasks:

1. Overview of the current status of the issue
2. Selection and calculation of magnetic system
3. Review, selection and calculation of power supply system circuit

The work consists of 2 chapters in which the mentioned tasks are solved.

Mathematical modeling of magnetic fields was carried out in The elcut software package.

Degree of implementation: theoretical development and calculations were made.

The scope of this work is the use of vibration units with the ability to change the oscillation frequency.

In this work were made an overview of the situation and the possible solution structures of the magnetic circuits developed by the power section of the power system.

The obtained results confirm the possibility of creating such a power system for an electromagnetic vibration unit that creates forces of 5 tons with a varying frequency of oscillations. The development of the system is associated with the solution of a large number of issues, since due to the novelty of the topic there are no methods for designing such systems, but the calculations confirm the possibility of creating such an installation.

Electromagnetic vibration units for small forces (5-10 tons) can compete with the now common hydraulic vibrators.

# Содержание

Введение.....	5
1.Магнитная система .....	7
1.1. Состояние вопроса и обзор вариантов.....	7
1.2 Расчёт магнитной системы.....	14
2. Система питания .....	18
2.1 Обзор вариантов силовой схемы.....	18
2.2 Исследование перспективности создания источника с подмагничиванием .....	22
2.3 Повышающий преобразователь.....	31
2.4. Коммутатор тока .....	37
2.5 Формирователь тока подмагничивания.....	40
2.6 Накопительная конденсаторная батарея .....	41
2.7 Выпрямитель и входной автомат. ....	42
2.6. Система управления.....	42
Заключение .....	45
Список используемой литературы .....	46

## Введение

Высокие темпы развития промышленности предъявляют повышенные требования к развитию топливно-энергетической базы. Решение энергетических задач в последнее время требует значительного увеличения добычи горючих ископаемых – нефти, газа, угля. Рост объемов добычи горючих ископаемых требует не только более интенсивного использования известных месторождений, но и поиска новых. Один из основных геофизических методов изучения строения земных недр является сейсморазведка.

Сущность сейсморазведки заключается в возбуждении упругих механических колебаний с поверхности земли или из специально пробуренных скважин. Последние распространяются вглубь и, отражаясь и преломляясь на структурных неоднородностях внутри земли, возвращаются на поверхность. Регистрация отраженной волны производится специальными датчиками – сейсмоприемниками. Сигналы с сейсмоприемников обрабатываются в сеймостанции, в результате чего строятся сейсмограммы, позволяющие судить об особенностях строения глубинных слоев грунта на исследуемой территории. По результатам сейсморазведки разрабатываются рекомендации, в каких местах возможно залегание полезных ископаемых и где нужно проводить пробное бурение.

Традиционным методом являлся взрывной метод. Возбуждение сейсмических волн в этом методе осуществляется с помощью взрывов заряда тротила в скважинах. Однако этот метод обладает целым рядом существенных недостатков: низкая производительность, вызванная необходимостью проведения буровзрывных работ; невозможность проведения работ в населенных пунктах или в относительной близости к ним; разрушающее действие на окружающую среду.

Более современным является метод возбуждения сейсмических волн электромагнитной вибрационной установкой. В лаборатории НИЛ6 был изготовлен макет электромагнитной вибрационной установки с изменяемой

частотой колебаний (вибратора), принятый за базовую конструкцию, содержащий излучающую плиту и устройство для ее прижима к грунту (для обеспечения неотрывного режима работы). Так же в конструкцию входит пригруз присоединён к излучающей плите при помощи упругого элемента, и источник знакопеременной силы, подключенный к системе электропитания. В качестве прижимной массы может использоваться машина, которая возит вибратор.

Целью данного проекта является выбор и расчёт источника силы и силовой части системы питания к нему. Развитие электронной промышленности за последнее десятилетие привело к появлению новых технологий, повышению показателей технологичности производств, что повлекло улучшение технических характеристик элементов, к появлению новой элементной базы, как в силовой, так и микроэлектронике.

Данное обстоятельство позволяет своевременно решать задачу создания рациональных систем питания с использованием достижений электронной промышленности. Таким образом, необходимо повышение сейсмической эффективности путем разработки рациональной системы питания с хорошими показателями надежности, режима энергопотребления, к.п.д, диапазона регулирования характеристик, удельной мощности, частоты повторения рабочих циклов, стоимости.

# 1.Магнитная система

## 1.1. Состояние вопроса и обзор вариантов

Магнитную систему можно выполнить различными конструктивными способами. Изначальной идеей была конструкция, изображенная на рис.1.1а. Так же можно использовать втяжную конструкция (рис.1.1б). В ходе разработки втяжной конструкции появилась идея о модернизации основной конструкции путем увеличения кол-ва зон преобразования с заменой паразитного зазора основной конструкции на рабочий (рис. 1.1в). Необходимо сравнить эти конструкции с целью выявления наиболее оптимальной для создания на ее основе мощного вибратора.

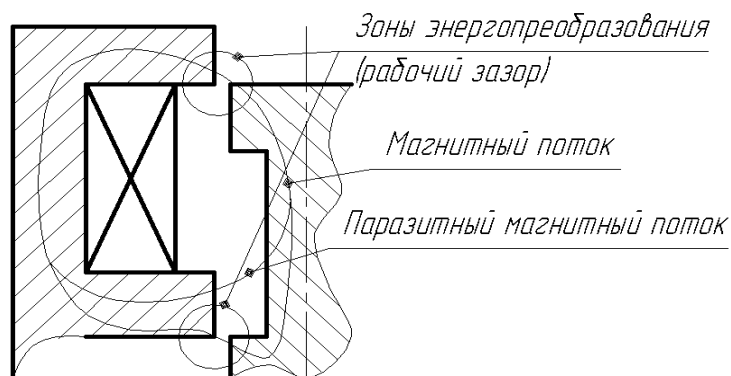
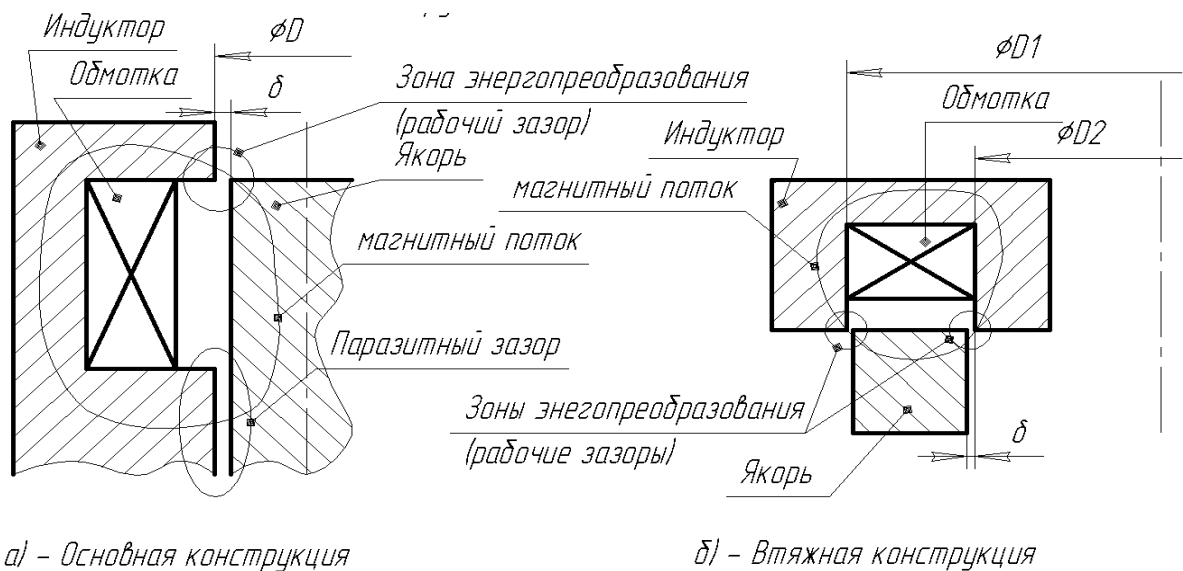


Рис. 1.1 – Конструкции магнитной системы.

Представляются интересным два конструктивных решения втяжной конструкции обычного (рис.1.2а) и обращенное (рис.1.2б). Надо отметить, что обычное и обращенное решения возможны и для других конструкций магнитных систем. Когда якорь содержится внутри индукторных частей – обычное решение, наоборот – обращенное.

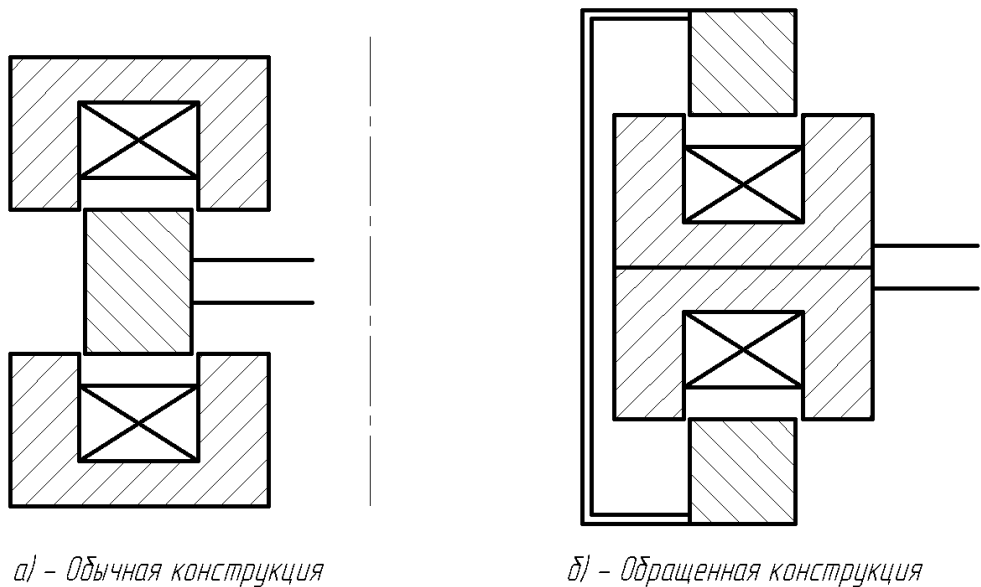


Рис. 1.2 – Обычная и обращенные конструкции.

Выполнение магнитопроводов из шихтованной электротехнической стали в замен порошковых магнитодиэлектриков улучшает удельные силовые характеристики преобразователя. Однако использование шихтовки влечет за собой применение специальных методов для ее установки и крепления. На рис.1.3 и рис.1.4 изображены возможные варианты выполнения шихтовки магнитопроводов. Недостатком шихтовки является ее сложное исполнение.



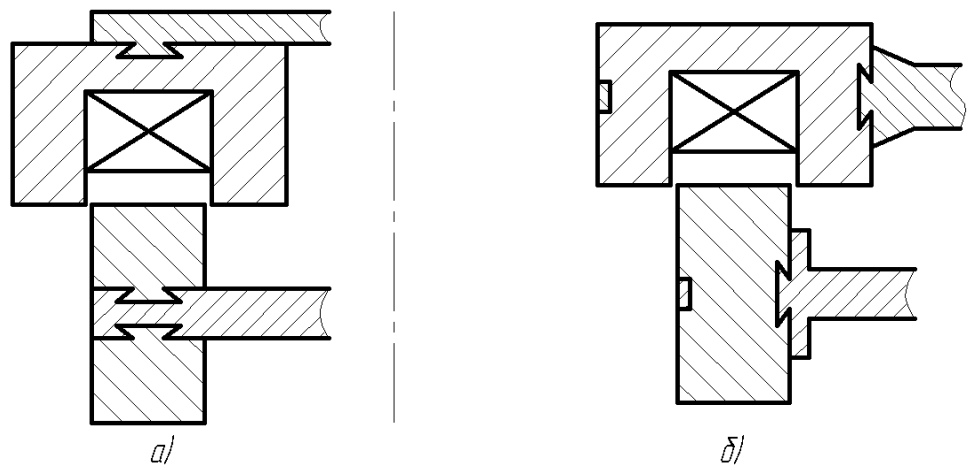


Рис. 1.3 – Варианты крепления якоря и индуктора.

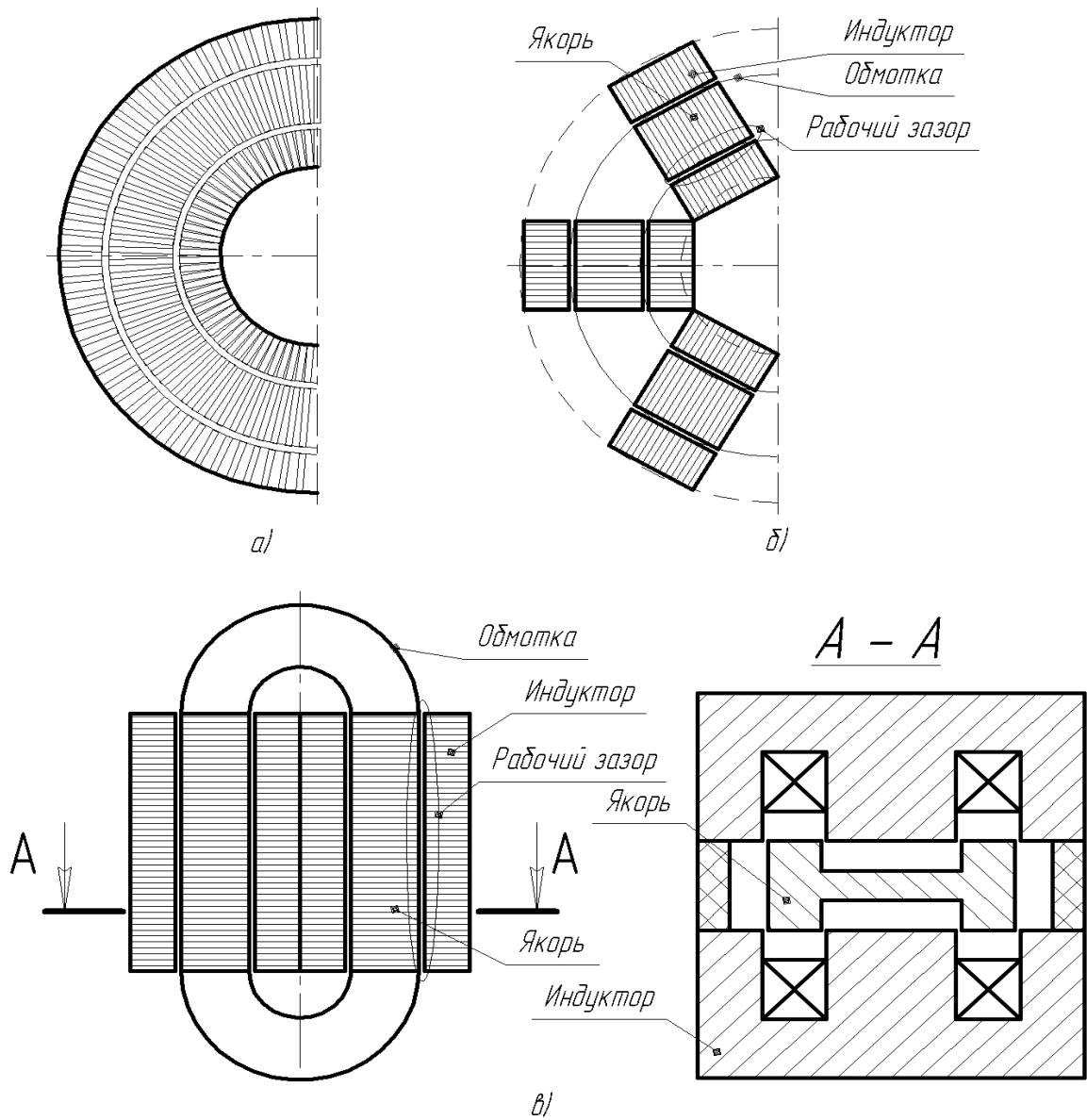


Рис. 1.4. – Варианты шихтовки магнитопровода.

Зоны энергопреобразования у вариантов конструкций по рис. 1.1а и рис. 1.1б изображены на рис. 1.5. Они очень похожи и имеют схожие процессы энергопреобразования.

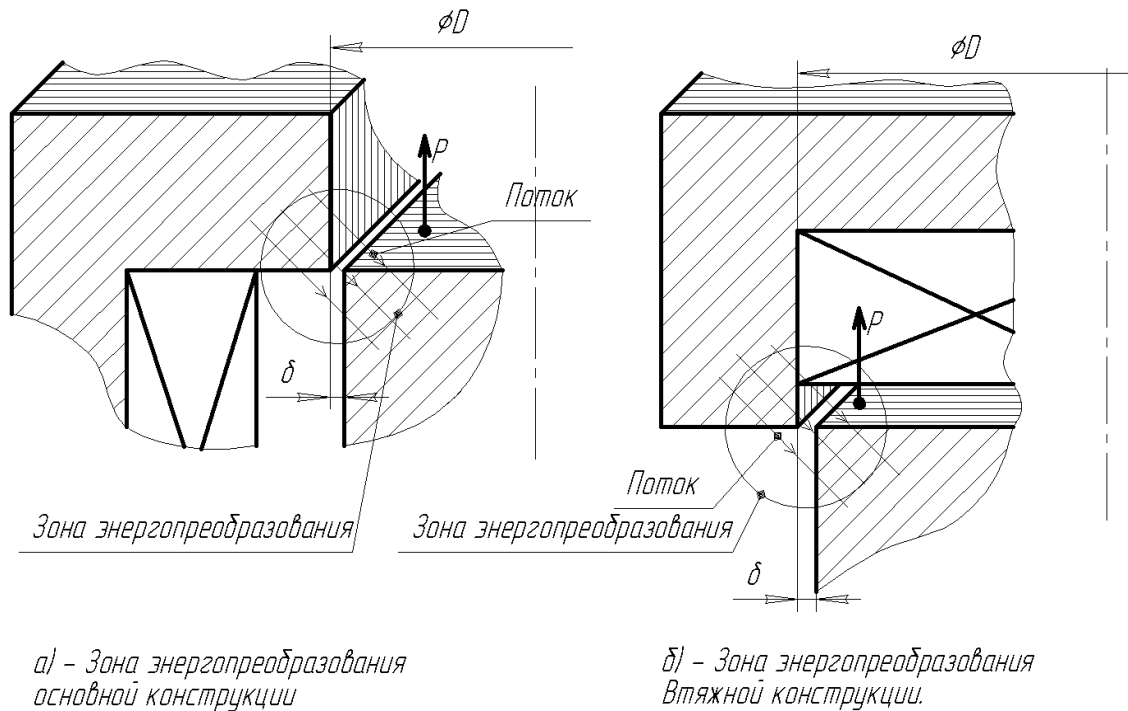


Рис 1.5 - Зоны энергопреобразования

Каждая зона энергопреобразования в конструкции будут выдавать примерно одинаковые силы  $P$  при одинаковых размерах  $D$  и  $\delta$  и одинаковых магнитных потоках. Но во втяжной конструкции зоны энергопреобразования - две, а следовательно можно получить в 2 раза большую силу при том же потоке.

Магнитные схемы замещения для конструкций изображены на рис.1.6.

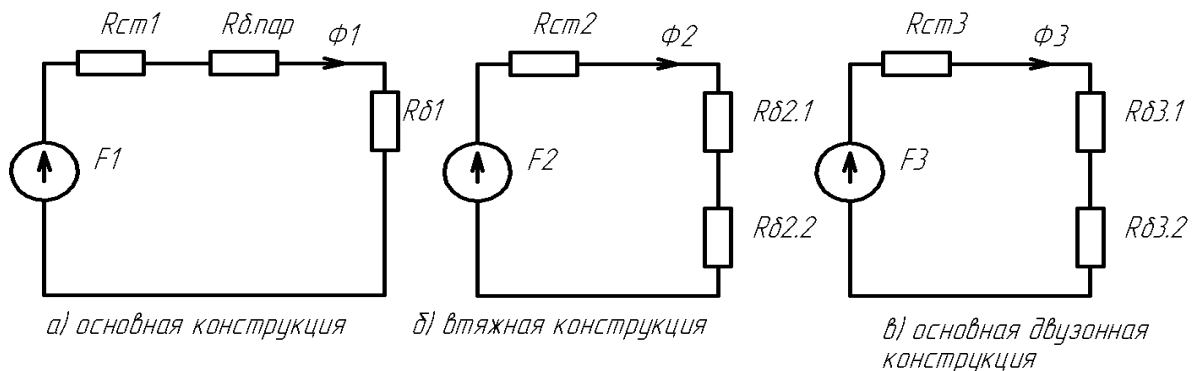


Рис. 1.6 – Магнитные схемы замещения

Если пренебречь сопротивлением паразитного зазора  $R_{\delta.пар}$  и сопротивлением стали  $R_{ст1}$  и  $R_{ст2}$ , а так же принять

$$R_{\delta1} \cdot 2 \approx (R_{\delta2.1} + R_{\delta2.2}),$$

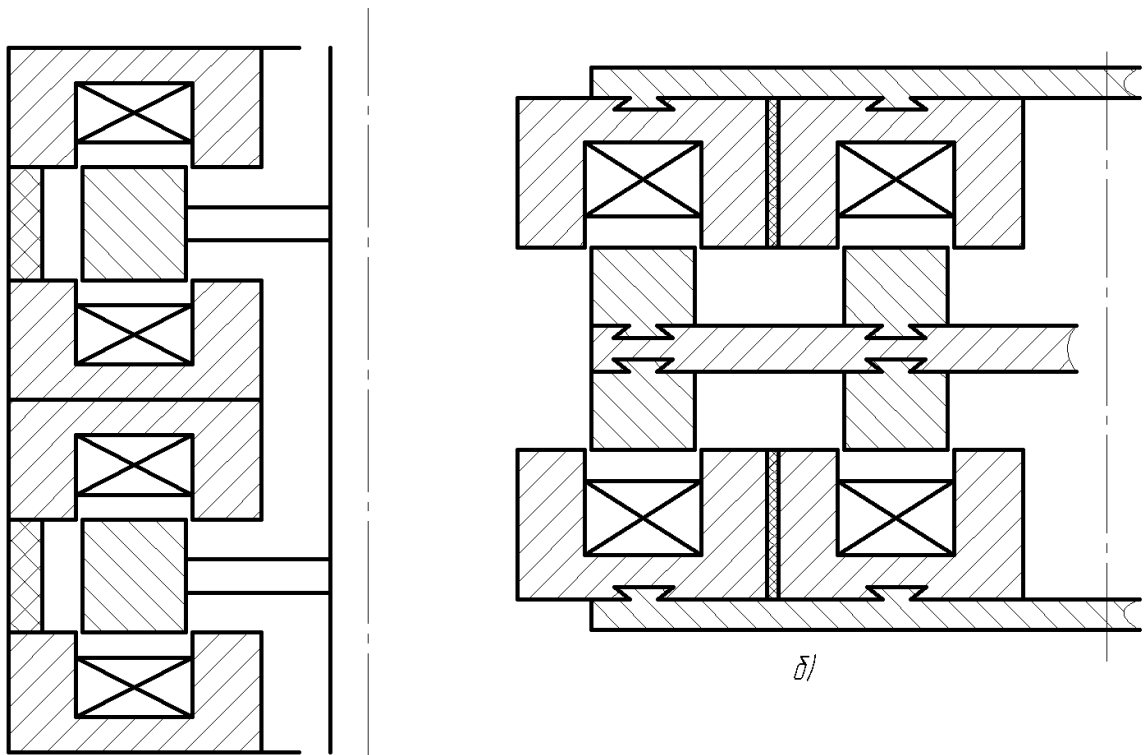
то для обеспечения равенства потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  (сила будет в 2 раза большей) необходимо, что бы  $F_2 = 2 \cdot F_1$ .

То есть втяжная конструкция будет выдавать в 2 раза большую электромагнитную силу. Для этого ей необходимо в 2 раза увеличить намагничивающую силу.

#### Варианты секционирования.

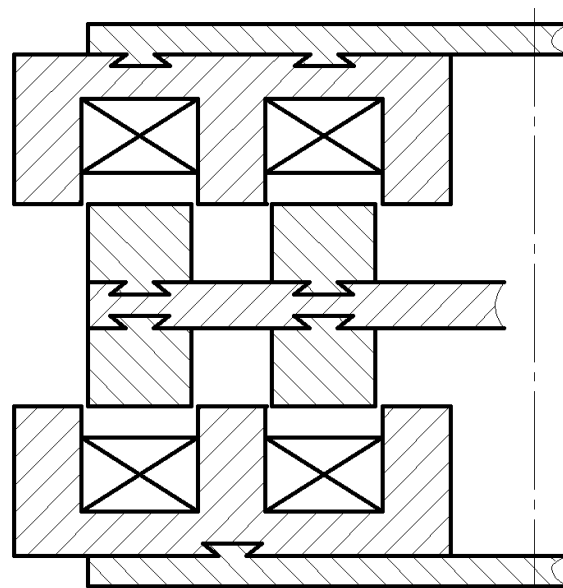
Одним из способов увеличения силы является секционирование конструкции – расположение нескольких однотипных секций в едином конструктиве. Рассмотрим варианты секционирования на основе основных модификаций конструкций вибратора. Втяжная конструкция может быть секционирована двумя способами: вертикальным - установкой магнитов в корпусе один над другим с одинаковыми габаритными размерами (рис.1.7а), горизонтальным – коаксиальной (соосной) установкой магнитов (рис.1.7б,в).

В конструкции (рис.1.7б) центральный полюс индуктора может быть объединен (рис.1.7в) при этом массы магнитопровода уменьшается, но несколько может усложниться процесс шихтовки за счет использования пластин более сложной формы (Ш – образный профиль).



*a/*

*б/*



*б/*

Рис. 1.7 – Варианты секционирования

Основываясь на вышеприведенном обзоре выбрали конструкцию по рис.1.1б. На основе этой конструкции разработали конструктивное решение рис. 1.8, которое взяли за основу для дальнейшей работы.

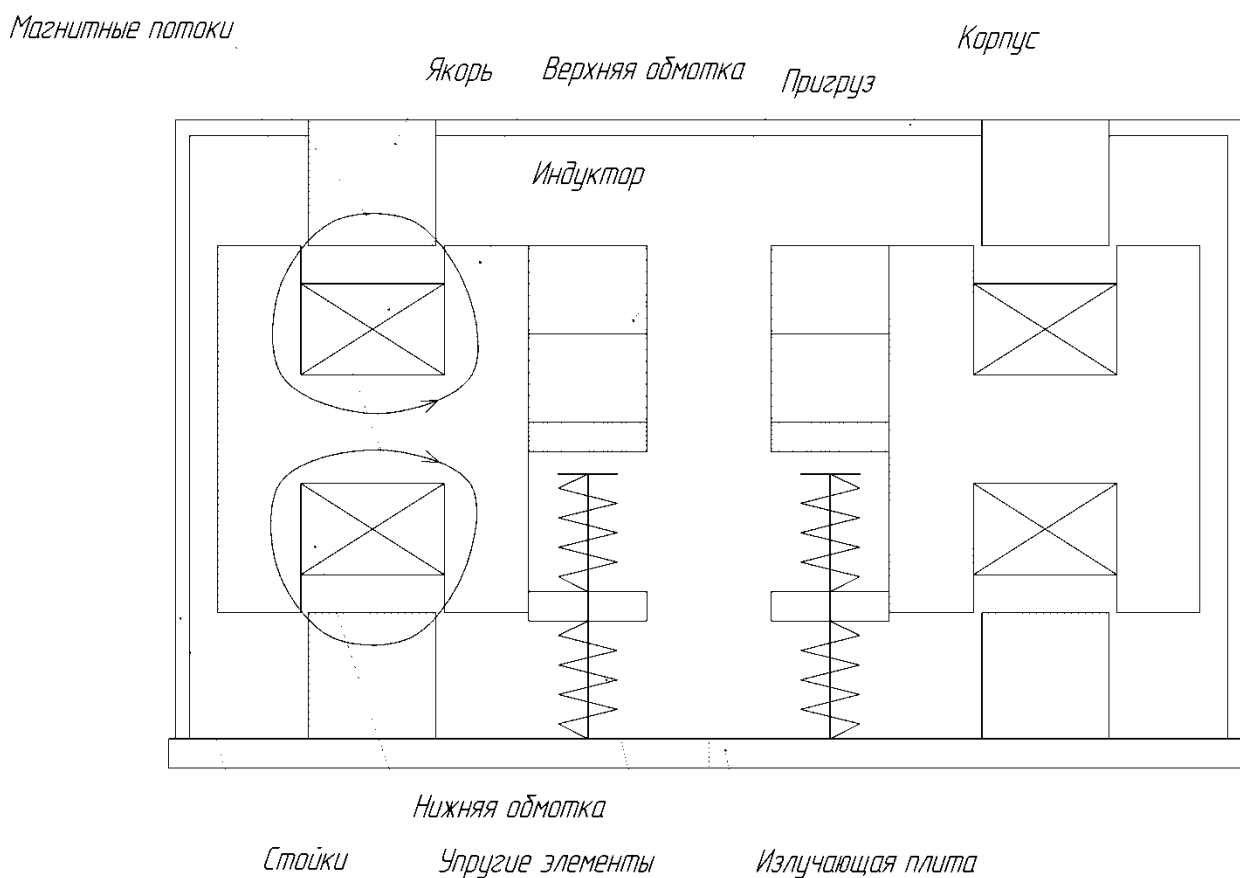
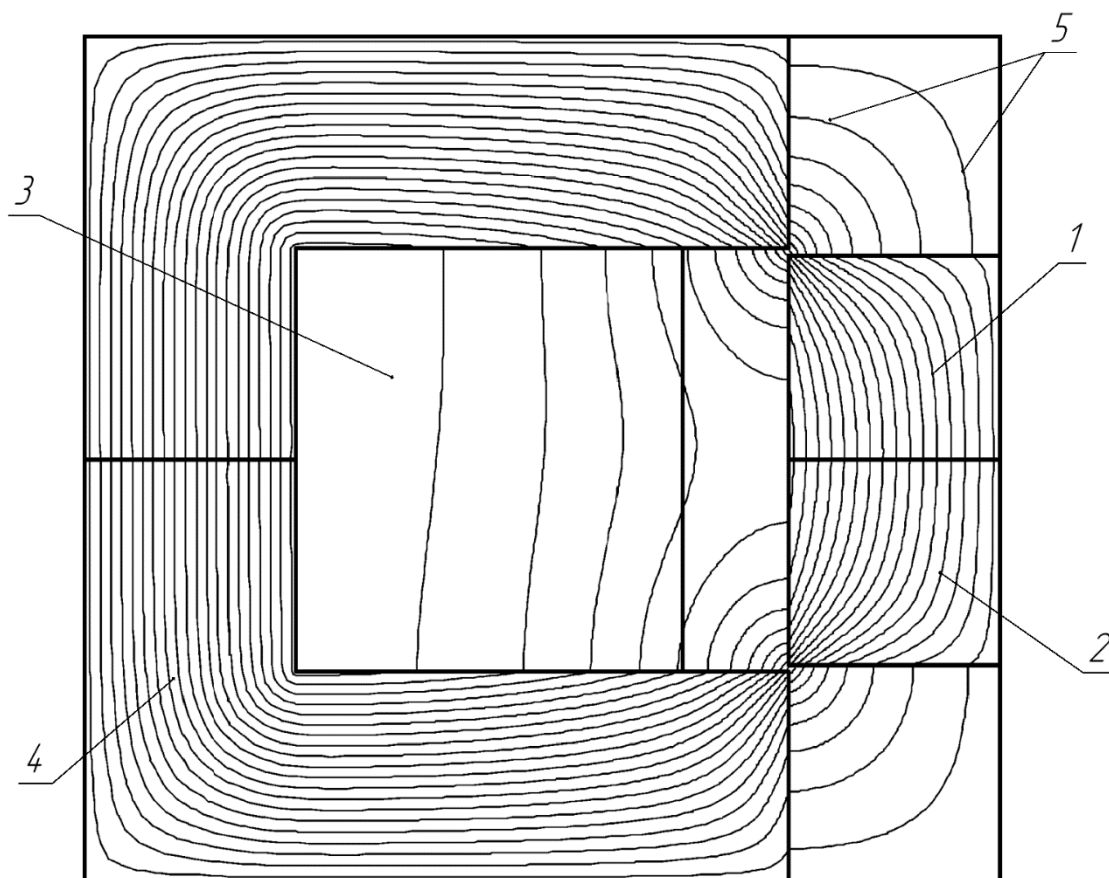


Рис. 1.8 – Выбранное конструктивное решение магнитной системы вибрационной установки.

Не выясненным остается еще вопрос об уровне боковых сил в основной конструкции, которые будут предъявлять особенные требования к изготовлению подшипниковых узлов.

## 1.2 Расчёт магнитной системы

Расчет производился с использованием программного комплекса Elcut, разбивающего расчетную область на несколько десятков тысяч конечных элементов что обеспечивало достаточную точность результатов. Поле построенное программой приведено на рисунке (рис.1.8).



1. Внешний полюс якоря
2. Внутренний полюс якоря.
3. Обмотка.
4. Индуктор.
5. Линии магнитной индукции.

Рис.1.8 - Картина магнитного поля в магнитной системе вибратора.

Параметры рассчитанные при помощи программного комплекса Elcut:  
 $x$  – положение якоря относительно индуктора, мм.  $x > 0$  – при перекрытии якоря и индуктора (сила тянет в сторону увеличения  $x$ )

$N$  - номер

$F$  – намагничивающая сила (нужно округлять)

$W$  – энергия магнитного поля

$\Phi_{об}$  – потокосцепление на один виток обмотки

$\Phi_{я}$  – магнитный поток якоря

$\Phi_{и}$  – магнитный поток индуктора

$R_{я1}$  – сила, действующая на 1-й (внешний) полюс якоря

$R_{я2}$  – сила, действующая на 2-й (внутренний) полюс якоря

$R_{и}$  – пондеромоторная сила, действующая на индуктора с обмоткой

$P$  – сила (средняя между силой индуктора и суммой сил якоря)

Результаты расчета для втяжного вибратора из 2212, на усилие 5тс., внешний полюс индуктора шихтованный с коэф. шихтовки 0.7, приведены в таблицах 1.1-1.5.

Таблица 1.1 - Результаты расчёта магнитной системы для положения  $x=0$

$F$ , кА	$W$ , Дж	$\Phi_{об}$ , Вб	$\Phi_{я}$ , Вб	$\Phi_{и}$ , Вб	$R_{и}$ , Н	$R_{я1}$ , Н	$R_{я2}$ , Н	$P$ , кН
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2.6793	0.0053909	0.0047543	0.0056825	359.36	160.78	196.41	358,27
2	10.626	0.010722	0.0094485	0.011305	1438.8	633.29	790.96	1432
3	23.243	0.015787	0.013877	0.016662	3103.2	1358.1	1731.2	3096
5	59.901	0.025	0.021819	0.026455	7198.7	3182.5	4094.6	7238
7	109.25	0.033245	0.028804	0.035275	11625	5185.2	6647.2	11730
10	202.79	0.044286	0.037982	0.04716	18274	8239.7	10536	18520
12	274.22	0.050787	0.043308	0.054159	22621	10175	12946	22870
15	373.47	0.0582	0.049414	0.061875	28171	12530	15981	28340
17	429.06	0.061682	0.05235	0.06536	31272	13748	17474	31250
20	504.12	0.065759	0.055853	0.069405	35272	15251	19326	64920
25	616.91	0.070806	0.060285	0.074365	40691	17237	21777	39850
30	730.88	0.074967	0.063962	0.078362	45914	18879	23845	44320
40	979.55	0.082113	0.07028	0.084954	56223	21914	27581	52860
50	1255.4	0.088275	0.075705	0.090457	66377	24745	31083	61100
70	1863.7	0.098497	0.084402	0.099352	85532	29836	37245	76310
100	2879.2	0.11056	0.094017	0.10976	112070	36376	45173	96810

Таблица 1.2 - Результаты расчёта магнитной системы для положения  $x=5$

F, кА	W, Дж	Фоб, Вб	Фя, Вб	Фи, Вб	Ри, Н	Ря1, Н	Ря2, Н	Р, кН
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	4.8693	0.0097465	0.0092685	0.010038	422.45	203.89	256.72	441.53
2	18.932	0.019172	0.018217	0.019755	1726.3	821.12	1039.2	1793
3	36.547	0.026296	0.024864	0.027168	3732	1752.6	2225	3855
5	77.552	0.036661	0.034281	0.038103	8386.4	3875.3	4909.1	8585
7	127.32	0.044985	0.041668	0.046986	13163	6061.7	7692.5	13460
10	212.12	0.055046	0.05047	0.057704	20014	9114.1	11642	20390
12	262.06	0.05961	0.054516	0.062343	23787	10637	13628	24030
15	328.16	0.064538	0.058982	0.067245	28571	12416	15934	28460
17	367.97	0.067036	0.061299	0.069714	31185	13376	17169	30870
20	425.08	0.070134	0.06421	0.072766	34688	14606	18761	34030
25	523	0.074509	0.068342	0.077015	40124	16364	21078	38780
30	628.27	0.07835	0.071976	0.080632	45535	18072	23223	43410
40	865.14	0.085158	0.078368	0.086831	56207	21304	27187	52350
50	1124.6	0.090953	0.083653	0.091988	66143	24245	30879	60630
70	1701.8	0.10065	0.092063	0.10046	85011	29803	37465	76140
100	2686.5	0.11233	0.10217	0.11058	111650	37329	46192	97590

Таблица 1.3 - Результаты расчёта магнитной системы для положения  $x=-5$

F, кА	W, Дж	Фоб, Вб	Фя, Вб	Фи, Вб	Ри, Н	Ря1, Н	Ря2, Н	Р, кН
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1.7611	0.0035251	0.002738	0.0038167	84.983	37.282	48.78	85.52
2	7.0439	0.0070499	0.0054755	0.0076331	339.83	149.12	195.08	342.02
3	15.846	0.010574	0.0082118	0.011449	764.32	335.47	438.81	769.3
5	43.965	0.01761	0.013672	0.019067	2121.4	929.89	1216.7	2134
7	85.779	0.024584	0.019075	0.026621	4123.1	1815.3	2367.1	4153
10	172.27	0.034772	0.026925	0.037671	8097	3610.1	4673.4	8190
12	243.9	0.041288	0.031903	0.044753	11184	5028.5	6479.7	11350
15	366.16	0.050366	0.038778	0.0546	16107	7287	9345.2	16370
17	445.74	0.055354	0.042566	0.059868	19264	8659.9	11074	19500
20	545.1	0.06075	0.046761	0.065315	23473	10278	13139	23450
25	684.66	0.067011	0.051775	0.071532	29229	12318	15732	28640
30	811.52	0.071649	0.055566	0.076055	34175	13942	17764	32940
40	1073.5	0.079189	0.061755	0.083116	43910	16782	21275	40980
50	1361.6	0.085624	0.067032	0.08892	53523	19346	24495	48680
70	1996.5	0.096293	0.075766	0.098215	72355	23957	30248	63280
100	3054.5	0.10887	0.085582	0.10899	99049	29976	37587	83310



Таблица 1.4 - Результаты расчёта магнитной системы для положения  $x=10$

F, кА	W, Дж	Фоб, Вб	Фя, Вб	Фи, Вб	Ри, Н	Ря1, Н	Ря2, Н	Р, кН
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	6.9965	0.014059	0.013742	0.014351	515.59	195.71	284.49	497,895
2	27.116	0.027581	0.026948	0.028158	2001.1	780.35	1105.2	1943
3	49.608	0.036776	0.035832	0.037632	4057.6	1695.8	2246	4000
5	93.93	0.048037	0.046476	0.049436	8573.4	3706.9	4813.4	8547
7	140.4	0.055855	0.053772	0.057637	12940	5657.5	7241.4	12920
10	197.73	0.062714	0.060296	0.0645	18216	7711.5	9847.2	17890
12	231.98	0.065845	0.063348	0.067585	21215	8771.4	11240	20610
15	279.32	0.069377	0.066865	0.071058	24908	10058	12931	23950
17	310.9	0.071357	0.068854	0.073003	27172	10833	13940	25970
20	360.57	0.07405	0.071563	0.075624	30462	11908	15367	28870
25	450.69	0.078073	0.075607	0.079444	35924	13623	17621	33580
30	550.65	0.081721	0.079262	0.082806	41418	15277	19800	38250
40	772.09	0.08809	0.08542	0.088578	51915	18510	23950	47190
50	1014.9	0.09351	0.090519	0.093408	61775	21636	27758	55580
70	1571.1	0.10285	0.099337	0.10156	81020	27671	34875	71780
100	2522.3	0.11413	0.10986	0.1114	107860	36167	44459	94240

Таблица 1.5 - Результаты расчёта магнитной системы для положения  $x=-10$

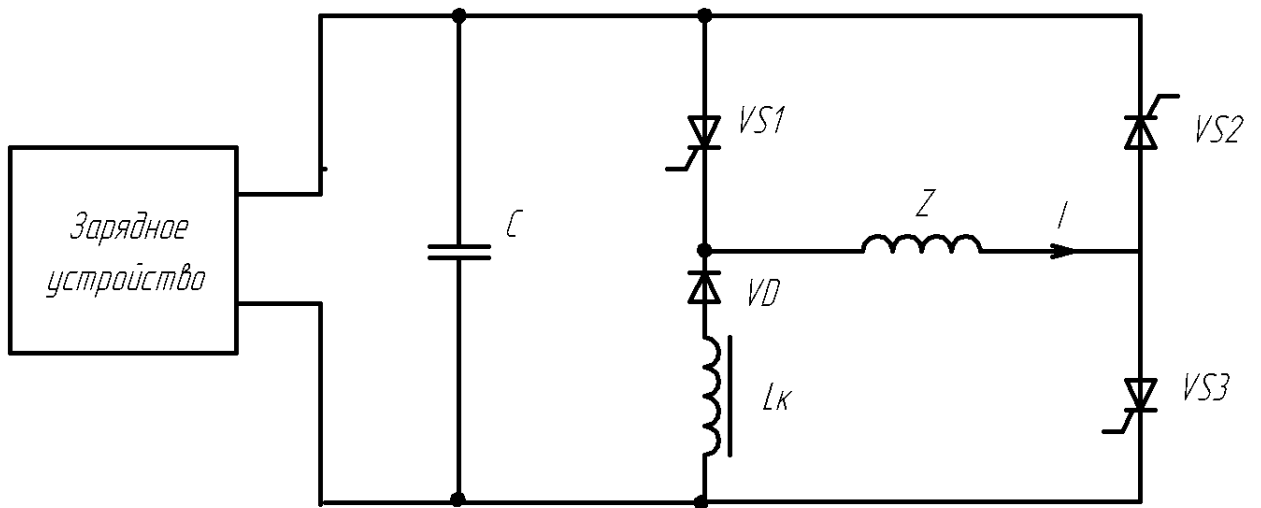
F, кА	W, Дж	Фоб, Вб	Фя, Вб	Фи, Вб	Ря, Н	Ри1, Н	Ри2, Н	Р, кН
0	0	0	0	0	0	0	0	0
995.86	1.4732	0.0029471	0.0020209	0.0032377	38.144	17.862	23.02	39,513
1991.7	5.8925	0.005894	0.0040417	0.0064753	152.56	71.446	92.075	158.041
2987.5	13.257	0.0088407	0.0060621	0.0097125	343.19	160.75	207.15	355.545
4979	36.816	0.014732	0.010101	0.016186	952.89	446.4	575.22	987.255
6970.2	72.098	0.020614	0.014132	0.022651	1869.1	873.9	1125.8	1934
9956.4	146.62	0.029384	0.020138	0.032289	3816.3	1776.6	2291.1	3942
11946	210.21	0.035165	0.024091	0.038643	5470.3	2545.4	3279.2	5647
14922	324.98	0.043671	0.029887	0.047994	8413.5	3915.6	5039.3	8684
16901	411.27	0.049067	0.033556	0.053896	10615	4928.5	6335.5	10940
19843	536.09	0.055846	0.038213	0.061082	14033	6363.7	8169.6	14280
24627	704.46	0.063394	0.043595	0.068687	19323	8214.9	10534	19040
29160	846.91	0.068605	0.047448	0.073836	23779	9660.3	12376	22910
38309	1123.9	0.076588	0.053436	0.081427	32333	12077	15462	29940
47565	1421.4	0.083236	0.058425	0.087475	41106	14284	18229	36810
66287	2073.6	0.094202	0.066709	0.097082	58598	18273	23237	50050
94577	3168	0.10721	0.076502	0.10818	84604	23496	29825	68960

## **2. Система питания**

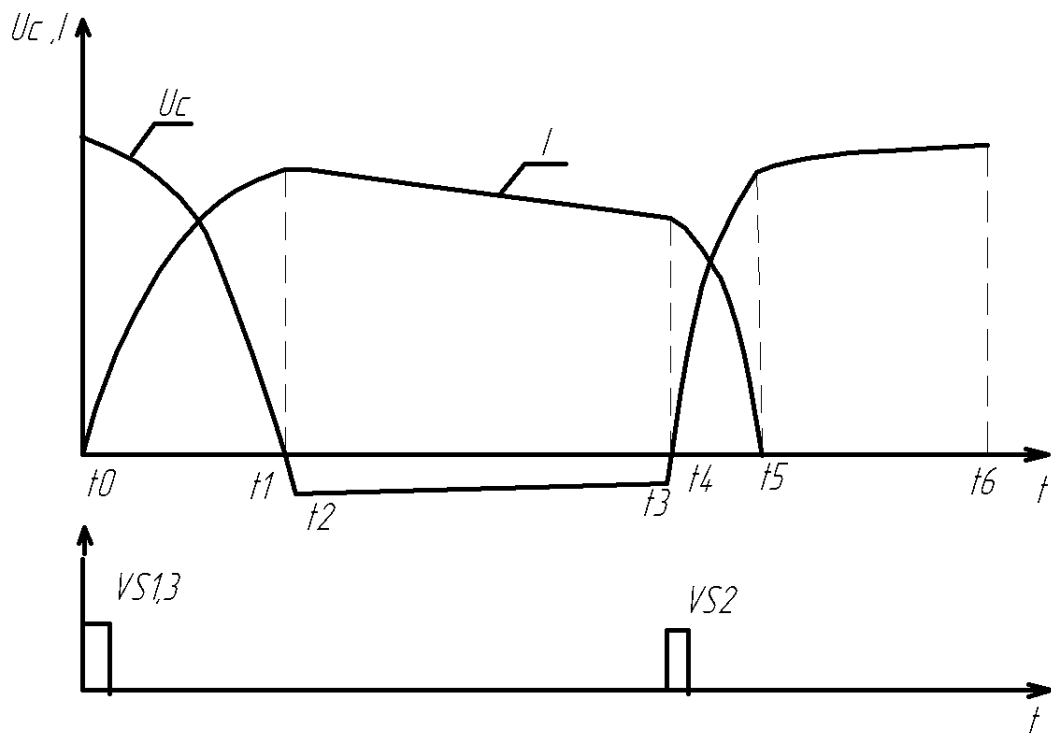
Электромагнитный вибрационный привод содержит якорь и индуктор (рис. 1.8) взаимные колебания которых происходят при подаче импульсов тока в обмотки возбуждения. Появляется необходимость в питании вибрационной установки, а именно в создании такой системы, которая бы поочерёдно подавала импульсы тока то в одну обмотку индуктора, то в другую (эти импульсы приводят к возникновению переменной силы. Эта сила через излучающую плиту воздействует на грунт. Управление работой вибрационной установки осуществляется электрической системой питания. Она позволяет формировать в обмотках вибрационной установки токи заданной формы с изменяющейся частотой, что дает возможность получать необходимые для технологического процесса силовые воздействия.

### **2.1 Обзор вариантов силовой схемы**

Одним из вариантов схемы является схема, представленная на рис.2.1а (формирование импульсов тока на тиристорах).



а) Схема для формирования импульсов тока на тиристорах



б) Временные диаграммы

Рис. 2.1. – Схема формирователя токов на тиристорах.

Данная схема не подходит т.к. время фронта и спада тока однозначно зависит от величины  $C$ , т.е. невозможно поддерживать необходимую форму импульсов при изменении частоты.

На рисунке 2.2а представлена схема для формирования импульсов тока на транзисторах. В качестве силовых приборов используются IGBT-транзисторы.

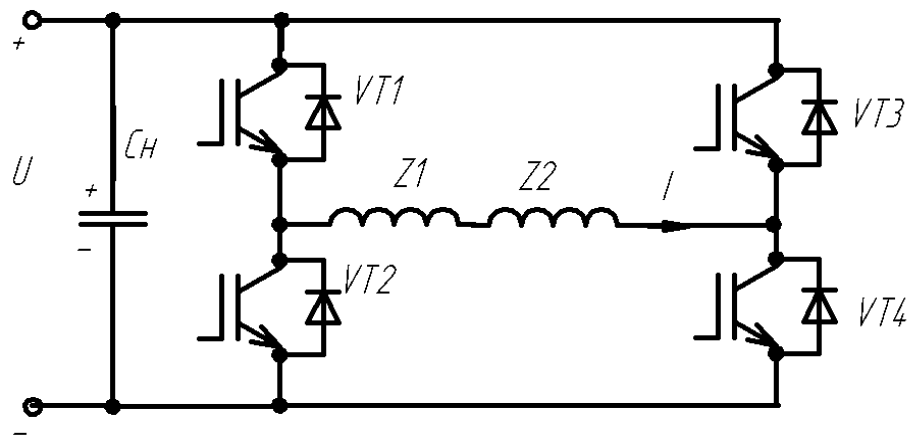
Индуктивности  $Z1$  и  $Z2$  являются обмотками электромагнитов. Накопительная емкость  $C_n$  является общей для коммутатора и повышающего преобразователя. Ток  $I$ , создаваемый в обмотках  $Z1$  и  $Z2$  приводит к появлению силы, тянущей якорь вибрационной установки то одну то в другую стороны.

Схема в определенный момент времени может работать в одном из трех режимов:

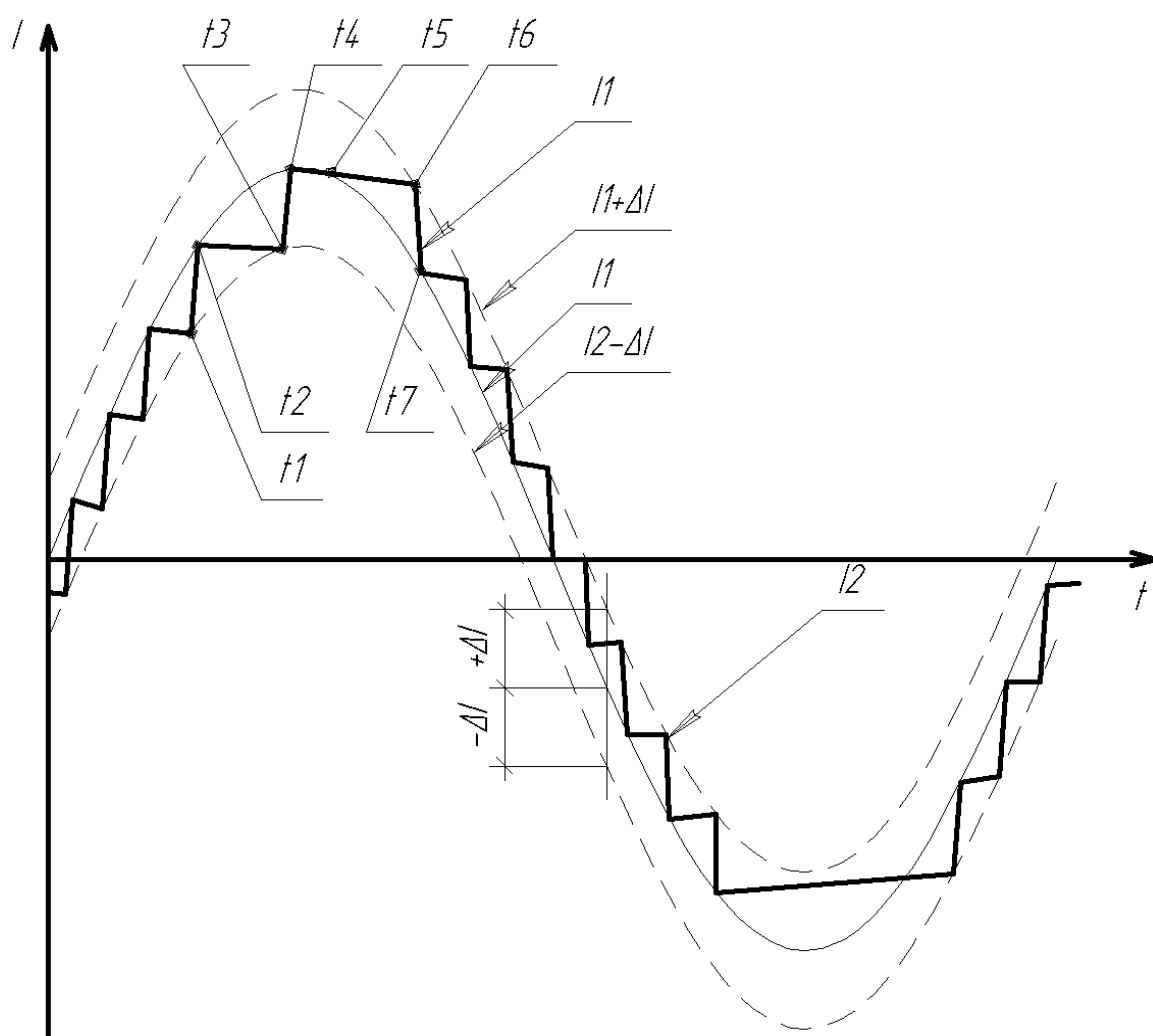
1. «накачка» - транзисторы  $VT1$  и  $VT4$  – открыты, энергия из накопительного конденсатора  $C_n$  поступает в нагрузку  $Z1, Z2$  ток  $I$ , протекая по цепи  $+C_n - VT1 - Z1, Z2 - VT4 - C_n$ , быстро возрастает рис.2.2б.

2. «полка» - один из транзисторов  $VT1$  или  $VT4$  открыт, а другой – закрыт, например  $VT1$  открыт, а  $VT4$  закрыт, тогда ток  $I$ , протекая по цепи  $Z1, Z2 - VD1 - VT4 - VD2 - Z1, Z2$ , медленно спадает из-за активных потерь в полупроводниковых приборах и обмотке.

3. «рекуперация» - оба транзистора закрыты. Энергия из нагрузки рекуперирована в накопительный конденсатор, ток  $I$  в нагрузке  $Z1, Z2$  протекая по цепи  $Z1,2 - VD3 - C_n - VD2 - Z1, Z2$ , быстро спадает.



а) Силовая схема коммутатора -тока



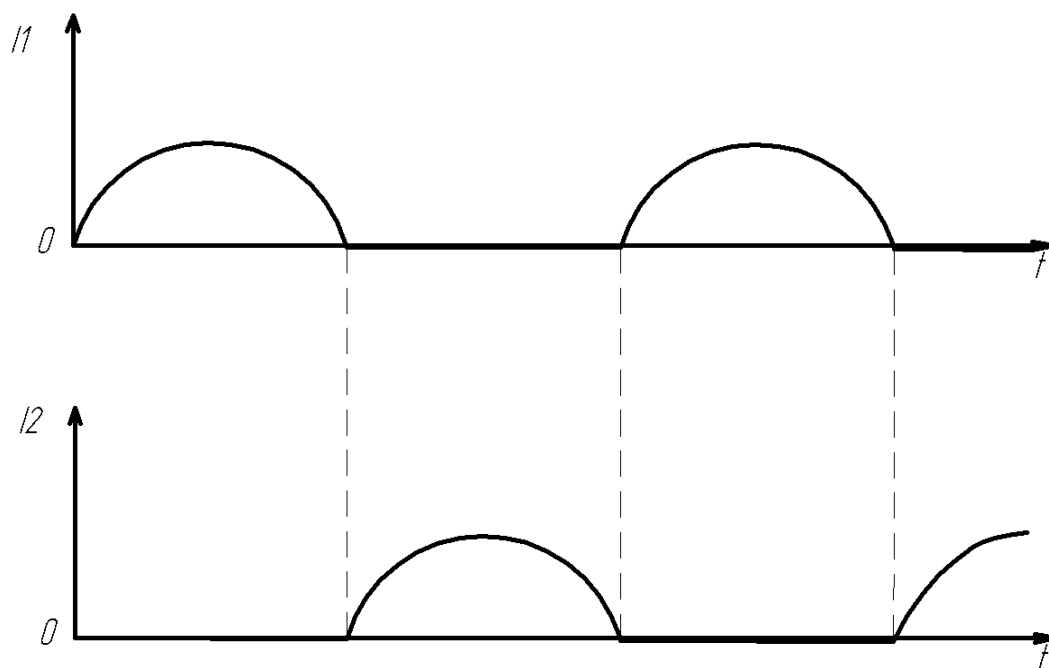
б) Временная диаграмма тока коммутатора

Рис 2.2. – Коммутатор тока на транзисторах.

## 2.2 Исследование перспективности создания источника с подмагничиванием

Для работы вибрационной установки (рис.1.8) необходимо поочередно формировать магнитные потоки  $\Phi_v$  и  $\Phi_n$  с изменением частоты и амплитуды. Т.к. схема предполагается мощная, она не должна загружать сеть реактивной мощностью, что возможно осуществить с помощью ёмкостного накопителя энергии, который заряжается зарядным устройством не потребляющим реактивную мощность из сети.

В простейшем случае (рис.1.8) вибрационная установка имеет две обмотки, в которых поочередно создаются токи(рис.2.3). Видно, что эти импульсы имеют постоянную и переменную составляющие. Есть идея формировать эти импульсы как состоящие из двух составляющих – постоянной  $I_0$  и переменной  $I_1$ .



*$I_1$  – ток через  $Z_1$*

*$I_2$  – ток через  $Z_2$*

Рис. 2.3 – Поочередное формирование токов

Какие выигрыши это может дать?

На рис.2.5 изображены временные диаграммы для случая без подмагничивания, а на рис.2.6 – с подмагничиванием.

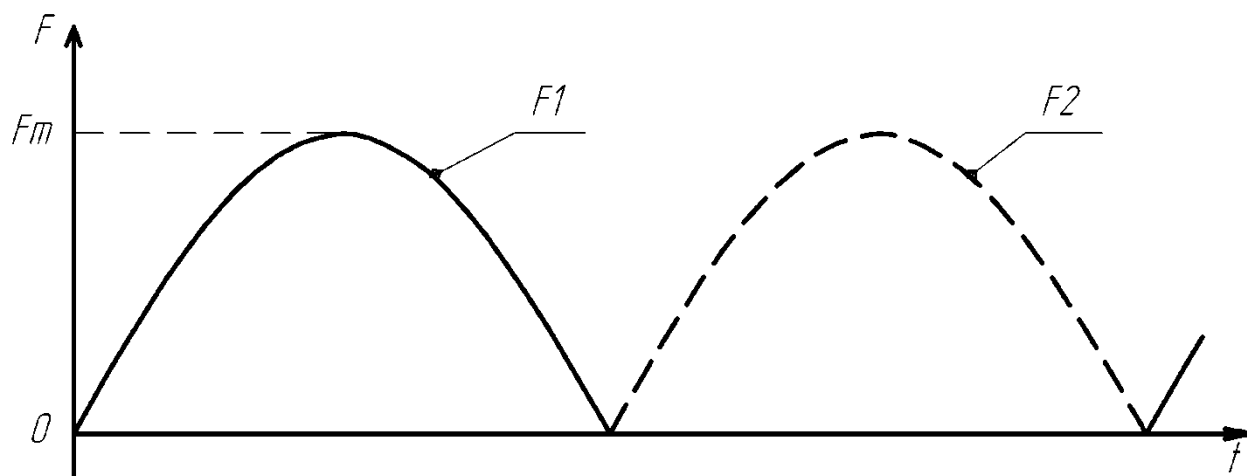


Рис. 2.5 - Временные диаграммы для случая без подмагничивания.

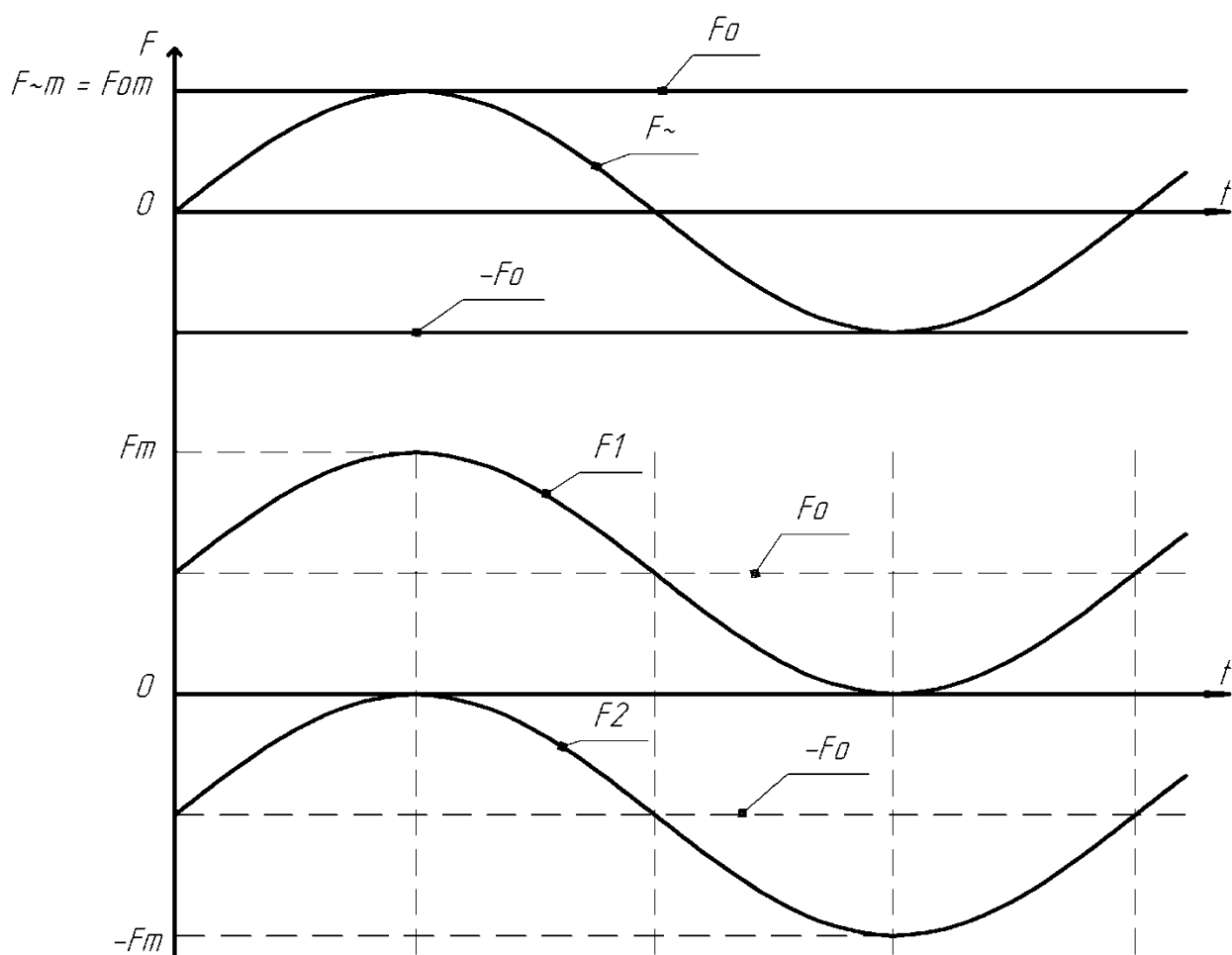


Рис. 2.6 - Временные диаграммы для случая с подмагничиванием.

Видно, что при подмагничивании амплитуда переменного тока уменьшается вдвое и появляется ток подмагничивания. Ток подмагничивания – постоянный и его создание возможно с использованием более простой схемой питания. Итак, амплитуда переменного тока уменьшается вдвое. Однако ток становится двуполярным – для его создания необходима более сложная система питания

Достоинства и недостатки:

- + вдвое меньшее значение амплитуды переменного тока
- более сложная система питания (необходимость двуполярного тока)
- существование тока подмагничивания.

На первый взгляд недостатки перевешивают достоинства. Для создания токов в одной обмотке использование подмагничивания нецелесообразно.

Но в вибрационной установке существует две обмотки, в которых поочередно создаются токи. Энергия присутствует в поле то одной, то другой обмотке. В обычной системе питания вибрационной установки перекачка энергии происходит через полупроводниковые приборы. Появляется идея организовать перекачку энергии не через полупроводниковые приборы, а как-то по другому. Например используя магнитную связь. Введение подмагничивания при определённых условиях предположительно позволит осуществить эту идею. Возможно упростится силовая схема (например за счёт объединения конверторов)

Рассмотрим различные варианты систем с подмагничиванием. Для всех этих систем основным недостатком является необходимость формирования переменного тока, а следовательно более сложная и не надёжная система питания. Рассмотрим остальные особенности схем более подробно.

### 2.2.1 Одинарная обмотка, один мост.

Система представлена на рисунке 2.7.



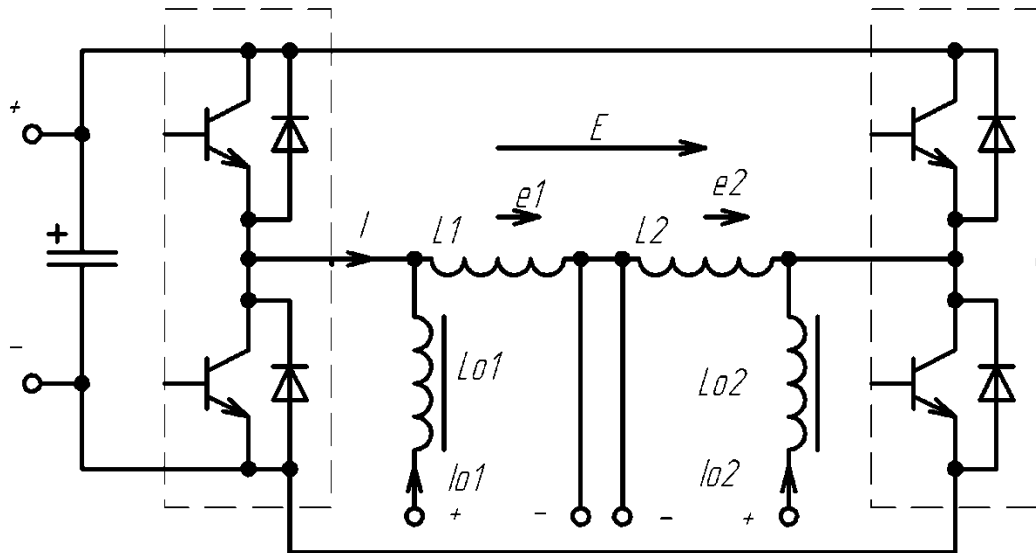


Рис. 2.7 – Одинарная обмотка, один мост.

По данной схеме имеем:

$$e_1 = L_{01} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (2.1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{e_1}{L_{01}} = \frac{E/2}{L_{01}}$$

(2.2),

где:  $e_1$ -падение напряжения на первой обмотке;

$e_2$ -падение напряжения на второй обмотке;

$E$ -сумма падений напряжений на первой и второй обмотке;

$L_{01}$  и  $L_{02}$ -обмотки подмагничивания.

Из выражения (2.2) видно, что в данной системе для поддержания  $I_{01} = const$  нужно использовать два дросселя  $L_{01}$  и  $L_{02}$ . В целом по схеме имеем:

По данной схеме делаем следующий вывод:

«+» достоинство, «-» недостаток

-  $L_0$  – две нужны;

- нет гальвано развязки переменной и постоянной составляющих;

+ один инвертор;

+ одинарная обмотка.

### 2.2.2 Двойная обмотка, один мост (рис.2.8)

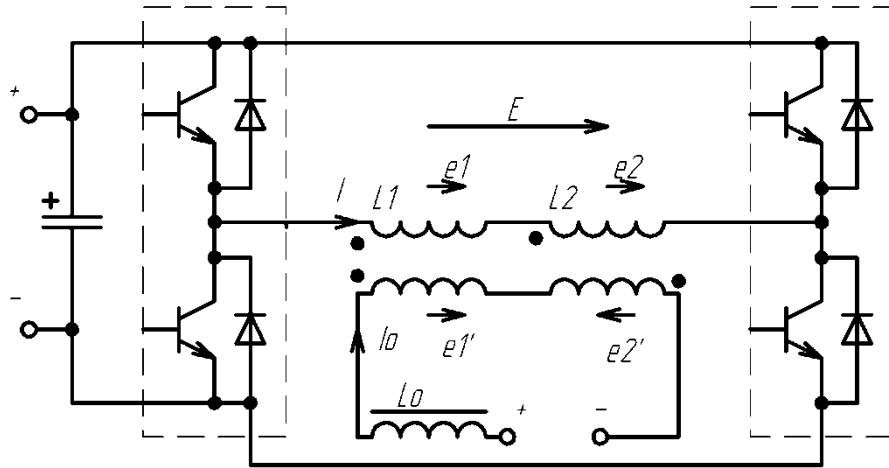


Рис. 2.8 – Двойная обмотка, один мост.

По этой системе имеем:

$$\begin{aligned} e_1' &= e_1 \cdot k_T \\ e_2' &= -e_2 \cdot k_T \end{aligned} \quad (2.3)$$

где  $k_T$  - коэффициент трансформации;

$e_1'$  - напряжение первой обмотки подмагничивания;

$e_2'$  - напряжение второй обмотки подмагничивания;

$I_0$  - ток подмагничивания.

При  $I_0 = const$

$$\begin{aligned} e_1 &= L_1 \cdot \frac{dI}{dt} \\ e_2 &= L_2 \cdot \frac{dI}{dt} \end{aligned}$$

(2.4)

При  $L_1 = L_2$ ,  $e_1 = e_2$  имеем:

$$E' = e_1' - e_2' = e_1 \cdot k_T - e_2 \cdot k_T = 0 \quad (2.5)$$

Отсюда следует, что  $L_0$  может быть мала или вовсе не нужна.

По данной схеме делаем следующий вывод:

- +  $L_0$  – одна, не нужна;
- + гальваноразвязка переменной и постоянной составляющих
- + один инвертор
- двойная обмотка

### 2.2.3 Одинарная обмотка, два моста (рис.2.9)

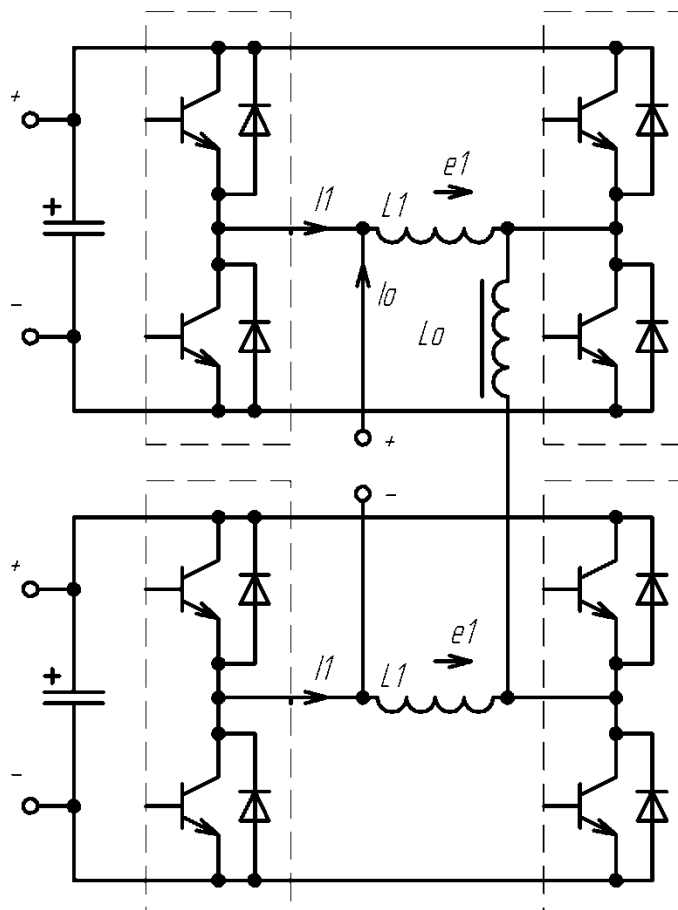


Рис. 2.9 – Одинарная обмотка, два моста.

При  $I_1 = I_2, e_1 = e_2$ :

$$e_0 = e_1 - e_2 = 0, \quad (2.6)$$

Т.е. при симметричной работе системы напряжение дросселя  $L_0$  равно нулю. Отсюда следует, что  $L_0$  может быть мала или вовсе не нужна.

По данной системе делаем следующий вывод:

- +  $L_0$  – одна, не нужна;
- нет гальваноразвязки переменной и постоянной составляющих
- два инвертора
- + одинарная обмотка

Все системы имеют свои достоинства и свои недостатки. Из трех перечисленных схем наиболее приемлемой кажется система с двойной обмоткой и одним мостом (рис.2.8). Необходимость изготовления двойной

обмотки проявляется только при изготовлении обмоток, что технически не очень сложно, зато необходим только один конвертор и нет необходимости в большой индуктивности  $L_0$ .

#### 2.2.4 Плюсы и минусы подмагничивания.

Рассмотрим систему с двойной обмоткой и одним мостом (рис.2.8). Рассчитаем габаритные мощности схемы без подмагничивания и с подмагничиванием.

а) Габаритная мощность системы без подмагничивания.

Габаритная мощность:

$$N_{\Gamma} = I_m \cdot U_m, \quad (2.7)$$

где  $I_m$  и  $U_m$  - максимальный ток и напряжение соответственно.

Напряжение на индуктивности:

$$L \frac{dI}{dt} = U_L. \quad (2.8)$$

Индуктивность:

$$L = w^2 \cdot G \quad (2.9)$$

где  $G$ - магнитная проводимость.

Подставляя (2.9) в (2.8) имеем:

$$U_L = w^2 \cdot G \cdot \frac{dI}{dt} \quad (2.10)$$

Магнитодвижущая сила равна:

$$F = I \cdot w \quad (2.11)$$

Витковое напряжение:

$$U_w = G \cdot \frac{dF}{dt} = \frac{U_L}{w} \quad (2.12)$$

Учитывая, что  $U_m = U_L$ , подставим (2.12) в (2.7):

$$N_{\Gamma} = I_m \cdot w \cdot \frac{U_m}{w} = F_m \cdot U_w \quad (2.13)$$

Учитывая, что :

$$\left(\frac{dF}{dt}\right)_{MAX} = \omega \cdot F_m, \quad (2.14)$$

подставим (2.12) и (2.14) в (2.13), получим:

$$N_{\Gamma} = F_m \cdot U_m = F_m \cdot G \cdot \left(\frac{dF}{dt}\right) = G \cdot \omega \cdot F_m^2 \cdot 2_{\text{моста}} \quad (2.15)$$

б) Габаритная мощность системы с подмагничиванием.

Габаритная мощность схемы с подмагничиванием определяется аналогично с помощью формул (2.7)-(2.14), с той лишь разницей, что амплитуда переменного тока уменьшается вдвое, т.е. становится равной  $\frac{F_m}{2}$ .

Запишем выражение (2.15) для случая с подмагничиванием:

$$N_{\Gamma} = \left(G \cdot \omega \cdot \left(\frac{F_m}{2}\right)^2\right) \cdot 2_{\text{обмотки}} \quad (2.16)$$

в) Площадь паза под обмотку в схеме без подмагничивания.

Учитывая, что плотность тока  $i = const$ , найдём действующее значение намагничивающей силы:

$$F_d = \frac{F_m}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{Q}, \quad (2.17)$$

где Q-скважность,

$$F_d = \frac{F_m}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1} = \frac{F_m}{2} \quad (2.18)$$

Площадь сечения меди:

$$S = \frac{F_d}{i_d} \quad (2.19)$$

где  $i_d$  –действующее значение плотности тока.

Подставим (2.18) в (2.19), имеем:

$$S = \frac{F_d}{2 \cdot i_d} \quad (2.20).$$

г) Площадь паза в системе с подмагничиванием.

Рассмотрим площадь паза для создания переменной составляющей тока. Амплитуда переменной составляющей тока равна  $\frac{F_m}{2}$ , следовательно действующее значение намагничивающей силы:

$$F_{d.VAR} = \frac{\frac{F_m}{2}}{\sqrt{2}} = \frac{F_m}{2\sqrt{2}} \quad (2.21)$$

Площадь паза по (2.19) получается:

$$S_{VAR} = \frac{F_m}{2\sqrt{2} \cdot i_d} \quad (2.22)$$

Для постоянной составляющей тока площадь паза:

Действующее значение намагничивающей силы:

$$F_{d.CONST} = \frac{F_m}{2} \quad (2.23)$$

Площадь паза меди равна:

$$S_{CONST} = \frac{F_m}{2 \cdot i_d} = \sqrt{2} \cdot S_{VAR} \quad (2.24)$$

Итого площадь паза для схемы с подмагничиванием:

$$S = S_{VAR} + S_{CONST} = \frac{F_m}{2 \cdot i_d} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = S_{VAR} \left(1 + \sqrt{2}\right) \quad (2.25)$$

Основные плюсы и минусы схемы с подмагничиванием свели в табл. 2.1.

Таблица 2.1 - Плюсы и минусы использования подмагничивания.

Параметр	Использование подмагничивания		Досто- во/Недост. подмагни- чивания
	Нет	Есть	
Кол-во мостов	2	1	+
Вид моста	полумост	полный	-
Габаритная мощность схемы $N_T$	$G \cdot \omega \cdot F_m^2 \cdot 2 \text{ моста}$	$\left( G \cdot \omega \cdot \left( \frac{F_m}{2} \right)^2 \right) \cdot 2 \text{ обм.}$	+
Ток подмагничивания, $i_d$	-	$F_0 = \frac{F_m}{2}$	-
Площадь паза меди, $S$	$\frac{F_d}{2 \cdot i_d}$	$\frac{F_m}{2 \cdot i_d} \cdot \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$	-

## 2.3 Повышающий преобразователь

### 2.3.1 Блок-схема системы питания.

Блок-схема системы питания представлена на рисунке 2.10. Она включает в себя: входной автомат и трансформатор, выпрямитель, повышающий преобразователь, накопительную конденсаторную батарею, коммутатор тока, формирователь тока подмагничивания, систему управления.

Рассмотрим назначение отдельных блоков системы питания:

- а) Входной автомат и трансформатор предназначены для питания системы.
- б) Для выпрямления напряжения используем выпрямитель.
- в) Повышающий преобразователь.
- г) Схема не должна загружать сеть реактивной мощностью, что возможно осуществить с помощью ёмкостного накопителя энергии

(накопительная конденсаторная батарея), который заряжается зарядным устройством не потребляющим реактивную мощность из сети.

д) Коммутатор тока предназначен для создания в обмотках электромагнита вибрационной установки тока заданной формы.

е) Формирователь тока подмагничивания – для создания постоянного тока подмагничивания.

ж) Система управления осуществляет управление силовой схемой.

На основе описанной блок-схемы была разработана силовая схема системы питания, изображённая на рисунке 2.11.

### 2.3.2 Расчёт повышающего преобразователя.

Силовая часть ППН включает (рис.2.11):

- датчик тока DA1;
- силовой транзистор VT1;
- силовой быстродействующий диод VD5;
- емкостной накопитель C6;
- защитную цепочку VD4-R1-C5;
- защитные варисторы RV1-2;
- датчик напряжения DV1 с нагрузочным резистором R2.

Выход ППН подключен к накопительной конденсаторной батарее C7. Один из конденсаторов батареи установлен вблизи от выхода ППН и входа коммутатора (на расстоянии около 20 см), для уменьшения уровня коммутационных перенапряжений на транзисторах ППН и коммутатора (из-за небольшой паразитной индуктивности соединительных проводов). Остальные конденсаторы батареи удалены от установки на расстояние 1-2м.

В качестве исходных данных для расчета повышающего преобразователя зададимся: средним входным напряжением от выпрямителя  $U_{двх}=513В$ , средней мощностью нагрузки  $P=10кВт$ , допустимой пульсацией входного тока  $\delta=50\%$ , частоту коммутации транзистора  $f=10кГц$ .



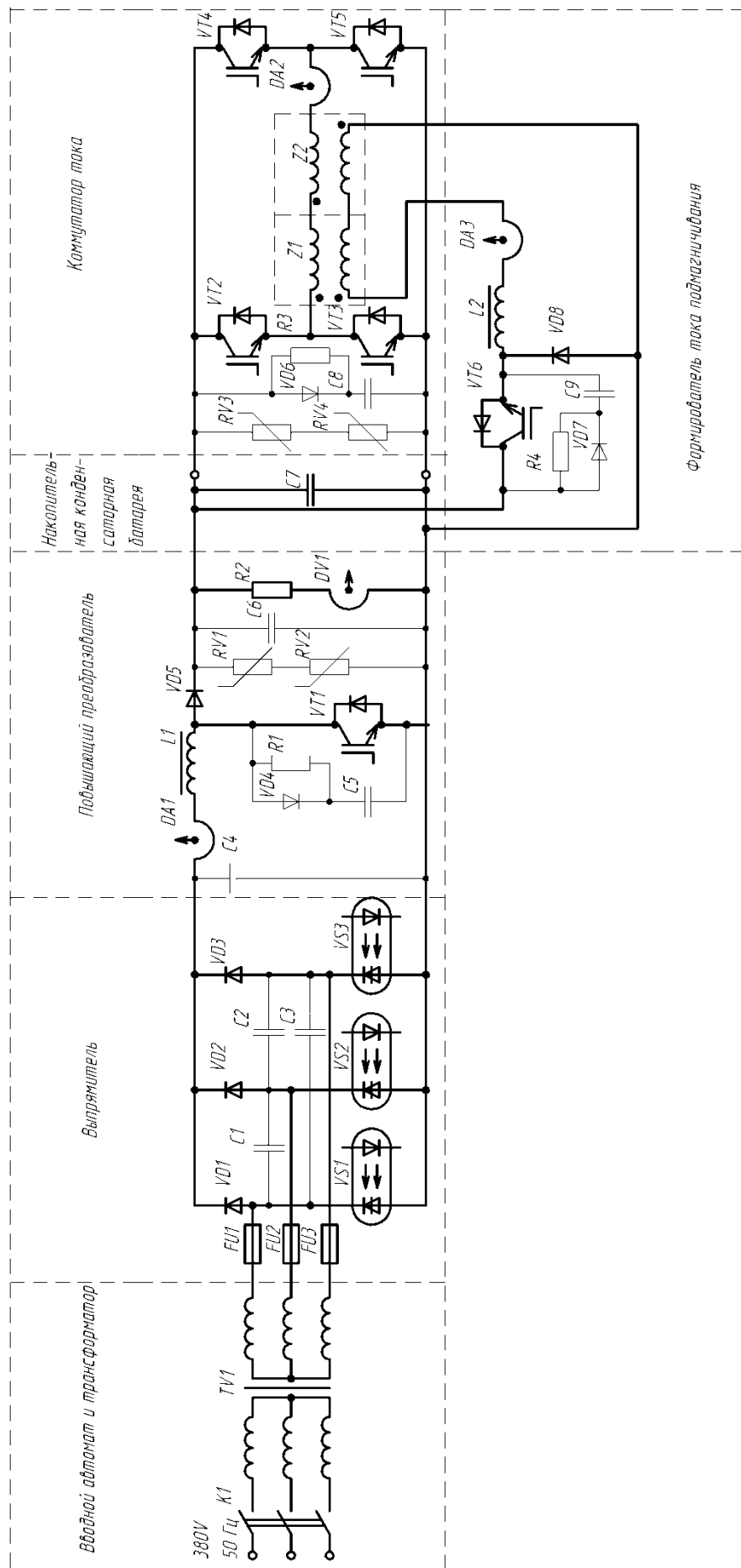


Рис. 2.11. – Силовая схема системы питания

а) Средний входной ток:

$$I_{cp} = I_{cpLd} = \frac{P_{6вых}}{U_{6вых}} = \frac{10000}{513} = 19,5 A. \quad (2.26)$$

б) Размах пульсаций тока дросселя в абсолютных величинах

$$\Delta I = \delta \cdot I_{cpLd} = 0,5 \cdot 19,5 = 9,8 A. \quad (2.27)$$

в) Силовая схема ППН представлена на рисунке 2.12а. Работа ППН осуществляется в два интервала (рис.2.12б). В течении первого интервала  $t_1$  транзистор VT открыт, ток протекает по цепи:  $+U_{вх} - L_d - VT - U_{вх}$  и возрастает (энергия в дросселе увеличивается, к дросселю приложено напряжение  $U_{Ld}=+U_{вх}$ ), диод VD закрыт и не проводит ток. В течении второго периода  $t_2$  транзистор VT закрыт, ток проходит по пути  $+U_{вх} - Ld - VD - C_H - U_{вх}$  и уменьшается (энергия, накопленная в дросселе, складывается с энергией из сети и переходит в конденсатор нагрузки. К дросселю приложено напряжение  $U_{Ld}=U_{вх}-U_{вых}$ ) [9].

За период  $t_1$  ток увеличивается до величины  $I_{max}$ , а за период  $t_2$  уменьшается до величины  $I_{min}$ . Т.к. среднее значение тока дросселя  $I_{max}$ ,  $I_{min}$ :

$$I_{cp} = (I_{max} + I_{min}) / 2, \quad (2.28)$$

а размах пульсаций

$$\Delta I = I_{max} - I_{min}. \quad (2.29)$$

Тогда  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  через  $\Delta I$  выразим:

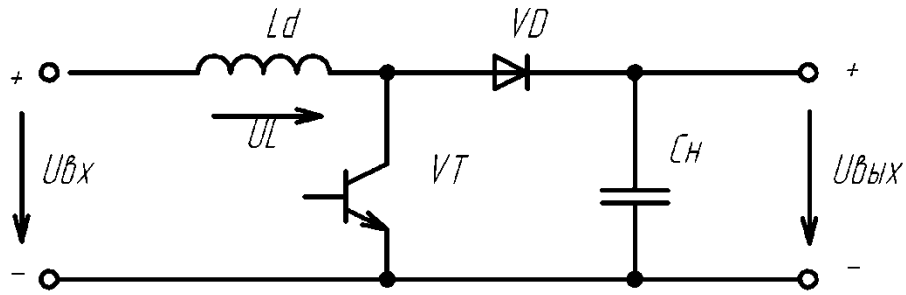
$$I_{max} = I_{cp} + \Delta I / 2 = 19,5 + 9,8 / 2 = 24,4 A, \quad (2.30)$$

$$I_{min} = I_{cp} - \Delta I / 2 = 19,5 - 9,8 / 2 = 14,6 A. \quad (2.31)$$

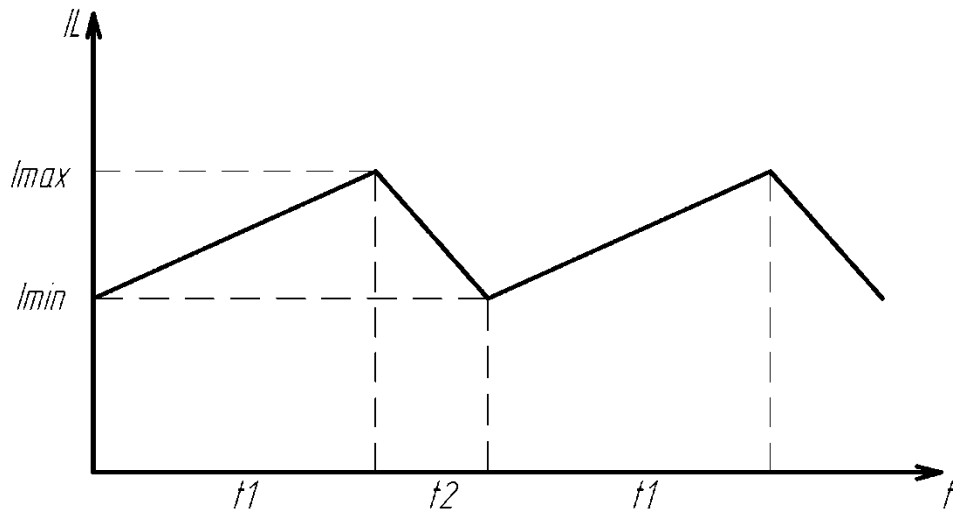
Учитывая амплитудный ток дросселя и напряжение на выходе преобразователя, в качестве транзистора и диода (VT1 и VD5) выбран IGBT транзистор типа МДТКИ-50-12 (50А, 1200В). Производимый Саранским заводом полупроводниковых приборов.

Резистор R2 выбираем ПЭВ-10-150кОм±5%

Датчик напряжения DV1 выбираем LV25-P



а) силовая схема



б) ток в дросселе

Рис. 2.12 – Повышающий преобразователь

г) Т.к. к дросселю на 1 этапе приложено напряжение  $U_{двх}$ , увеличение тока можно описать:

$$U_{Ld} = U_{двх} = L_d \cdot dI/dt \quad (2.32)$$

Упростили:

$$U_{двх} = L_d \cdot \Delta I / t_1 \Rightarrow t_1 = L_d \cdot \Delta I / U_{двх} \quad (2.33)$$

Т.к. на 2 этапе выходное напряжение практически не изменяется, напряжение индуктивности:

$$U_{Ld} = U_{двых} - U_{двх} = L_d \cdot \Delta I / t_2 \quad (2.34)$$

Откуда из (2.32)  $t_2$

$$t_2 = L_d \cdot \Delta I / (U_{двых} - U_{двх}) \quad (2.35)$$

д) Далее из формулы для частоты преобразователя  $f = 1/(t_1 + t_2)$  выразим значение индуктивности, необходимой  $f = 10 \text{ кГц}$ :

$$L = \frac{1}{f \cdot \left( \frac{\Delta I}{U_{dвх}} + \frac{\Delta I}{U_{dвых} - U_{dвх}} \right)} = \frac{1}{10000 \cdot \left( \frac{9,8}{513} + \frac{9,8}{900 - 513} \right)} = 0,0023 \text{ Гн} \quad (2.36),$$

далее по 2.33 и 2.35 выражаем  $t_1$  и  $t_2$ :

$$U_{d_{вх}} = L_d \cdot \Delta I / t_1 \Rightarrow t_1 = L_d \cdot \Delta I / U_{d_{вх}} = 0,0023 \cdot 9,8 / 513 = 43 \text{ мкс}$$

$$t_2 = L_d \cdot \Delta I / (U_{d_{вых}} - U_{d_{вх}}) = 0,0023 \cdot 9,8 / (900 - 513) = 57 \text{ мкс}.$$

е) Амплитуда энергии в дросселе

$$W_L = \frac{LI_{\max}^2}{2} = \frac{0,0023 \cdot 24,4^2}{2} = 0,685 \text{ Дж} . \quad (2.37)$$

ж) Расчет индуктивности (дросселя).

Дроссель выберем из кольцеобразного аморфного железа, производства “Гаммамет”:

Средняя линия для магнитного потока

$$l_{cp} = \pi \frac{d + D}{2} = \pi \frac{40 + 80}{2} = 0,188 \text{ м} \quad (2.38)$$

Индукция насыщения  $B_m = 0,8 \text{ Тл}$ .

По закону полного тока:

$$\begin{cases} \oint H \cdot l_{cp} = F; \\ \mu\mu_0 H = B. \end{cases} \Rightarrow \frac{B}{\mu\mu_0} l_{cp} = F, \quad (2.39)$$

где  $\mu$ - абсолютная магнитная проницаемость,  $\mu_0$ - относительная магнитная проницаемость,  $F$ - намагничивающая сила,.

Выразим нужное число витков.

$$\frac{B_m}{\mu\mu_0} l_{cp} = F_m = I_m w \Rightarrow w = \frac{B_m}{\mu\mu_0 I_m} l_{cp}. \quad (2.40)$$

Далее найдем

$$\begin{cases} W = \frac{GF^2}{2} \\ F = \frac{\Phi}{G} \end{cases} \Rightarrow W = \frac{\Phi^2}{2G}, \quad (2.41)$$

где  $G$  – проводимость магнитной цепи,  $\Phi$  – магнитный поток.

$$\Phi = B \cdot S; G = \mu\mu_0 \frac{S}{l_{cp}}, \quad (2.42)$$

объединяя 2.41 и 2.42 получим:

$$W = \frac{B^2 S^2}{2\mu\mu_0 S} l_{cp} = \frac{B^2 S}{2\mu\mu_0} l_{cp} \Rightarrow S = \frac{2\mu\mu_0 W}{B^2 l_{cp}}. \quad (2.43)$$

Число колец, необходимых для дросселя:

$$N = \frac{S}{S_0}, \quad (2.44)$$

где  $S_0$ - площадь сечения одного кольца.

Для  $L=0,0023$  Гн из (2.36) выразим эннергии

$$W_L = \frac{LI_{\max}^2}{2} = \frac{0,0023 \cdot 24,4^2}{2} = 0,685 \text{ Дж}. \quad (2.45)$$

Если взять магнитопровод типоразмера ГМ54ДС500 размерами 80x40x20 число витков и число колец по формулам (2.40, 2.44)

$$N = \frac{2\mu\mu_0 W_L}{B_m^2 l_{cp} S_0} = \frac{2 \cdot 140 \cdot \mu_0 \cdot 0,685}{0,8^2 \cdot 0,188 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 6 \text{ шт};$$

$$w = \frac{B_m}{\mu\mu_0 I_m} l_{cp} = \frac{0,8}{140 \mu_0 \cdot 24,4} \cdot 0,188 = 32 \text{ вит}. \quad (2.46)$$

Полученный дроссель имеет характеристики  $I_m=26,8$ А,  $L=2,29 \cdot 10^{-3}$  Гн  $W=0,823$ Дж.

Для осущетвления выбора провели аналогичных расчеты для других типоразмеров колец и результаты свели в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Необходимое число витков и колец.

Типоразмер магнитопровода	Число витков, w	Число колец, N
ГМ54ДС500 80x40x20	30	18
ГМ54ДС140 80x40x20	32	6
ГМ54ДС90 80x40x20	55	3
ГМ54ДС45 80x40x20	109	2

По результатов расчетов исходя из соображений экономии выбрали магнитопровод ГМ54ДС140. Необходимо изготавливать дроссель из 6 колец и 32 витков провода.

## 2.4. Коммутатор тока

Расчет коммутатора тока, как и повышающего преобразователя, производится по величинам :

-прикладываемому к силовым приборам напряжению;

-амплитудному току силовых приборов;

Максимальное повторяющееся напряжение на коммутирующих приборах не должно превышать 0,8 от их паспортного значения. В нашем случае значение напряжения на транзисторах и диодах составляет  $U_{сн}=800В$ . Поэтому выберем транзисторы и диоды на напряжение не менее  $U=800/0.8=1000В$ .

Максимальный ток, протекающий через приборы, определяется параметрами нагрузки (числом витков) и зависит от требований, предъявляемых к системе.

Максимальное быстродействие приборов, требуемое для работы данной схемы, можно оценить исходя из предположения максимальной рабочей частоты, необходимой для формирования сигнала в нагрузке.

Удобно для построения данной схемы (в качестве VT1,VT2,VT3,VT4) использовать полупроводниковые модули. Ближайшими по совокупности рассмотренных параметров являются модули типа М2ТКИ2-200-12  $I_m=200А$ ,  $U_m=1200В$ . Модули имеют гальванически развязанное от электрических цепей приборов металлическое основание, являющееся тепло отводом, что облегчает модульное построение силовой схемы установки.

Мощные полупроводниковые транзисторы коммутатора и ППН в ходе своей работы из за быстрых коммутаций токов могут создавать перенапряжения. Для борьбы с этими явлениями используют защитные цепочки (ниже приведён выбор их параметров). Дополнительно к рассчитанным защитным цепочкам параллельно к транзисторам последовательно установлены два защитных варистора RV3,4 типа СН2-2А-470В±10% на квалификационное напряжение 470В.

2.4.1 Энергия магнитного поля равна (согласно пункту 1.2):

$$W = L \frac{I^2}{2} = G \frac{F_M^2}{2} = 343 \text{ Дж} \quad (2.52)$$

Найдём габаритную мощность схемы:

$$N_r = U \cdot I = \left( G \cdot \omega \cdot \frac{F_M^2}{2} \right) \cdot 2 = W \cdot \omega = 343 \cdot 502.64 = 172 \text{ кВт} \quad (2.53)$$

Исходя из требований техники безопасности задаёмся  $U=900\text{В}$

Найдём ток:

$$I = \frac{N_r}{U} = \frac{172405}{900} = 191,6 \text{ А} \quad (2.54)$$

Найдём число витков:

$$w = \frac{F}{I} = \frac{14000}{191,6} = 73,07 \quad (2.55)$$

Принимаем  $w=73$ .

#### 2.4.2 Защитные цепочки для коммутатора тока.

Защитная цепочка для коммутатора тока состоит из элементов С8, VD6, R3.

Выберем С8=1мкФ, К75-17-1000В-8мкФ±10%.

В процессе выбора VD6 обратили внимание, что он способен кратковременно выдерживать ток превышающий номинальный в 10 раз:

$$I_d = \frac{I}{10} = \frac{191,6}{10} = 19,2 \text{ А} \quad (2.56)$$

Исходя из полученного результата диод VD6 выбираем на 20А марки HLA30PP120.

Выбираем резистор R3 ПЭВ-2-100Ом±10%.

Дополнительно к рассчитанной защитной цепочки параллельно к транзистору VT1 установлены защитные варисторы RV1,2 типа СН2-2А-470В±10% на квалификационное напряжение 470В.

Датчик тока DA2 выбираем фирмы LEM.

Для дальнейшего расчёта зададимся током подмагничивания  $I_p=30\text{А}$  и посчитаем число витков обмотки подмагничивания:

$$w = \frac{F}{I_p} = \frac{14000}{30} = 476 \quad (2.57)$$

Рассчитаем активные потери в обмотке вибрационной установки. Из (2.25)

выразим  $j_d$ :

$$j_d = \frac{F_m \cdot (1 + \frac{1}{\sqrt{2}})}{2 \cdot S} = \frac{14000 \cdot (1 + \frac{1}{\sqrt{2}})}{2 \cdot 3.3 \cdot 10^{-3}} = 3621 \text{ кА/м}^2 \quad (2.58)$$

Потери в обмотке для переменной составляющей равны:

$$W_{VAR} = \rho \cdot j_d^2 \cdot S_{CU.VAR} \cdot L_{CP} = 1,8 \cdot 10^{-8} \cdot (3621 \cdot 10^3)^2 \cdot 820 \cdot 10^{-6} \cdot 1.53 = 288 \text{ Вт} \quad (2.59)$$

где с учётом (2.25):

$$S_{CU.VAR} = S_{VAR} \cdot K_3 = \frac{S}{1 + \sqrt{2}} \cdot K_3 = \frac{3.3 \cdot 10^{-3}}{1 + \sqrt{2}} \cdot 0.6 = 820 \cdot 10^{-6} \text{ м} \quad (2.60)$$

$$L_{CP} = \pi \cdot (R_{213} + R_{273}) = 3.14 \cdot (0.213 + 0.273) = 1.53 \text{ м} \quad (2.61).$$

Потери в обмотке для постоянной составляющей равны:

$$W_{CONST} = \rho \cdot j_d^2 \cdot S_{CU.CONST} \cdot L_{CP} = 1,8 \cdot 10^{-8} \cdot (3621 \cdot 10^3)^2 \cdot 1160 \cdot 10^{-6} \cdot 1.53 = 419 \text{ Вт} \quad (2.62)$$

где с учётом (2.24):

$$S_{CU.CONST} = S_{CONST} \cdot K_3 = S_{VAR} \cdot \sqrt{2} \cdot K_3 = \frac{3.3 \cdot 10^{-3}}{1 + \sqrt{2}} \cdot \sqrt{2} \cdot 0.6 = 1160 \cdot 10^{-6} \text{ м} \quad (2.63)$$

по (2.61)  $L_{CP} = 1,53 \text{ м}$

Найдём максимальную мощность, которую сможет выдавать формирователь тока нагрузки:

$$W_{MAX} = I_{II} \cdot U_{ВЫХ} = 30 \cdot 900 = 27 \text{ кВт} \quad (2.64)$$

Сравнивая результаты (2.64) и (2.62) получаем, что  $W_{max} \gg W_{const}$ , следовательно ток подмагничивания выбран верно.

## 2.5 Формирователь тока подмагничивания.

2.5.1 В связи со схожестью величины тока в повышающем преобразователе и системе подмагничивания выбираем параметры элементов защитной цепочки для VT6 такие же как для VT1 (пункт 2.3.2з), т.е.:

а) С9 выбираем К78-2-5,5нФ на 1000В;



б) диод VD7 выбираем 1N5408

в) резистор R4 выбираем ПЭВ-25-620Ом±10%.

### 2.5.2 Выбор дросселя.

Дроссель L2 должен накапливать энергию примерно равную энергии запасаемой в магнитном поле вибрационной установки. Предварительно выбираем L2 с максимальной энергией равной энергии магнитного поля (2.52). Если при практических экспериментах окажется, что пульсации тока в системе подмагничивания не значительны, то L2 может быть уменьшена. Найдём L2:

$$W = \frac{L2 \cdot I_{II}^2}{2} \quad (2.65)$$

отсюда L2:

$$L2 = \frac{2W}{I_{II}^2} = \frac{2 \cdot 343}{30^2} = 0,76 Гн \quad (2.66)$$

С учётом полученных результатов выбираем дроссель L2: 0,76Гн-35А  
Аналогично пункту 2.4 выбрали силовой управляемый прибор- IGBT транзистор (со встроенным диодом) марки МДТКИ-50-12.

## 2.6 Накопительная конденсаторная батарея

Выберем накопительную конденсаторную батарею.

Предположим, что возврат в C7 запасённой в поле энергии 343Дж должно привести к увеличению напряжения на C7 на 80В:

$$W = \frac{C7}{2} \cdot \left[ \left( U_{ВЫХ} + \Delta U \right)^2 - U_{ВЫХ}^2 \right] = 343 Дж \quad (2.67)$$

отсюда выразим C7:

$$C7 = \frac{2 \cdot W}{\left[ \left( U_{ВЫХ} + \Delta U \right)^2 - U_{ВЫХ}^2 \right]} = \frac{343 \cdot 2}{\left[ \left( 100 + 80 \right)^2 - 100^2 \right]} = 4561 мкФ \quad (2.68)$$

C7 составим из конденсаторов К57-17- 50мкФ,1000В (90 штук).

## 2.7 Выпрямитель и входной автомат.

Для сглаживания пульсаций тока, потребляемой повышающим преобразователем, используем конденсаторы C1,C2,C3 (в одном корпусе три конденсатора) типа КБГ-МП  $3 \times 1 \text{ мкФ} \pm 20\%$ ,  $U_p=380\text{В}$ .

Для защиты схемы от КЗ (короткого замыкания) используем предохранители FU1,2,3. Средний ток предохранителей:

$$I = \frac{P}{U_{\text{ВЫХ.}} \cdot \frac{2}{3}} = \frac{10000}{900 \cdot \frac{2}{3}} = 16 \text{ А} \quad (2.69)$$

Выбирали предохранители типа ВПЗБ-1В ( 25А,380В).

Выберем три диодно-тиристорных модуля (VS1,VD1; VS2,VD2; VS3,VD3) марки МДТО16-9-3И.

Автоматический выключатель выбираем S213-20А, 380В.

## 2.6. Система управления

Блок-схема системы управления (СУ) изображена на рис.2.13. Она необходима для для управления силовой частью электромагнитной вибрационной установки. Состоит из блоков:

- а) Блок питания.
- б) Блок управления выпрямителем - управляет полууправляемым выпрямителем.
- в) Блок управления повышающим преобразователем.
- г) Датчик обратной связи, подающий в блок управления сигнал тока дросселя
- д) Драйвер транзистора используется для гальванической развязки и управлением транзистором.

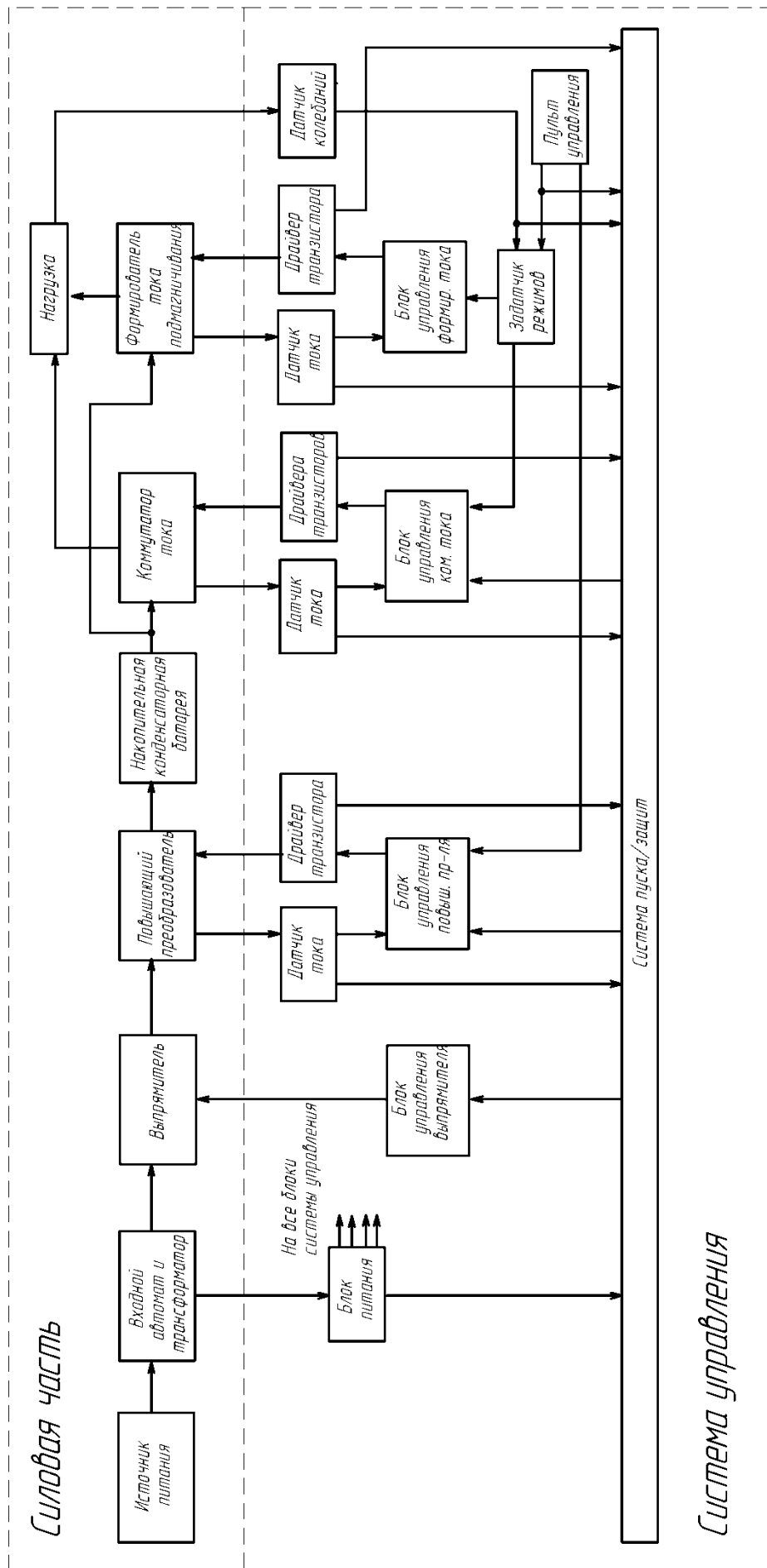


Рис. 2.13 – Блок схема системы управления.

з) Блок управления формирователем тока подмагничивания управляет формирователем тока формируя нужную величину тока подмагничивания.

и) Задатчик режимов подаёт сигнал на блок управления формирователя тока и блок управления коммутатора тока о необходимых токах.

к) Пульт управления содержит элементы управления для работы человека.

л) На нагрузке будут установлены датчики сигналов с помощью которых будет корректироваться работа системы.

м) Система пуска/защит осуществляет остановку системы при нестандартной ситуации. Она осуществляет:

- защиту от превышения входного тока повышающего преобразователя;

- защиту от превышения напряжения на накопительном конденсаторе С7;

- остановку системы при срабатывания внутренних защит драйверов;

- мониторинг напряжения питания системы управления;

- контроль напряжения на накопительном конденсаторе, предотвращение включения схемы в работу при его малом значении.

е) Блок управления коммутатором тока управляет транзисторами коммутатора VT2, VT3, VT4 и VT5, формирует в обмотках вибрационной установки Z1 и Z2 импульсы токов (рис.2.2б) в соответствии с сигналом задания тока, вырабатываемым задатчиком режимов.

ж) Датчик О.С. нужен, чтобы знать текущие величины контролируемых параметров.

## Заключение

Основная задача, которая решалась при выполнении работы, заключалась в разработке системы питания для электромагнитной вибрационной установки с изменяемой частотой колебаний.

В ходе работы был произведён выбор магнитной системы, выбор и расчет системы питания.

Полученные результаты подтверждают возможность создания такой системы питания для электромагнитной вибрационной установки, создающей усилия 5 т.с. с изменяющейся частотой колебаний. Разработка системы сопряжена с решением большого числа вопросов, поскольку в силу новизны темы не существует методик проектирования подобных систем, однако проведённые расчеты подтверждают возможность создания такой установки.

Электромагнитные вибрационные установки на небольшие силы (5-10 т.с.) могут составить конкуренцию ныне распространенным гидравлическим вибраторам.

## Список используемой литературы

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Ивашин В.В., Симкин С.А., Чичинин И.С. Энергетика электромагнитного резонансного вибратора в автоколебательном режиме.- Геология и геофизика, 1978, №10, С.119-129.
6. Изолированные датчики тока и напряжения фирмы LEM. Характеристики, применение, расчеты. [www.lem.com](http://www.lem.com)
7. Кострыгин Ю.П. Сейсморазведка на сложных сигналах. – Тверь: Издательство ГЕРЕС, 2002. - 416 с.
8. Мощные полупроводниковые приборы. Диоды: Под ред. Н.В. Ефимова, Т.В. Жукова.-М.; Энергоиздат, 1987.-562с.: ил.
9. Мощные полупроводниковые приборы. Транзисторы: Справочник Б.А. Бородин, В.М. Ломакин, В.В. Мокряков и др.; Под ред. А.В. Голомедова.-М.: Радио и связь, 1985.-.560с., ил.

10. Позднов М.В. “Магнитная пружина”- элемент перестраиваемых по частоте резонансных колебательных систем // Вестник молодых ученых: серия технические науки, №7.-2000г., издательство СПбГТУ, С.38-45.
11. Резисторы: (справочник)/ Ю.Н. Андреев, А.И. Антонян и др.; Под редакцией И.И. Четвертакова.-М.; Энергоиздат, 1981.-352с., ил.
12. Семенов Б.Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов.- М. Издательство «СОЛОН-Р», 2001. – 327с.
13. Смирнов В.П., ОАО «Енисейгеофизика», г. Минусинск. Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда «Енисей СЭИ, КЭМ» // ж. «Приборы и системы разведочной геофизики», №01(03), 2003г.
14. Электрические измерения. Учебник для вузов. Изд.4-е. Под ред. А.В. Фремке. Л., “ Энергия”, 1973.
15. Шнеерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная невзрывная сейсморазведка.- М.: Недра, 1988.-237с.
16. Экспериментальные исследования процесса возбуждения сейсмических волн вибрационным источником / И.С. Чичинин, Г.П. Евчатов, В.Н. Сидоров и др.- В кн.: Вопросы возбуждения сейсмических волн вибрационным источником. Новосибирск,1976, с.65-86.
17. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки. Справочник под редакцией Ю.Н. Рысев.-М.; Энергоиздат, 1987-656с.: ил.
18. Яблонский А.А. и Норейко С.С. Курс теории колебаний. Учеб. пособие для студентов втузов. Изд.3-е, М., «Высш.школа», 1975, 248 с.
19. SERSEL объявляет о вездеходном вибраторе нового поколения NOMAD 65. // Приборы и системы разведочной геофизики №01(03)/2003, ежеквартальное официальное издание саратовского евро-азиатского геофизического общества.
20. Положение о выпускной квалификационной работе: утв. решен. учен. совет. от 21.12.2017 решение №94 : [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tltsu.ru/upravlenie/educational-methodical-management/regulatory->

documents-of-educational-process/7\_Положение%20о%20ВКР-дек\_pdf.pdf

(Дата обращения: 08.03.2019).

21. Diodes Incorporated [Электронный ресурс]. URL: <https://www.diodes.com> (дата обращения: 27.05.2019)

22. Electrical resistance and conductance [Электронный ресурс]. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_resistance\\_and\\_conductance](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistance_and_conductance) (дата обращения: 17.05.2019)

23. Resistor [Электронный ресурс]. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Resistor> (дата обращения: 17.05.2019)

24. TVR204 Datasheet, PDF - Datasheet Search Engine [Электронный ресурс]. URL: [http://www.alldatasheet.com/view\\_datasheet.jsp?Searchword=TVR204&sField=2](http://www.alldatasheet.com/view_datasheet.jsp?Searchword=TVR204&sField=2) (дата обращения: 27.05.2019)

25. DC-DC Converter Technologies for Electric/Hybrid Electric Vehicles [Электронный ресурс]. URL: <http://www.powerguru.org/dc-dc-converter-technologies-for-electrichybrid-electric-vehicles/> (дата обращения: 07.05.2019)