

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Факультет «Аэрокосмический»
Кафедра «Летательные аппараты»
Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой,
д.т.н., проф.

_____ / Дегтярь В.Г./

«__» _____ 2020 г.

РАЗРАБОТКА МИНИ-ГЭС

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР: к.т.н., доцент
_____ /П.О Шабуров/

_____ 2020 г.

Автор работы
студент группы П-428

_____ /М.В. Горт/

_____ 2020 г.

АННОТАЦИЯ

Горт М.В. Разработка Мини-ГЭС –
Челябинск: ЮУрГУ, П–428, 2020,
65с., 44ил., 6 табл., библиогр. список
– 20 наим.

Цель – используя современное программное обеспечение и технологии, создать модель, проверить турбину, рассчитать генератор, проверить в современных расчётных пакетах с составлением модели, создать модель преобразователя с векторным управлением, разработка схемы системы управления, произвести экономический расчёт себестоимости.

Задача – изучив различную литературу (как отечественную, так и зарубежную) и ознакомившись с вопросом, составить модель механической части ГЭС, снять нужный момент с вала, рассчитать тихоходный генератор на постоянных магнитах, составить модель преобразователя с векторным управлением, электрической принципиальной схемы управления.

Разбираемая далее тема актуальна и разрабатывается инженерами многих стран, так как с прогрессом в области техники и электроники потенциал малой гидроэнергетики только возрастает.

<i>ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР</i>				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Горт М.В.</i>		
<i>Провер.</i>		<i>Шабуров П.О.</i>		
<i>Реценз.</i>				
<i>Н. Контр.</i>		<i>Шабуров П.О.</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Дегтярь В.Г.</i>		
<i>Разработка Мини-ГЭС</i>				
		<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
			6	65
<i>ЮУрГУ Летательные аппараты</i>				

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 КОНСТРУКЦИИ МИНИ-ГЭС	11
1.1 МГЭС на базе энергоблоков контейнерного исполнения	12
1.2 Пропеллерный тип турбины	13
1.3 Диагональная турбина.....	14
1.4 Радиально-осевая турбина	16
1.5 Ковшовая турбина.....	17
1.6 Водоворотная турбина.....	18
2 МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	19
3 ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ С ДРОБНОЗУБЦОВОЙ ОБМОТКОЙ.	23
3.1 Электромагнитный расчёт	24
3.2 Магнитная цепь	27
3.3 Масса активных материалов.....	33
3.4 Потри и КПД	34
3.5 Моделирование в пакете RМхprt	36
3.6 Моделирование в пакете Maxwell2D	38
4 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ	43
4.1 Цифровая система управления	44
4.2 Схема инвертора	52
5 СЕБЕСТОИМОСТЬ МИНИ-ГЭС.....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	58
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	59
ПРИЛОЖЕНИЕ А	61
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	62
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	65

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире безусловно очень важна гидроэнергетика. Опыт развитых стран мира показывает, что именно гидроэнергетика является прочной нитью, которая удерживает энергобаланс на планете. Согласно статистике, в 2018 году гидроэнергетика достигла 20% от общего объема полученной электроэнергии во всем мире и около 70% всей возобновляемой энергии. Судя по прогнозам энергетиков, следует ожидать увеличение к 2030 году примерно на 40% [1].

Как и везде, есть некоторые недостатки, связанные с гидроэлектроэнергией, но эти недостатки перекрывает значительно большее количество достоинств. Стоимость гидроэлектроэнергии является относительно низкой, что делает гидроэнергетику одним из наиболее конкурентоспособных источников возобновляемой энергии. Кроме того, в отличие от тепловых и ядерных электростанций, гидроэлектростанции не потребляют воду. На какой-то местности есть необходимость в плотине или водохранилище, с установкой легко контролировать количество энергии, производимой станцией, что делает ее чрезвычайно гибкой.

Основной проблемой больших гидроэлектростанций, является влияние на окружающую среду и жизнь людей живущих в окрестностях, ведь для того чтобы большая ГЭС работала необходимо построить большую плотину, это в конечном итоге будет означать разрушение природы, начиная от вырубке лесов до вмешательства во флору и фауну, а также может потребоваться перемещение людей. И все эти факторы способствуют негативному отклику прессы и массовому противодействию строительству более крупных плотин [2-3].

Большинство людей считают, что для производства электроэнергии, гидроэлектростанция обязательно должна быть большой. Больше не всегда лучше. Ведь можно найти огромный гидроэнергетический потенциал в небольших реках по всему миру. И эти реки могут быть отличным решением, поскольку не требуют огромного вмешательства в природу, и столь большого государственного финансирования.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

Статистика показывает, что процент использования мини ГЭС и малых ГЭС, в мире увеличивается.

Небольшая гидроэлектростанция обычно служит промышленному предприятию или небольшому обществу. Несмотря на то, что каждая страна, имеет свой максимальный предел для генерации энергии, в качестве верхнего предела определяется 10 мегаватт, что уже может называться гидроэлектростанцией. Множество примеров, которые уже существуют в мире, показывают, что в последние годы в таких странах, как Китай, Япония, Чили, Соединенные Штаты и Индия, увеличивалось производство гидроэлектроэнергии в небольших объемах.

Мини-ГЭС обычно имеют максимальную мощность до 100 кВт. Мини-гидростанции, как правило, используются для обеспечения электроэнергией небольших населенных пунктов или отдаленных частных домов. Такие гидроэлектростанции обычно встречаются в развивающихся странах, их используют в качестве дополнения к фотоэлектрическим системам солнечной энергии.

Малые и мини гидроэнергетические системы улавливают энергию текущей воды и преобразуют ее в полезную энергию. Несмотря на то, что малые и мини-гидроэлектрические системы сильно зависят от потока воды и могут обеспечить надежное, чистое и доступное электричество [3-8].

Основные преимущества наличия малых или мини-гидроэлектростанций вместо больших ГЭС:

1. Контроль паводков

Речные долины, как правило, очень ценятся, и это одна из причин, по которой на них располагаются населенные пункты. Однако на качество жизни могут влиять обычные наводнения. Таким образом, установка электростанции может быть отличным решением для предотвращения этого огромного ущерба.

2. Экологический баланс

При строительстве отсутствует необходимость в большой плотине с подтоплением территорий, что позволяет минимизировать ущерб экологии.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

Небольшие плотины являются огромным преимуществом для людей, и они могут быть экологически чистыми. Некоторые конструкции ГЭС, не требуют наличие плотины, поэтому вообще не влияют на экологическую обстановку.

3. Предсказуемость энергии

Одним из главных преимуществ как малых, так и мини-гидроэлектростанций является тот факт, что очень легко предсказать количество энергии, которое они смогут произвести в течение одного года.

4. Надежность

Одно существенное преимущество, которое имеют малые и мини ГЭС, состоит в том, что они имеют меньшую зависимость от высококвалифицированных кадров, контролирующих работу, и не нуждаются в частом обслуживании [2].

Резюмируя всё вышеперечисленное можно сказать, что потенциал гидроэнергетики раскрыт не полностью и есть множество пробелов и возможностей для простых жителей, государства и бизнеса.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

1 КОНСТРУКЦИИ МИНИ-ГЭС

По своей конструкции все Мини-ГЭС (далее МГЭС) предполагают забор воды с последующим преобразованием в механическое вращение и после выброс отработанной воды. Инженеры придумали множество конструкций, которые отличаются своими характеристиками и показателями такими как КПД, минимальная высота истока, номинальный расход воды, особенности установки,

Разделяют две технологии установки это русловая схема создания напора (рис. 1.1а) и деривационная схема создания напора (рис. 1.1б)

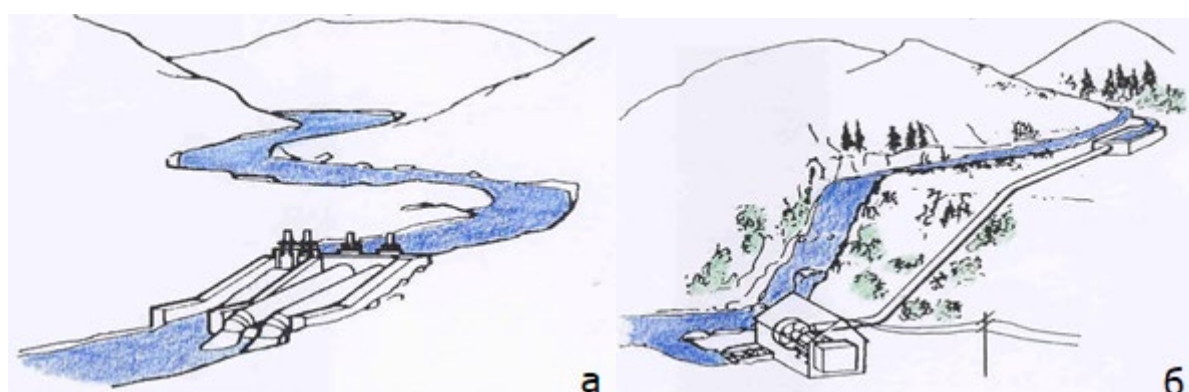


Рис.1.1 – Системы создания напора

Источники водных ресурсов так же разнообразны (рис. 1.2)



Рис. 1.2 – Источники водных ресурсов

1.1 МГЭС на базе энергоблоков контейнерного исполнения

Силовой блок такой МГЭС представляет установку мощностью 10 или 30кВт и предназначен для работы в условиях небольшой высоты истока (напор от 3 до 5м) предназначенные для работы как в изолированных сетях, так и на сеть.

В качестве изолированных потребителей выступают удалённые районы слабообжитые или новые поселения в большом удалении от центральной магистрали. Если условия позволяют, то установка нуждается только в установке на место и подаче воды при малом перепаде воды возможен забор с использованием деривации.

Установку можно использовать на существующих гидротехнических сооружениях. Это могут быть водосборные сооружения, водоемы охладители тепловых электростанций, водохранилища, плотины на равнинных реках, водоочистные городов.

Конструкция представляет из себя контейнер (рис. 1.3) с энергоблоком внутри. Энергоблок состоит из 10 футового морского контейнера (поз. 4) герметичного исполнения, внутри контейнера установлен гидроагрегат с ортогональной турбиной (поз. 1), подводящий (поз. 2) и отводящий (поз. 3) водоводы контейнера, компенсатор водовода (поз. 5).

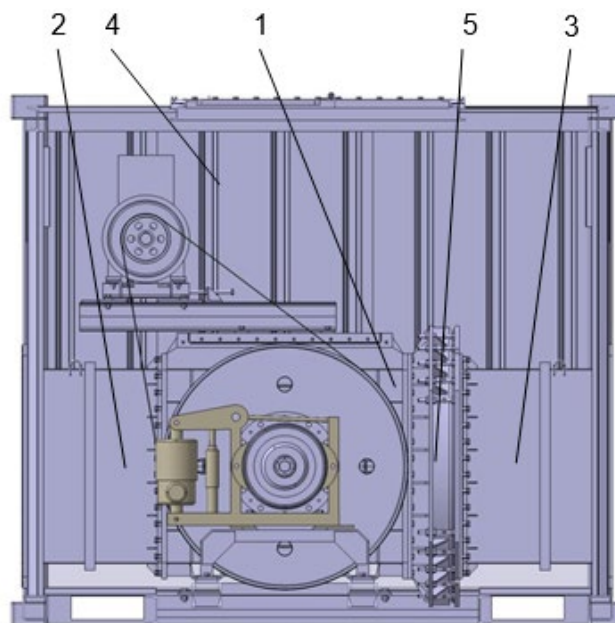


Рис. 1.3 – Составляющие МГЭС контейнерного типа

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

В конструкции используется 3-х или 5-ти лопастное рабочее колесо в зависимости от требуемой мощности (рис. 1.4)

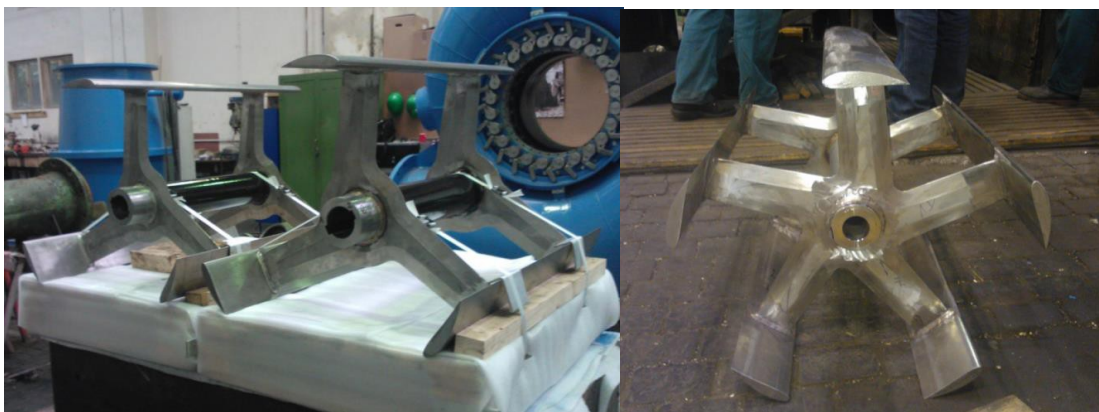


Рис. 1.4 – Рабочее колесо с лопастями

1.2 Пропеллерный тип турбины

Такой тип МГЭС имеет самую высокую быстроходность среди турбин. Что позволяет при малых скоростях потока получать достаточную скорость вращения. Высокая скорость позволяет применять более быстроходные, а значит недорогие генераторы, избавляет от установки мультиплексоров.

Компания ИНСЭТ выпускает ряд МГЭС с пропеллерными турбинами на напоры от 3 до 18 метров (Таблица 1.1).

Таблица 1.1. Варианты исполнения

Параметры	Мощность МГЭС				
	МГЭС 10Пр		МГЭС 15Пр	МГЭС 50Пр	
Мощность, кВт	0,6-4,0	2,2-10,0	3,5-15,0	10,0-30,0	10,0-50,0
Напор, м	2,0-4,5	4,0-10,0	4,5-12,0	2,5-6,0	4,0-10,0
Расход, м ³ /с	0,07-0,14	0,10-0,21	0,10-0,30	0,3-0,8	0,4-0,9
Частота вращения, об/мин	1000	1500	1500	600	750
Номинальное напряжение, В	230		400	230, 400	
Номинальная частота тока, Гц	50		50	50	

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР

Лист

13

Внешний вид напоминает гребной винт судна (рис. 1.5)



Рис. 1.5 – Пропеллерная турбина

Так как лопасти работают в воде то в отличие от самолёта их изготавливают значительно шире. Это вызвано необходимостью избавления от кавитации – образования пузырьков разрежения, которые разрушают турбину. Профиль лопасти имеет так же меньшую толщину и стрелку прогиба. Это дает меньший коэффициент подъёмной силы, а значит уменьшается риск возникновения кавитации. Лопасти могут изготавливаться как поворотными, так и фиксированными. Поворотные имеет смысл изготавливать только при больших колебаниях напора или с переменной нагрузкой энергосистемы. Так же с помощью поворотных лопастей можно жёстко держать частоту вращения и частоту вырабатываемого напряжения.

1.3 Диагональная турбина

Диагональная турбина выполняется в виде турбины, у которой оси лопастей расположены не перпендикулярно к оси ротора, а наклонены под углом 30, 45, 60

градусов. Диагональные турбины так же имеют широки диапазон регулирования и работают при нестабильном потоке воды и переменной нагрузке (рис. 1.6).

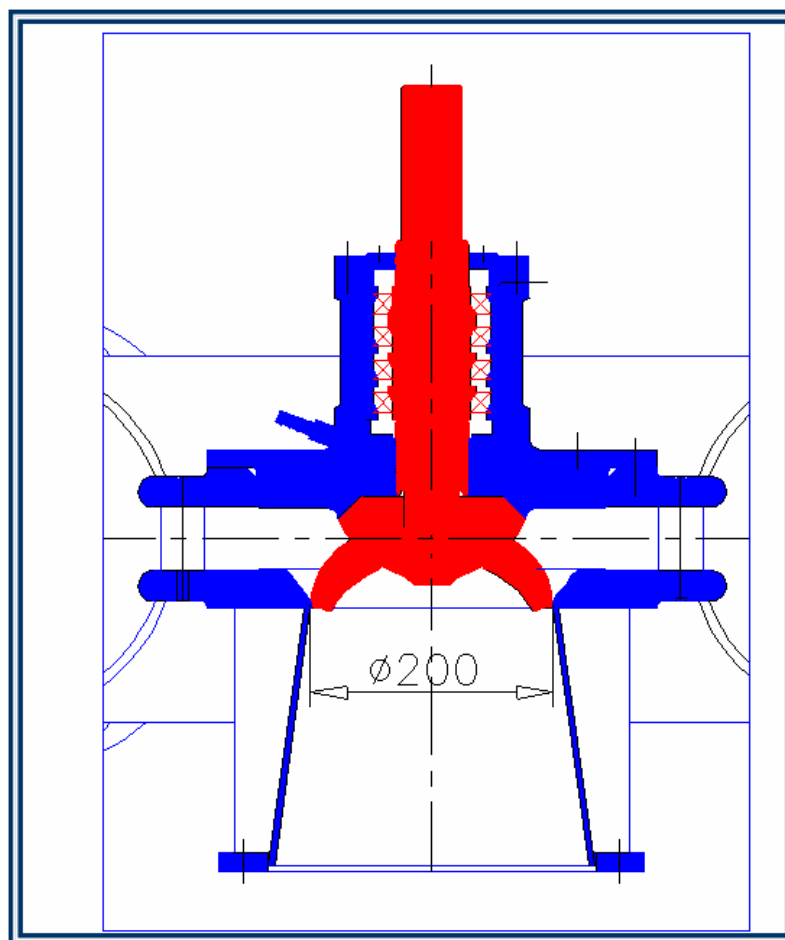


Рис. 1.6 – Диагональная турбина

Компанией ИНСЭТ разработана конструкция МГЭС с диагональной турбиной (Таблица 1.2).

Таблица 1.2. Варианты исполнения

Параметры	МГЭС 20 ПрД
Мощность, кВт	10 - 20
Напор, м	8-18
Расход, м ³ /с	0,08-0,17
Частота вращения, об/мин	1500
Номинальное напряжение, В	230, 400
Номинальная частота тока, Гц	50

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР

Лист

15

1.4 Радиально-осевая турбина

Вода на ротор поступает с наружной улиткообразной трубы и движется к центру турбины (рис. 1.7). Пройдя сквозь лопасти, вода отдаёт свою энергию ротору вращая его. После прохождения через ротор воды она поступает конусную отсасывающую трубу что позволяет убрать излишнюю кинематическую энергию. После этого вода сбрасывается. Компания ИНСЭТ выпускает рассматриваемую конструкцию турбин на разные мощности (Таблица 1.3).

Для производства таких турбин требуется высоко износостойкие сорта сталей, которые способны обеспечить долгую и надёжную работу.

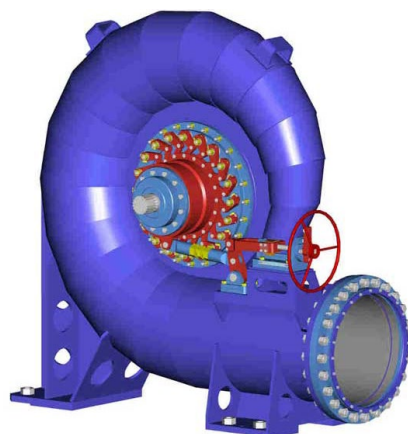


Рис. 1.7 – Радиально-осевая турбина

Таблица 1.3. Варианты исполнения

Мощность, кВт	до 950	550	3300	5600
	ГА2	ГА4	ГА9	ГА11
Частота вращения ротора турбины, об/мин	1000; 1500	1000	600; 750; 1000	750; 1000
Номинальное напряжение, В	400; 6000	400; 6000	6000; 10000	6000; 10000
Номинальная частота тока, Гц	50	50	50	50
Напор, м	30-100	25-55	70-120	100-160
Расход, М ³ /с	0,4-1,25	0,4-1,3	0,6-3,2	1,5-4,0

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР

Лист

16

1.5 Ковшовая турбина

Такой тип турбин применяется при больших напорах воды. Напорный трубопровод подводится к МГЭС и заканчивается соплом, из которого под давлением поступает вода на ротор турбины. Ротор выполнен из множества чашеобразных ёмкостей, вода создаёт давление на чашу и ротор раскручивается до больших скоростей (рис. 1.8). Максимальный КПД создаётся при условии, что отразившаяся от чаши вода будет иметь нулевую скорость, а такая скорость достигается при половине скорости потока из сопла. Соплом гидроагрегата служит для регулирования поступающей воды за счёт введения либо выведения специальной иглы. Отработанная вода стекает в нижний бьеф. Корпус как правило выполняют большим для увеличения КПД за счёт уменьшения отражения воды от стенок.



Рис. 1.8 – Ковшовая турбина

ИНСЭТ выпускает МГЭС на напоры от 40 до 250 метров (Таблица 1.4).

Таблица 1.4. Варианты исполнения

Параметры	Тип МГЭС	
	МГЭС 100К	МГЭС 200К
Мощность, кВт	до 100	до 180
Напор, м	40-250	40-250
Расход, М ³ /с	0,015-0,060	0,015-0,060
Частота вращения, об/мин	750; 1000; 1500	750; 1000; 1500
Номинальное напряжение, В	230, 400	230, 400

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР

Лист

17

1.6 Водоворотная турбина

В рамках данной работы будет рассматриваться конструкция МГЭС, основанную на технике работы водоворота (рис. 1.9).

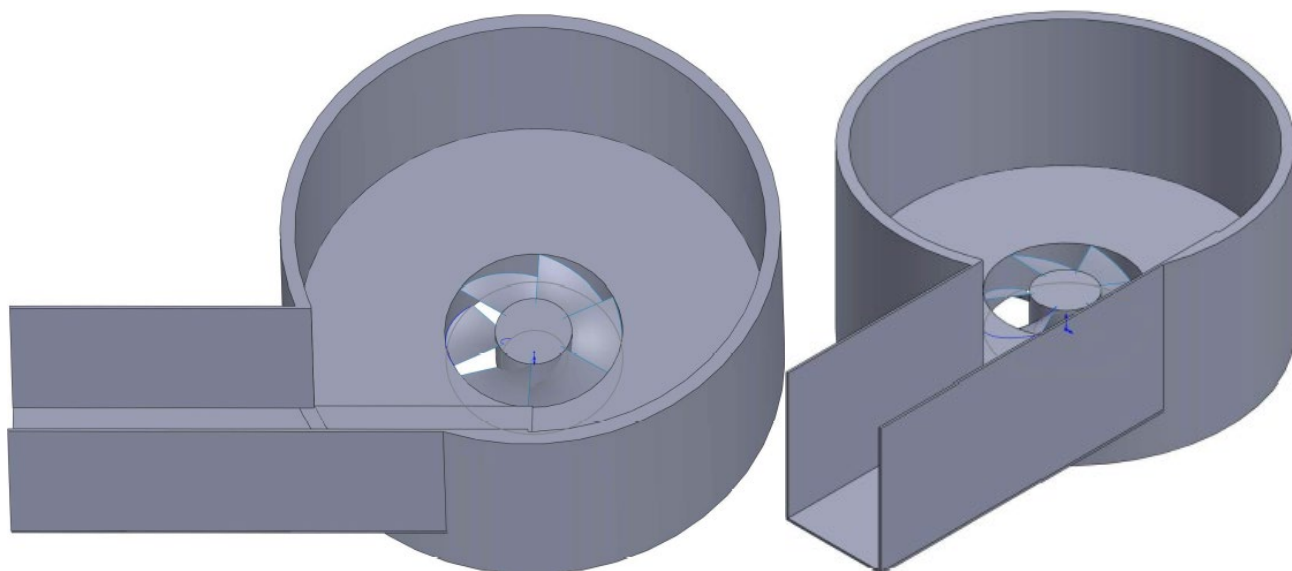


Рис. 1.9 – Конструкция турбины

Уникальная форма бетонной улитки, превращает входящий поток воды, в водоворот низкого давления, вода в свою очередь, вращает ротор турбины, далее момент передается на генератор. Возможна конструкция с мультиплексором, но для уменьшения потенциально выходящих из строя узлов решено отказаться от такой конструкции. Для контроля потока воды, МГЭС оснащена автоматизированными шлюзовыми воротами. Данная конструкция ГЭС способна вырабатывать до 400кВт энергии, без сооружения плотины, так как, водоворотная турбина не требует большого потока воды[8] (рис. 1.10).

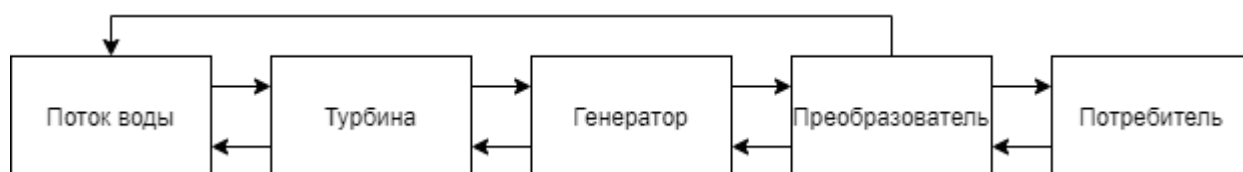


Рис. 1.10 – Функциональная схема Мини-ГЭС

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

2 МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для проверки работоспособности турбины используя возможности суперкомпьютер была составлена модель в пакете программного обеспечения SolidWorks[9] (рис. 2.1)

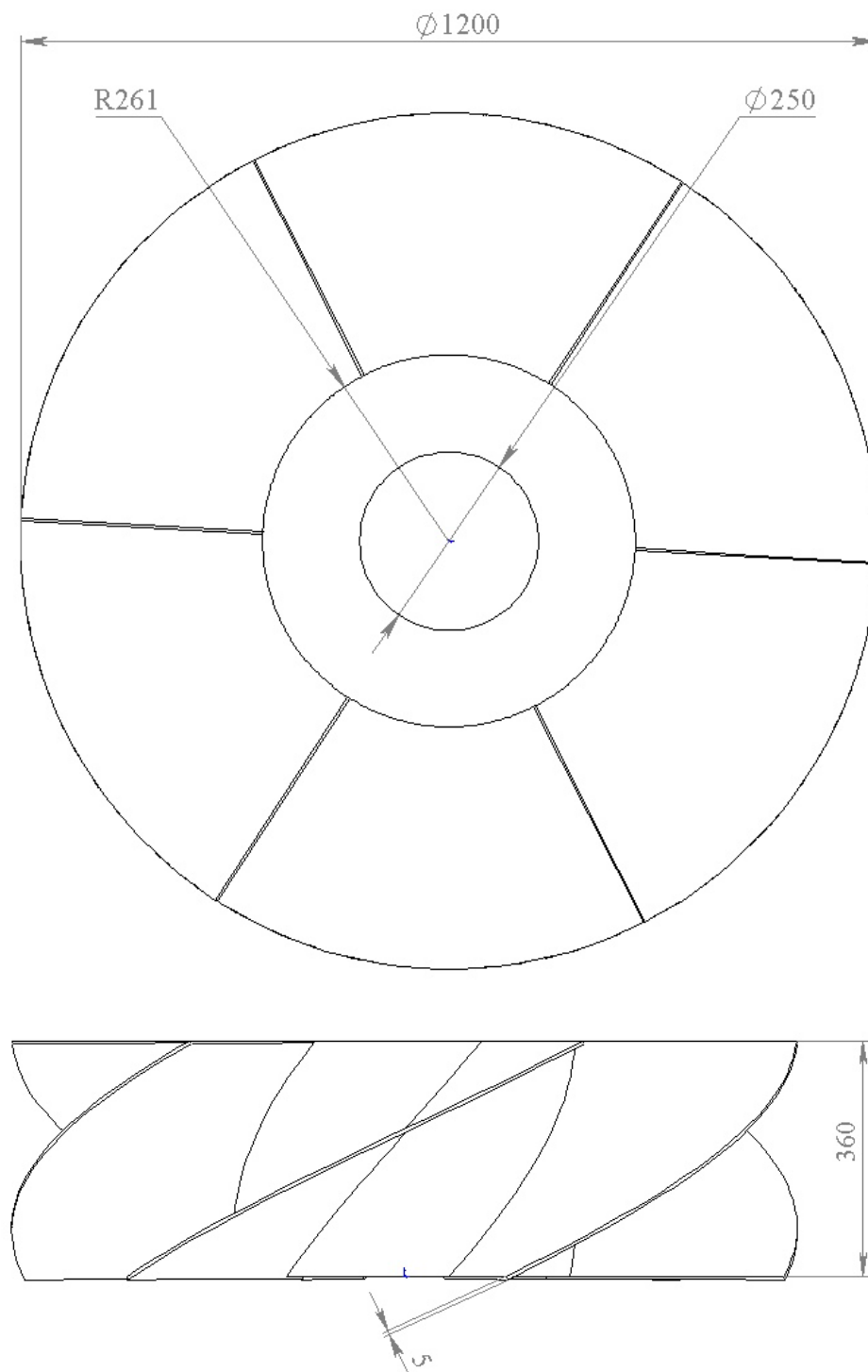


Рис. 2.1 – Модель гидротурбины

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР

Лист

19

Далее 3D модель была передана в пакет программного обеспечения ANSYS Workbench. В новом проекте создаётся модуль Mesh путём перетаскивания добавляется геометрия, открываем сеточный генератор настраиваем оптимальную сетку (рис. 2.2), так как при моделировании процессов протекания воды используется всё пространство то весь объём разбивается сеткой [10].

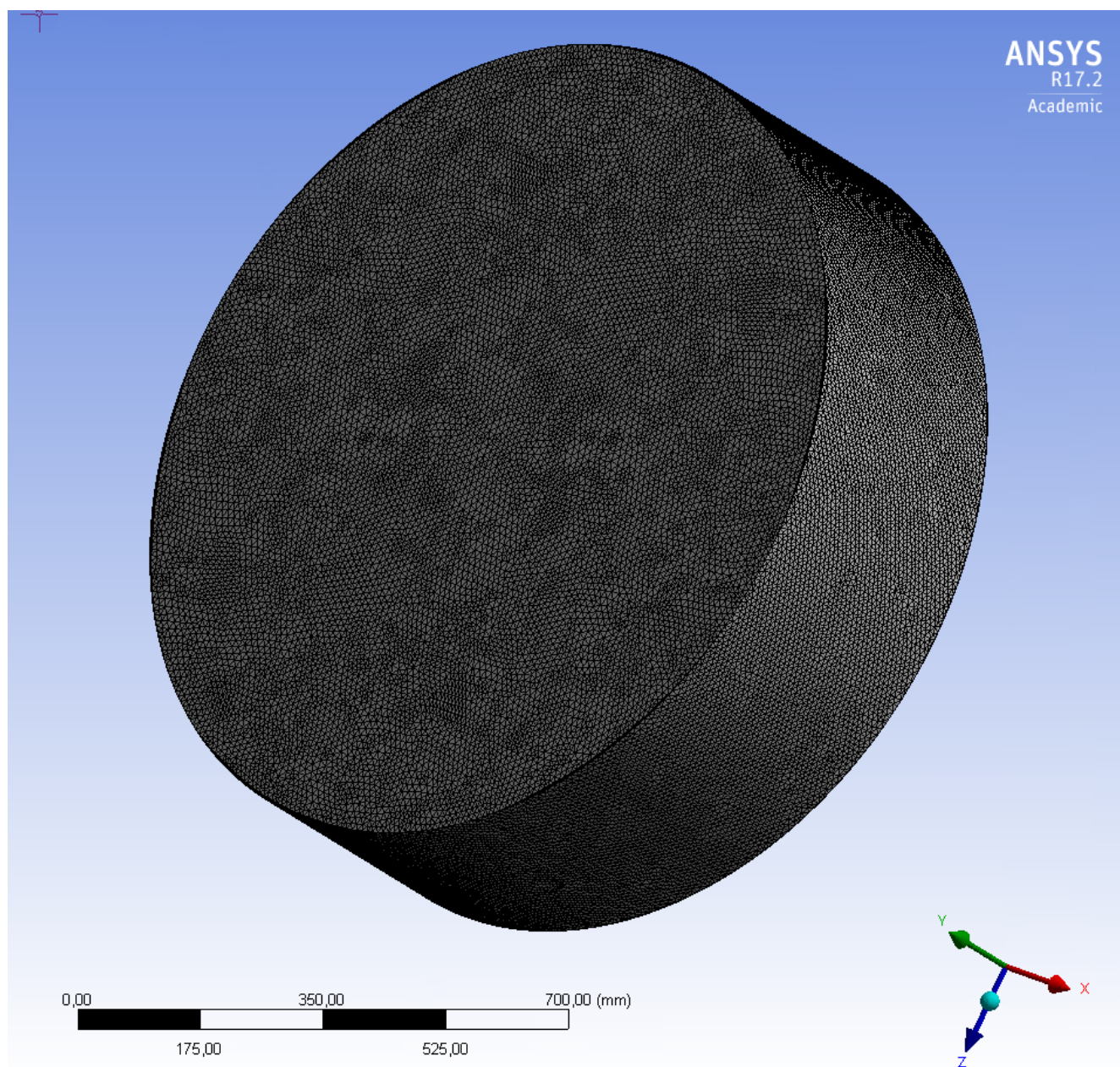


Рис. 2.2 – Объёмный цилиндр, разбитый сеткой

На краях сетка сгущается в несколько раз чаще так как там протекают сложные процессы (рис. 2.3)

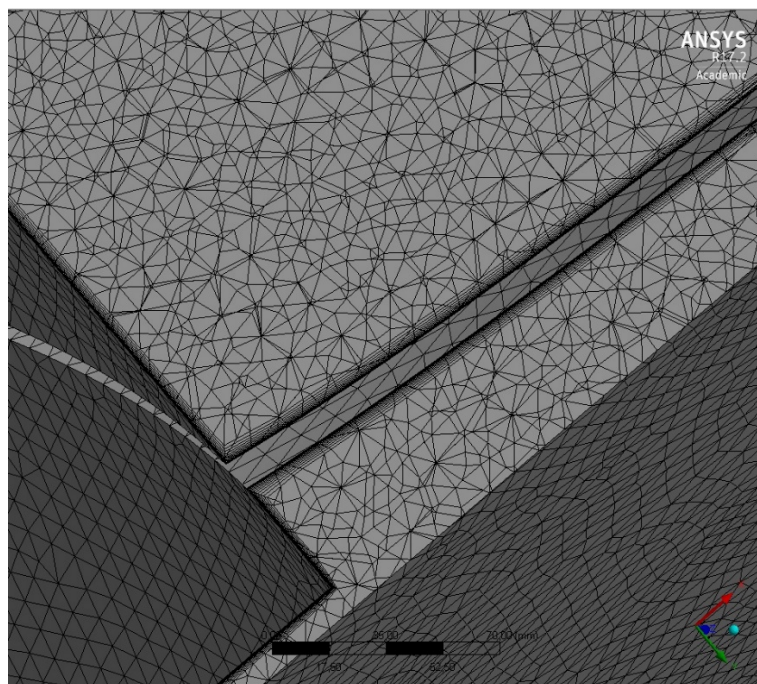


Рис. 2.3 – Сгущение краёв

После построения сетки подключаем решатель CFX после настройки среды получаем готовую модель (рис. 2.4).

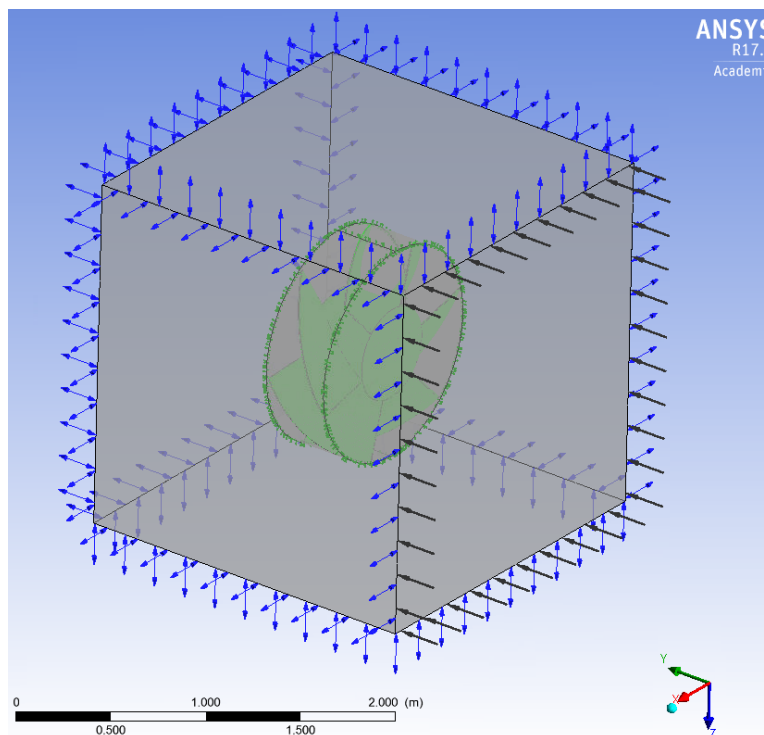


Рис. 2.4 – Модель гидротурбины

Получаем момент по результатам моделирования (рис. 2.5)

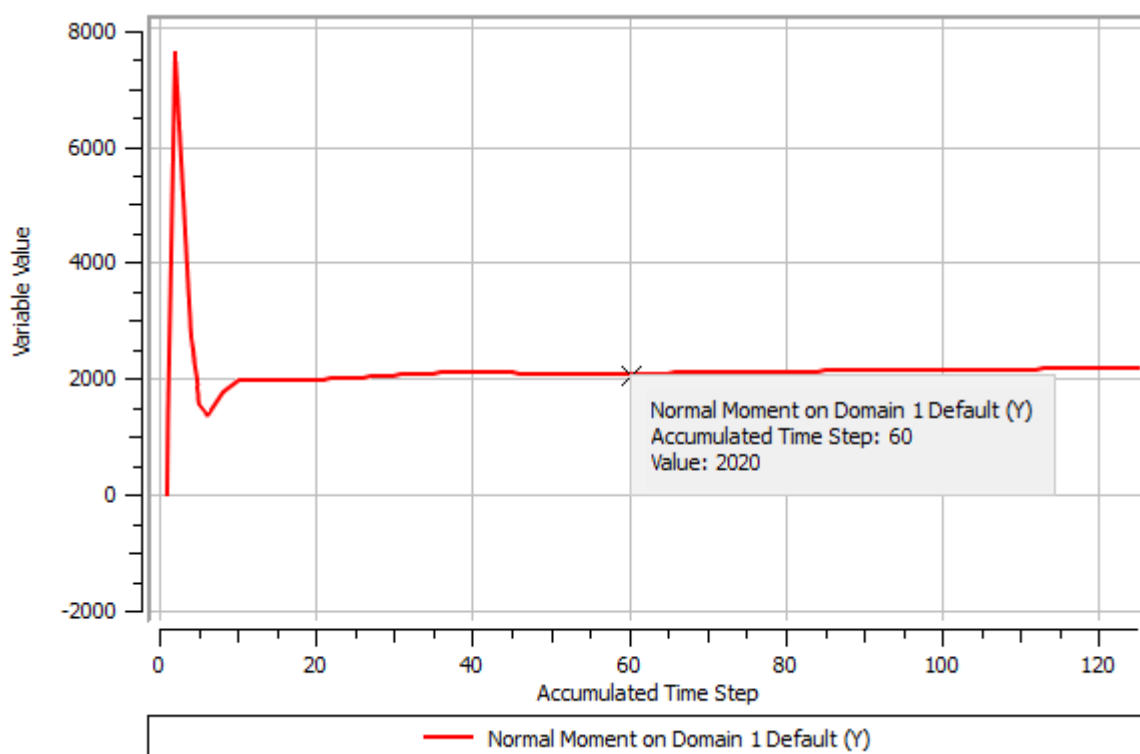


Рис. 2.5 – Нормальный момент

По результатам моделирования можно сделать вывод что турбина выдаёт требуемый момент при $h=1.8$ и оборотах 100об/мин что соответствует 20кВт в установившемся режиме.

3 ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ С ДРОБНОЗУБЦОВОЙ ОБМОТКОЙ.

Проектирование генератора является сложным многоэтапным процессом, включающим в себя разработку технического задания, технического предложения, эскизного и технического проектов, изготовление и испытание макетов и опытных образцов. При этом выбирается принцип действия и конструкция генератора, активные и конструкционные материалы, определяются размеры и обмоточные данные, даются рекомендации по технологии изготовления, рассчитываются надежность и экономическая эффективность [11].

При оптимальном проектировании на ЭВМ обычно решается более узкая задача – определение по исходным данным размеров и обмоточных данных выбранной конструкции.

Многообразие требований, предъявляемых к электрической машине, не позволяет установить единый критерий оптимальности. Из известных критериев оптимальности, отражающих энергетические характеристики, наиболее широко применяемым является коэффициент использования двигателя.

Универсальность этого критерия заключается в том, что он не зависит от обмоточных данных и линейной нагрузки ротора. Поэтому в процессе проектирования при заданных габаритных размерах, находят такую геометрию магнитной системы, которая, удовлетворяя требованиям технического задания, обеспечивает максимальное значение $K_{и}$.

Более сложной задачей проектирования является задача массогабаритной оптимизации. В результате решения этой задачи требуется найти такие габаритные размеры, при которых двигатель имеет минимальную массу или объем, обеспечивая заданное значение $K_{и}$. Очевидно, что $K_{и}$ в данном случае можно рассматривать как ограничительный параметр, который не должен принимать значение ниже заданного, а оценка эффективности выбранного или полученного в результате расчета варианта должна осуществляться по-другому, более

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

подходящему для решения данной задачи критерию. Таким критерием является коэффициент использования объема или коэффициент использования массы.

При оптимальном проектировании использовалась его статическая модель, представляющая собой совокупность уравнений и неравенств, связывающих исходные данные, независимые и зависимые параметры. Исходные данные заданы в техническом задании и определяются назначением электрической машины. Деление остальных параметров на независимые и зависимые условно и осуществляется исходя из условий простоты решения системы уравнений.

Массогабаритная оптимизация выбранного варианта конструкции целиком определяется технологическими ограничениями и параметрами активных материалов (постоянные магниты, материал обмоток электрической машины).

Принятая конструкция генератора ориентирована на использование высококоэрцитивных материалов, изготовленных на основе интерметаллических соединений бора никеля и железа.

Магниты приклеены к магнитопроводящему кольцу, которое напрессовано на немагнитную втулку из легкого металла [12].

3.1 Электромагнитный расчёт

Предварительный расчёт главных размеров по формуле Арнольда

Расчёт диаметра

$$D_a = \sqrt{\frac{S}{\left(\frac{k_b k_0 \pi^2 \alpha_\delta}{60}\right) AB_\delta \lambda n}} \quad (3.1)$$

$$D_a = \sqrt{\frac{20000}{\left(\frac{1,11 \cdot 0,96 \pi^2 0,75}{60}\right) 20000 \cdot 0,8 \cdot 1,8 \cdot 100}} = 0,415 \text{ м}$$

где $S = 20000 \text{ Вт}$ - полная мощность

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

$B_\delta = 0,8 \text{ Тл}$ - индукция в зазоре

$\alpha_\delta = 0,75$ - коэффициент полюсного перекрытия

$n = 100 \text{ об/сек}$ - частота вращения

$\lambda = 1,8$ - задание формы

$k_b = 1,1$ - коэффициент формы

$k_0 = 0,96$ - обмоточный коэффициент

$A = 20000 \text{ А/м}$ - линейная нагрузка

Расчёт длины

$$l = D\lambda = 0,37 \cdot 2 = 0,74 \text{ м} \quad (3.2)$$

Высота спинки статора

$$h_c = 0,004 \text{ м}$$

Высота спинки ротора

$$h_p = 0,003 \text{ м}$$

Ширина зубца статора

$$a_z = 0,006 \text{ м}$$

Высота магнита в метрах

$$h_m = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$D_a = 0,415 \text{ м}$$

Ширина паза

$$b_p = \frac{D_a \pi}{z} = \frac{0,415 \pi}{102} = 6,77 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.3)$$

Высота паза

$$b_{p2} = (D_a - 2h_{paz}) \frac{\pi}{z} - a_z = (0,415 - 2 \cdot 0,03) \cdot \frac{\pi}{102} = 4,922 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.4)$$

где $b_{sl} = 5,396 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

$h_{paz} = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Высота коронки зубца

$$a_p = \frac{a_{po} - b_{sl}}{2} = \frac{6,77 \cdot 10^{-3} - 5,4 \cdot 10^{-3}}{2} = 6,868 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad (3.5)$$

где $a_{po} = \frac{\pi(D_a - 2h_{sl}) - za_z}{z} = \frac{\pi \cdot 0,415 - 102 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{102} = 6,77 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Большая ширина паза статора

$$d_1 = \frac{\pi(D_a - 2h_{sl} - 2h_{z1})}{z} - a_z = \frac{\pi \cdot 0,415}{102} - 6 \cdot 10^{-3} = 6,77 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.6)$$

Меньшая ширина паза статора

$$d_2 = \frac{\pi(D_a + 2h_{paz})}{z} - a_z = \frac{\pi(0,415 + 2 \cdot 0,03)}{102} = 8,618 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.7)$$

Площадь паза

$$S_{paz} = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \cdot h_{paz} = \frac{6,77 \cdot 10^{-3} + 8,618 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0,03 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (3.8)$$

Вылет лобовых частей

$$l_{lob} = \frac{\tau_{cp} - a_z}{2} k_{lob} = \frac{0,012 - 6 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 1,13 = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.9)$$

где $\tau_{cp} = \frac{\alpha_z}{2} (D_a - h_{paz}) = \frac{0,062}{2} (0,415 - 0,03) = 0,012$

$\alpha_z = \frac{2\pi}{z} = \frac{2\pi}{102} = 0,062 \text{ м}$ - угол на зубец

$k_{lob} = 1,13$ - коэффициент лобового удлинения

Зубцовое деление в середине высоты паза

Длина среднего витка обмотки якоря

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

$$l_{nl} = l_a + 2l_{vlob} = 0,746 + 2 \cdot 0,013 = 0,772 \text{ м} \quad (3.10)$$

$$l_{vlob} = K_v b_{k\tau} + B = 0,5 \cdot 0,024 + 10^{-3} = 0,013 \text{ м}$$

$$b_{k\tau} = \frac{\pi(D_a - h_{paz})}{z} y = \frac{\pi(0,415 - 0,03)}{102} \cdot 2 = 0,024 \text{ м}$$

Осевая длинна статора

$$l_n = l_a + 2l_{lob} = 0,746 + 2 \cdot 3,3 \cdot 10^{-3} = 0,753 \text{ м} \quad (3.11)$$

Осевая длинна магнита

$$D_n = D_a + 2\delta + 2h_m + 2h_p \quad (3.12)$$

$$D_n = 0,415 + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 0,432 \text{ м}$$

где l_m и l_p принимаем равным l_δ

Ширина магнита

$$b_m = \frac{\pi(D_a - 2\delta)\alpha_\delta}{2p \cdot 1,04} = \frac{\pi(0,415 - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}) \cdot 0,7}{2 \cdot 50 \cdot 1,04} = 8,746 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.13)$$

Предварительная величина потока в нейтральном сечении магнита

$$\Phi_1 = \frac{H_c \mu_0 l_m b_m h_m}{\delta k_\mu + h_m} \quad (3.14)$$

$$\Phi_1 = \frac{8,4 \cdot 10^5 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 0,746 \cdot 8,75 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 + 5 \cdot 10^{-3}} = 6,151 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

где $H_c = 8,4 \cdot 10^5$ А/м - коэрцитивная сила магнита NdFeB

$k_\mu = 1,3 \div 1,8$ - коэффициент насыщения магнитной цепи.

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м постоянная электрическая проницаемость воздуха

$k_\mu = 1,2$ - коэффициент насыщения

3.2 Магнитная цепь

Индукция в спинке ротора

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

$$B_p = \frac{\Phi_1}{2h_p l_m} = \frac{6,1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,746} = 1,362 \text{ Тл} \quad (3.15)$$

Индукция в зубце

$$B_z = \frac{\Phi_1 2p}{z a_z l_m k_c} = \frac{6,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 50}{102 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,746 \cdot 0,95} = 1,484 \text{ Тл} \quad (3.16)$$

где $k_c = 0,95$ - коэффициент заполнения пакета сталью

Индукция в спинке статора

$$B_c = \frac{\Phi_1}{2h_c l_m k_c} = \frac{6,1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,746 \cdot 0,9} = 1,135 \text{ Тл} \quad (3.17)$$

Напряженность магнитного поля в спинке ротора

$$H_p = s3(B_p) = 1,874 \cdot 10^3 \text{ А/м} \quad (3.18)$$

Напряженность магнитного поля в зубце статора

$$H_z = s2412(B_z) = 588 \text{ А/м} \quad (3.19)$$

Напряженность магнитного поля в спинке статора

$$H_{ct} = s2412(B_c) = 220 \text{ А/м} \quad (3.20)$$

Длина средней магнитной линии в спинке ротора

$$l_{-p} = \left[h_p + \frac{(D_a - 2\delta - 2h_m - h_p)\pi}{2p} \right] 0,5 \quad (3.21)$$

$$l_{-p} = \left[3 \cdot 10^{-3} + \frac{(0,415 - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3})\pi}{2 \cdot 50} \right] 0,5 = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Длина средней магнитной линии в спинке статора

$$l_{-c} = \left[h_c + (D_a + 2h_{\text{паз}} + h_c) \frac{\pi}{z} \right] 0,5 \quad (3.22)$$

$$l_{-c} = \left[4 \cdot 10^{-3} + (0,415 + 2 \cdot 0,03 + 4 \cdot 10^{-3}) \frac{\pi}{102} \right] 0,5 = 9,37 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Магнитное сопротивление ротора

$$R_{mr} = \frac{H_p l_{-p}}{\Phi_1} = \frac{1,87 \cdot 7,793}{6,1 \cdot 10^{-3}} = 2,394 \cdot 10^3 \quad \text{А/Вб} \quad (3.23)$$

Магнитное сопротивление воздушного зазора

$$R_{m\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 l_m b_m} = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 0,746 \cdot 8,75 \cdot 10^{-3}} = 6,1 \cdot 10^4 \quad \text{А/Вб} \quad (3.24)$$

Магнитное сопротивление спинки статора

$$R_{mct} = \frac{H_{ct} l_{-c}}{\Phi_1} = \frac{220 \cdot 9,37}{6,1} = 338,3 \quad \text{А/Вб} \quad (3.25)$$

Сопротивление магнита

Значение потока близко к тому, которое принималось ранее. В расчёте не учтено рассеяние от магнита так как машина не попала в модель потоков рассеяния, оно автоматически учтено в результате по полемому расчёту[13].

Сопротивление магнита основному магнитному потоку без учёта потоков рассеяния с боковой и с торцевой поверхности магнита

$$R_m = \frac{h_m}{\mu_0 l_m b_m} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 0,746 \cdot 8,75 \cdot 10^{-3}} = 6 \cdot 10^5 \text{ Ом} \quad (3.26)$$

Полное магнитное сопротивление основному магнитному потоку

$$R = R_p + R_\delta + R_z + R_c + R_M \quad (3.27)$$

$$R = 2,4 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^4 + 2,9 \cdot 10^3 + 338 + 6 \cdot 10^5 = 6,8 \cdot 10^5 \text{ Ом}$$

Полезный магнитный поток

$$\Phi = \frac{H_c h_M}{R} = \frac{8,4 \cdot 5 \cdot 10^2}{6,76 \cdot 10^5} = 6,21 \cdot 10^{-3} \text{ Вб} \quad (3.28)$$

Принимаем величину потока в нейтральном сечении магнита равной

$$\Phi_{del} = 6,1 \cdot 10^{-3}$$

Частота пульсации тока

$$f = p \frac{n}{60} = 50 \frac{100}{60} = 83,3 \text{ Гц} \quad (3.29)$$

Сечение паза

$$Q_m = S_{paz} k_m = 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,35 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \quad (3.30)$$

Число витков на зубец

$$W_{zub2} = \frac{W_{faz2}}{z} = \frac{78,23}{102} \cdot 3 = 2,3 \quad (3.31)$$

где $k_{ob} = 0,925$ - обмоточный коэффициент

$$W_{faz2} = \frac{10E_{cp}}{\sqrt{3}pnk_{ob}\Phi} = \frac{10 \cdot 389,5}{\sqrt{3} \cdot 50 \cdot 100 \cdot 0,925 \cdot 6,21 \cdot 10^{-3}} = 78,3$$

Определение ЭДС фазы

$$E_f = W_f 4k_B f \Phi k_{ob} = 102 \cdot 4 \cdot 1,11 \cdot 83,3 \cdot 6,21 \cdot 10^{-3} \cdot 0,925 = 216,8 \text{ В} \quad (3.32)$$

где $W_z = 3$

$$W_f = W_z \frac{z}{mf} = 3 \frac{102}{3} = 102$$

$$k_B = 1,11$$

Линейное ЭДС

$$E_g = E_f \cdot \sqrt{3} = 216,8 \cdot \sqrt{3} = 375,5 \text{ В} \quad (3.33)$$

Сечение эффективного проводника

$$q = \frac{S_{pa} \cdot 0,35}{2 \cdot W_z} = \frac{2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,35}{2 \cdot 3} = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \quad (3.34)$$

Эффективный проводник наберём из n элементарных тогда

$$q_{el} = \frac{q}{n_{el}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-5}}{16} = 8,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 \quad (3.35)$$

где $n_{el} = 16$ - количество элементарных проводников

Тогда ближайший по сортаменту провод [14]

$$d = 1 \cdot 10^{-3}$$

$$q = n_{el} \cdot q_{el} = 16 \cdot 7,8 \cdot 10^{-7} = 1,2 \cdot 10^{-5}$$

$$Q_m = 2 \cdot W_z \cdot q = 2 \cdot 3 \cdot 1,26 \cdot 10^{-5} = 7,54 \cdot 10^{-5}$$

Средняя длина витка обмотки

$$L_{cp} = (l_a + Ll + \tau_{cp})2 = (0,746 + 0,028 + 0,012) \cdot 2 = 1,57 \text{ м} \quad (3.36)$$

Активное сопротивление фазы обмотки

$$R_{f155} = R_f \cdot K_t = 0,223 \cdot 1,54 = 0,34 \text{ Ом} \quad (3.37)$$

$$\text{где } R_f = \frac{\rho_m W_f L_{cp}}{q} = \frac{1,75 \cdot 10^{-8} - 102 \cdot 1,57}{1,26 \cdot 10^{-5}} = 0,223 \text{ Ом}$$

Индуктивность секции

Коэффициент проводимостей для потоков пазового рассеяния

$$\Lambda_{paz} = \left[0,618 + \frac{h_{sl}}{b_{sl}} + \frac{h_{paz} - h_{sl} - 1,5 \cdot b_{sl}}{3 \cdot d_l} \right] \quad (3.38)$$

$$\Lambda_{paz} = \left(0,618 + \frac{0,03 - 1,5 \cdot 6,77 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 6,77 \cdot 10^{-3}} \right) = 1,59$$

Коэффициент проводимостей для потоков лобового рассеивания

$$\Lambda_{lob} = 0,34 \cdot \frac{q_l}{l_a} \left(l_{lob} + \tau_{cp} - 0,64 \cdot \frac{\pi D_\delta}{z} \right) \quad (3.39)$$

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

$$\Lambda_{lob} = 0,34 \cdot \frac{0,34}{0,746} \cdot \left(3,3 \cdot 10^{-3} + 0,012 - 0,64 \cdot \frac{\pi \cdot 0,414}{102} \right) = 1,08 \cdot 10^{-3}$$

где $q_l = \frac{z}{2 \cdot p \cdot mf} = \frac{102}{2 \cdot 50 \cdot 3} = 0,34$ - число пазов на полюс и фазу

$$D_\delta = D_a - \delta = 0,415 - 5 \cdot 10^{-4} = 0,414 \text{ м}$$

Коэффициент проводимостей для потока статора, замыкающегося через магниты

$$\Lambda_m = \frac{1}{2 \cdot p \mu_0} \left[1 - \left(2 \cdot \sqrt{\frac{B_r H_c}{2 \cdot 2} - \frac{B_r H_c}{2 \cdot 2}} \right) \frac{B_\kappa}{H_c} \right] \quad (3.40)$$

$$\Lambda_m = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6}} \left[1 - \left(2 \cdot \sqrt{\frac{1,2 \cdot 8,4 \cdot 10^5}{2,52 \cdot 10^5} - \frac{1,2 \cdot 8,4 \cdot 10^5}{2,52 \cdot 10^5}} \right) \right] \cdot \frac{1,2}{8,4 \cdot 10^5} = 0,011$$

где $BH_m = \frac{B_r \cdot H_c}{2 \cdot 2} = \frac{1,2 \cdot 8,4 \cdot 10^5}{2 \cdot 2} = 2,52 \cdot 10^5$

Сумма коэффициентов проводимостей для всех потоков статора

$$\Lambda = \Lambda_{paz} + \Lambda_{lob} + \Lambda_m = 1,56 + 1,082 + 0,011 = 1,6 \quad (3.41)$$

Индуктивность фазы

$$L_f = 2\mu_0 \frac{\left(\frac{W_f}{a}\right)^2 l_\delta}{pq_l} \Lambda = 2 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{102^2 \cdot 0,746}{50 \cdot 0,34} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (3.42)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

$$x_f = 2\pi f L_f = 2\pi \cdot 83,3 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} = 0,966 \text{ Ом} \quad (3.43)$$

3.3 Масса активных материалов

Масса стали статора

$$m_c = \left[\frac{\pi}{4} (D_a^2 - D_v^2) - S_{paz} z \right] l_a k_z \rho_{st} \quad (3.44)$$

$$m_c = \left[\frac{\pi}{4} (0,415^2 - 0,347^2) - 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 102 \right] \cdot 0,746 \cdot 0,93 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 92,6 \text{ кг}$$

где $k_z = 0,93$

$$\rho_{st} = 7,8 \cdot 10^3$$

Масса спинки статора

$$m_{stc} = \frac{\pi}{4} \left[-D_v^2 + (D_v + 2h_c)^2 \right] l_a k_z \rho_{st} \quad (3.45)$$

$$m_{stc} = \frac{\pi}{4} \left[-0,347^2 + (0,347 + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3})^2 \right] \cdot 0,746 \cdot 0,93 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 23,8 \text{ кг}$$

Масса зубцов статора

$$m_z = m_c - m_{stc} = 92,63 - 23,8 = 68,8 \text{ кг} \quad (3.46)$$

Масса меди обмотки статора

$$m_{med} = q L_{cp} W_f 3 \rho_{med} = 1,257 \cdot 10^{-5} 1,57 \cdot 102 \cdot 3 \cdot 8,9 \cdot 10^3 = 53,8 \text{ кг} \quad (3.47)$$

где $\rho_{med} = 8,9 \cdot 10^3$ - плотность меди

Масса стали ротора

$$m_{str} = \frac{\pi}{4} \left[(D_v + 2h_p)^2 - D_v^2 \right] l_p \rho_{st} \quad (3.48)$$

$$m_{str} = \frac{\pi}{4} \left[(0,347 + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3})^2 - 0,347^2 \right] \cdot 0,746 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 19,2 \text{ кг}$$

Масса магнитов

$$m_{mag} = 2pl_m b_m h_m \rho_{mag} = 50 \cdot 0,746 \cdot 8,75 \cdot 5 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 25,4 \text{ кг} \quad (3.49)$$

где $\rho_{mag} = 7,8 \cdot 10^3$ - плотность магнитов

Масса ротора

$$m_{rot} = m_c + m_{med} + m_{str} + m_{mag} = 92,6 + 53,8 + 19,2 + 25,4 = 191 \text{ кг} \quad (3.50)$$

3.4 Потри и КПД

Электрические потери

$$P_{el} = m f I_S^2 R_{f155} = 3 \cdot 40,8 \cdot 0,344 = 1,72 \cdot 10^3 \text{ Вт} \quad (3.51)$$

Магнитные потери в ярме магнитопровода статора

$$P_a = k_{da} p_a B_c^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} m_{stc} = 1,5 \cdot 1,05 \cdot 1,13^2 \cdot \left(\frac{83,3}{50} \right)^{1,3} \cdot 23,8 = 94 \text{ Вт} \quad (3.52)$$

где $k_{da} = 1,5$ - коэффициент добавочных потерь

$$p_a = 1,05$$

Магнитные потери в зубцах статора

$$P_z = k_{dz} p_a B_z^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} m_z = 2 \cdot 1,05 \cdot 1,5^2 \cdot \left(\frac{83,3}{50} \right)^{1,3} \cdot 68,8 = 617,9 \text{ Вт} \quad (3.53)$$

где $k_{dz} = 2$ коэффициент добавочных потерь

Механические потери

$$P_{mex} = 3,68 p \left(\frac{v_p}{40} \right)^3 \sqrt{l_a} = 3,68 \cdot 50 \cdot \left(\frac{1,9}{40} \right)^3 \cdot \sqrt{0,746} = 0,017 \text{ Вт} \quad (3.54)$$

$$\text{где } v_p = \pi (D_v + 2h_p + 2h_m) \frac{n}{60}$$

$$v_p = \pi \cdot (0,347 + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}) \frac{100}{60} = 1,9$$

Добавочные потери

$$P_{dob} = mfU_f I_s \cdot 0,005 = 3 \cdot 163,3 \cdot 40,8 = 100 \text{ Вт} \quad (3.55)$$

Пульсационные потери в роторе

$$P_{pov} = 0,5 \cdot 2p \alpha_\delta \tau l k_0 \left(\frac{zn}{10000} \right)^{1,5} (B_0 t_{z1} \cdot 10^3)^2 \quad (3.56)$$

$$P_{pov} = 50 \cdot 0,7 \cdot 0,013 \cdot 0,746 \cdot 4,6 \cdot \left(\frac{102 \cdot 100}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,57 \cdot 0,013 \cdot 10^3)^2 = 87 \text{ Вт}$$

$$\text{где } B_0 = B_\delta (k_{\delta 1} - 1) = 0,935 \cdot (1,615 - 1) = 0,575$$

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1} + 10 \cdot \delta}{t_{z1} - b_{sl} + 10\delta} = \frac{0,013 + 5 \cdot 10^{-3}}{0,013 - 6,77 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}} = 1,6$$

$$t_{z1} = \frac{D_a \pi}{z} = \frac{0,415 \cdot \pi}{102} = 0,013$$

$$\tau = \frac{(D_a - 2\delta) \pi}{2p} = \frac{(0,415 - 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}) \cdot \pi}{2 \cdot 50} = 0,013$$

$k_0 = 4,6$ - эмпирический коэффициент материала полюсов, электрическая проводимость полюсов, выбран самый маленький в силу того, что магниты плохо проводят электрический ток.

Полные потери в генераторе

$$P_{pot} = P_{el} + P_a + P_z + P_{mex} + P_{dob} \quad (3.57)$$

$$P_{pot} = 1,72 \cdot 10^3 + 94 + 617 + 0,02 + 100 = 2,5 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

КПД

$$\eta = 1 - \frac{P_{pot}}{mfI_s U_f + P_{pot}} = \frac{2,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 40,8 \cdot 163 \cdot 2,5 \cdot 10^3} = 0,888 \quad (3.58)$$

3.5 Моделирование в пакете RMxprt

Разработанная конструкция генератора постоянных магнитов на 20кВт была исследована средством ANSYS Electronics Desktop.

Используя классическую аналитическую теорию двигателя и эквивалентные методы магнитных цепей, открывается возможность используя RMxprt проверить производительность машины, уточнить размер и выполнить сотни анализов «что, если» за считанные секунды. Поэтому для обоснования возможности реализации генератора была построена модель генератора в RMxprtDesign, при моделировании в RMxprtDesign были использованы все возможности быстрого анализа полученной машины так как расчёт занимает миллисекунды, недостатком является отсутствие проверки геометрии и проверки машины на возможность физической реализации, поэтому инженер берёт на себя ответственность при изменении каких либо параметров машины[15]. Ниже приведена полученная геометрия электрической машины (рис. 3.1)

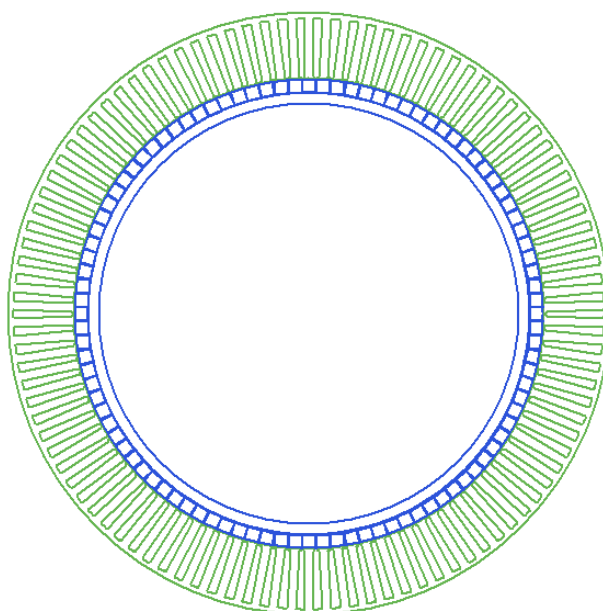


Рис. 3.1 – Геометрия генератора

После запуска анализа машины получен результат (Таблица 3.1)

Таблица 3.1. Результат моделирования

Параметр	Значение
Внешний диаметр статора, м	0.474
Внутренний диаметр статора, м	0.370
Длина генератора, м	0.785
Внешний диаметр ротора, м	0.368
Внутренний диаметр ротора, м	0.330
Линейное напряжение, В	459
Среднеквадратичное значение тока в линии, А	26,7
Среднеквадратичное значение тока фазы, А	26,8
Среднеквадратичное напряжение фазы, В	267
Тепловая нагрузка якоря, A^2/mm^3	40
Удельная электрическая нагрузка, А/мм	18,8
Плотность тока якоря, A/mm^2	2.1
Потеря железного сердечника, Вт	1377
Потери в меди, Вт	894
Полные потери, Вт	2271
Выходная мощность, Вт	20004
Входная мощность, Вт	22275
Эффективность, %	89.8
Коэффициент мощности	0,93
Синхронная скорость, об/мин	100
Ток короткого замыкания, А	63

Данные показывают, что машина работает верно, при заданных оборотах получена требуемая мощность, КПД составил 90%

3.6 Моделирование в пакете Maxwell2D

После рассмотрения генератора в пакете RMXprtDesign требуется передать расчёт в Maxwell2DDesign для уточнения расчёта и принятия решения необходимости доработки устройства. Maxwell2DDesign позволяет решить задачу наиболее точно, получаем практически копию реального двигателя (рис. 3.2) с некоторыми оговорками, из расчётных методов он является наиболее точным. Можно проверить магнитную систему, на предмет насыщения и потери уточнить так как они считаются с учётом реального распределения магнитного поля.

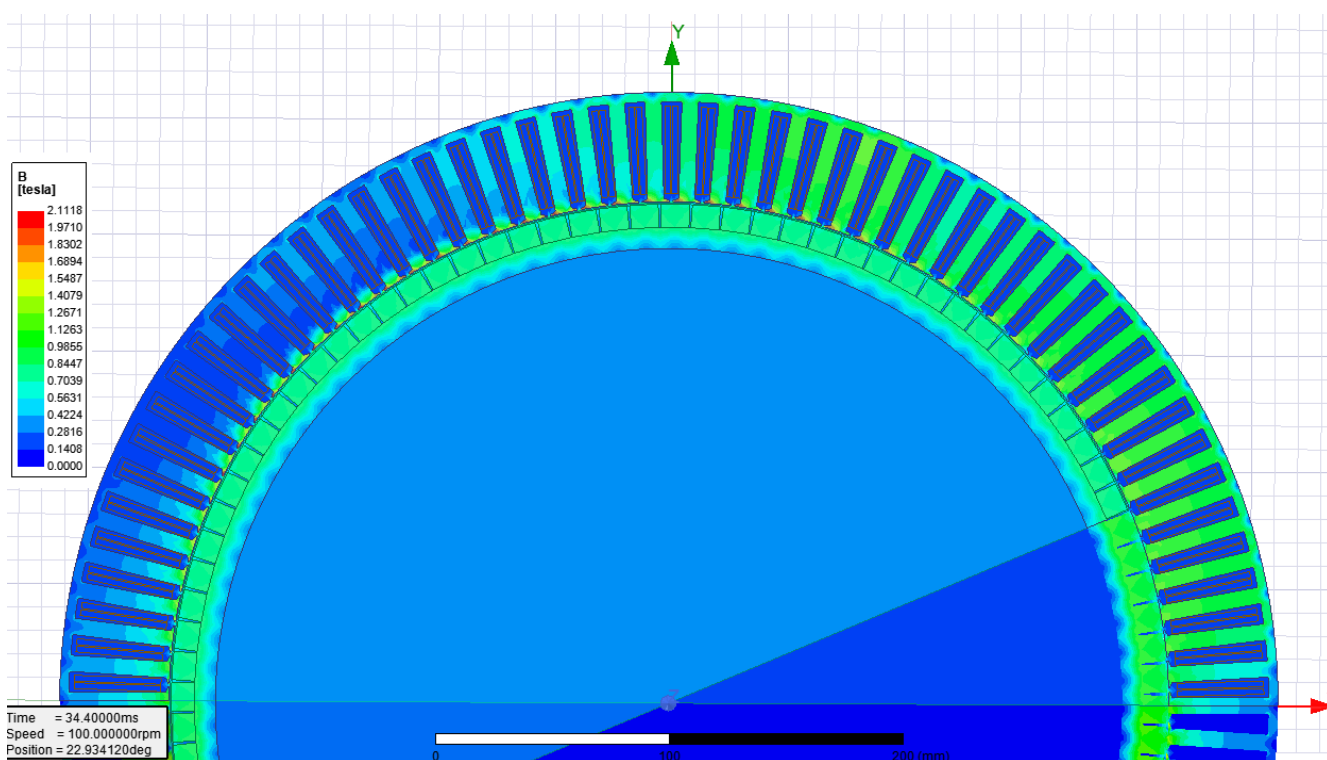


Рис. 3.2 – Распределение индукции

После моделирования можно пронаблюдать переходные процессы и получить параметры в установившемся режиме. Момент создаваемый генератором при номинальной скорости (рис. 3.3).

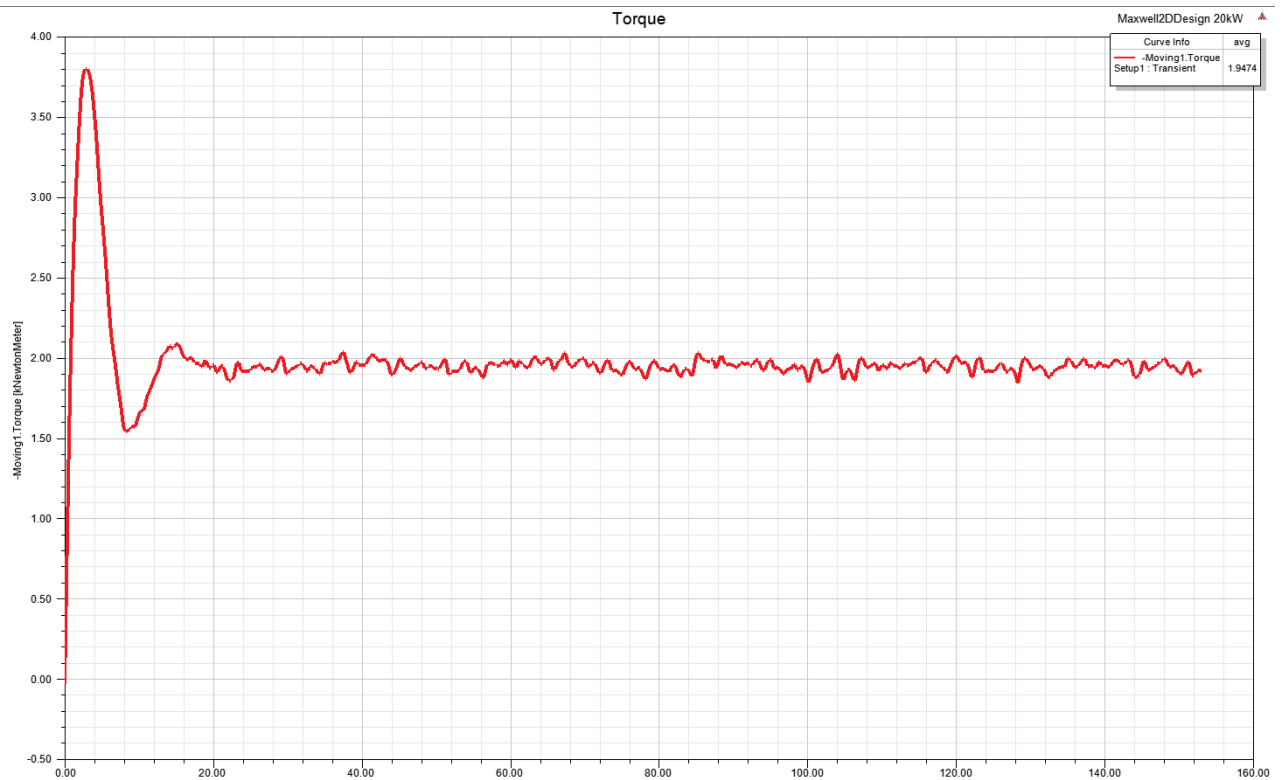


Рис. 3.3 – Момент на валу генератора

Мощность, снимаемая с выводов генератора (рис. 3.4)

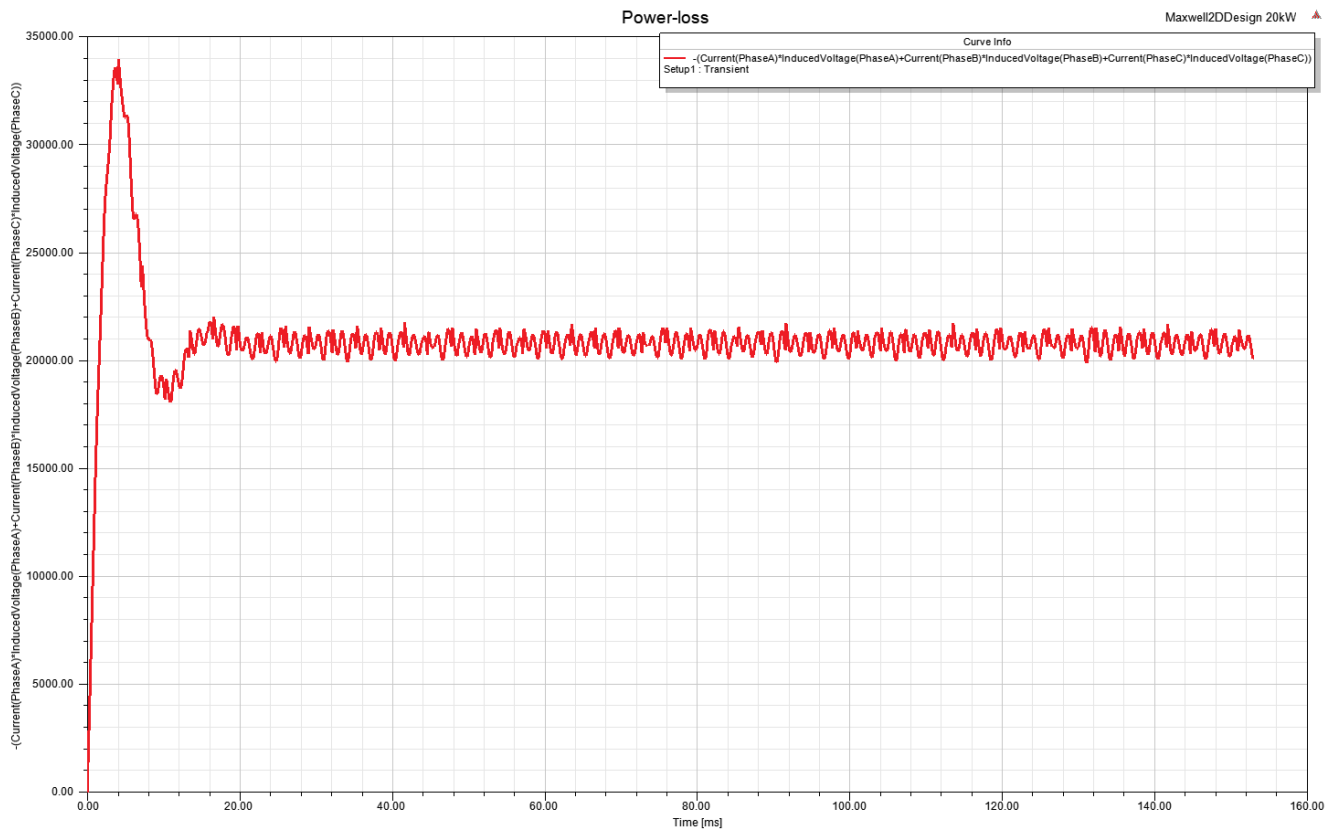


Рис. 3.4 – Мощность генератора

Суммарные потери в генераторе (рис. 3.5)

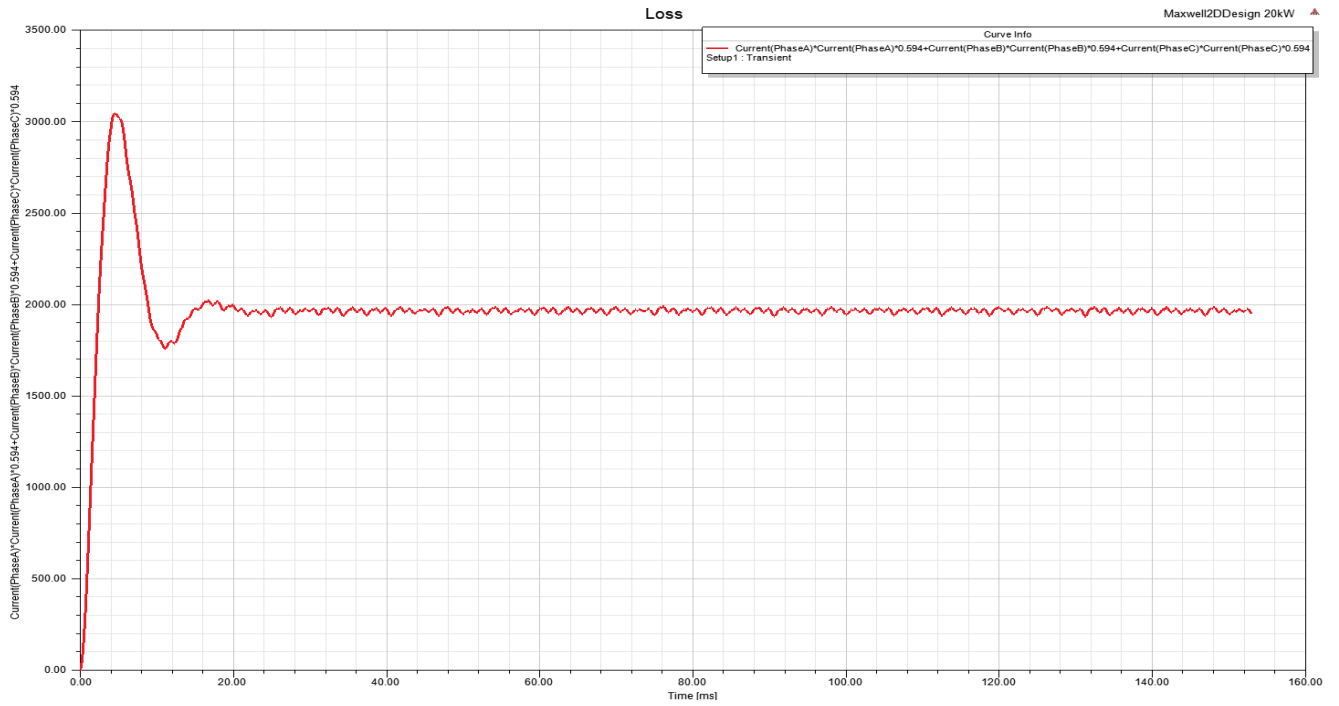


Рис. 3.5 - Потери в генераторе

Внешний вид генератора (рис. 3.6-3.7)

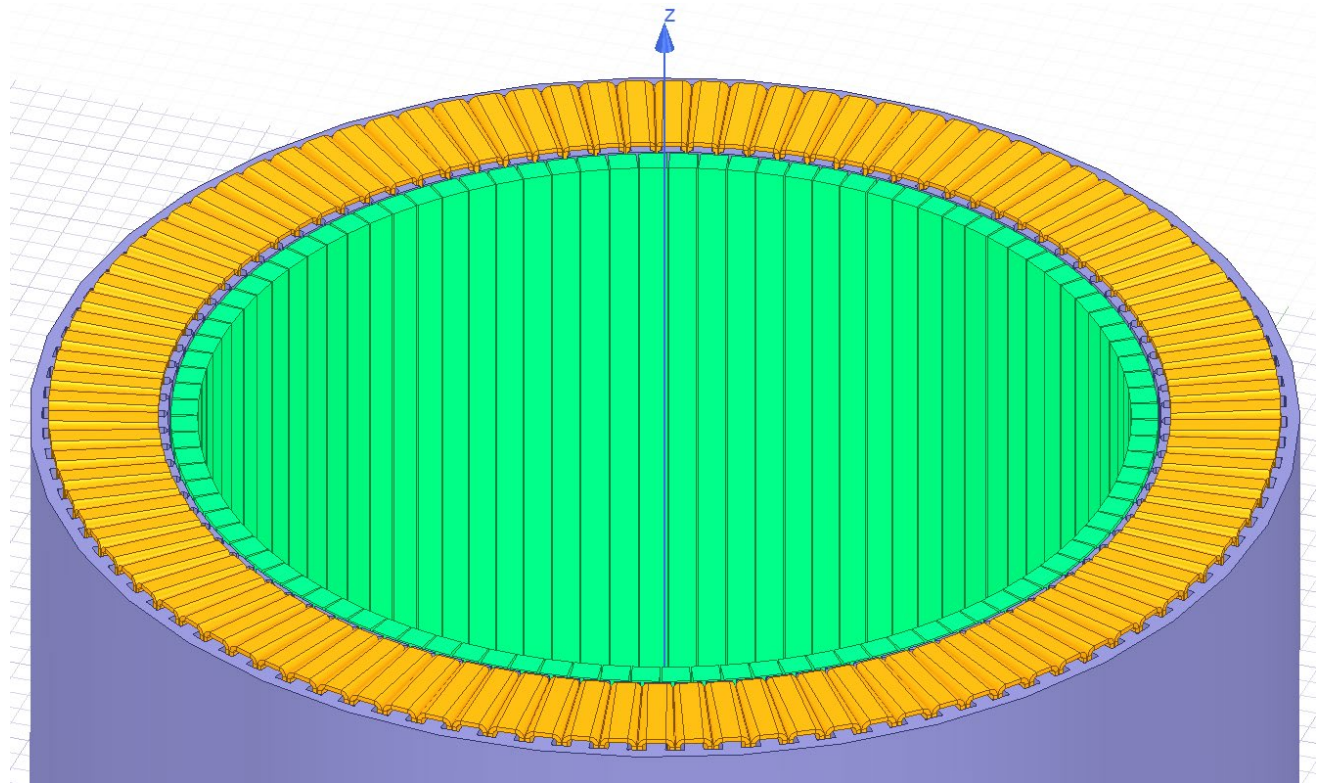


Рис. 3.6 – Общий вид машины

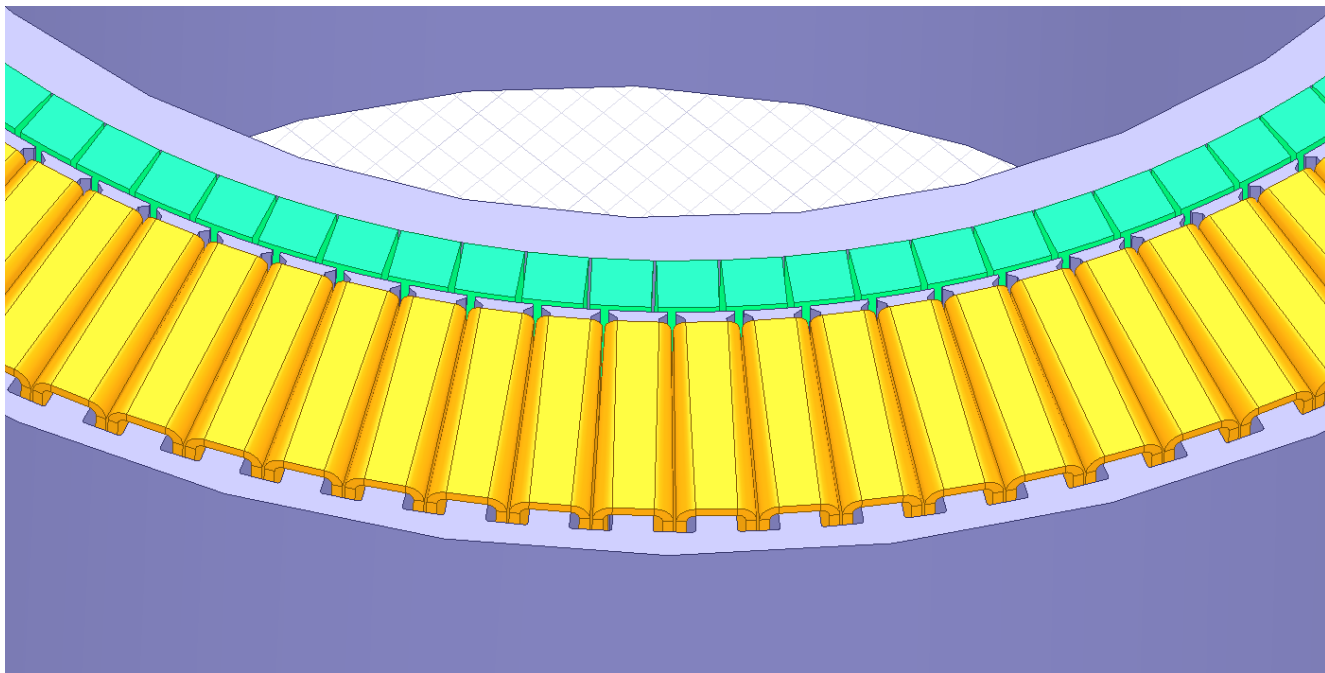


Рис. 3.7 – Общий вид машины детально

При увеличении машины на 20% мощность поднимается двукратно до 40кВт КПД теряет 1% ниже приведена сравнительная таблица 3.2.

Таблица 3.2. Сравнение генераторов.

Параметр	20кВт	40кВт	Δ%
Внешний диаметр статора, м	0.474	0.524	10.549
Внутренний диаметр статора, м	0.37	0.43	16.216
Длина генератора, м	0.785	0.8	1.9108
Внешний диаметр ротора, м	0.368	0.428	16.304
Внутренний диаметр ротора, м	0.33	0.39	18.182
Вес меди в якоре, кг	72.60	92.62	27.58
Вес постоянного магнита, кг	60.28	71.42	18.479
Вес стали статора, кг	235.22	219.35	-6.74
Вес сердечника ротора, кг	59.42	71.31	20.01
Общий вес нетто, кг	427.53	454.72	6.36

Выходная мощность 40кВт генератора с учётом потерь (рис. 3.8)

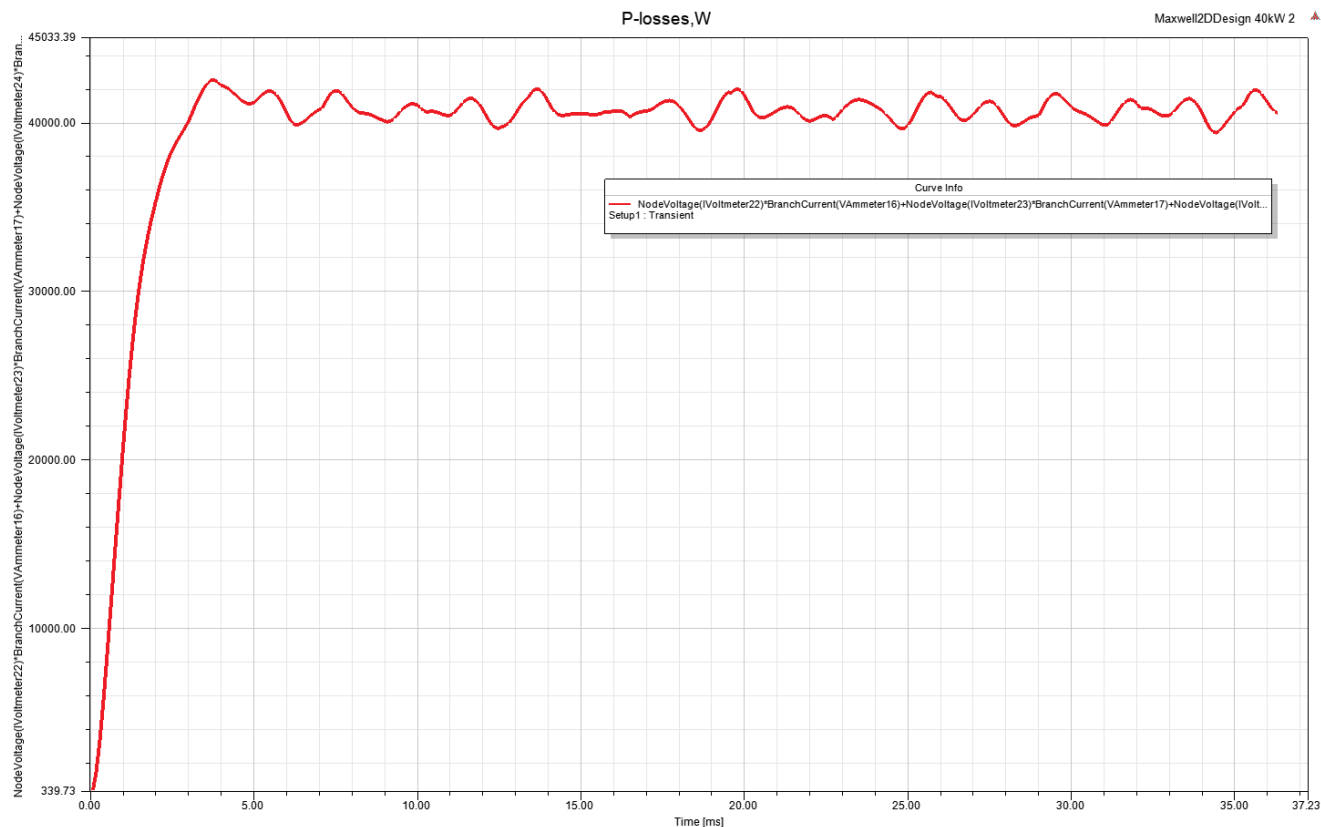


Рис. 3.8 – Выходная мощность

В результате получен тихоходный генератор требуемой мощности, который можно использовать для преобразования энергии без применения мультиплексора что повышает надёжность конструкции.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

4 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

При проектировании преобразователя была выбрана трёхфазная сеть. Так как на выходе генератора переменная частота напряжения и амплитуда то нужно применять преобразовать в стабильные 380В 50Гц.

Автономный инвертер – это преобразователь постоянного тока в переменный работающий в сети, где нет другого источника энергии.

Применяемая система управления является векторной системой управления (рис. 4.1).

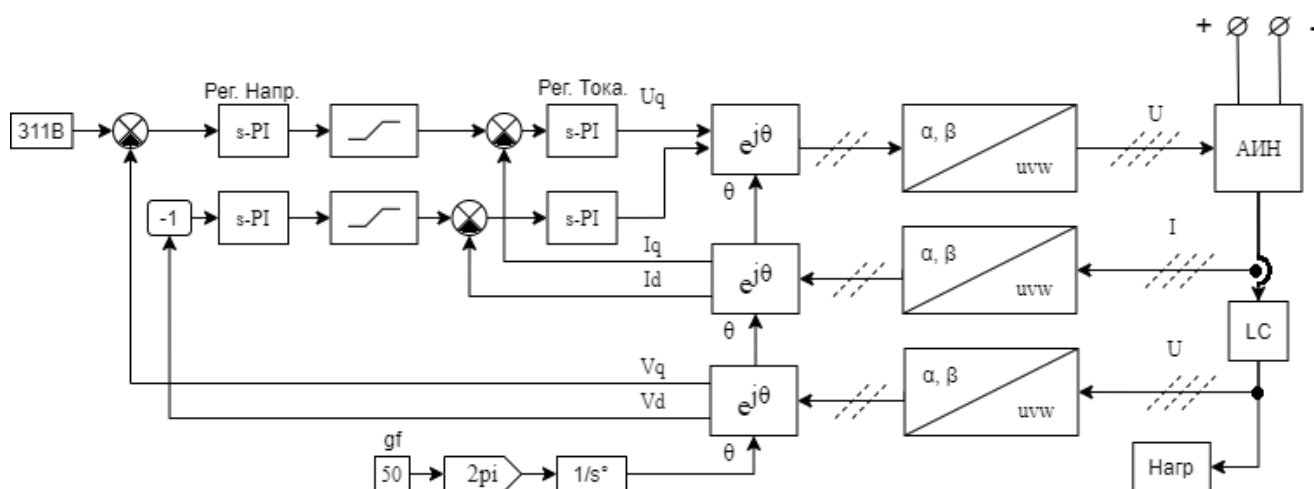


Рис. 4.1 – Функциональная схема преобразователя

Нагрузка системы должна быть симметричной, но характер нагрузки может быть любым. Подчинённый контур регулирования тока позволяет обеспечить защиту от токов короткого замыкания, а также перегрузок. Поскольку система управления ортогональная, предел отсечки по току зависит от мощности и максимален при значении $1,4I_m$ при $\cos\varphi = 0.7$ [16].

Подбор оптимальных параметров LC-фильтра рекомендуется в таком порядке. Так как стоимость индуктора больше то лучше номинал ёмкости выбрать как можно большим. Но с увеличением ёмкости увеличивается ток холостого хода силового моста. Вторым этапом проектирования выступает подбор частоты стоек, при увеличении частоты уменьшается вес индуктора. Ориентируясь на новые разработки выбор пал на Infineon FF8MR12W2M1P_B11 (рис. 4.2) полумостовой

модуль 8 мОм МОП-транзистор CoolSiC 1200V $I_{nom}=150A$ $I_{DRM}=300A$ в виду малой ёмкости затвора частота переключения ШИМ выбрана 22кГц Внутренняя схема (рис. 4.2) содержит защитный терморезистор.



Рис. 4.2 – Внешний вид FF8MR12W2M1P_B11

Драйвер для управления был взят рекомендуемый производителем Infineon 2ED020I12-F2 гальванически развязанный двухканальный IGBT драйвер. Есть аппаратная защита от короткого замыкания. Выбрав ключи и драйвер следует перейти к выбору номинала индуктивности фильтра, который должен быть максимально компактным и иметь малый запас энергии для минимизации выбросов при переключении нагрузки. Противовесом выступают высокочастотные гармоники выходного напряжения, которые нужно снизить до значения ГОСТ менее 5% при моделировании удалось получить амплитуду гармоники менее 2Вольт.

4.1 Цифровая система управления

Система управления берёт своё начало с интегратора угла (рис. 4.3) на него подаётся константа, внутри формируется мгновенное значение угла от 0 до 2π

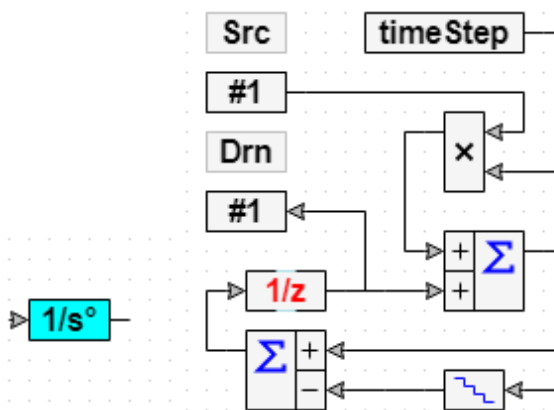


Рис. 4.3 – Интегратор угла

Далее сигнал уходит в инверсный преобразователь Парка (рис. 4.4) он позволяет из двух катетов сформировать вращающийся радиус вектор получить ортогональную систему сигналов. На выходе получаем две синусоиды с 90градусным сдвигом чья амплитуда определена двумя катетами.

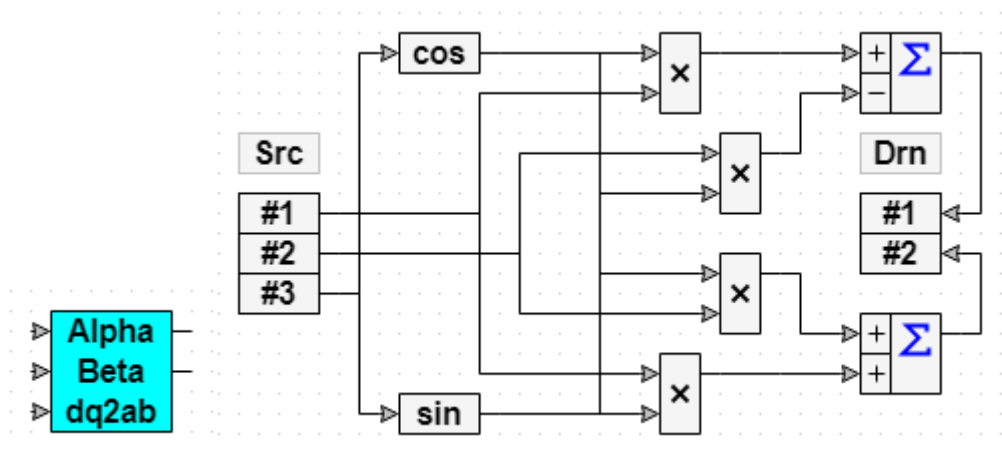


Рис. 4.4 – Преобразователь Парка

Далее получаем из двух синусоид применив преобразователь Эдит Кларк (рис. 4.5) трёхфазную систему. В итоге это позволяет формировать переменное трёхфазное напряжение с заданной амплитудой и фазой.

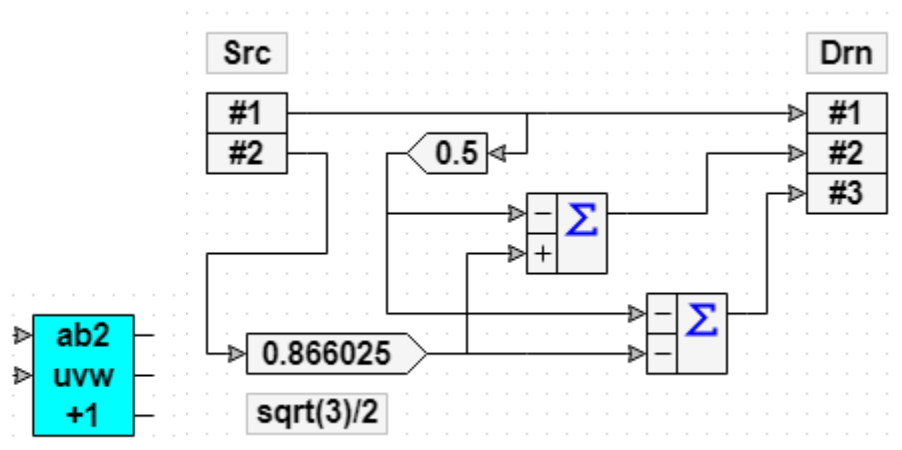


Рис. 4.5 – Преобразователь Эдит Кларк

Для получения токов с датчиков тока используя обратный преобразователь Эдит Кларк – преобразуем трёхфазную систему в двухфазную (рис. 4.6) получив на входе два катета.

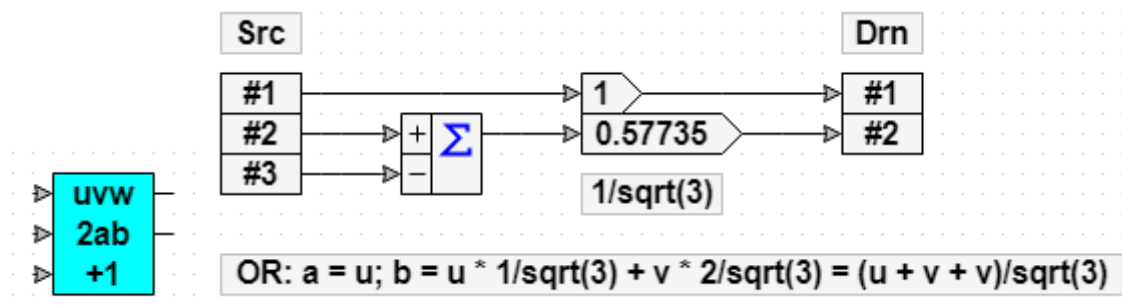


Рис. 4.6 – Обратный преобразователь Эдит Кларк

Составной блок PI-регулятор (рис. 4.7) каждый регулятор отвечает за свой катет. На вход подаём задание для тока в виде констант. Если ошибка присутствует, то регулятор либо поднимет, либо уменьшит соответствующие катеты, и таким образом два регулятора будут регулировать напряжение, подбирать такое напряжение что бы два тока два катета стали равны заданию, которое формируют регуляторы напряжения, которое подаём на нагрузку.

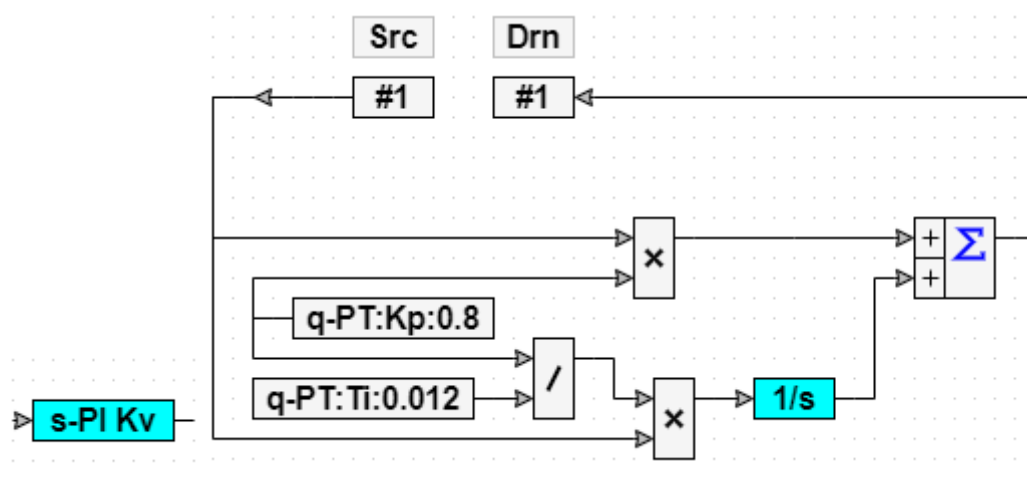


Рис. 4.7 – PI-Регулятор

Аналогичным образом напряжение преобразуется из трёхфазного в двухфазное далее поступает на преобразователь Кларк и на выходе двухфазное

постоянное напряжение, которое поступает на регулятор. Таким образом работает вся система управления.

В рамках этой работы не рассматривался вариант с синхронизацией с сетью, но реализовать такую возможность имея готовую систему управления не сложно, нужно просто заменить константу на входе интегратора угла контуром автоподстройки частоты.

Векторная система управления в сборе (рис. 4.8)

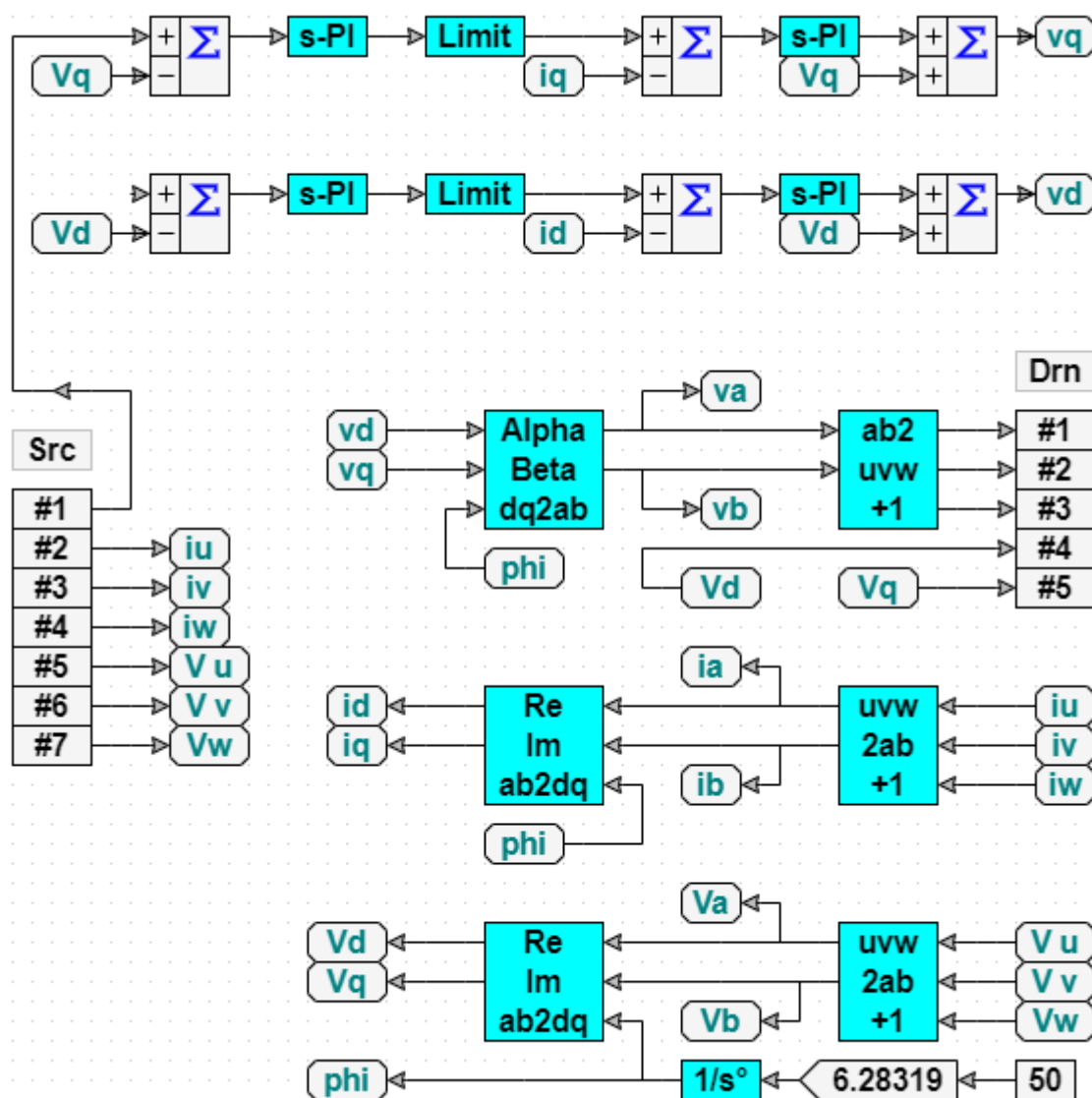


Рис. 4.8 – Векторная система управления

На общей схеме присутствует составной блок Prog (рис. 4.9) он имитирует ступенчатое изменение нагрузки с реверсом.

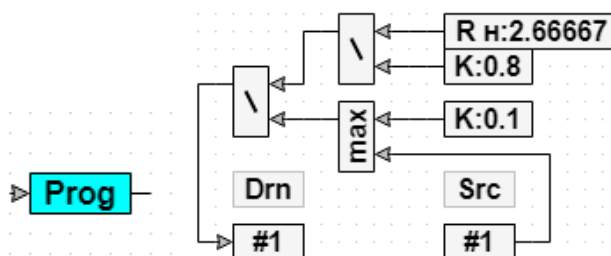
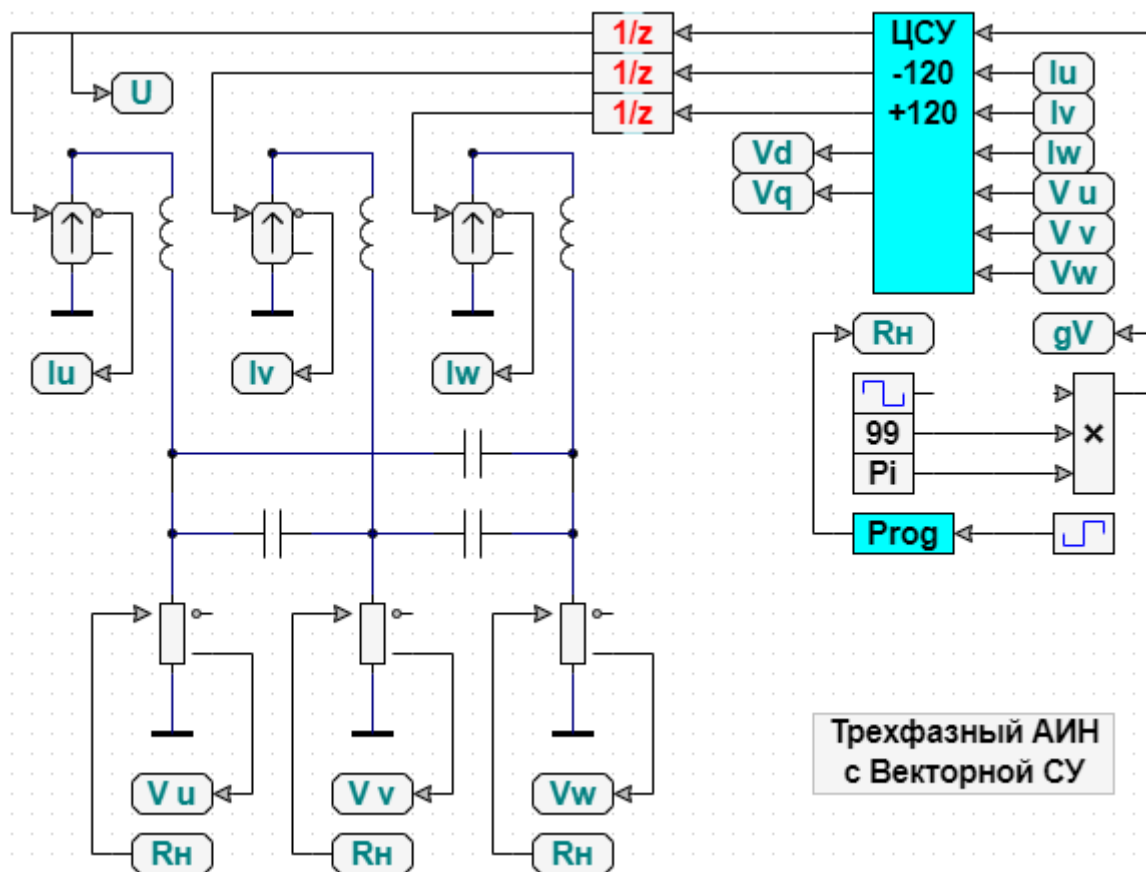


Рис. 4.9 – Задание нагрузки

Линейная непрерывная модель автономного инвертера напряжения с векторной системой управления (рис. 4.10).



Трёхфазный АИН с Векторной СУ

Рис. 4.10 – Линейная модель преобразователя

Первоначальная настройка осуществляется в непрерывной модели, где частота моделирования ограничена лишь интервалом вычисления, управление осуществляется непосредственно переменным сопротивлением, после проверки и

уточнения коэффициентов и значений фильтра можно перейти к дискретной реализации.

Дискретная реализация дополнена источником напряжения и широтно-импульсным модулятором с вычислителем сопротивлений ключей [17] (рис. 4.11).

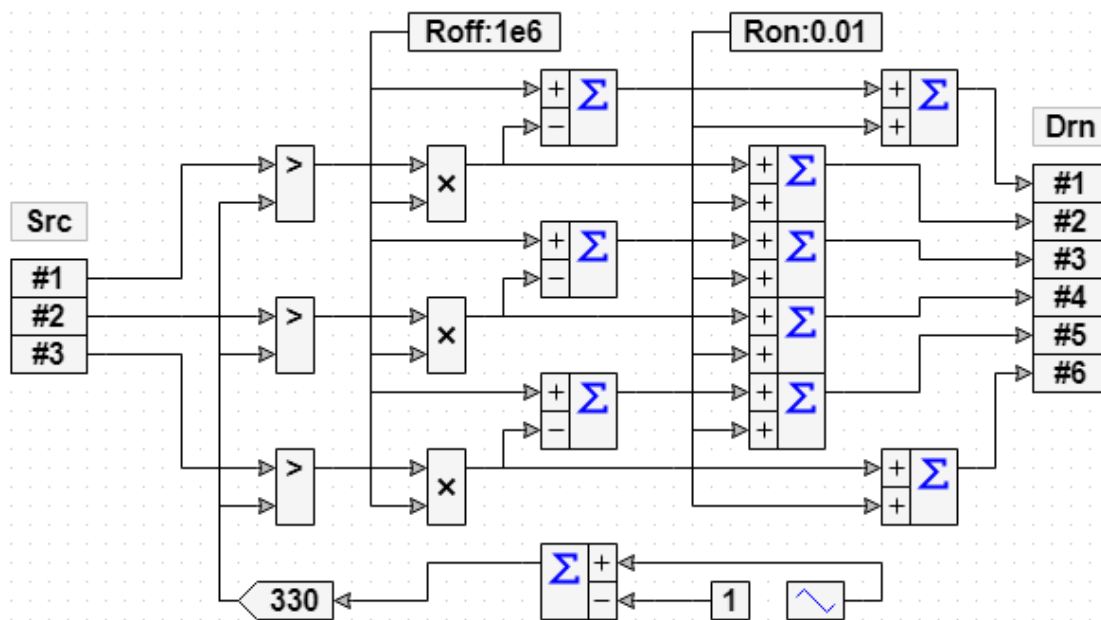


Рис. 4.11 – Дискретная модель ШИМ

Внутренняя структура силовой части моста (рис. 4.12)

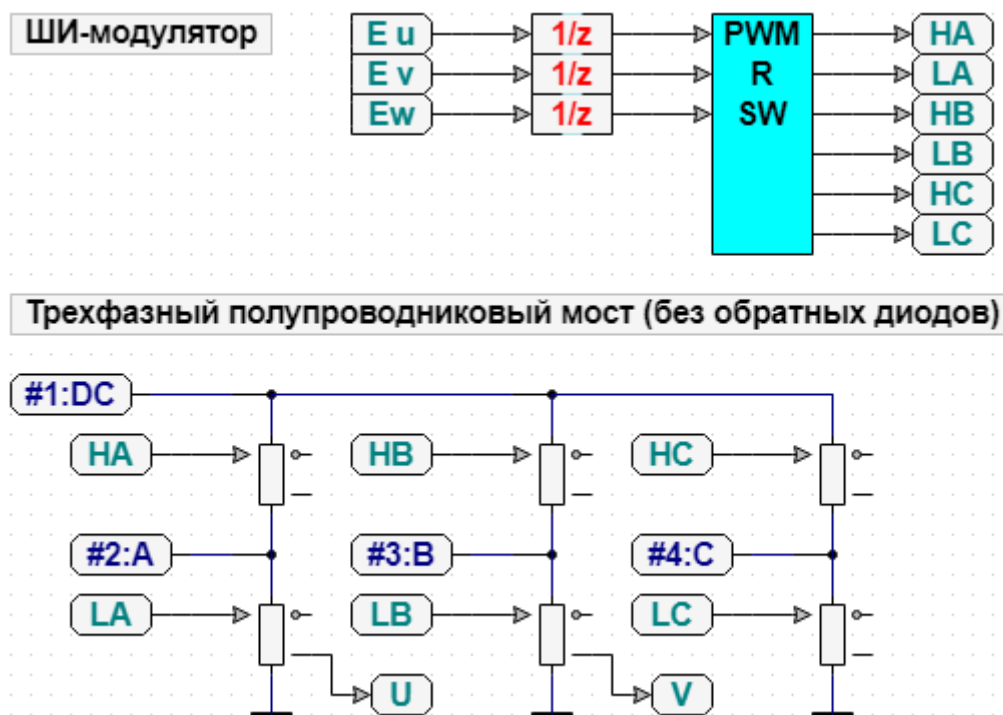


Рис. 4.12 – ШИМ с силовым мостом

Импульсная динамическая модель трехфазного автономного инвертора напряжения (рис. 4.13).

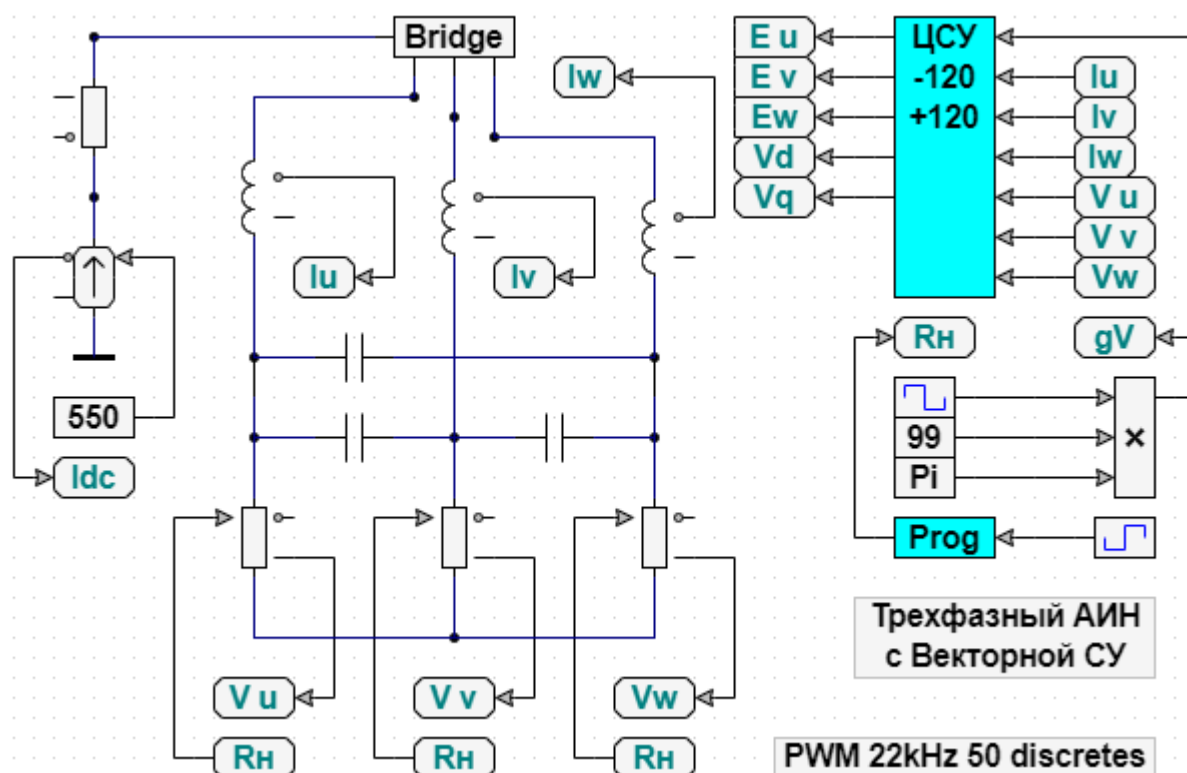


Рис. 4.13 – Импульсная модель преобразователя

Для проверки работоспособности нагрузим систему управления самым сложным случаем - реверс с мгновенной сменой фазы [18]. После моделирования на дискретной модели получим перерегулирование менее 5 Вольт (рис. 4.14-4.15). При мгновенном набрасывании 90% нагрузки напряжение проседает более значительно на 16 Вольт, но восстанавливается менее чем за пол периода, что достаточно с учётом того, что потребитель будет находится на удалении и до потребителя дойдёт лишь ещё меньший скачок [19]. На осциллограмме: V_u – напряжение на фазе u , V_q – мнимая составляющая вектора напряжения, I_u – ток соответствующий фазы, gV – задание напряжения, V_d – вещественная составляющая вектора напряжения.

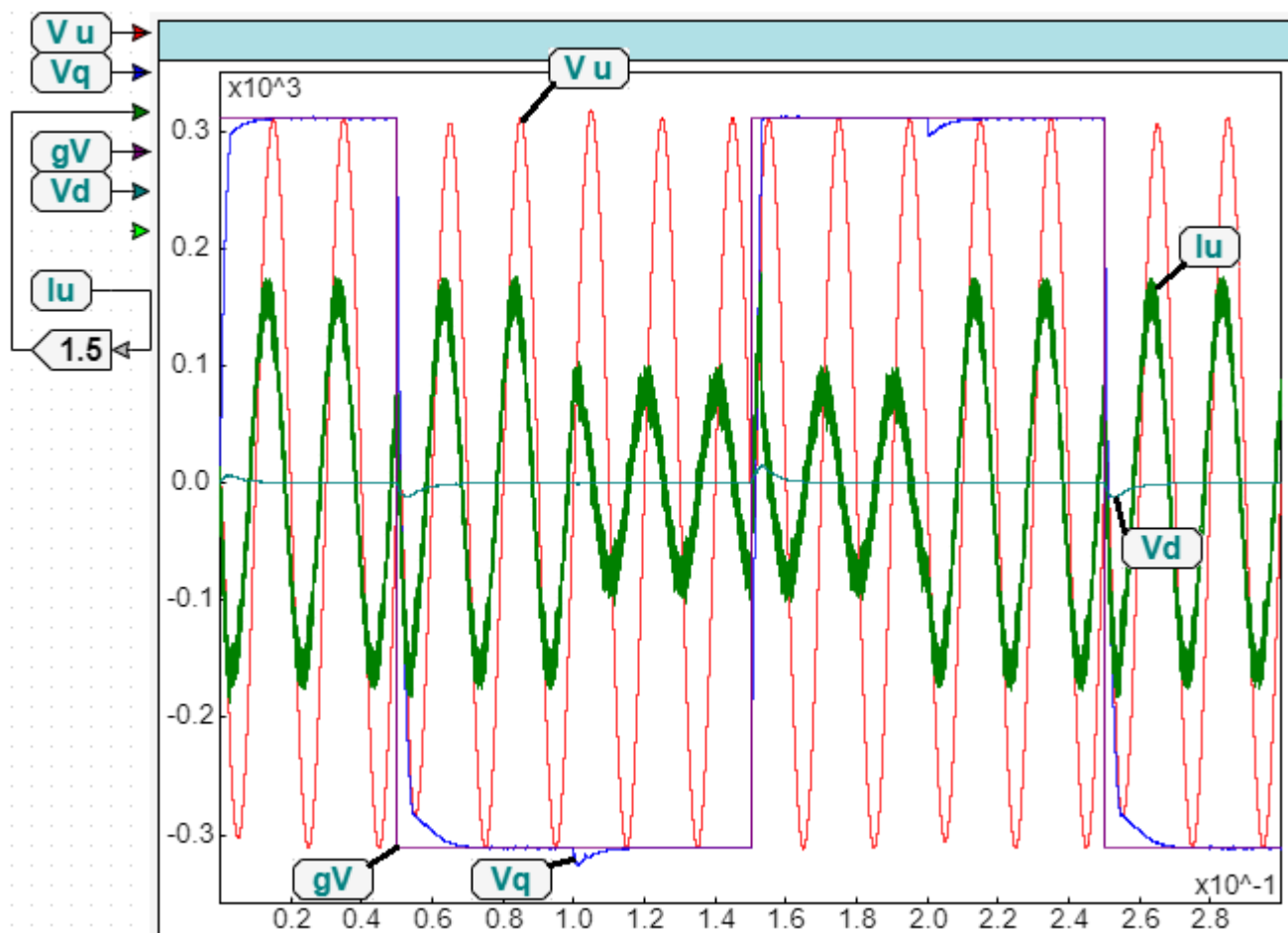


Рис. 4.14 – Осциллограмма переходных процессов

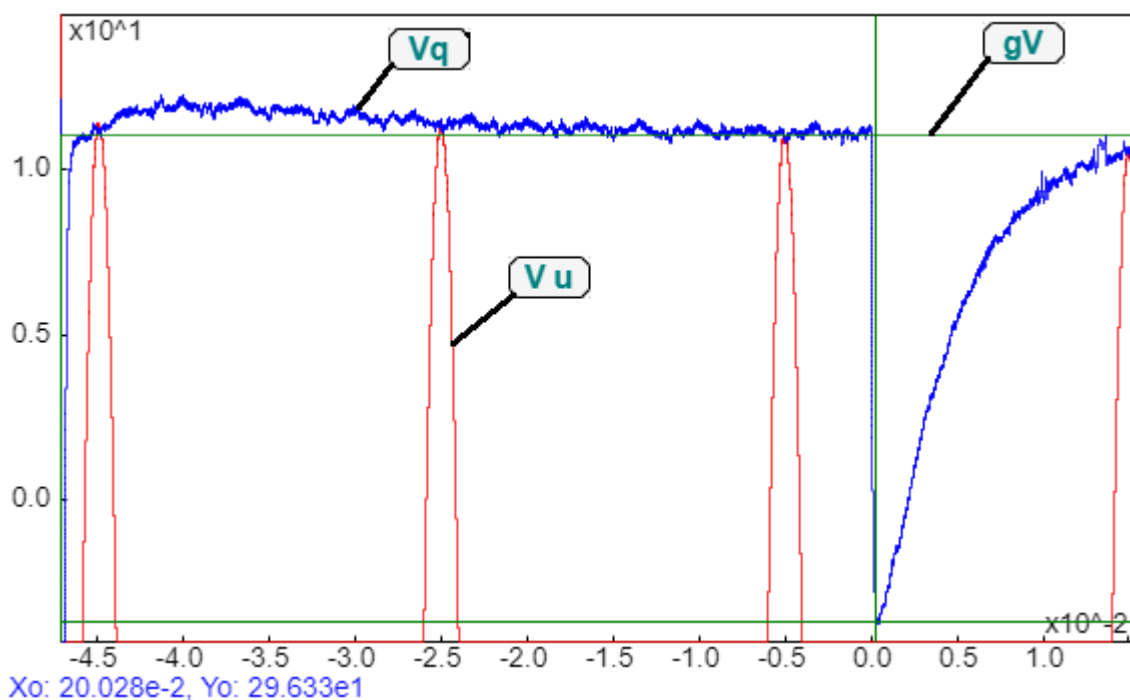


Рис. 4.15 – Осциллограмма мнимой составляющей при реверсе и набрасывании нагрузки

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

4.2 Схема инвертора

После настройки системы стоит задача воплотить систему управления в жизни. Если опыта в разработке подобных систем нет нужно на что-то опираться, а таком случае поможет документация от производителя с типовой рекомендуемой схемой, производитель гарантирует работоспособность после сборки.

Для эффективного управления силовыми ключами необходим драйвер – он выступает в роли усилителя мощности импульсов. Для правильного подбора номинального тока питания драйвера и элементов обвязки драйвера необходимо произвести минимальный расчёт [20].

Частота ШИМ задана 22кГц. Переходный процесс ключа (4.16).

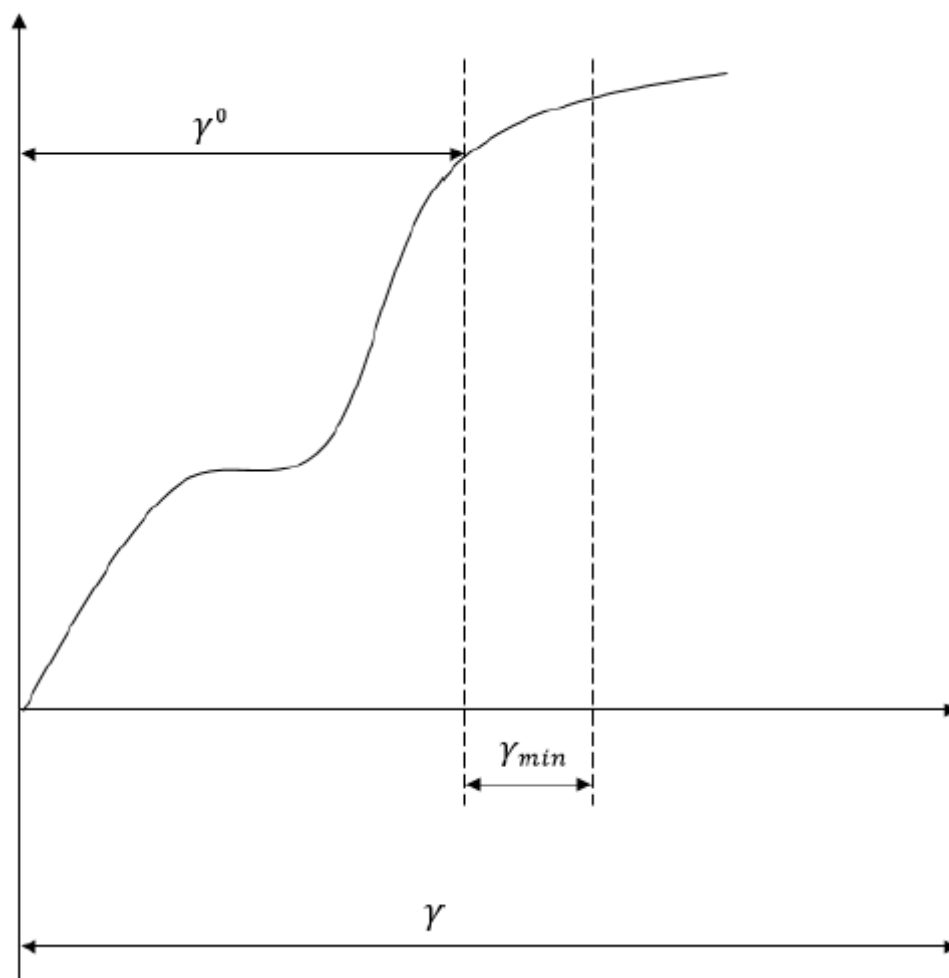


Рис. 4.16 – Циклограмма открытия ключа

Для того, чтобы найти γ , необходимо время включения разделить на период ШИМ

$$\gamma = \frac{t_{ON}}{T_{ШИМ}} = \frac{19,5 \cdot 10^{-8}}{4,54 \cdot 10^{-5}} = 4,29 \cdot 10^{-3} \quad (4.1)$$

где $t_{ON} = 19,5 \cdot 10^{-8} c$ - время включения, по datasheet'a полумоста.

$$T_{ШИМ} = \frac{1}{f_{ШИМ}} = \frac{1}{22000} = 4,5 \cdot 10^{-5} c - \text{период ШИМ.}$$

Теперь рассчитаем ток затвора. Для этого используем следующую формулу:

$$I_g = \frac{P_{DRV}}{\Delta U_g} = \frac{0,164}{20} = 8,18 \cdot 10^{-3} A \quad (4.2)$$

где $P_{DRV} = Q_g \cdot f_{in} \cdot \Delta U_g = 372 \cdot 10^{-9} \cdot 22000 \cdot 20 = 0,164 \text{ Вт}$

$Q_g = 372 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$ - заряд затвора. Взят из технической документации на полумост.

$f_{in} = 22 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ - частота коммутации.

Ток затвора

$$I_{g \max} = \frac{I_g}{\gamma} = \frac{8,18 \cdot 10^{-3}}{4,29 \cdot 10^{-3}} = 1,9 A \quad (4.3)$$

Так как преобразователь трёхфазный нужно сделать схему одной стойки и отмасштабировать на ещё два. На рисунке 4.18 показан драйвер с силовым полумостом.

Для преобразования трёхфазного напряжения в постоянное будем использовать диодный мост VUO86-12NO7 3-фазный, 90А, 1200В (рис. 4.17).



Рис. 4.17 – Выпрямительный мост

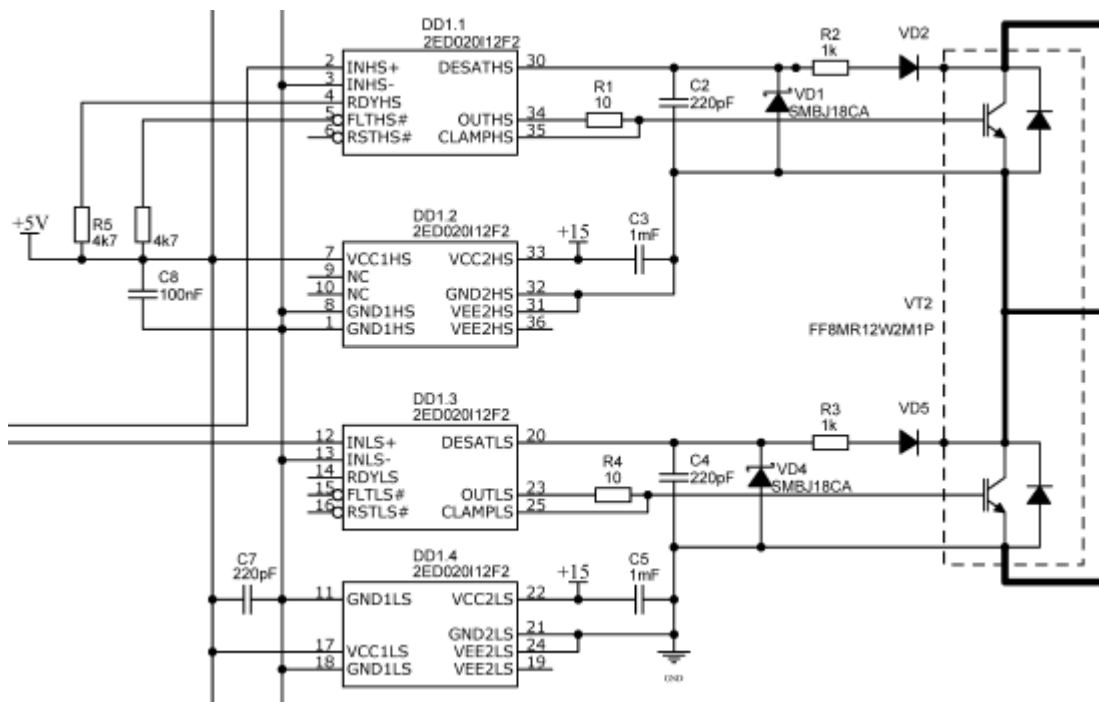


Рис. 4.18 – Схема полумоста с драйвером

Для обеспечения напряжением драйвера и контролера в схеме имеется два понижающих dc-dc преобразователя. Формируем 5В для цепей управления драйвера (рис. 4.19).

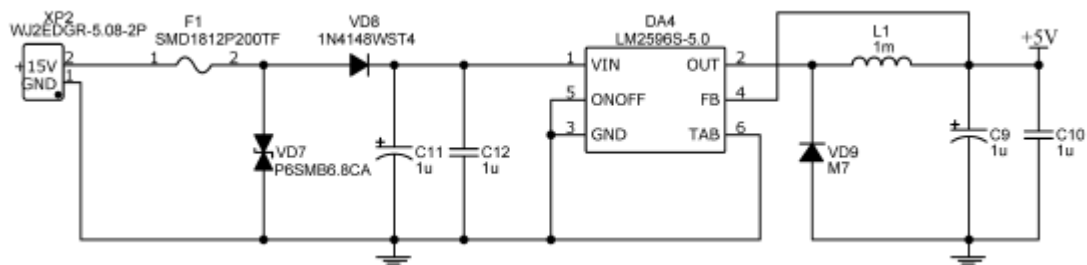


Рис. 4.19 – Преобразователь dc-dc 5В

Преобразователь для обеспечения питания контроллера (рис. 4.20).

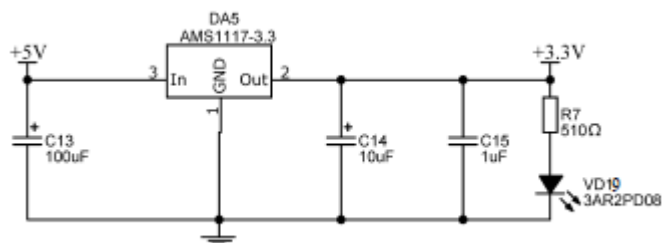


Рис. 4.20 – Преобразователь dc-dc 3,3В

Определившись с компонентами, требуется выбрать контроллер для системы управления. Количество ножек контроллера не должно быть меньше 12 так как под управление ключами задействовано 6 выводов и для снятия тока и напряжения задействовано 6 выводов. Выбор пал на контроллер STM32G431KBT6 в себе он содержит RAM 32кБайт, Flash 128кБайт, тактовая частота 170МГц, количество входов/выходов 26. Имеется достаточный набор интерфейсов управления CAN, I2C, I2S, SAI, SPI, USART, USB.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

5 СЕБЕСТОИМОСТЬ МИНИ-ГЭС

Для примерного понимания стоимости всей конструкции попробуем посчитать все составляющие конструкции. Начнём считать по порядку.

Стоимость турбины не будет большой, но тут нужно смотреть на то какие подшипники применять, так как от стоимости подшипников будет зависеть время бесперебойной работы турбины.

Стоимость генератора складывается из стоимости магнитов, меди, электротехнической стали. Попробуем рассчитать примерную стоимость магнитов.

$$C_{GEN} = m_{mag} \cdot C_{mUD} = 60 \cdot 20000 = 1200000 \text{руб} \quad (5.1)$$

где $m_{mag} = 60 \text{кг}$ - масса магнитов

$C_{mUD} = 20000 \text{руб}$ - примерная стоимость высококоэрцитивных магнитов, производимых в России. Если брать магниты из-за рубежа, то стоимость уменьшается.

Стоимость преобразователя складывается из стоимости выпрямителя, контроллера, силовых ключей, индуктора и ёмкости фильтра. Силовая сборка из двух ключей стоит $C_{kUD} = 12000 \text{руб}$ тогда стоимость моста вычисляется как

$$C_{KEY} = C_{kUD} \cdot n = 12000 \cdot 3 = 36000 \text{руб} \quad (5.2)$$

Контроллер STM32G431KBT6 в розничной продаже стоит 297руб.

Исходя из того, что МГЭС не прерывает выработку энергии можно посчитать что если загружать на 100%, то в сутки получаем

$$20 \text{кВт} \cdot 24 \text{часа} = 480 \text{кВт} \cdot \text{ч} \quad (5.3)$$

Месячная выработка энергии

$$20 \text{кВт} \cdot 24 \text{часа} \cdot 30 = 14400 \text{кВт} \cdot \text{ч} \quad (5.4)$$

В год выработка составит

$$20 \text{кВт} \cdot 24 \text{часа} \cdot 365 = 175,2 \text{МВт} \cdot \text{ч} \quad (5.5)$$

С учётом стоимости электроэнергии в Челябинске для частного лица по общему одно ставочному тарифу 3.25руб за 1кВт·ч можно узнать стоимость выработанной энергии в год

$$20\text{кВт} \cdot 24\text{часа} \cdot 365 \cdot 3,25 = 569400\text{Руб} \quad (5.6)$$

Если использовать генератор на 40кВт то

$$20\text{кВт} \cdot 24\text{часа} \cdot 365 \cdot 3,25 = 1138800\text{Руб} \quad (5.7)$$

При этом генератор на 40кВт будет дороже на 20%, а силовой преобразователь можно оставить без изменений, так как при подборе силовых стоек подбор осуществлялся по времени открытия и скорость удовлетворяла только 150А ключей.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа, расчётов и моделирования был разработан генератор, преобразователь, турбина и схема системы управления. При моделировании генератора был подтверждён расчёт результаты которого сошлись. Моделирование преобразователя дало наглядность и понимание процессов в преобразователе, а разработка схемы дополнительный опыт работы с документацией.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. До 2030 года производство электроэнергии на мировых ГЭС увеличится на 50%. //Блог новостного сайта <https://finance.ua/>. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <http://news.finance.ua/ru/news/-/437869/do-2030-goda-proizvodstvo-elektroenergii-na-mirovyh-ges-uvlichitsya-na-50> (18.03.2020)
2. Преимущества и недостатки гидроэлектростанций. //Блог технического сайта www.ensy.ru. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <http://www.ensy.ru/energiya/preimuschestva-i-nedostatki-gidroelektrostantsiy.html> (18.03.2020)
3. Друзь Н. Положение дел по использованию возобновляемых источников энергии в Центральной Азии / Н. Друзь, Н. Борисова, А. Асанкулова, Р. Захидов, У. Таджиев // Перспективы их использования и потребности в подготовке кадров. /ОБЗОР–ЮНЕСКО, – Алмата: –2010. –144с.
4. Н. [Li](#), D. [Chen](#), F. [Wang](#), Н. [Zhang](#), [Switched Model and Dynamic Analysis of a Hydroturbine Governing System in the Process of Load Rejection Transient](#) ([Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME](#) – 2017), pp.139
5. A. Dietz, A. Groeger, C. Klingler, Efficiency improvement of small hydroelectric power stations with a permanent-magnet synchronous generator (1st International Electric Drives Production Conference 2011), Proceedings 6085557, – P. 93-100
6. F.A. [Farret](#), M.G. [Simoes](#), [Michels](#), [A.Small](#), [Hydroelectric Systems](#) –2013, ([Green Energy and Technology](#) 59), pp. 151-184.
7. T. [Wegiel](#), , D. [Borkowski](#), [Variable speed small hydropower plant](#) (Proceedings – 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems), pp. 167-174.
8. Новый бельгийский стартап: ГЭС, которая не влияет на поток реки. //Блог новостного сайта uaEnergy [Электронный ресурс]. Режим доступа:

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

URL: <http://https://uaenergy.com.ua/post/32398/novy-beljiyskiy-startap-ges-kotoraya-ne-vliyaet-na-potok-reki> (18.03.2020)

9. Дударева Н., Загайко С. Самоучитель SolidWorks / Дударева Н., Загайко С., БХВ-Петербург, 2011, 416 с.

10. Иванов Д.В., Доль А.В. Введение в Ansys Workbench: Учеб.-метод. пособие для студентов естественно-научных дисциплин. – Саратов: Амирит, 2016. – 56 с.

11. Zhong Q. Hornik T. Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration/Zhong Q. Hornik T. First Edition: IEEE press,2013.- 411 p.

12. Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. Пособие для электромех. И электроэнерг. Спец. Вузов. -М.: Высш. шк., 1990. -416 с.

13. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: Учеб. Для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. -3-е изд., испр. И доп. -М.: Высш. шк., 2002. -757с.: ил.

14. Лифанов, В.А. Расчет машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов: учебное пособие / В.А. Лифанов. -2-е изд., перераб. и доп.

15. Огородникова О.М. Компьютерный инженерный анализ в среде ANSYS Workbench [Электронный ресурс] / Екатеринбург: Техноцентр компьютерного инжиниринга УрФУ. 2018. 350 с.

16. Цифровые управляющие системы для электропривода URL: https://klinachevnu.ru/Jigrein/dcs_knv.htm

17. Векторное управление электродвигателем «на пальцах» URL: https://habr.com/ru/company/npf_vektor/blog/367653/

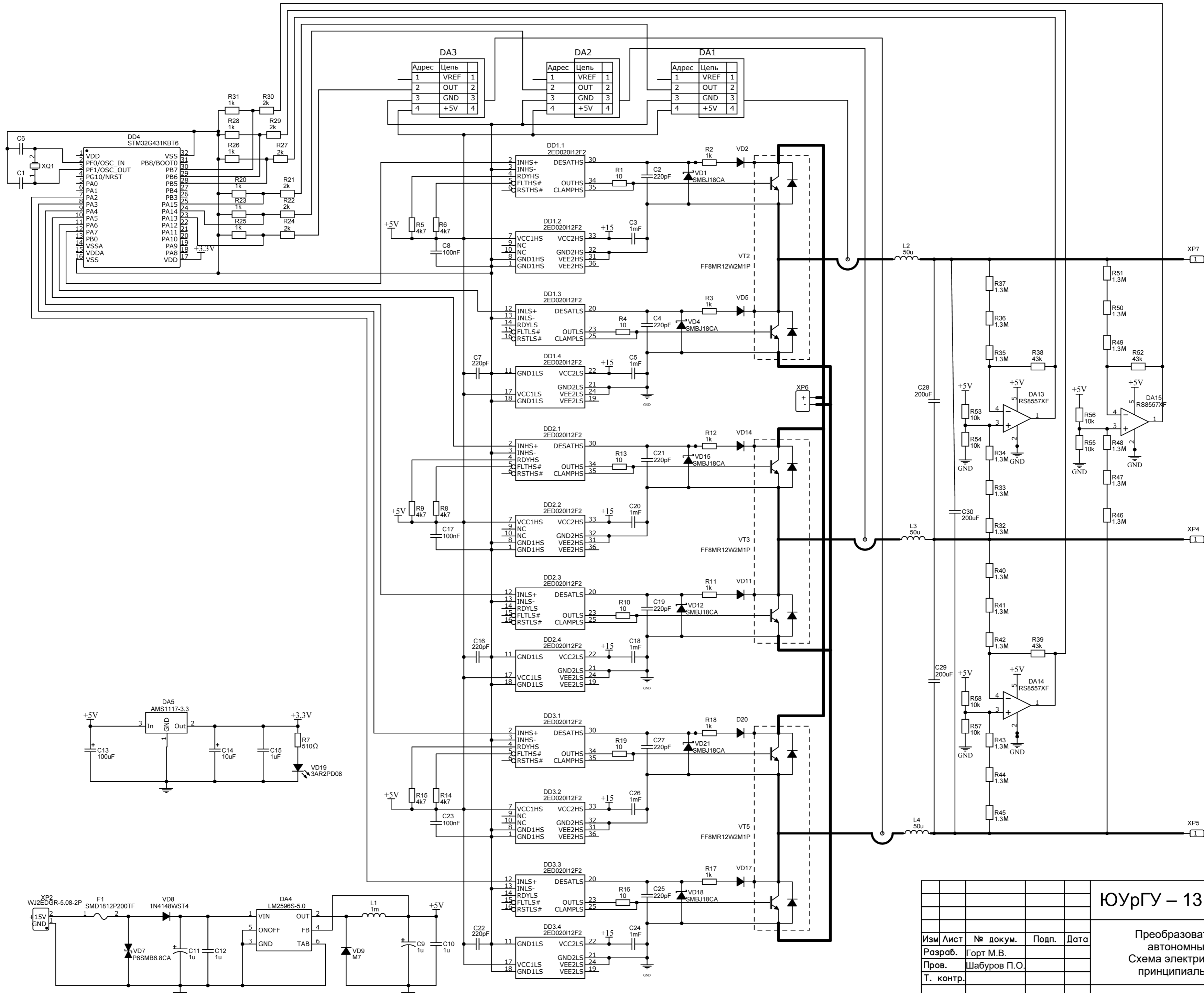
18. Калачев Ю.Н., Векторное регулирование (заметки практика) / Калачев Ю.Н. : «ЭФО», 2017.- 63 с.

19. Калачев Ю.Н., SimInTech: моделирование в электроприводе / Калачев Ю.Н. : ДМК, 2019.- 90 с.

20. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники / Хоровиц П., Хилл У. изд. Мир, 2003.- 704 с.

					ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Инв. № подл. Подп. и дата Взамен инв. № Инв. № дубл. Подп. и дата Справ. № Перв. примен.

ЮУрГУ – 13.03.02.2020.116.04 ЭЗ			
Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Горт М.В.		
Пров.	Шабуров П.О.		
Т. контр.			
Н. контр.	Шабуров П.О.		
Утв.	Дегтярь В.Г.		
Преобразователь автономный. Схема электрическая принципиальная			
Лит. Б1		Листов 1	
ЮУрГУ Летательные аппараты			

	Перв. примен.	Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примеч.
		<u>Конденсаторы</u>			
		C1	0402CG120J500NT	1	SMD1206 X7R 12pF ±10% 50V
		C2	0603B221K500NT	1	SMD1206 X7R 220pF ±10% 50V
		C3	C1005A105K100NT	1	SMD1206 X7R 1µF ±10% 50V
		C4	0603B221K500NT	1	SMD1206 X7R 220pF ±10% 50V
		C5	C1005A105K100NT	1	SMD1206 X7R 1µF ±10% 50V
	Справ. №	C6	0402CG120J500NT	1	SMD1206 X7R 12pF ±10% 50V
		C7	0603B221K500NT	1	SMD1206 X7R 220pF ±10% 50V
		C8	MA0603XR104K101PRG	1	SMD1206 X7R 100nF ±10% 50V
		C9	CL21(CBB21)	1	1мкФ, 50В, 105°С, 20%, 5x11мм P:2мм
		C10	C1005A105K100NT	1	SMD1206 X7R 1µF ±10% 50V
		C11	CL21(CBB21)	1	1мкФ, 50В, 105°С, 20%, 5x11мм P:2мм
		C12	C1005A105K100NT	1	SMD1206 X7R 1µF ±10% 50V
		C13	B41851A6107M000	1	100мкФ, 50В, 105°С, 20%, 8x12мм
		C15	C1005A105K100NT	1	SMD1206 X7R 1µF ±10% 50V
		C14	ECAPNP10uF/50V	1	10мкФ, 50В, 105°С, 20%, 5x11мм P:2мм
		C16	0603B221K500NT	1	SMD1206 X7R 220pF ±10% 50V
		C17	MA0603XR104K101PRG	1	SMD1206 X7R 100nF ±10% 50V
		C18	C1005A105K100NT	1	SMD1206 X7R 1µF ±10% 50V
	C19	0603B221K500NT	1	SMD1206 X7R 220pF ±10% 50V	
	C20	C1005A105K100NT	1	SMD1206 X7R 1µF ±10% 50V	
	C21, C22	0603B221K500NT	2	SMD1206 X7R 220pF ±10% 50V	
	C23	MA0603XR104K101PRG	1	SMD1206 X7R 100nF ±10% 50V	
	C24	C1005A105K100NT	1	SMD1206 X7R 1µF ±10% 50V	
	C25	0603B221K500NT	1	SMD1206 X7R 220pF ±10% 50V	

						ЮУрГУ – 13.03.02.2020 116.04 ПЭЗ			
	Изм	Лис	№ докум.	Подп.	Дата				
Инв. №подл.	Разраб.		Горт М.В.			Преобразователь автономный Схема электрическая принципиальная Перечень элементов	Лит.	Лист	Листов
	Пров.		Шабуров П.О.					62	3
	Н. контр.		Шабуров П.О.				ЮУрГУ Летательные аппараты		
	Утв.		Дегтярь В.Г.						

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примеч.
C26	C1005A105K100NT	1	SMD1206 X7R 1μF ±10% 50V
C27	0603B221K500NT	1	SMD1206 X7R 220pF ±10% 50V
C28...C30	LGX2H471MELC58	3	-25°C - 105°C
<u>Микросхемы</u>			
DA1...DA3	HAS 200-S	3	
DA4	LM2596S-5.0	1	TO-263
DA5	AMS1117-3.3	1	SOT-223
DA13...DA15	RS8557XF	3	SOT23-5
DD1...DD3	2ED020I12F2	3	PG-DSO-36-58
DD4	STM32G431KBT6	1	LQFP
<u>Предохранители</u>			
FU1	SMD1812P200TF	1	SMD1812
<u>Индуктивности</u>			
L1	1mH	1	
L2...L4	18μH	3	
<u>Резисторы</u>			
R1	RC0402FR-0710RL	1	5%
R2	RC0402FR-071KL	1	1%
R4	RC0402FR-0710RL	1	5%
R5, R6	RC0402FR-074K3L	2	5%
R7	RC0402FR-07510RL	1	5%
R8, R9	RC0402FR-074K3L	2	5%
R10	RC0402FR-0710RL	1	5%
R11, R12	RC0402FR-071KL	2	1%
R13	RC0402FR-0710RL	1	5%
R14	RC0402FR-074K3L	1	5%
R15, R16	RC0402FR-0710RL	2	5%

Ивн. № подл.	Подп. и дата	Ивн. № дубл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ивн. № дубл.	Подп. и дата	Ивн. № подл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

ЮУрГУ – 13.03.02.2020 116.04 ПЭЗ

Лист
63

Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примеч.		
R17, R18	RC0402FR-071KL	2	1%		
R19	RC0402FR-0710RL	1	5%		
R20	RC0402FR-071KL	1	1%		
R21, R22	RC0402FR-072KL	2	1%		
R23	RC0402FR-071KL	1	1%		
R24	RC0402FR-072KL	1	1%		
R25, R26	RC0402FR-071KL	2	1%		
R27...R30	RC0402FR-072KL	4	1%		
R31	RC0402FR-071KL	1	1%		
R32...R37	RC0402FR-071M3L	6	5%		
R38, R39	RC0402FR-0743KL	2	5%		
R40...R51	RC0402FR-071M3L	11	5%		
R52	RC0402FR-0743KL				
<u>Приборы полупроводниковые</u>					
VD1	SMBJ18CA	1	DO-214AA SMB		
VD2	MUR4100ERLG	1	DO201AD		
VD4	SMBJ18CA	1	DO-214AA SMB		
VD5	MUR4100ERLG	1	DO201AD		
VD7	P6SMB6.8CA	1	DO-214AA		
VD8	1N4148WST4	1	SOD-323		
VD9	HER508	1	DO201AD		
VD11	MUR4100ERLG	1	DO201AD		
VD12	SMBJ18CA	1	DO-214AA SMB		
VD14	MUR4100ERLG	1	DO201AD		
VD15	SMBJ18CA	1	DO-214AA SMB		
VD17	MUR4100ERLG	1	DO201AD		
VD18	SMBJ18CA	1	DO-214AA SMB		
VD20	MUR4100ERLG	1	DO201AD		
VD21	SMBJ18CA	1	DO-214AA SMB		
VT1...VT3	FF8MR12W2M1P	3			
ЮУрГУ – 13.03.02.2020 116.04 ПЭЗ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					64

