

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет приборостроения,
информационных технологий и
электроники

Кафедра
«Электроэнергетика и электротехника»

Направление подготовки

13.03.02. «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль

«Электрооборудование автомобилей и
тракторов»

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА
на тему

Энергетическая силовая установка полноприводного электромобиля

Студент

 19.06.18
(подпись, дата)

Мызенков
Павел Валерьевич

Руководитель

 19.06.18
(подпись, дата)

Тимохин С.В.

Нормоконтролер

вед. инженер,
III у

 19.06.18
(подпись, дата)

Боброва Л.Р.

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 19.06.18 № 12)

Заведующий кафедрой

 21.06.18 Ашанин В.Н.
(подпись)

Работа защищена с
отметкой

Отлично

(протокол заседания ГЭК от 22.06.18 № 6)

Секретарь ГЭК


(подпись)

Бростилова Т.Ю.

Реферат

Пояснительная записка 80 листов, 37 рисунков, 29 таблиц, 6 листов формата А1, 22 источника, 2 приложения.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИЛОВАЯ УСТАНОВКА, ПОЛНОПРИВОДНЫЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ, КОНТРОЛЛЕР-ИНВЕРТОР, МЕХАНИЧЕСКАЯ ТРАНСМИССИЯ, МОТОР-КОЛЕСО, ЭЛЕКТРОННЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛ, ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО.

Объектом разработки является энергетическая силовая установка для полноприводного электромобиля.

Цель работы – разработка энергетической силовой установки для полноприводного электромобиля мощностью от 15 до 20 кВт.

В процессе работы проводилась разработка двух типов силовых установок для полноприводного электромобиля: с одним электрическим двигателем при использовании механической трансмиссии и с четырьмя электрическими двигателями, встраиваемые в колеса электромобиля.

В результате проведенной работы были разработаны энергетические силовые установки для полноприводного электромобиля с использованием одного электрического двигателя мощностью 20 кВт, и с использованием мотор-колес суммарной мощностью 16 кВт, разработано устройство распределения мощности для силовой установки с мотор-колесами, произведен расчет запаса хода и энергетической эффективности. Также разработано и рассчитано зарядное устройство для аккумуляторной батареи силовой установки с комбинированным режимом заряда и возможностью заряда от трехфазной промышленной сети переменного тока.

Основные технико–эксплуатационные характеристики:

- суммарная мощность электродвигателя силовой установки;
- энергетическая эффективность;
- запас хода.

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Мызенков			Энергетическая силовая установка полноприводного электромобиля Пояснительная записка	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Тимохин						
Н. Контр.		Боброва				Группа 14ПЭ2		
Утверд.		Ашанин						

Содержание

Введение.....	6
1 Обзор электромобилей с полноприводной силовой установкой	7
2 Патентный поиск.....	10
3 Анализ возможных вариантов реализации силовой установки для полноприводного электромобиля.....	15
4 Разработка энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с механической трансмиссией	17
4.1 Разработка структурной схемы энергетической силовой установки.....	17
4.2 Выбор элементов и устройств для силовой установки полноприводного электромобиля с механической трансмиссией.....	18
4.3 Разработка принципиальной схемы энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с механической трансмиссией.....	25
5 Разработка энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с мотор-колесами.....	29
5.1 Разработка структурной схемы энергетической силовой установки.....	29
5.2 Выбор элементов и устройств для силовой установки полноприводного электромобиля с мотор-колесами.....	30
5.3 Разработка электронного дифференциала для силовой установки электромобиля с мотор-колесами.....	36
5.4 Разработка принципиальной схемы энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с мотор-колесами.....	51
6 Расчет эффективности и запаса хода силовых установок.....	54
7 Принцип действия силовой установки полноприводного электромобиля	58
8 Алгоритм работы силовой установки	59
9 Разработка зарядного устройства для АКБ силовой установки.....	60
9.1 Основные требования к зарядному устройству АКБ.....	60
9.2 Разработка структурной схемы зарядного устройства.....	61

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

9.3 Расчет силовой цепи зарядного устройства.....	63
9.4 Расчет управляющей схемы зарядного устройства.....	67
9.5 Принцип действия зарядного устройства.....	77
Заключение	79
Список использованных источников	80
Приложение А - Копия графической части.....	80
Приложение Б - Перечень элементов.....	87

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Введение

Транспортно-дорожный комплекс является мощным источником загрязнения природной среды. Из 35 млн. тонн вредных выбросов 89% приходится на выбросы автомобильного транспорта и предприятий дорожно-строительного комплекса, также транспорт является одним из основных источников шума в городах и вносит значительный вклад в тепловое загрязнение окружающей среды, поэтому повышение экологичности автотранспорта является одной из важнейших проблем современного автомобилестроения [1]. Некоторые автопроизводители нашли решение в производстве электромобилей, число которых с каждым годом на дорогах растет. В настоящий момент большинство выпускаемых электромобилей городского класса мало пригодны для езды по пересеченной местности, бездорожью или грунтовым дорогам из-за малого клиренса. Бензиновые полноприводные автомобили зачастую имеют большую мощность двигателя, чем автомобили с задним или передним приводом, поэтому количество вредных выбросов автомобилей данного класса больше и влечет за собой больший экологический вред. Использование полноприводной силовой установки в электромобиле, прежде всего в электромобилях с высоким клиренсом, значительно увеличит показатель проходимости. Помимо наличия всех ведущих колес, использование в силовой установке электрического двигателя, обладающего большим крутящим моментом в большом диапазоне его частоты вращения, дает значительные преимущества, по сравнению с бензиновыми двигателями аналогичной мощности [2].

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 Обзор электромобилей с полноприводной силовой установкой

Силовая установка внедорожника *Land Rover Defender Electric* состоит из 95-сильного (330 Н*м) электромотора и литий-ионных батарей емкостью 27 киловатт-часов, что позволяет пройти около 80 километров пути. Заряда аккумуляторов должно хватить на целый восьмичасовой рабочий день, после чего внедорожник может отправляться на отдых, где его ожидает подзарядка. При использовании 7-киловаттной зарядки полный цикл занимает 4 часа, а используя 3-киловаттную зарядку можно восстановить работоспособность внедорожника за 10 часов. Премьера электрического *Land Rover Defender* состоялась в марте 2015 года на автосалоне в Женеве, и всего было создано 7 таких автомобилей. Каждый из этих электромобилей успешно протестированы в разных условиях, проводя испытания в самых тяжелых и необычных дорожных условиях [3].



Рисунок 1 – Полноприводный электромобиль *Land Rover Defender Electric*

Tesla Model S P85D – полноприводный седан оснащен двумя электромоторами. Переднюю ось вращает 188-сильный агрегат, заднюю – двигатель, развивающий 470 лошадиных сил. В совокупности они ускоряют седан до 100 км/ч за 3,2 секунды, то есть на секунду быстрее, чем в случае с заднеприводной модификацией. Четверть мили такой седан преодолевает за 11,8 секунды, а его максимальная скорость составляет 250 км/ч – тогда как *Model S* с задним приводом может разогнаться только до 210 км/ч [4].

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Рисунок 2 – Полноприводный электромобиль *Tesla Model S P85D*

Protean Ford F-150 - данный внедорожник оснащен четырьмя мотор-колесами мощностью 110 л.с каждое и развивающие крутящий момент в 800 - 1000 Н*м. Масса мотор-колес и батарей, которые весят около 450 килограмм, меньше, чем масса штатного ДВС *Ford F-150*. На электромобиль установлены литий-ионные батареи емкостью 40 кВт/ч (максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку 138 кВт) и обеспечивают пробег автомобиля на одной зарядке до 100 км. Заряжаются аккумуляторы в течении 6-8 часов от штатной розетки и буквально за час от трехфазной розетки повышенной мощности. Закреплены батареи на специальных кронштейнах под кузовом автомобиля примерно посередине, для оптимального распределения массы и управляемости. В тоже время таким образом удалось сохранить все полезное пространство, как в салоне, так и в кузове пикапа [5].



Рисунок 3 – Полноприводный электромобиль *Protean Ford F-150*

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Bolinger B1 – вполне динамичный полноприводный внедорожник. Общая отдача его электромоторов равна 270 кВт (367 л.с.) и 640 Н*м, этого хватает для разгона с 0 до 60 миль/ч (97 км/ч) за 4,5 с и максимальной скорости в 204 км/ч. Авторы модели намерены предложить клиентам две версии: с батареей на 60 и 100 кВт*ч. Паспортный запас хода на зарядке составляет 193 либо 322 км. Батарея и блок электроники упакованы в алюминиевое пространственное шасси весом всего 134 кг со встроенной клеткой безопасности из низколегированной стали, защищенной несколькими слоями гидроизоляции и выдерживают погружение под воду минимум на полчаса [6].



Рисунок 4 – Полноприводный электромобиль *Bolinger B1*

Представленные в обзоре полноприводные электромобили имеют мощную силовую установку, так как общая масса данных электромобилей велика, по сравнению с электромобилями, для которых разрабатывается маломощная силовая установка. Показатель массы четырех колесного транспортного средства является важным показателем, и большая масса данных электромобилей пагубно влияет на их проходимость в условиях бездорожья. Также данные электромобили имеют большие габариты, при которых усложняется маневрирование в городских условиях при плотном автопотоке.

2 Патентный поиск

При проведении патентного поиска были выявлены следующие аналогичные устройства и системы.

Патент № 173152 – Электромобиль [7].

Полезная модель относится к электротранспорту. Технический результат, достигаемый заявленным решением, заключается в повышении надежности, комфортабельности и увеличении запаса хода электромобиля. Указанный результат достигается тем, что электромобиль, содержащий обратимую электромашину с блоком управления, накопитель электрической энергии с блоком контроля и датчиками состояния, зарядное устройство, преобразователь напряжения, электрический вакуумный насос, имеет зубчатый редуктор с передаточным отношением 2,0-3,5, соединенный карданной передачей с задним мостом, жидкостную систему охлаждения обратимой электромшины, блока управления, зарядного устройства и преобразователя напряжения, состоящую из радиатора, насоса и вентилятора, а накопитель электрической энергии, состоящий из нескольких батарей.

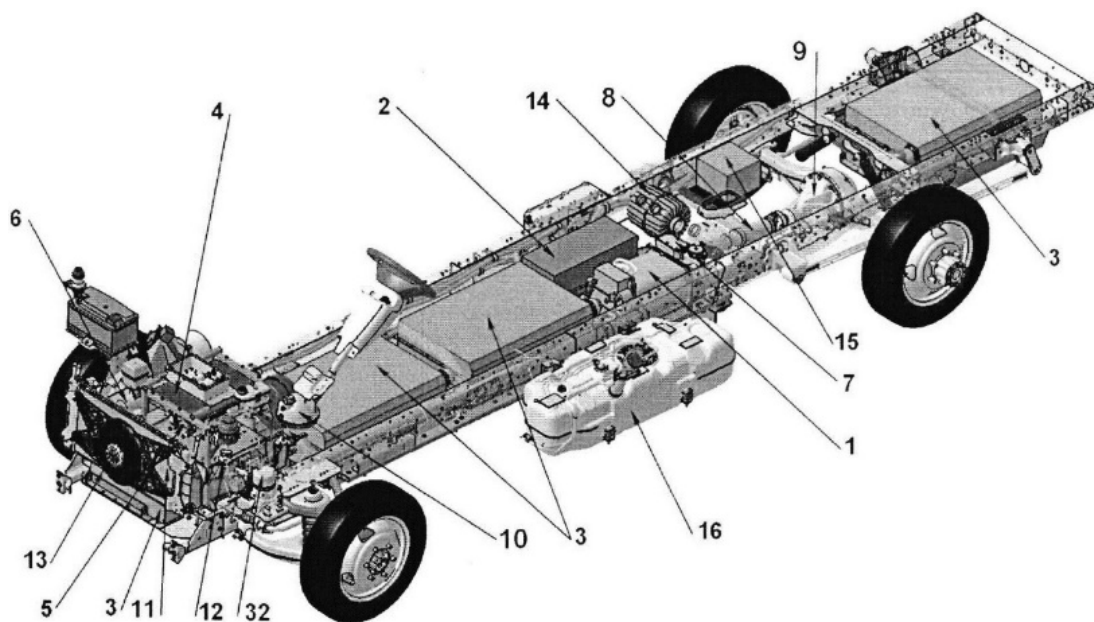


Рисунок 5 – Общий вид силовой установки электромобиля

Электромобиль, содержащий кузов, в кокпите которого размещены, по меньшей мере, два ряда поперечно расположенных, относительно продольной геометрической оси автомобиля, пассажирских сидений, расположенный в задней части кузова багажный отсек, в полу которого сформирована ниша крепления запасного колеса, отсек силовой установки, расположенный в передней части кузова, высоковольтный и низковольтный накопители электроэнергии, бортовое зарядное устройство, преобразователь напряжения, зарядный разъем, а также расположенные в отсеке силовой установки инвертор, модуль отопителя салона и электропривод, включающий в себя объединенные в блок тяговый электродвигатель и редуктор, отличающийся тем, что электропривод выполнен снабженным фасонной, поперечно расположенной, относительно продольной геометрической оси электромобиля траверсой, неподвижно прикрепленной к корпусу тягового электродвигателя, а также отстоящим от траверсы кронштейном, неподвижно прикрепленным к редуктору, инвертор выполнен неподвижно прикрепленным, с образованием монтажного блока электропривода, к траверсе, монтажный блок электропривода выполнен с возможностью его размещения в штатном, для комплектации автомобиля с двигателем внутреннего сгорания, отсеке силовой установки, противолежащие концы траверсы и кронштейн выполнены с возможностью их присоединения к штатным, для комплектации автомобиля с двигателем внутреннего сгорания, демпферам колебаний ДВС, модуль отопителя салона выполнен закрепленным, посредством промежуточного кронштейна, на расположенной со стороны кокпита стенке отсека силовой установки, высоковольтный накопитель электроэнергии выполнен составным, образованным первым, вторым и третьим блоками накопителя, кузов выполнен снабженным первой и второй нишами блоков накопителя, первая ниша выполнена сформированной под крайним, со стороны багажного отсека, рядом сидений, а вторая ниша выполнена сформированной в полу багажного отсека в интервале между крайним, со стороны багажного отсека, рядом сидений и нишей

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

крепления запасного колеса, кузов выполнен снабженным поперечно расположенным, относительно продольной геометрической оси электромобиля, подрамником, закрепленным в отсеке силовой установки выше монтажного блока электропривода, первый блок высоковольтного накопителя электроэнергии выполнен установленным в первой нише, второй блок высоковольтного накопителя электроэнергии выполнен установленным во второй нише, а третий блок высоковольтного накопителя электроэнергии и низковольтный накопитель электроэнергии выполнены установленными на подрамнике в отсеке силовой установки, зарядный разъем выполнен установленным в штатном, для комплектации автомобиля с двигателем внутреннего сгорания, люке заправочной горловины топливного бака, бортовое зарядное устройство выполнено расположенным в открытом со стороны дорожного полотна, штатном, для комплектации автомобиля с двигателем внутреннего сгорания, тоннеле пола со смещением к отсеку силовой установки, преобразователь напряжения выполнен закрепленным под передним правым сидением пассажира, электромобиль выполнен оснащенный электрическим вакуумным насосом усилителя тормозов, закрепленным на расположенной со стороны кокпита стенке отсека силовой установки, электромобиль выполнен оснащенный блоком контроля высоковольтного накопителя электроэнергии, размещенным в кокпите и закрепленным на штатном, для комплектации автомобиля с двигателем внутреннего сгорания, тоннеле пола со смещением к стенке кокпита со стороны отсека силовой установки.

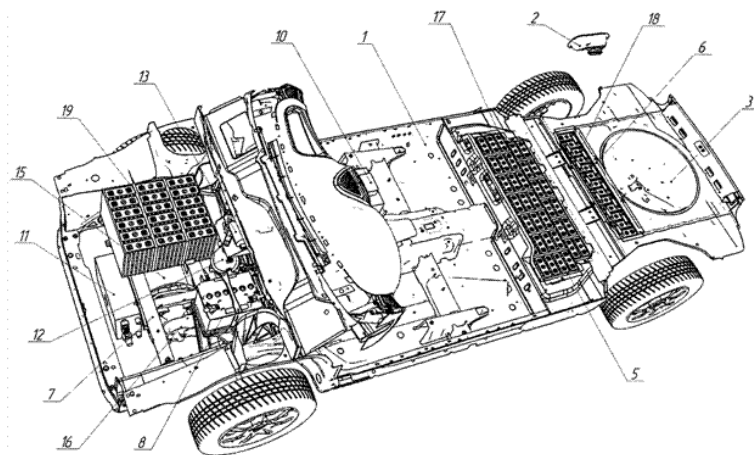


Рисунок 6 – Общий вид полезной модели электромобиля

Изобретение относится к транспортным средствам с электрической тягой. Движитель включает электродвигатель с аккумуляторными батареями, редуктор, связывающий ось электродвигателя с приводом дифференциала для ведущих полуосей и промежуточную ось. На оси электродвигателя и промежуточной оси редуктора установлены две муфты и две конические шестерни по скользящей посадке, которые контактируют с коническими шестернями, установленными по неподвижной посадке на дополнительной оси, связанной с осью механического рекуператора энергии. Вокруг оси последнего предусмотрена витая пружина, фиксируемая при заводке храповым устройством. Муфты и конические шестерни имеют возможность контактировать для передачи крутящего момента. Муфты имеют три положения: нейтральное, подключение рекуператора на зарядку и включение его на рабочий режим. Рычаг управления муфтами и элемент отключения храповика рекуператора для его срабатывания связаны с электромагнитами. Задатчиком подключения рекуператора для передвижения электромобиля служит поперечная рейка в зоне педалей управления электромобиля, включаемая электромагнитом с пульта и содержащая два концевых электрических датчика, подводимых последовательно под педали управления электромобиля. Электромобиль характеризуется повышенной приемистостью, дополнительным запасом энергии для маневрирования и увеличенным пробегом с одной зарядкой батарей.

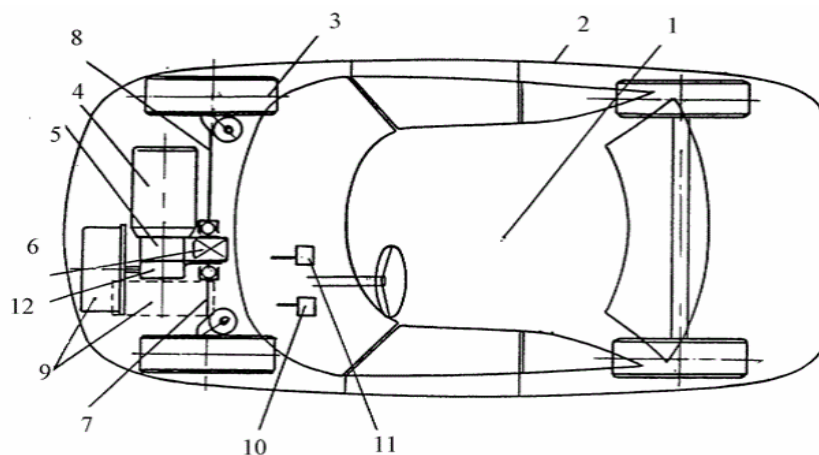


Рисунок 7 – Общий вид полезной модели электромобиля

Группа изобретений относится к электрическим тяговым системам транспортных средств с питанием от собственных источников энергоснабжения. Силовая установка электромобиля содержит аккумуляторную батарею (101), обогреватель аккумуляторов (102), соединенный с аккумулятором (101), устройство управления аккумуляторами (103), электрическую распределительную коробку (104), двигатель (105), контроллер (106) двигателя и разграничительный индуктор (L2). Устройство управления аккумуляторами (103) выполнено с возможностью управлять обогревателем аккумуляторов, когда температура аккумуляторной батареи ниже, чем первое пороговое значение для обогрева, а остаточный заряд аккумулятора больше, чем пороговая величина заряда при движении. Устройство управления аккумуляторами выполнено с возможностью отслеживать текущую скорость изменения силы тяги электромобиля в реальном времени и прекращать обогрев аккумулятора, когда текущая скорость изменения силы тяги достигает заданного порога. Технический результат заключается в увеличении срока службы аккумуляторной батареи электромобиля.

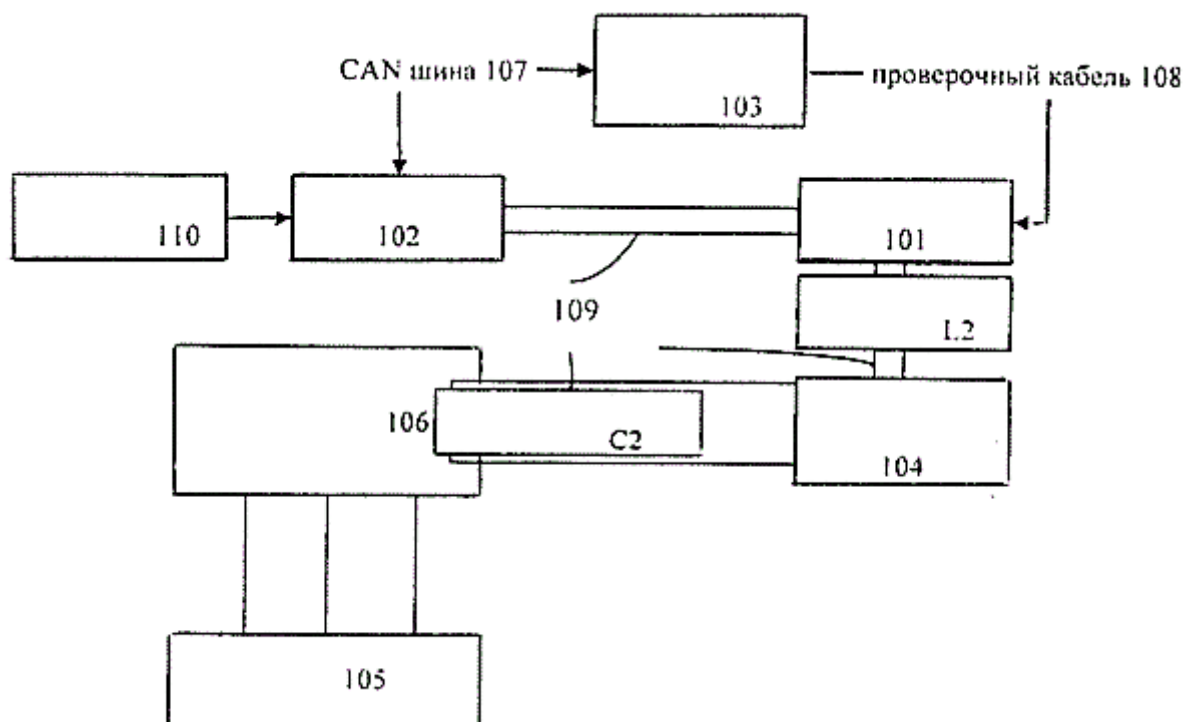


Рисунок 8 – Структурная схема полезной модели

3 Анализ возможных вариантов реализации силовой установки для полноприводного электромобиля

В полноприводных автомобилях с двигателем внутреннего сгорания крутящий момент передается на колеса посредством механической трансмиссии. Такую же схему передачи крутящего момента возможно реализовать и в электромобилях, но без использования коробки передач и передавая крутящий момент с электродвигателя на механическую раздаточную коробку. Силовая установка полноприводного электромобиля с выбранным диапазоном мощности от 15 до 20 кВт предназначена прежде всего для компактных электромобилей с малой общей массой, соответственно габариты и масса трансмиссии будут не велики. Схема полного привода с механической трансмиссией от электрического двигателя представлена на рисунке 9.

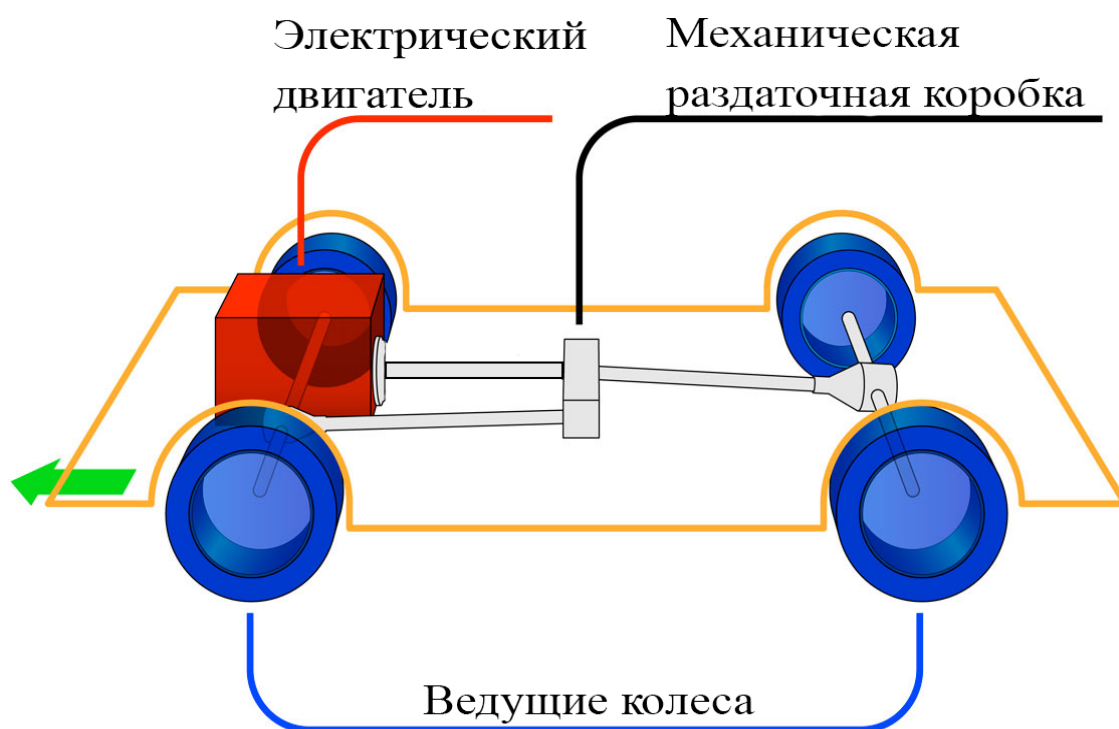


Рисунок 9 – Полноприводная силовая установка с механической трансмиссией

Существует возможность реализации полного привода на электромобиле при использовании другого типа силового агрегата, такого как мотор-колесо. Мотор-колесо представляет собой агрегат, объединяющий колесо и встроенные в

него тяговый электродвигатель. Схема полноприводной силовой установки с мотор-колесами представлена на рисунке 10.

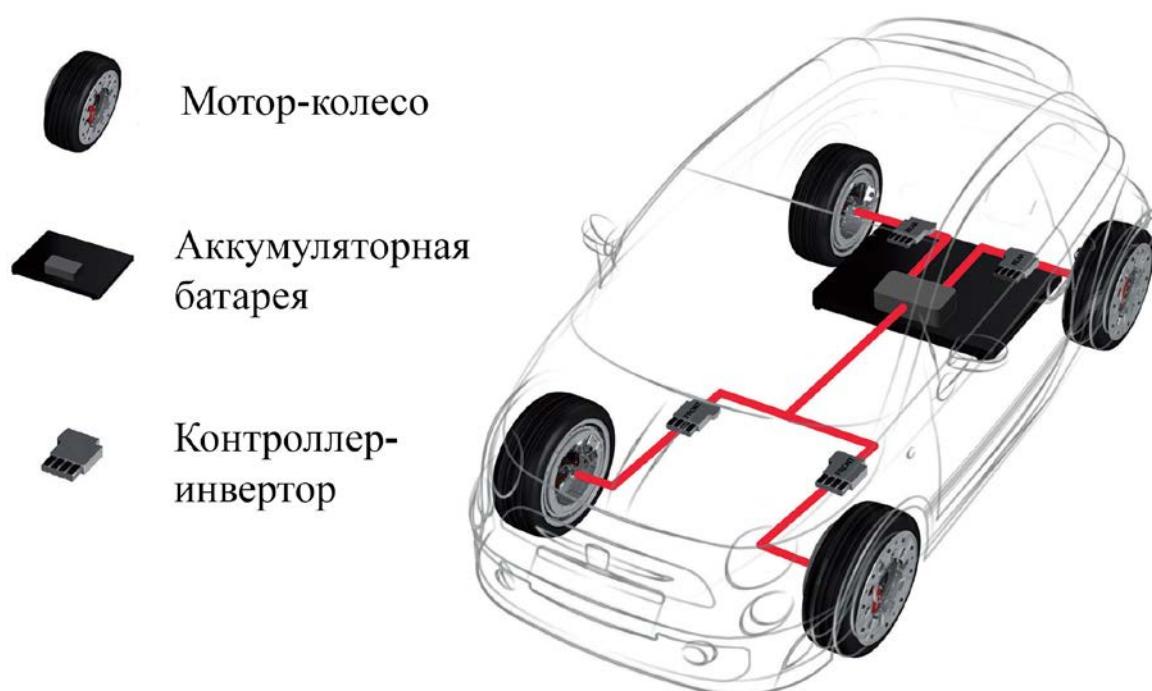


Рисунок 10 – Полноприводная силовая установка с мотор-колесами

При сравнении выше описанных силовых установок можно выделить отличительные особенности каждой из них. Полноприводная силовая установка с механической трансмиссией обладает следующими свойствами:

- не требует специальных электронных устройств для распределения крутящего момента;
- минимальное количество электрических элементов силовой установки;
- низкая неподрессоренная масса (на уровне автомобилей данного класса).

Отличительными особенностями полноприводной силовой установки с использованием четырех мотор-колес являются:

- непосредственная передача крутящего момента от электродвигателя на колесо без потерь механической энергии;
- малая общая масса электромобиля по сравнению с электро автомобилем, имеющего механическую полноприводную трансмиссию.

4 Разработка энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с механической трансмиссией

4.1 Разработка структурной схемы энергетической силовой установки

В состав силовой установки полноприводного электромобиля с механической трансмиссией входят: электрический двигатель (ЭД), контроллер-инвертор (КИ), аккумуляторная батарея (АКБ) и органы управления, такие как педаль акселератора (ПА), переключатель направления движения (ПН) и датчик нажатия педали тормоза (ДПТ), представляющий из себя выключатель, при срабатывании которого, контроллер управления электродвигателем переключает электродвигатель в режим генератора. Важной особенностью данной силовой установки является наличие механической раздаточной коробки (РК), которая механически связана с передним (ПД) и задним (ЗД) дифференциалами, а дифференциалы в свою очередь механически связаны с четырьмя ведущими колесами (К) через полуоси. Структурная схема полноприводной силовой установки с механической трансмиссией изображена на рисунке 11, а также в приложении А.

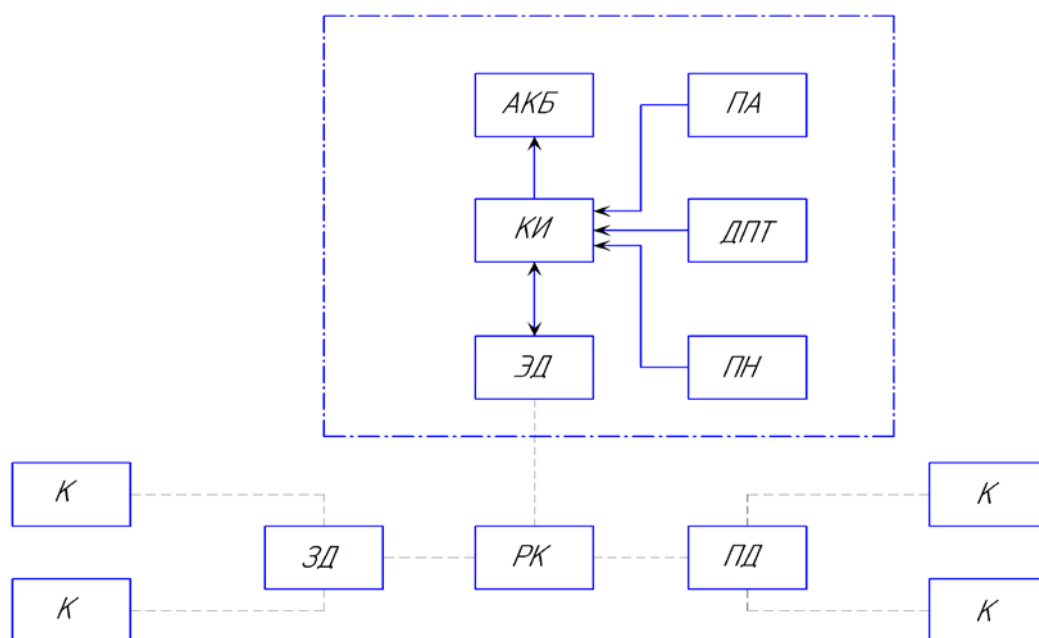


Рисунок 11 – Структурная схема силовой установки полноприводного электромобиля с механической трансмиссией

4.2 Выбор элементов и устройств для силовой установки полноприводного электромобиля с механической трансмиссией

Необходимо выбрать электродвигатель для силовой установки мощностью от 15 до 20 кВт. Выбран бесколлекторный трехфазный двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов с датчиками положения ротора *Golden Motor НРМ-20KW* (Рисунок 12). Характеристики двигателя представлены в таблице 1 [11].



Рисунок 12 – Внешний вид электродвигателя *НРМ-20KW*

Таблица 1 – Характеристики электродвигателя *НРМ-20KW*

Номинальное напряжение $U_{\text{ном эд}}$, В	96
Номинальная мощность $P_{\text{ном эд}}$, кВт	20
Максимальная мощность $P_{\text{max эд}}$, кВт	50
Номинальный крут. момент $M_{\text{ном эд}}$, Н*м	80
Максимальный крут. момент $M_{\text{max эд}}$, Н*м	160
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном эд}}$, об/мин	3500

Продолжение таблицы 1

Максимальная частота вращения $n_{\max \text{ эд}}$, об/мин	6000
КПД $\eta_{\text{эд}}$, %	90
Масса $m_{\text{эд}}$, кг	39

Выбор данного типа двигателя обусловлен его высоким КПД из-за использования метода возбуждения от постоянных магнитов вместо электромагнитов, потребляющих энергию. Также в данном типе электродвигателей не используется щеточно-коллекторный узел, ресурс которого ограничен.

При выборе аккумуляторной батареи следует учитывать, что при номинальной выходной мощности электродвигателя, номинальное значение тока разряда АКБ не должен превышать значений, указанных производителем, а при максимальной выходной мощности электродвигателя, максимально допустимое продолжительное значение тока АКБ должен быть минимум в 2 раза больше значения номинального тока, отдаваемого АКБ. С учетом выше перечисленных требований, выбрана литий-железо-фосфатная АКБ НПО ССК 230/ C_3 -Ah-50V емкостью $C_{\text{акб}} = 230$ А*ч. Характеристики АКБ представлены в таблице 2 [12].

Таблица 2 – Характеристики АКБ НПО ССК 230/ C_3 -Ah-50V

Напряжение АКБ $U_{\text{акб}}$, В	50
Емкость АКБ $C_{\text{акб}}$, А*ч	230
Количество циклов заряда разряда	3000
Номинальный ток разряда АКБ $I_{\text{ном раз акб}}$, А	230
Максимальный ток разряда АКБ $I_{\text{max раз акб}}$, А	1150
Внутреннее сопротивление АКБ $r_{\text{вн}}$, мОм	5
Максимальный постоянный ток заряда АКБ $I_{\text{max зар}}$, А	230
Напряжение полностью заряженной АКБ $U_{\text{max акб}}$, В	58
Напряжение полностью разряженной АКБ $U_{\text{min акб}}$, В	45
Масса $m_{\text{акб}}$, кг	92

Для достижения значения напряжения АКБ, соответствующего номинальному значению напряжения питания электродвигателя, а также для увеличения запасаемой энергии используются две одинаковые, последовательно соединенные АКБ. При этом, номинальное значение напряжения сборки АКБ удвоится, по отношению к значению напряжения одной АКБ:

$$U_{\text{акб сб}} = U_{\text{акб}} * 2 = 50 * 2 = 100 \text{ В.}$$

Напряжение полностью разряженной сборки АКБ:

$$U_{\text{min сб}} = U_{\text{min акб}} * 2 = 5 * 2 = 90 \text{ В.}$$

Напряжение полностью заряженной сборки АКБ:

$$U_{\text{max сб}} = U_{\text{max акб}} * 2 = 58 * 2 = 116 \text{ В.}$$

Внутреннее сопротивление сборки АКБ:

$$r_{\text{вн сб}} = 2 * r_{\text{вн}} = 0,005 * 2 = 0,01 \text{ Ом.}$$

Энергия, запасенная в данной сборке АКБ:

$$W_{\text{сб}} = C_{\text{акб}} * U_{\text{акб сб}} = 230 * 100 = 23000 \text{ Вт * ч.}$$

При последовательном соединении двух АКБ значение тока в цепи данной сборки АКБ будет таким же, как и при значении протекающего тока цепи с одной АКБ, поэтому токовые характеристики сборки АКБ идентичны токовым характеристикам АКБ, указанных производителем.

Выбранный электродвигатель по своей сути является трехфазной синхронной машиной с датчиком положения ротора, а для питания такого типа электродвигателя постоянным напряжением необходим контроллер-инвертор – электронная система, определяющая положение ротора относительно каждой из трех обмоток и в определенный момент подает напряжение на обмотки определенной полярности, необходимого для вращения ротора. Помимо выше перечисленных функций, данная электронная система управления двигателем должна иметь возможность быть использованной в силовой установке электромобиля, обладая дополнительными

функциями, такими как рекуперация и управление выходной мощностью электродвигателя. С учетом выше перечисленных требований, выбран контроллер-инвертор *Golden Motor HPC700H* (Рисунок 13), специально предназначенный для работы в силовых установках электромобилей [13]. Характеристики контроллера представлены в таблице 3.



Рисунок 13 – Внешний вид контроллера *HPC700H*

Таблица 3 – Характеристики контроллера-инвертора *HPC700H*

Номинальное напряжение $U_{\text{ном кнт}}$, В	96
Максимальный постоянный средний ток в цепи АКБ $I_{\text{max кнт}}$, А	280
Максимальное значение постоянного фазного тока электродвигателя $I_{\text{max ф кнт}}$, А	560
Постоянное значение тока потребления контроллера $I_{\text{пит кнт}}$, А	4
Форма подаваемого на электродвигатель тока	трапецеидальный
Управление моментом электродвигателя	От педали акселератора
КПД $\eta_{\text{кнт}}$, %	98
Масса $m_{\text{кнт}}$, кг	5,7

Контроллер-инвертор имеет внешний плавкий предохранитель в цепи АКБ положительной полярности с током срабатывания 280 А. Также контроллер-инвертор имеет дополнительные полезные функции, необходимые для работы силовой установки:

- рекуперативное торможение;
- возможность включения реверсного вращения;
- стабилизация входного напряжения;
- защита от перезаряда АКБ;
- защита от полного разряда АКБ;
- ограничение батарейного тока;
- ограничение фазного тока;
- ограничение максимальной частоты вращения;
- защита от перегрева контроллер-инвертора.

Установка предельных входных и выходных значений тока для электродвигателя производится программно, путем соединения контроллера с компьютером через кабель *USB*.

Для коммутации силовой цепи и подачи напряжения на контроллер-инвертор, требуется силовой контактор, контакты которого замыкаются и размыкаются соответственно при подаче или снятии напряжения с электромагнитной катушки контактора. Силовые контакты контактора должны быть рассчитаны для работы с максимальным батарейным током контроллера управления, составляющий 280 А, а допустимое напряжение питания катушки должно быть не меньше напряжения аккумуляторной батареи, которое составляет 100 В. Согласно этим требованиям, выбран контактор *Albright RW400* (рисунок 14). Характеристики контактора указаны в таблице 4 [14].

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

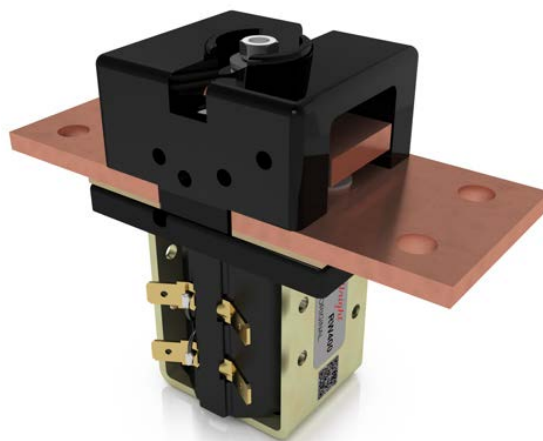


Рисунок 14 – Силовой контактор *Albright RW400*

Таблица 4 – Характеристики силового контактора *RW400*

Максимальный ток силовых контактов $I_{\text{max кк}}$, А	400
Напряжение питания электромагнитной катушки $U_{\text{кат}}$, В	6...240
Падение напряжения на контактах при $I_{\text{кк}} = 400$ А, $U_{\text{п кк}}$, мВ	40
Количество срабатываний	>1000000

Коммутирование цепи электромагнитной катушки силового контактора должно происходить через замок зажигания, путем поворота ключа. Таким же образом происходит коммутирование питания контроллера с аккумуляторной батареи.

Для защиты контроллера управления от перегрузки питания по току, в цепи питания контроллера управления необходимо использовать плавкие предохранители, срабатывание которых будет происходить при максимальном уровне допустимого тока питания контроллера управления 4 А. Выбран предохранитель *Littelfuse L15S004.T* (рисунок 15) с номинальным током 4 А и держатель предохранителя, который должен быть жестко закреплен на кузове транспортного средства (рисунок 16) [15].



Рисунок 15 – Предохранитель плавкий *Littelfuse L15S004.T*



Рисунок 16 - Держатель предохранителя *Littelfuse LSCR001*

Для защиты силовой батарейной цепи контроллера управления выбран предохранитель *Eaton FWA-250B* с номинальным током 275 А [16]. Данный предохранитель устанавливается в колодку разборных соединений, находящейся на корпусе контроллера управления. Внешний вид предохранителя изображен на рисунке 17.

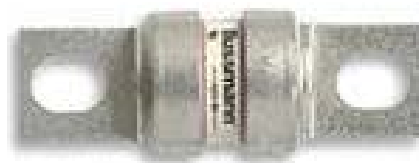


Рисунок 17 – Предохранитель *Eaton FWA-250B*

Управления крутящим моментом электродвигателя производится посредством электронной педали акселератора с датчиком Холла *Sayoon JKH*, подключаемой к контроллеру управления. Питания элемента Холла осуществляется от внут-

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ренного источника напряжения контроллера, напряжением 5 В. Напряжение выходного сигнала с педали акселератора составляет от 1,1 до 4,2 В [17]. Внешний вид педали акселератора изображён на рисунке 18.



Рисунок 18 – Внешний вид электронной педали акселератора *Sayoon JKH*

Для включения режима рекуперации при нажатии на педаль тормоза достаточно использовать серийный датчик стоп-сигнала, используемый в бортовой сети автомобиля с ДВС, который является обычным выключателем со скользящим контактом.

4.3 Разработка принципиальной схемы энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с механической трансмиссией

Контроллер управления электродвигателем имеет 23-контактный штыревой разъем для подключения датчиков, элементов и органов управления через 23-контактный гнездовой разъем, а также разборные контактные соединения для подключения к силовым цепям АКБ и электродвигателя. Схема обозначений выводов и контактов контроллер-инвертора *HPC700H* представлена на рисунке 19.

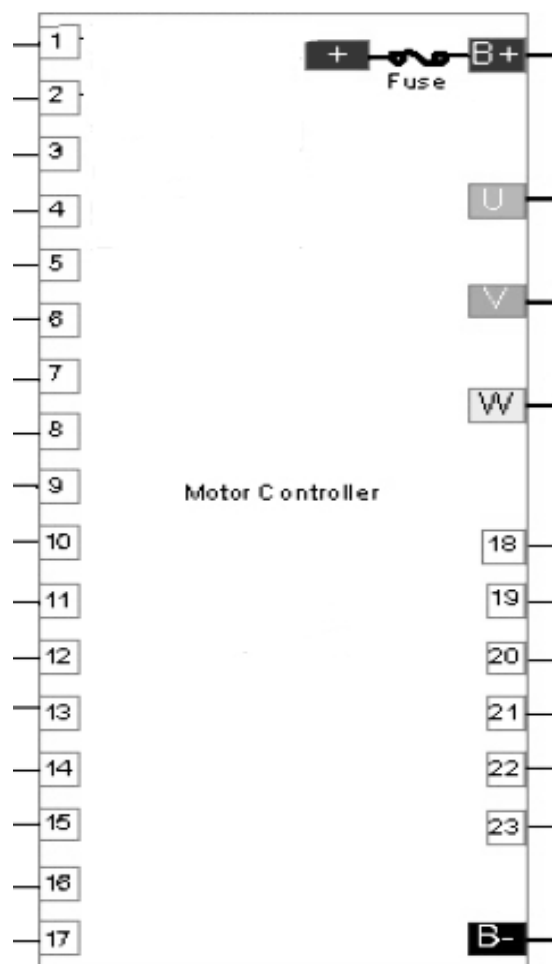


Рисунок 19 – Схема обозначений выводов и контактов *HPC700H*

Схема расположения контактов в разъемном соединении изображена на рисунке 20.

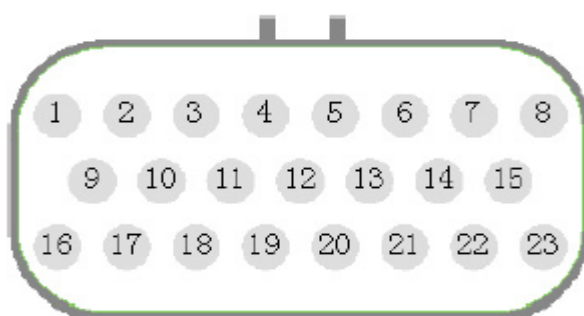


Рисунок 20 - Схема расположения контактов 23-контактного штыревого разъема контроллер-инвертора *HPM700H*

Назначение контактов разъема контроллер-инвертора *HPC700H* представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Назначение контактов разъема

Номер контакта разъема	Назначение контакта
1	Питание контроллера
6	Питание педали акселератора
7	Сигнал педали акселератора
8	Земля
9	Питание переключателя направления движения
10	Питание датчика педали тормоза
18	Сигнал датчика Холла фазы <i>A</i> электродвигателя
19	Сигнал датчика Холла фазы <i>B</i> электродвигателя
20	Сигнал датчика Холла фазы <i>C</i> электродвигателя
21	Питание датчиков Холла и датчика температуры электродвигателя
22	Земля датчиков Холла и датчика температуры электродвигателя
23	Сигнал датчика температуры электродвигателя
<i>U</i>	Питание фазы <i>A</i> электродвигателя
<i>V</i>	Питание фазы <i>B</i> электродвигателя
<i>W</i>	Питание фазы <i>C</i> электродвигателя
<i>B+</i>	Провод с положительной клеммы АКБ
<i>B-</i>	Провод с отрицательной клеммы АКБ

Фазные провода электродвигателя *HPM-20KW* имеют цветовую маркировку:

- фаза *A* – «Голубой»;
- фаза *B* – «Зеленый»;
- фаза *C* – «Желтый».

Фазные провода электродвигателя соединяются с контроллером управления через разборные соединения контроллера управления в соответствии с обозначенными фазами.

Клемма положительной полярности сборки из двух последовательно соединенных АКБ соединяется с одним из двух силовых контактов контактора *Albright RW400*, а контакт «+» контроллера управления соединяется с разборным соединением «B+» через предохранитель *Eaton FWA-250B*. Второй силовой контакт контактора соединяется с контроллером через разборное соединение «B». Клемма отрицательной полярности сборки АКБ соединяется с контактом «B-» контроллера управления.

Контакт «1» штыревого 23-контактного разъёмного соединения контроллера управления соединяется с одним концом предохранителя *Littelfuse L15S004.T*, другой конец предохранителя соединяется с контактом «B+» контроллера управления.

Контакты «6», «7» и «8» разъёмного соединения контроллера управления соединяются с выводами разъёма педали акселератора «+5V», «Signal» и «GND» соответственно.

Контакт «9» разъёмного соединения контроллера управления соединяется с одним из двух контактов переключателя направления движения, второй контакт переключателя направления движения соединяется с контактом «8» разъёма контроллера управления.

Контакт «10» разъёмного соединения контроллера управления соединяется с одним из двух контактов датчика нажатия педали тормоза, второй контакт переключателя направления движения соединяется с контактом «8» разъёма контроллера управления.

Контакты «18», «19» и «20» разъёма контроллера управления соединяются с контактами разъёмного соединения электродвигателя «Hall-A», «Hall-B» и «Hall-C» соответственно.

Контакты «21», «22» и «23» разъёма контроллера управления соединяются с контактами разъёмного соединения электродвигателя «+5V», «GND» и «Motor TEMP» соответственно.

Принципиальная схема энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с механической трансмиссией представлена в приложении А. Перечень элементов представлен в приложении Б.

5 Разработка энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с мотор-колесами

5.1 Разработка структурной схемы энергетической силовой установки

В состав силовой установки полноприводного электромобиля с мотор-колесами входят: четыре электродвигателя мотор-колес (ЭДМК), четыре контроллер-инвертора для управления электродвигателями мотор-колеса (КИ), аккумуляторная батарея (АКБ) и органы управления: переключатель направления движения (ПН) и датчик нажатия педали тормоза (ДПТ). Органы управления должны взаимодействовать со всеми четырьмя контроллерами управления мотор-колес, находящиеся в составе силовой установки. Также в составе силовой установки необходимо электронное устройство, позволяющее распределять крутящий момент между мотор-колесами при поворотах по аналогии с механическим дифференциалом и управлять общей тягой силовой установки электромобиля с мотор-колесами от одной педали акселератора. Таким устройством является электронный дифференциал (ЭД), с которым взаимодействует педаль акселератора (ПА). Структурная схема электронного дифференциала представлена на рисунке 20, а также в приложении А.

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

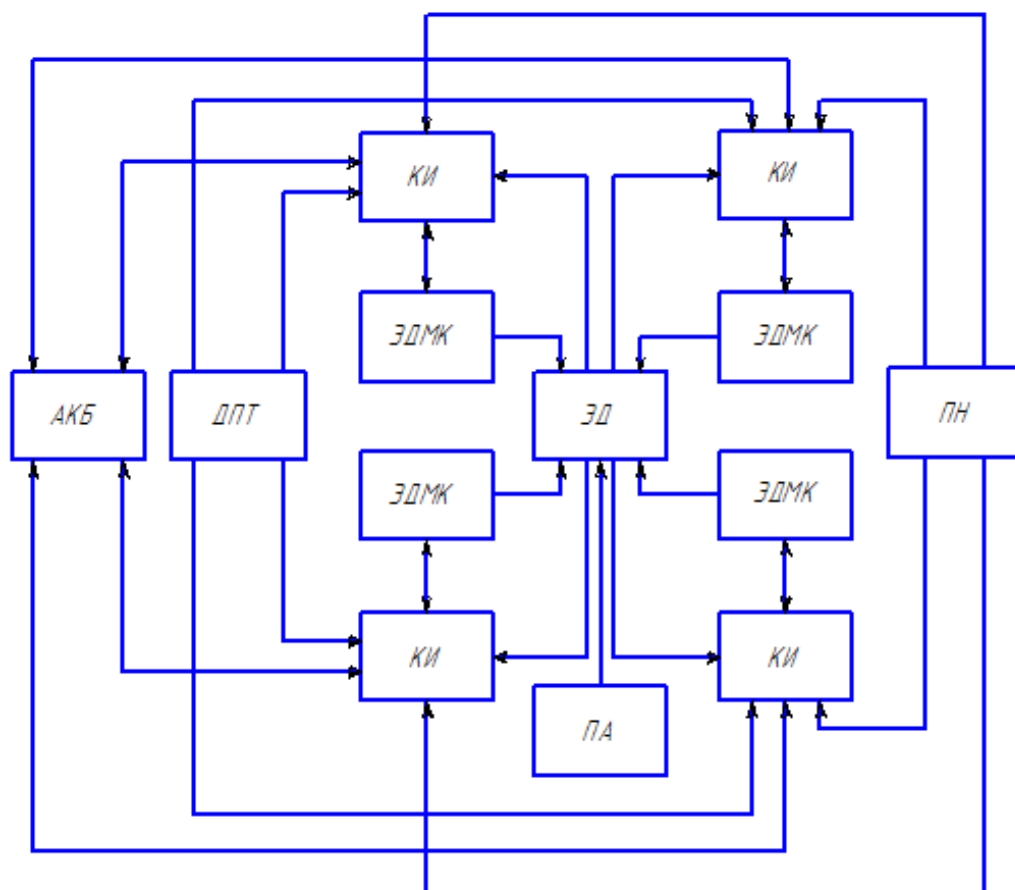


Рисунок 20 – Структурная схема полноприводной силовой установки с мотор-колесами

5.2 Выбор элементов и устройств для силовой установки полноприводного электромобиля с мотор-колесами

Для полноприводной силовой установке электромобиля с мотор-колесами требуются 4 мотор-колеса с суммарной мощностью от 15 до 20 кВт. Выбран трехфазный бесколлекторный двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов с датчиками положения ротора *Qs Motor QS273 4000W V3* (рисунок 21). Характеристики двигателя представлены в таблице 6 [18].



Рисунок 21 – Внешний вид электродвигателя QS273

Таблица 6 – Характеристики электродвигателя QS273

Номинальное напряжение $U_{\text{ном эд1}}$, В	72
Номинальная мощность $P_{\text{ном эд1}}$, кВт	4
Максимальная мощность $P_{\text{max эд1}}$, кВт	8
Номинальное значение постоянного фазного тока $I_{\text{ф эд1}}$, А	65
Максимальное значение постоянного фазного тока $I_{\text{ф max эд1}}$, А	110
Номинальный крутящий момент $M_{\text{ном эд1}}$, Н*м	60
Максимальный крутящий момент $M_{\text{max эд1}}$, Н*м	220
Номинальная частота вращения $n_{\text{ном эд1}}$, об/мин	700
Максимальная частота вращения $n_{\text{max эд1}}$, об/мин	800
КПД, %	90
Масса $m_{\text{эд1}}$, кг	23
Класс защиты	IP54

Почти во всех выпускаемых электромобилях значение емкости аккумуляторной батареи, выраженной в киловатт-часах, меньше значения мощности электродвигателя, выражаемой в киловаттах, при этом запас хода данных электромобилей составляет от 100 до 500 км. Для данной силовой установки, которая входит в состав полноприводного электромобиля, значение емкости АКБ в киловатт-часах

будет примерно равно значению суммы номинальных мощностей электродвигателей, которое составляет 16 кВт, так как задачи данной силовой установки – это повышение проходимости электромобиля и условия эксплуатации данного электромобиля требуют больших затрат мощности силовой установки. С учетом выше перечисленных требований, выбрана литий-железо-фосфатная АКБ НПО ССК 230/C₃-Ah-25V [12]. Характеристики АКБ представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Характеристики АКБ НПО ССК 270/C₃-Ah-25V

Номинальное напряжение АКБ $U_{акб1}$, В	25
Емкость АКБ $C_{акб1}$, А*ч	270
Количество циклов заряда разряда	3000
Номинальный ток разряда АКБ $I_{ном раз акб1}$, А	270
Максимальный ток разряда АКБ $I_{max раз акб1}$, А	1350
Внутреннее сопротивление АКБ $r_{вн}$, мОм	5
Максимальный постоянный ток заряда АКБ $I_{max зар акб1}$, А	270
Напряжение полностью заряженной АКБ $U_{max акб1}$, В	29
Напряжение полностью разряженной АКБ $U_{min акб1}$, В	22
Масса $m_{акб1}$, кг	56

Для достижения значения напряжения, соответствующего номинальному значению напряжения питания электродвигателя, используются три одинаковые, последовательно соединенные АКБ. При этом, номинальное напряжение сборки АКБ утроится, по отношению к напряжению одной АКБ:

$$U_{акб сб1} = U_{акб1} * 3 = 25 * 3 = 75 \text{ В.}$$

Напряжение полностью разряженной сборки АКБ:

$$U_{min сб1} = U_{min акб1} * 3 = 22 * 3 = 66 \text{ В.}$$

Напряжение полностью заряженной сборки АКБ:

$$U_{max сб1} = U_{max акб1} * 3 = 29 * 3 = 87 \text{ В.}$$

Внутреннее сопротивление сборки АКБ:

$$r_{\text{вн сб}} = 3 * r_{\text{вн}} = 0,005 * 3 = 0,015 \text{ Ом.}$$

Энергия, запасенная в данной сборке АКБ:

$$W_{\text{сб1}} = C_{\text{акб1}} * U_{\text{акб сб1}} = 270 * 75 = 20250 \text{ Вт * ч.}$$

При последовательном соединении трех АКБ значение тока в цепи данной сборки АКБ будет таким же, как и при значении протекающего тока цепи с одной АКБ, поэтому токовые характеристики сборки АКБ идентичны токовым характеристикам АКБ, указанных производителем.

Для управления электродвигателем мотор-колеса выбран контроллер-инвертор *Kelly KEB72801X* (рисунок 21). При выборе данного контроллера учитывался максимальный продолжительный фазный ток электродвигателя, при котором контроллер будет работать в номинальном режиме. Характеристики контроллера представлены в таблице 8 [19].

Таблица 8 – Характеристики контроллер-инвертора *KEB72801X*

Диапазон рабочего напряжение, В	18...90
Максимальная выходная мощность, Вт	8000
Метод управления электродвигателем	Переключение обмоток
Напряжение входного сигнала от педали акселератора, В	1,1...4,2
Максимальное значение среднего тока аккумуляторной батареи, А	60
Максимальный постоянный фазный ток электродвигателя, А	110
Масса, кг	2,2
Диапазон рабочей температуры, °С	-40...+50
Степень защиты	IP65

Данный контроллер-инвертор является полностью программируемым устройством, поэтому существует возможность ограничивать фазный ток потребления электродвигателя или тока АКБ. В данной силовой установке, имеющей в

своем составе четыре таких контроллер-инвертора, программные настройки последних должны быть одинаковы.



Рисунок 22 – Внешний вид контроллер-инвертора *KEB72801X*

Для выбора силового коммутационного устройства нужно учитывать силу тока, протекающего от АКБ ко всем четырем контроллерам-инверторам при максимально допустимом потреблении энергии электродвигателями и контроллер-инверторами. Для этого нужно произвести расчет силы тока для максимально допустимого режима работы силовой установки. Сила тока, протекающего в цепи АКБ при максимальной потребляемой мощности всех электродвигателей, при этом ток одного электродвигателя, отдаваемый контроллер-инвертором, ограничен программными настройками:

$$I_{\text{кон.АКБ max}} = 4 * I_{\text{кон.max}} = 4 * 60 = 240 \text{ A},$$

где $I_{\text{кон.max}}$ – максимальное значение постоянного тока для каждого контроллер-инвертора в цепи АКБ, при максимальном фазном токе каждого электродвигателя $I_{\text{эд max}} = 110 \text{ A}$.

Для коммутации силовой цепи АКБ и подачи напряжения на контроллер-инверторы, выбран силовой контактор *Albright SW200-6* (рисунок 23). Характеристики контактора указаны в таблице 9 [21].



Рисунок 23 – Силовой контактор *Albright SW200-6*

Таблица 9 – Характеристики силового контактора SW200-6

Максимальный ток силовых контактов I , А	250
Коммутируемое напряжение, В	72
Напряжение питания электромагнитной катушки U_k , В	6...240
Падение напряжения на контактах при $I = 400$ А, U_n , мВ	40
Количество срабатываний	>1000000

Коммутирование цепи электромагнитной катушки силового контактора производится через замок зажигания, путем поворота ключа. Таким же образом происходит коммутирование цепи питания контроллер-инверторов в данной силовой установке.

Для защиты контроллер-инверторов и электродвигателей от токов, превышающих установленное значение $I_{кон. max} = 60$ А, выбран предохранитель *Eaton ANN-60* (рисунок 24) с током срабатывания 60 А.



Рисунок 24 – Внешний вид предохранителя

Для данной силовой установки требуется такое устройство как электронный дифференциал, позволяющий распределять крутящий момент в зависимости от угла поворота колес.

5.3 Разработка электронного дифференциала для силовой установки электромобиля с мотор-колесами

5.3.1 Разработка алгоритма работы электронного дифференциала

Электронный дифференциал должен работать в двух режимах:

- режим пропорционального распределения крутящего момента (по аналогии с механическим активным дифференциалом);
- режим блокировки частоты вращения колес (по аналогии с механическими заблокированными межосевым и межколесным дифференциалами).

Для осуществления работы этих режимов, микроконтроллер разрабатываемого устройства должен принимать сигналы с необходимых датчиков для определения следующих величин:

- частоты вращения колес (датчики Холла);
- величина крутящего момента (датчики тока);
- угол поворота руля (датчик угла поворота руля).

В режиме пропорционального распределения крутящего момента, микроконтроллер получает сигнал уровня запрашиваемой водителем тяги от ножной педали акселератора и информацию о величине тока, протекающего через контроллер-инверторы каждого электродвигателя от датчиков тока. Величина тока, потребляемого электродвигателем, прямо пропорционально зависит от его крутящего момента, поэтому выбран именно этот способ определения механической нагрузки. В зависимости от показаний датчика угла поворота руля, микроконтроллер изменяет тягу каждого электродвигателя до того момента, пока значения потребляемых то-

ков каждого электродвигателя не станут пропорциональны соотношению проходимого пути колесами в единицу времени, ведь при любом угле поворота он становится известен, при известной ширине колеи и длине колесной базы транспортного средства. Микроконтроллер в свою очередь управляет четырьмя цифровыми потенциометрами, выводы которых соединены с разъемами контроллер-инверторов, предназначенных для подключения педали акселератора.

При включении режима блокировки частоты вращения колес, микроконтроллер получает информацию о частоте вращения каждого из четырех электродвигателей от датчиков Холла, установленных на статоре электродвигателей заводом-изготовителем и предназначенных для определения положения ротора. После чего микроконтроллер сравнивает значения частот вращения и регулирует тягу каждого электродвигателя таким образом, чтобы поддерживалась одинаковая частота вращения всех колес при определенном уровне тяги электро Автомобиля, задаваемой водителем при помощи педали акселератора. Управление тягой электродвигателей микроконтроллер осуществляет тем же способом, что и в ранее рассмотренном режиме работы. Данный режим работы предназначен исключительно для передвижения по бездорожью, так как при движении электро Автомобиля в повороте по твердому покрытию (например асфальт), сила трения способствует изменению механической нагрузки на колеса, и как следствие – изменение частоты вращения колес, а данный режим работы предусматривает уравнивание частот вращения колес, и электро Автомобиль столкнется с явлением недостаточной поворачиваемости, создавая угрозу потери управления на относительно больших скоростях.

Электро Автомобиль, для которого разрабатывается это устройство, имеет 4 электродвигателя, но контроллер-инвертор рассчитан для подключения только одного электродвигателя и требует подключения педали акселератора, поэтому разрабатываемое устройство не только обеспечивает выше перечисленные режимы работы, но и позволяет параллельно управлять тягой четырех электродвигателей используя одну педаль акселератора. Алгоритм работы изображен на рисунке 25.

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

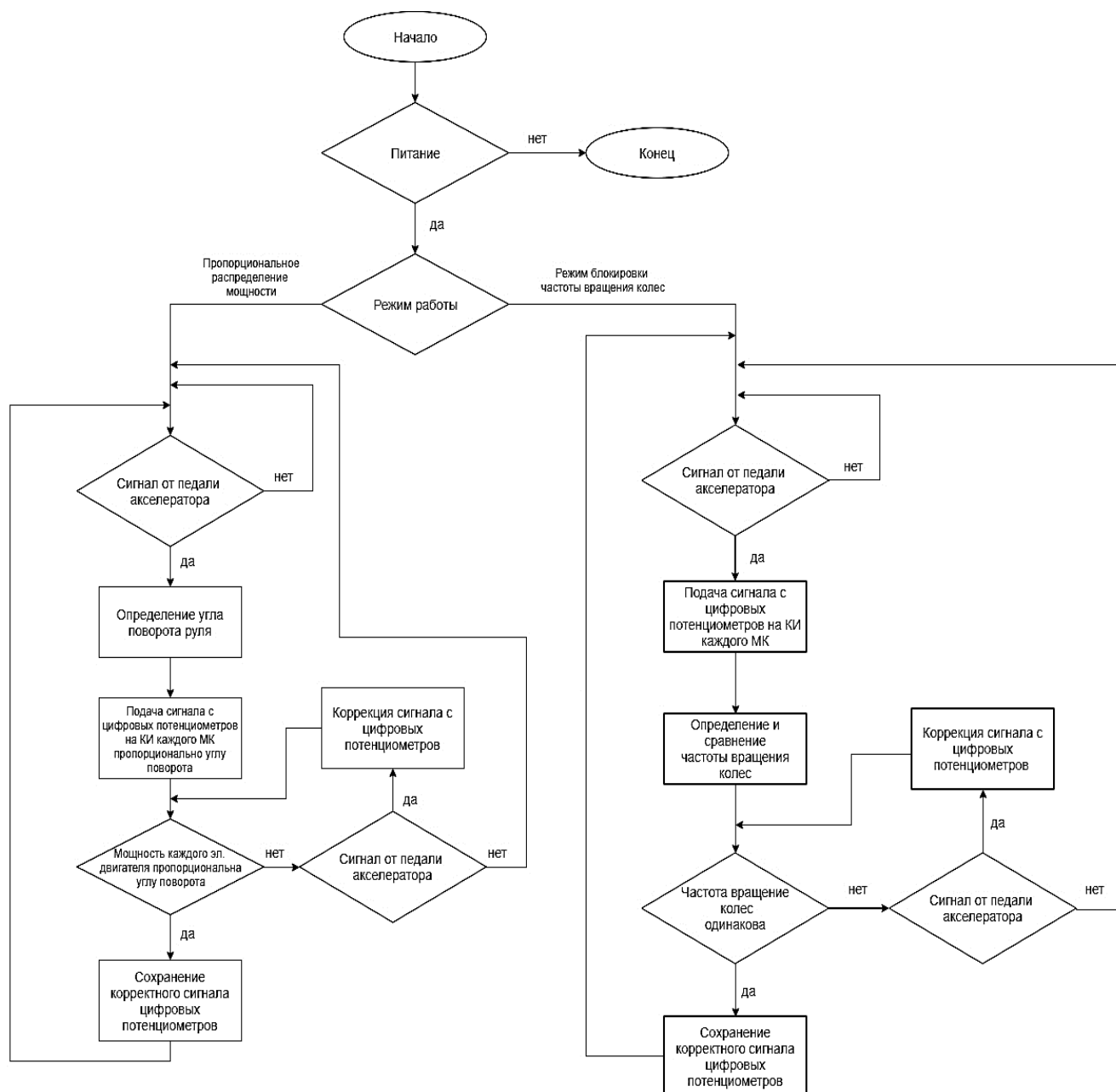


Рисунок 25 – Алгоритм работы электронного дифференциала

5.3.2 Разработка структурной схемы электронного дифференциала

Для определения крутящего момента каждого из электродвигателей необходимо использовать четыре датчика тока (ДТ), которые будут измерять значения токов, протекающих через контроллер-инверторы электродвигателей мотор-колес в момент их работы. Для определения частоты вращения колес существует возможность использования датчиков Холла (ДХ), находящихся в каждом из четырех

электродвигателей мотор-колес, предназначенных для определения положения ротора относительно фазных обмоток статора. Также в разрабатываемой системе должны использоваться переключатель режимов (ПР) и световая индикация (СИР) текущих режимов работы устройства. Для распределения мощности между колесами при поворотах, микроконтроллер электронного дифференциала должен получать информацию об угле поворота колес, поэтому необходимо использовать датчик угла поворота руля (ДУП). Для управления сигналом, задающий необходимый уровень тяги мотор-колес, производится через каждый из четырех цифровых потенциометров (ЦП), выводы которых подключаются в разъемы каждого из четырех контроллер-инверторов, предназначенных для подключения педали акселератора. Структурная схема устройства изображена на рисунке 26.

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

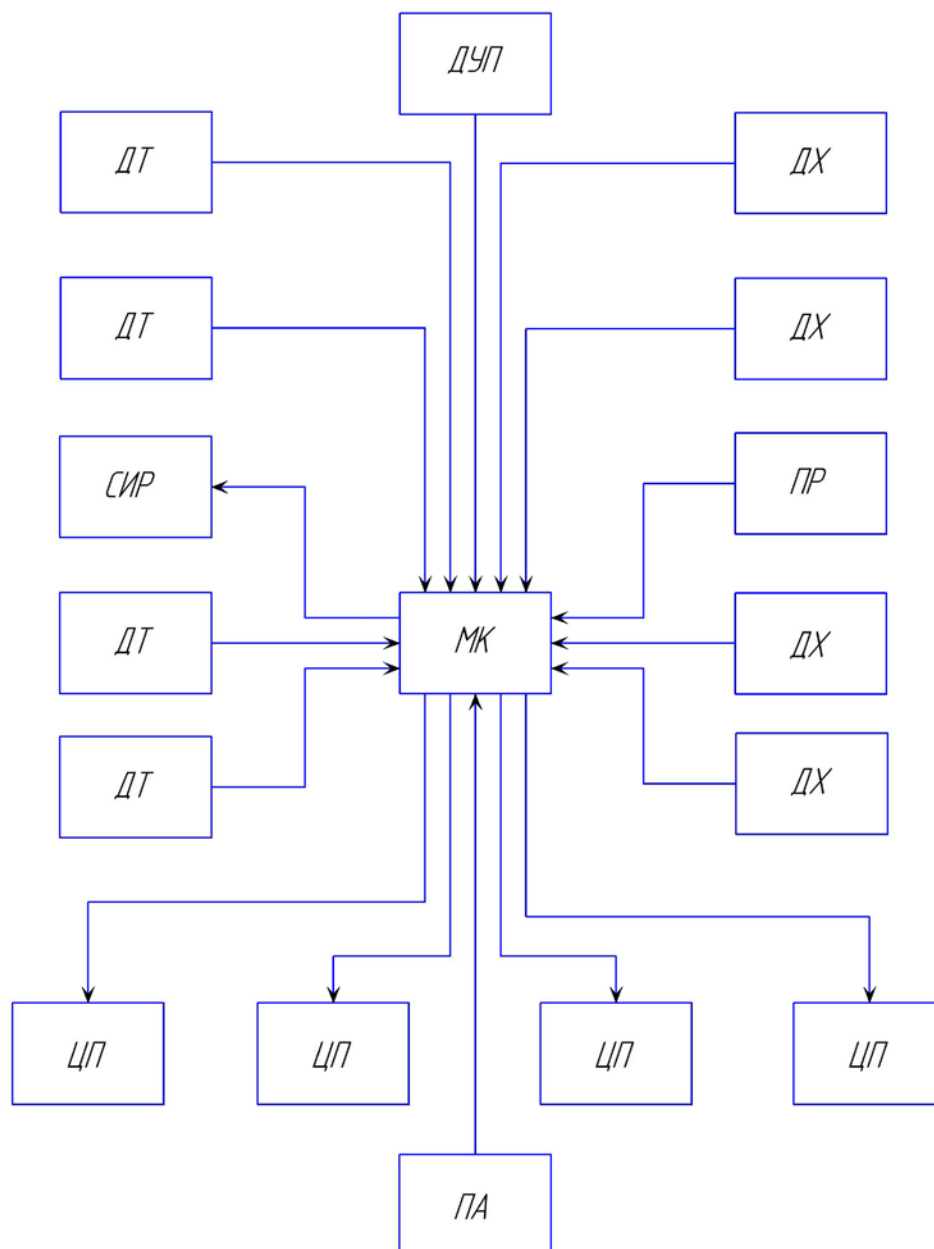


Рисунок 26 – Структурная схема электронного дифференциала

5.3.3 Выбор элементов и датчиков для электронного дифференциала

Напряжение сигнала $U_{\text{сиг}}$, принимаемого контроллер-инвертором *KEB72801X* от педали акселератора, составляет от 1 до 4,2 В. Напряжение питания педали акселератора составляет $U_{\text{п пед}} = 5$ В. Потенциометрический датчик педали акселератора, которая предназначена для работы с данным контроллер-инвертором, имеет сопротивление $R_{\text{пот пед}} = 5000$ Ом.

Рассчитаем максимальный ток, проходящий через подвижной контакт цифрового потенциометра. Расчет тока производится при максимальном значении напряжения регулирования $U_{\max \text{ рег}} = 4,2 \text{ В}$:

$$I_{\max \text{ рег}} = \frac{U_{\text{п пед}}}{\left(R_{\text{пот пед}} - \frac{U_{\max \text{ рег}}}{U_{\text{п пед}}} * R_{\text{пот пед}}\right)} = \frac{5}{\left(5000 - \frac{4,2}{5} * 5000\right)} = 0,00625 \text{ мА}.$$

Исходя из рассчитанного тока подвижного контакта потенциометра, выбран цифровой потенциометр *MCP45HV51T-502E/ST*. Характеристики данной интегральной схемы представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Характеристики цифрового потенциометра *MCP45HV51T-502E/ST*

Производитель	<i>Microchip</i>
Напряжение питания, В	От 1,8 до 36
Максимальный ток источника питания, мА	100
Количество потенциометров	1
Сопротивление потенциометра, Ом	5000
Максимальный ток подвижного контакта, мА	25
Количество шагов потенциометра	256
Цифровой интерфейс	<i>I2C</i>
Количество выводов микросхемы	14
Емкость выводов шины <i>I2C</i> , пФ	10

Для определения значения крутящего момента электродвигателей необходимо использовать датчик тока. Максимальное значение тока, потребляемого электродвигателем и контроллер-инвертором, составляет 120 А, поэтому выбран линейный датчик тока *CSLA1CH*. Характеристики датчика приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Характеристики линейного датчика тока

Производитель	<i>Honeywell</i>
Напряжение питания, В	От 8 до 16

Продолжение таблицы 11

Максимальный ток питания, мА	19
Максимальный измеряемый ток, А	150
Выходная величина	Напряжение
Чувствительность, В/А	0,0196
Время отклика, мкс	3

Для управления общей тягой электромобиля через электронный дифференциал, выбрана педаль акселератора с датчиками Холла *Sayoorn JKH*. Параметры представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Характеристики педали акселератора *JKH*

Производитель	<i>Sayoorn</i>
Напряжение питания U_n , В	5
Выходное напряжение, В	От 1 до 4,2
Номинальный ток нагрузки, мА	10
Угол поворота педали, °	30

Датчик определения угла поворота руля выбран датчик *Bosch LWS3*. Характеристики датчика представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Характеристики датчика угла поворота руля *LWS3*

Производитель	<i>Bosch</i>
Напряжение питания U_n , В	От 8 до 16
Максимальный потребляемый ток при 12 В, мА	150
Диапазон измерения угла поворота руля, °	От -780 до 780
Интерфейс	<i>CAN</i>

Для получения и обработки сигналов с датчиков и управления цифровыми потенциометрами, выбран микроконтроллер *PIC18F2685*. Характеристики микроконтроллера представлены в таблице 14.

Таблица 14 - Характеристики микроконтроллера *PIC18F2685*

Производитель	<i>Microchip</i>
Напряжение питания U_n , В	4,3 – 5,5
Ширина шины данных, бит	8
Максимальная тактовая частота, МГц	40
Размер программной памяти, Кб	96
Размер оперативной памяти, Кб	3,25
Разрешение АЦП, бит	10
Количество каналов АЦП	8
Количество выводов	28
Поддерживаемые интерфейсы	<i>I²C, USART, SPI, CAN UART</i>
Максимальный ток питания, мА	250
Максимальный суммарный ток любого из портов, мА	200
Максимальный ток выводов, мА	20
Общая мощность рассеивания, Вт	1
Входное напряжение низкого уровня портов ввода/вывода $U_{вхн}$, В	0 – 0,8
Входное напряжение высокого уровня портов ввода/вывода $U_{вхв}$, В	4 – 5
Выходное напряжение низкого уровня портов ввода/вывода $U_{выхн}$, В	0 – 0,6
Выходное напряжение высокого уровня портов ввода/вывода $U_{выхв}$, В	4,3
Емкость шины <i>I2C</i> , пФ	50

Данный микроконтроллер имеет контроллер *CAN*, работающий через интерфейс *UART*, но не имеет *CAN*-приемопередатчика, необходимый для взаимодействия с

физическим интерфейсом *CAN*, поэтому использована специальная ИС, позволяющая обеспечивать прием и передачу данных с физической шины *CAN UART*, это микросхема *MCP2551*. Ее характеристики представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Характеристики приемопередатчика *CAN MCP2551*

Производитель	<i>Microchip</i>
Максимальное напряжение питания $U_{п}$, В	7
Поддерживаемые интерфейсы	<i>CAN UART, CAN</i>
Максимальный ток питания при доминантном состоянии линии <i>CAN</i> , мА	75
Максимальный ток питания при рецессивном состоянии линии <i>CAN</i> , мА	10
Номинальное напряжение на линиях <i>CAN-H</i> и <i>CAN-L</i> при рецессивном состоянии линии, В	2,5
Номинальное дифференциальное напряжение линий <i>CAN-H</i> и <i>CAN-L</i> при доминантном режиме, В	3
Скорость передачи данных, Мбит/с	1

Для световой индикации текущих режимов работы разрабатываемого устройства выбран двухцветный светодиод *BL-L517EGW*. Характеристики светодиода представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Характеристики светодиода *BL-L517EGW*

Производитель	<i>Betlux Electronics</i>
Номинальное напряжение питания, В	5
Номинальный ток питания, мА	30
Максимальная сила света, мКд	20
Количество выводов	2

Переключатель режимов в зависимости от положения, будет устанавливать на цифровом входе микроконтроллера уровень логического «0» или «1», тем самым

определяя режим работы разрабатываемого устройства. Так как выводы микроконтроллера настроены на прием сигналов, их сопротивление очень велико и ограничивать ток в цепи переключателя нет необходимости.

Некоторые датчики в разрабатываемом устройстве требуют напряжение питания 12 В, при том, что все ИС требуют напряжение питания 5 В. Поэтому система будет питаться от двух номиналов напряжений. Напряжение АКБ силовой установки составляет 75 В постоянного напряжения, поэтому целесообразно использовать понижающий преобразователь напряжения. Выбран понижающий преобразователь напряжения *XP Power RDC3072T0512*. Характеристики ППН приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Характеристики ППН *RDC3072T0512*

Производитель	<i>XP Power</i>
Входное напряжение $U_{вх}$, В	36...140
Постоянное выходное напряжение первого канала $U_{вых1}$, В	5
Постоянное выходное напряжение второго канала $U_{вых2}$, В	12
Максимальный выходной ток первого канала $I_{вых1}$, А	4
Максимальный выходной ток второго канала $I_{вых2}$, А	0,42

Электрические характеристики датчиков Холла *SS41*, установленных в электродвигателях, представлены в таблице 18.

Таблица 18 - Характеристики датчика Холла *SS41*

Производитель	<i>Honeywell</i>
Максимальное напряжение питания $U_{ном}$, В	24
Максимальный выходной ток $I_{out max}$, мА	20
Тип датчика	биполярный
Максимальная рабочая частота f_{max} , кГц	100

5.3.4 Разработка принципиальной схемы электронного дифференциала

Микроконтроллеры серии *PIC18* имеет технологию выбора периферийного вывода, благодаря которой появляется возможность ставить в соответствие вывод микроконтроллера и выход или вход его встроенных периферийных модулей. Обозначение выводов микроконтроллера изображено на рисунке 27.

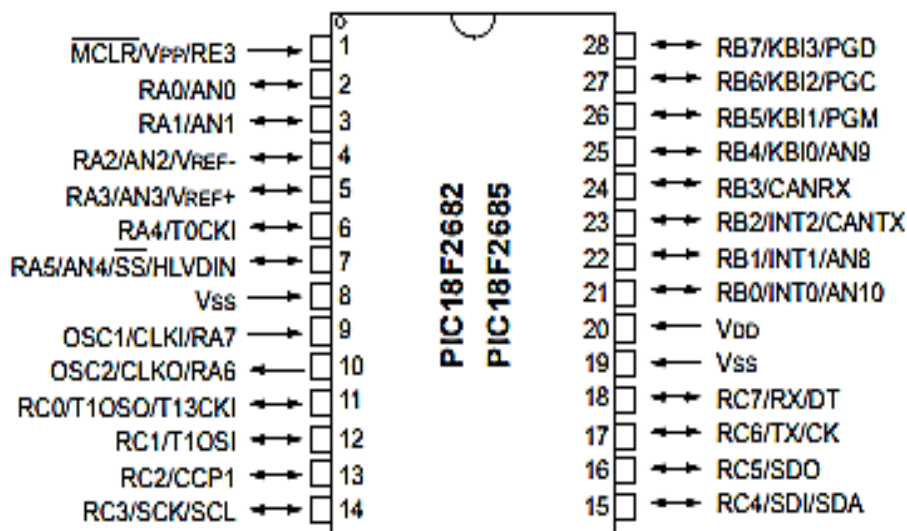


Рисунок 27 - Обозначение выводов микроконтроллера *PIC18F2685*

Значения выводов микроконтроллера, необходимые для использования представлены в таблице 19.

Таблица 19 - Назначение выводов микроконтроллера *PIC18F2685*

Аналоговый вход	AN0, AN1, AN2, AN3, AN4, AN8, AN9, AN10
Цифровой вход/выход	RA0, RA1, RA2, RA3, RA4, RA5, RA6, RA7, RB0, RB1, RB2, RB3, RB4, RB5, RB6, RB7, RC0, RC1, RC2, RC3, RC4, RC5, RC6, RC7
Интерфейс I2C	SDA, SCL
Интерфейс контроллера CAN	CANRX, CANTX
Выводы питания	V _{DD} , V _{SS}

Для ограничения тока в цепи светодиода, необходимо включить в цепь токоограничительный резистор. При расчёте токоограничительного резистора для

цепи светодиода, необходимо учитывать выходное напряжение высокого уровня выводов $U_{\text{ВЫХВ}}$ и номинальный ток светодиода $I_{\text{д}}$:

$$R_{\text{огр}} = \frac{U_{\text{ВЫХВ}}}{I_{\text{д}}} = \frac{4,3}{0,02} = 215 \text{ Ом.}$$

Необходимая рассеиваемая мощность для резистора:

$$P_p = I_{\text{д}}^2 * R_{\text{огр}} = 0,02^2 * 215 = 0,086 \text{ Вт.}$$

Из ряда номиналов E96 выбрано сопротивление резистора номиналом 215 Ом и рассеиваемой мощностью 0,1 Вт.

Выводы светодиода соединены через резистор 215 Ом с цифровыми выходами *RB6* и *RB7*.

Информационное взаимодействие между микроконтроллером и цифровыми потенциометрами (обозначения выводов потенциометра изображены на рисунке 28) производится посредством интерфейса *I2C* (рисунок 29). Стандарт данного интерфейса обязывает установку подтягивающих резисторов на линии шины к уровню напряжения питания микросхем. Также стандарт данного интерфейса ограничивает общую емкость шины до $C_{i2c \text{ ш}} = 400 \text{ пФ}$.

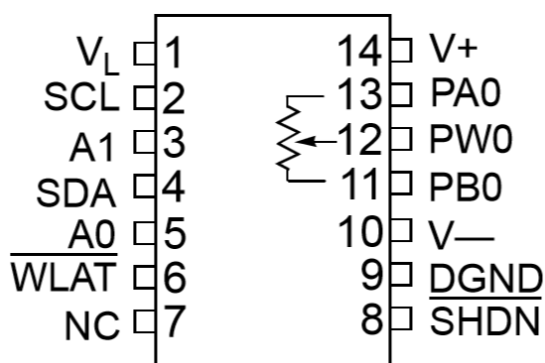


Рисунок 28 – Обозначения выводов цифрового потенциометра *MCP45HV1*

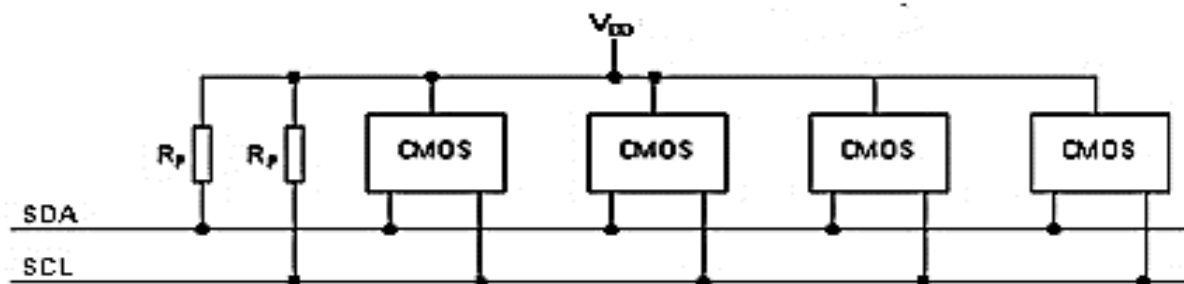


Рисунок 29 – Схема физического интерфейса *I2C*

Исходя из технической документации цифрового потенциометра, емкость между выводами *SDA* и *SCL* равна: $C_{i2c\text{ п}} = 10 \text{ пФ}$.

Исходя из технической документации микроконтроллера, емкость между выводами *SDA* и *SCL* равна: $C_{i2c\text{ м}} = 50 \text{ пФ}$.

Общая емкость шины:

$$C_{i2c\text{ ш}} = C_{i2c\text{ п}} * 4 + C_{i2c\text{ м}} = 10 * 4 + 50 = 90 \text{ пФ}.$$

Емкость шины *I2C* в разрабатываемом устройстве не превышает 400 пФ.

Максимальное значение сопротивления резисторов подтяжки зависит от времени нарастания фронта t_r сигналов линий *SDA* и *SCL*, и от емкости шины. Время нарастания фронта зависит от рабочей частоты шины. Выбрана оптимальная частота работы шины $f_{scl} = 400 \text{ кГц}$. Время нарастания фронта приданной частоте равно $t_r = 300 \text{ нс}$.

Расчет максимального значения сопротивления резисторов $R_{p\text{ max}}$:

$$R_{p\text{ max}} = \frac{t_r}{0,8473 * C_b} = \frac{300}{0,8473 * 90} = 3,93 \text{ кОм}.$$

Расчет минимального значения сопротивления резисторов $R_{p\text{ min}}$:

$$R_{p\text{ min}} = \frac{U_{DD} - U_{OL\text{ max}}}{I_{OL}} = \frac{5 - 0,6}{0,003} = 1466 \text{ Ом, где}$$

U_{DD} – напряжение питания микросхем на шине;

$U_{OL\text{ max}}$ – выходное напряжение низкого уровня;

I_{OL} – выходной ток вывода при напряжении низкого уровня.

Оптимальным значением сопротивления станет среднее значение сопротивления между максимальным и минимальным:

$$R_p = \frac{R_{p\text{ max}} - R_{p\text{ min}}}{2} = \frac{3930 + 1466}{2} = 2698 \text{ Ом}.$$

Необходимая рассеиваемая мощность для резистора:

$$P_p = I_{OL}^2 * R_p = 0,003^2 * 2698 = 0,024 \text{ Вт}.$$

Из ряда номиналов E192 выбрано сопротивление резистора номиналом 2,71 кОм и рассеиваемой мощностью 0,05 Вт.

Выводы *SDA* и *SCL* цифровых потенциометров и микроконтроллера подключаются к линиям шины *I2C*. Ведомые ИС на шине *I2C* должны иметь уникальный 7-ми битный адрес. Префикс адреса (5 бит старших разрядов) установлен заводом-изготовителем, оставшая часть адреса (2 бита младших разрядов) устанавливается с помощью адресных выводов A0 и A1 путем комбинирования соединений адресных выводов с плюсом питания и землей, тем самым устанавливая на выходах уровни напряжения логического «0» и «1».

Информационное взаимодействие микроконтроллера и датчика угла поворота происходит посредством *CAN*-шины (рисунок 30).

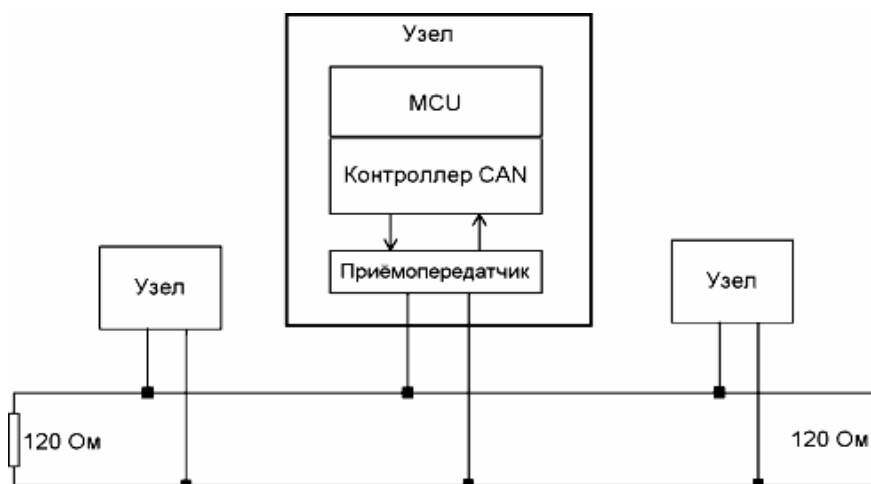


Рисунок 30 – Схема физического интерфейса *CAN*

Информационная связь между *CAN*-шиной и микроконтроллером, организована через приёмопередатчик, представляющий из себя интегральную цифровую микросхему (рисунок 31).

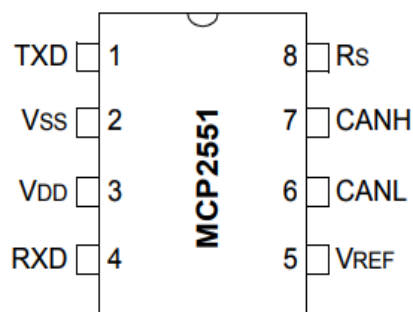


Рисунок 31 – Обозначения выводов ИС приемопередатчика CAN

Выводы приемопередатчика и микроконтроллера в интерфейсе *UART* соединяются таким образом, чтобы передающий (*Tx*) вывод одной ИС соединялся с принимающим (*Rx*) выводом другой ИС (рисунок 32).

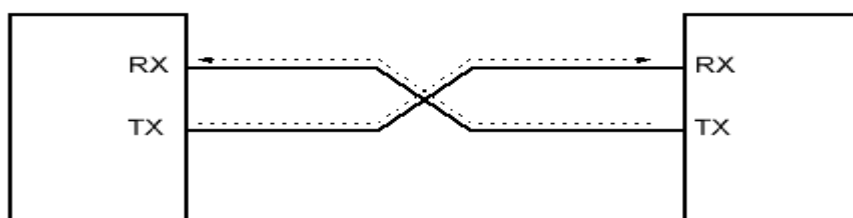


Рисунок 32 – Физический интерфейс *UART*

Выводы приемопередатчика и датчика угла поворота *CANH* и *CANL* соединяются на соответствующих линиях шины, при этом линии замыкаются между собой через резисторы согласования, сопротивление которых 120 Ом. Их наличие обязательно по стандарту интерфейса *CAN*.

Переключатель режимов в зависимости от положения, будет устанавливать на цифровом входе микроконтроллера уровень логического «0» или «1», тем самым определяя режим работы разрабатываемого устройства. Так как микроконтроллер содержит внутренние токоограничительные резисторы, использовать внешние добавочные резисторы в цепи переключателя нет необходимости. Переключатель соединяется с выводом микроконтроллера *RB5*.

Контакт выходного сигнала педали акселератора подключается к выводу канала АЦП микроконтроллера *AN0*.

Датчики Холла электродвигателей соединяются с цифровыми выводами микроконтроллера: RA1, RA2, RA3 и RA4.

Сигнальные выводы датчиков тока соединяются с выводами каналов АЦП микроконтроллера AN4, AN8, AN9 и AN10.

5.4 Разработка принципиальной схемы энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с мотор-колесами

Контроллер-инвертор *KEB72801X* имеет 14-контактный штыревой разъем для подключения датчиков, элементов и органов управления через 14-контактный гнездовой разъем, а также разборные контактные соединения для подключения к силовым цепям АКБ и электродвигателя. Схема выводов и контактов контроллер-инвертора *KEB72801X* представлена на рисунке 33.

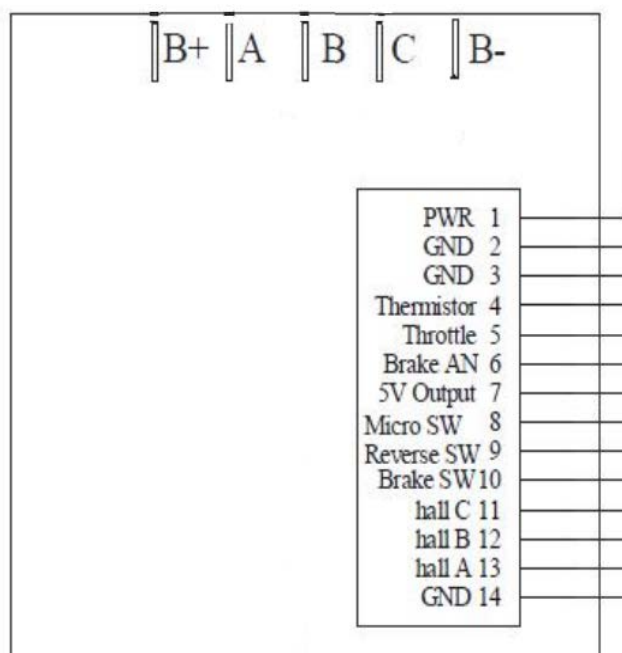


Рисунок 33 - Схема выводов и контактов контроллер-инвертора *KEB72801X*

Схема расположения контактов в разъёмном соединении изображена на рисунке 34.

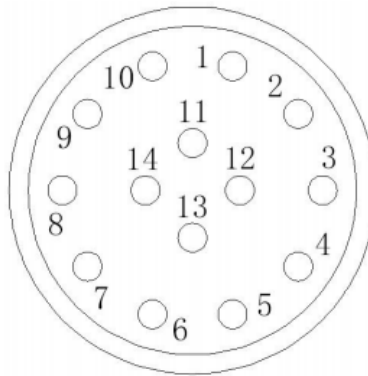


Рисунок 34 - Схема расположения контактов 14-контактного штыревого разъема

Назначение контактов контроллер-инвертора *KEB72801X* управления представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Назначение выводов и контактов контроллер-инвертора *KEB72801X*

Номер контакта разъема	Назначение контакта
1	Питание контроллер-инвертора
2	Земля педали акселератора
3	Земля датчика тормоза и переключателя направления
4	Сигнал датчика температуры электродвигателя
5	Сигнал педали акселератора
7	Выход +5В
9	Питание переключателя направления движения
10	Питание датчика педали тормоза
11	Сигнал датчика Холла фазы <i>С</i> электродвигателя
12	Сигнал датчика Холла фазы <i>В</i> электродвигателя
13	Сигнал датчика Холла фазы <i>А</i> электродвигателя
14	Земля датчиков Холла и датчика температуры электродвигателя
<i>А</i>	Питание фазы <i>А</i> электродвигателя
<i>В</i>	Питание фазы <i>В</i> электродвигателя
<i>С</i>	Питание фазы <i>С</i> электродвигателя
<i>В+</i>	Провод с положительной клеммы АКБ
<i>В-</i>	Провод с отрицательной клеммы АКБ

Фазные провода электродвигателей *QS273-4000W V3* имеют цветовую маркировку:

- фаза *A* – «Голубой»;
- фаза *B* – «Зеленый»;
- фаза *C* – «Желтый».

Фазные провода каждого из четырех электродвигателей соединяются с каждым из четырех контроллер-инверторов соответственно через разборные соединения в соответствии с обозначенными фазами. Разборные соединения «*B+*» каждого контроллер-инвертора соединяются с одним из двух силовых контактов контактора через предохранители.

Клемма положительной полярности сборки из трех последовательно соединенных АКБ соединяется со вторым силовым контактом контактора, а клемма отрицательной полярности сборки АКБ соединяются с контактом «*B-*» каждого контроллер-инвертора.

Контакт «1» 14-контактного разъемного соединения каждого контроллер-инвертора соединяются с клеммой АКБ положительной полярности через замок зажигания.

Контакт «2», «5» и «7» 14-контактного разъемного соединения каждого контроллер-инвертора соединяются с выводами «*PB0*», «*PW0*» и «*PA0*» соответственно каждой из четырех интегральных схем *MCP45HV1* электронного дифференциала.

Контакты «3» разъемного соединения каждого контроллер-инвертора соединяются с выводом переключателя и выводом датчика педали тормоза.

Контакты «4», «7», «11», «12», «13» и «14» разъемного соединения каждого контроллер-инвертора соединяется с контактами «*GND*», «*+5V*», «*Hall C*», «*Hall B*», «*Hall A*» и «*Thermistor*» разъемного соединения каждого электродвигателя.

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Контакт «+» электромагнитной катушки контактора соединяется с клеммой АКБ положительной полярности через замок зажигания. Контакт «-» электромагнитной катушки контактора соединяется с клеммой АКБ отрицательной полярности.

Контакты «+5V», «Signal» и «GND» разъемного соединения педали акселератора соединяются с выводом ППН электронного дифференциала «V_{OUT2}», выводом микроконтроллера электронного дифференциала «AN0» и выводом ППН «COM» соответственно.

Выводы ППН электронного дифференциала «+V_{IN}» и «-V_{IN}» соединяются с силовым контактом контактора цепи АКБ положительной полярности и с клеммой АКБ отрицательной полярности соответственно.

Принципиальная схема представлена в приложении А. Перечень элементов представлен в приложении Б.

6 Расчет эффективности и запаса хода силовых установок

Для расчета и сравнения эффективности и запаса хода разработанных силовых установок, необходимо создать теоретические условия эксплуатации с использованием параметров реальной автомобильной платформы и учетом заданной мощности силовой установки. Для расчета выбрана платформа автомобиля ЛУАЗ-969М, с полноприводной механической трансмиссией. Необходимые для расчета параметры данного автомобиля представлены в таблице 21 [21].

Таблица 21 – Технические характеристики ЛУАЗ-969М

Снаряженная масса $m_{сн}$, кг	970
Масса ДВС $m_{двс}$, кг	100
Масса трансмиссии $m_{трн}$, кг	150
Общая масса заправочных материалов $m_{зп}$, кг	45
Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x (прибл.)	0,45
Площадь поперечного сечения кузова автомобиля S , м ²	1,7

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Продолжение таблицы 21

КПД трансмиссии $\eta_{тр}$, % (прибл.)	0,85
Передаточное число механической трансмиссии u	5
Диаметр колеса D , м	0,55

Масса платформы автомобиля ЛУАЗ-969М без ДВС и узлов, не участвующих в работе энергетической силовой установки:

$$m = m_{сн} - m_{двс} - m_{зп} = 970 - 100 - 45 = 825 \text{ кг.}$$

Масса электромобиля на базе ЛУАЗ-969М, с энергетической силовой установкой и полноприводной механической трансмиссией:

$$m_{эм} = m + 2 * m_{акб} + m_{эд} + m_{кнт} = 825 + 2 * 92 + 39 + 5,7 = 1054 \text{ кг.}$$

Расчет будет производиться для скорости электромобиля $V = 60$ км/ч при движении по асфальтному покрытию с продольным уклоном $\alpha = 0^\circ$.

Частота вращения электродвигателя при скорости электромобиля 60 км/ч:

$$n_{эм} = \frac{60 * V * u}{3,6 * \pi * D} = \frac{60 * 60 * 5}{3,6 * 3,14 * 0,55} = 2895 \text{ об/мин.}$$

Для того, чтобы электромобиль начал движение, сила тяги на ведущих колесах должна превысить сумму сил сопротивления движению. Для этого производится расчет сил, противодействующих началу движения и ускорения [22].

Сила сопротивления воздуха на скорости $V = 60$ км/ч (16,7 м/с):

$$F_{возд} = \frac{C_x * S * \rho * V^2}{2} = \frac{0,45 * 1,7 * 1,29 * 16,7^2}{2} = 138 \text{ Н,}$$

где ρ – плотность воздуха, выраженная в кг/м³.

Сила трения качения колес:

$$F_{тр} = f * (m_{в} + m_{эм}) * g * \cos\alpha = 0,018 * (80 + 1054) * 9,8 * 1 = 200 \text{ Н,}$$

где f – коэффициент трения качения асфальтного покрытия, $m_{в}$ – масса водителя, g – ускорение свободного падения.

Сумма сил сопротивления движению электромобиля при движении с постоянной скоростью $V = 60$ км/ч:

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$F_{\text{эм}} = F_{\text{тр}} + F_{\text{возд}} = 200 + 138 = 338 \text{ Н.}$$

Необходимое значение крутящего момента электродвигателя, для движения со скоростью 60 км/ч:

$$M_{\text{эм}} = \frac{F_{\text{эм}} * D}{2 * \eta_{\text{тр}} * u} = \frac{338 * 0,55}{2 * 0,85 * 5} = 22 \text{ Н * м.}$$

Необходимая выходная мощность силовой установки при движении со скоростью 60 км/ч:

$$P_{\text{вых}} = F_{\text{эм}} * V = 338 * 16,7 = 5645 \text{ Вт.}$$

Выдаваемая мощность АКБ, при движении со скоростью 60 км/ч:

$$P_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{вых}}}{\eta_{\text{эд}} * \eta_{\text{кнт}}} = \frac{5645}{0,9 * 0,98} = 6400 \text{ Вт.}$$

Запас хода полноприводного электромобиля с одним электрическим двигателем и механической полноприводной трансмиссией без учета рекуперации:

$$X_{\text{зап}} = \frac{W_{\text{сб}} * V}{P_{\text{вх}}} = \frac{23000 * 60}{6400} = 215 \text{ км.}$$

Масса электромобиля на базе ЛУАЗ-969М, с энергетической силовой установкой на четырех мотор-колесах:

$$\begin{aligned} m_{\text{эм1}} &= m - m_{\text{трн}} + 3 * m_{\text{акб1}} + 4 * m_{\text{эд1}} + 4 * m_{\text{кнт1}} = \\ &= 825 - 150 + 3 * 56 + 4 * 23 + 4 * 2,2 = 944 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Частота вращения электродвигателей мотор-колес при скорости электромобиля 60 км/ч:

$$n_{\text{эм1}} = \frac{60 * V}{3,6 * \pi * D} = \frac{60 * 60}{3,6 * 3,14 * 0,55} = 579 \text{ об/мин.}$$

Сила трения качения колес электромобиля с мотор-колесами:

$$F_{\text{тр1}} = f * (m_{\text{в}} + m_{\text{эм}}) * g * \cos \alpha = 0,018 * (80 + 944) * 9,8 * 1 = 180,6 \text{ Н.}$$

Сумма сил сопротивления движению электромобиля с мотор-колесами при движении с постоянной скоростью $V = 60$ км/ч:

$$F_{\text{эм1}} = F_{\text{тр}} + F_{\text{возд}} = 180 + 138 = 318 \text{ Н.}$$

Необходимое суммарное значение крутящего момента электродвигателей всех мотор-колес, для движения со скоростью 60 км/ч:

$$M_{\text{эм1}} = \frac{F_{\text{эм1}} * D}{2} = \frac{318 * 0,55}{2} = 87 \text{ Н * м.}$$

Необходимая суммарная выходная мощность силовой установки с мотор-колесами при движении со скоростью 60 км/ч:

$$P_{\text{вых1}} = F_{\text{эм1}} * V = 318 * 16,7 = 5310 \text{ Вт.}$$

Выдаваемая мощность АКБ, при движении со скоростью 60 км/ч:

$$P_{\text{вх1}} = \frac{P_{\text{вых1}}}{\eta_{\text{эд1}} * \eta_{\text{кнт1}}} = \frac{5310}{0,9 * 0,98} = 6020 \text{ Вт.}$$

Запас хода полноприводного электромобиля с мотор-колесами без учета рекуперации:

$$X_{\text{зап1}} = \frac{W_{\text{сб1}} * V}{P_{\text{вх1}}} = \frac{20250 * 60}{6020} = 200 \text{ км.}$$

Энергетическая эффективность силовой установки полноприводного электромобиля с мотор-колесами, по отношению к силовой установки полноприводного электромобиля с одним электродвигателем и механической трансмиссией:

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вх1}}} - 1 \right) * 100\% = \left(\frac{6400}{6020} - 1 \right) * 100\% = 13\%,$$

при этом, запас хода электромобиля с мотор-колесами меньше на:

$$\Delta x = \left(\frac{X_{\text{зап}}}{X_{\text{зап1}}} - 1 \right) * 100\% = \left(\frac{215}{200} - 1 \right) * 100\% = 7,5\%,$$

учитывая, что запасенная энергия АКБ силовой установки с одним электродвигателем больше, чем в силовой установке с мотор-колесами на:

$$\Delta W = \left(\frac{W_{\text{сб}}}{W_{\text{сб1}}} - 1 \right) * 100\% = \left(\frac{23000}{20250} - 1 \right) * 100\% = 13\%.$$

Таким образом, силовая установка полноприводного электромобиля с мотор-колесами показала большую эффективность, чем силовая установка с одним электрическим двигателем и механической трансмиссией. Тем не менее, силовая установка электромобиля с мотор-колесами имеет большую неподрессоренную

массу, оказывая большую нагрузку на подвеску электромобиля, требующая усиления последней.

7 Принцип действия силовой установки полноприводного электромобиля

Для того, чтобы привести электромобиль в движение, необходимо повернуть ключ зажигания в положение старт, который замкнет цепь контактора и подведет напряжение к контроллер-инвертору. Это переведет электромобиль в режим готовности к движению. Чтобы выбрать направление движения электромобиля (вперед или назад) необходимо переключателем выбора направления движения выбрать требуемый режим. Далее контроллер-инвертор на основе принятого сигнала управляет направлением вращения ротора электрического двигателя (или четырьмя электрическими двигателями в случае силовой установки с мотор-колесами).

Чтобы электромобиль начал движение, необходимо воздействовать на педаль акселератора, при этом с педали акселератора на контроллер-инвертор (или контроллер-инверторы в случае силовой установки с мотор-колесами) поступает аналоговый сигнал. Уровень, поданного сигнала будет зависеть от степени нажатия на педаль. По данному уровню контроллер-инвертор подает пропорциональный высокий ток на электрический двигатель.

Для включения режима рекуперации необходимо минимальное нажатие на педаль тормоза, которая механически взаимодействует с датчиком педали тормоза, представляющий из себя устройство с замыкающим контактом. Контакты датчика замкнутся и датчик подаст сигнал о включении режима рекуперации, при этом электродвигатель (или электродвигатели в случае силовой установки с мотор-колесами) перейдет в режим генератора и будет подзаряжать аккумуляторную батарею через контроллер-инвертор, к которому она подключена. После снятия механического воздействия с педали тормоза, режим рекуперации прекратится, и, если в дан-

ном случае педаль акселератора не нажата, электромобиль движется накатом и тормозит силой трения между колесами и дорогой, а также встречным потоком воздуха.

8 Алгоритм работы силовой установки

Основным устройством системы управления силовой установки является контроллер-инвертор, который на основе сигналов с датчиков и органов управления управляет исполнительными устройствами.

Для работы силовой установки необходимо электропитание, подаваемое на контроллер-инвертор. При его отсутствии контроллер-инвертор не функционирует. После подачи электропитания на контроллер-инвертор путем поворота ключа в положение «СТАРТ» и замыкания контактов контактора, система анализирует сигналы, поступающие с датчиков органов управления. Первым анализируется сигнал с датчика направления движения, он информирует систему о том, какое направление движения электромобиля выбрал водитель (вперед или назад). После получения сигнала от датчика направления движения, контроллер управления двигателем переходит к анализу сигнала с датчика педали тормоза. При ненулевом сигнале, система управления установит режим рекуперации. Вслед за проверкой условия подачи сигнала с датчика педали тормоза, проверяется условие подачи сигнала с датчика педали акселератора. Подача напряжения на электродвигатель будет происходить, если водитель нажмет на педаль акселератора и с ДПА поступит сигнал ненулевого уровня на контроллер управления, а он в свою очередь подаст пропорциональное напряжение с АКБ на ЭД. Выше приведенный цикл будет выполняться до тех пор, пока ключ пуска не будет переведен в положение «СТОП». Схема алгоритма изображена на рисунке 35.

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

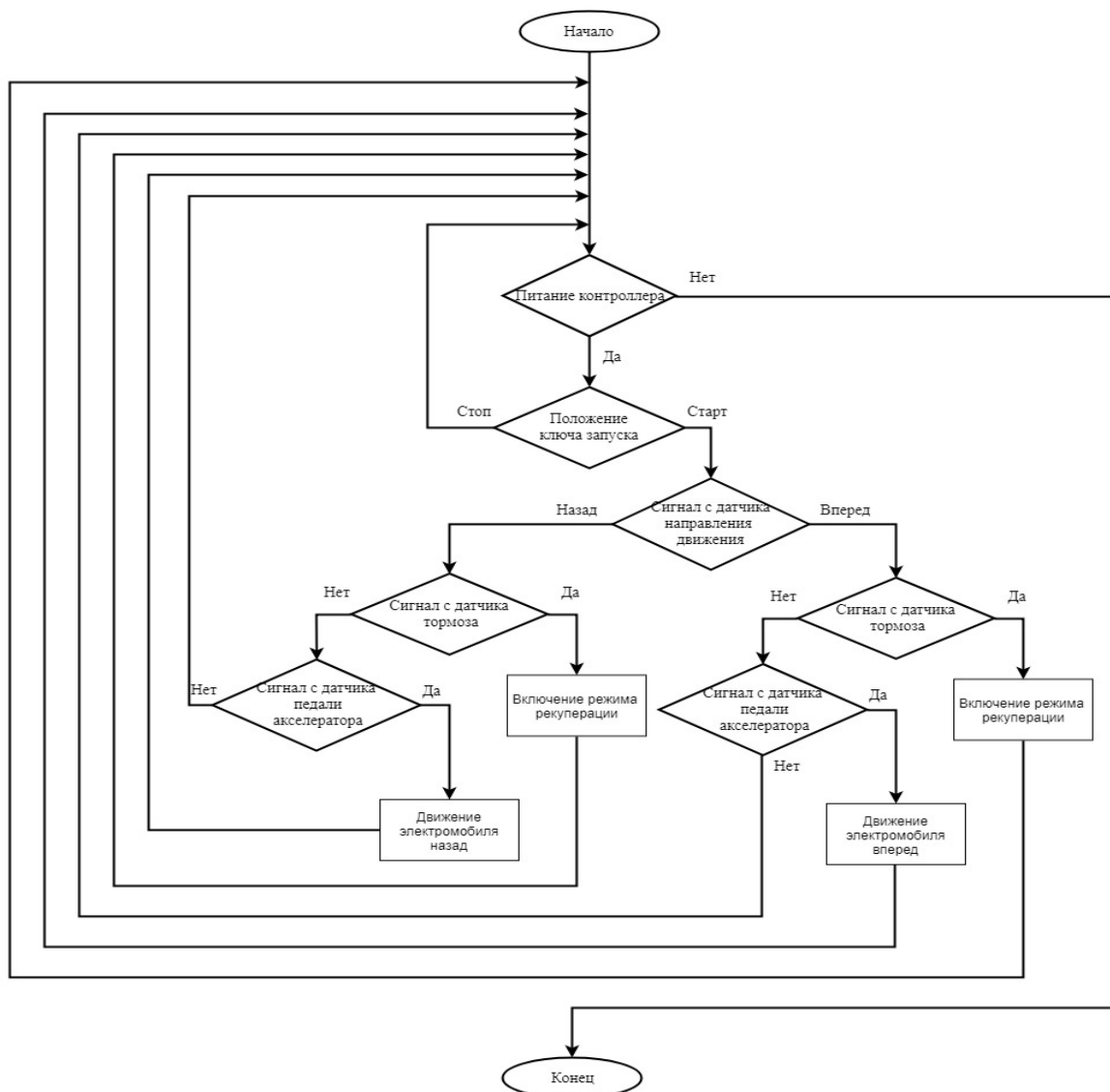


Рисунок 35 – Алгоритм работы силовой установки электромобиля

9 Разработка зарядного устройства для АКБ силовой установки

9.1 Основные требования к зарядному устройству АКБ

Источник энергии электромобиля состоит из двух последовательно соединенных литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей, каждая из которых имеет номинальное напряжение 50 В и емкость 230 А*ч. Полностью заряженная сборка из двух аккумуляторных батарей имеет напряжение 116 В, полностью разряженная – 90 В. Зарядные устройства, заряжающие АКБ напряжением постоян-

ного значения, просты в плане проектирования и производства, но при заряде данным методом, зарядный ток АКБ достигает больших значений, вызывая нагрев АКБ и разрушая внутреннюю структуру аккумуляторов в батарее. Поэтому, оптимальным методом заряда АКБ является комбинированный режим заряда, который состоит из двух стадий: первая стадия заряда проводится при неизменной величине постоянного тока до того момента, пока напряжение на АКБ не достигнет значения полностью заряженной АКБ. Вторая стадия заряда происходит при неизменном значении напряжения, равного напряжению заряженной АКБ, до тех пор, пока зарядный ток не достигнет минимальных значений.

При заряде АКБ постоянным значением зарядного тока, появляется необходимость стабилизировать зарядный ток, поэтому оптимальным схемотехническим решением является использование двухтактного трехфазного тиристорного выпрямителя, а регулирование угла открывания тиристоров позволит устанавливать необходимую величину зарядного тока.

При заряде АКБ постоянным значением напряжения, стабилизация выходного зарядного тока не требуется, поэтому угол открывания тиристоров устанавливается минимальным и не изменяется вплоть до окончания заряда АКБ.

Выбор трехфазной сети питания для зарядного устройства обусловлен рядом значительных преимуществ перед однофазными:

- исключение асимметрии фаз в электрической сети вследствие работы зарядного устройства;
- минимальное значение коэффициента пульсаций выходного напряжения;
- способна передать высокую мощность без перегрузки сети.

9.2 Разработка структурной схемы зарядного устройства

Исходя из требований к зарядному устройству, для понижения напряжения трехфазной сети до требуемого значения, необходимо использовать понижающий трехфазный трансформатор напряжения (ТН). Далее, для получения постоянного

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

напряжения и последующей стабилизации выходного тока в режиме заряда током постоянной величины, необходим управляемый преобразователь переменного напряжения в постоянное, для этого необходимо использовать трехфазный двух-тактный выпрямительный мост (ВМ), состоящий из оптотиристорных модулей. Выпрямленное напряжение подается на заряжаемую АКБ (АКБ). Для генерации управляющих импульсов для отпирания тиристоров и задания угла открывания тиристоров необходима система импульсно-фазового управления, состоящая из цепи детектора перехода фазы через 0 (ЦДН), предназначенного для определения момента, в котором синусоидальное напряжение фаз трехфазной сети переходит в положительную полуволну, микроконтроллера (МК), предназначенного для вычисления угла отпирания тиристоров и автоматического выбора режима заряда АКБ, цепь управления оптотиристорами (ЦУ), датчика напряжения АКБ (ДН) и датчика тока (ДТ). Для работы микроконтроллера и прочих элементов низкого напряжения питания необходим источник постоянного напряжения (ИПН). Структурная схема зарядного устройства представлена на рисунке 36, а также в приложении А.

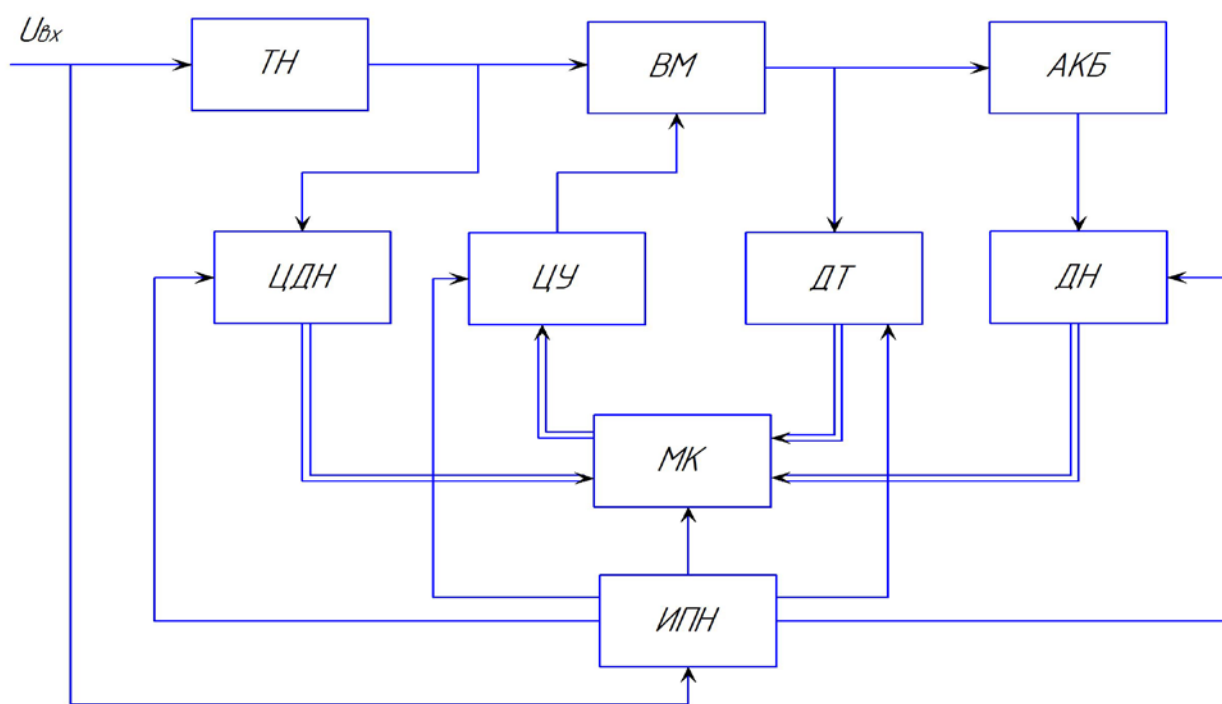


Рисунок 36 – Структурная схема зарядного устройства

9.3 Расчет силовой цепи зарядного устройства

Напряжение на полюсных выводах полностью заряженной сборки АКБ $U_{\max \text{ сб}} = 116 \text{ В}$, а емкость сборки АКБ $C_{\text{акб}} = 230 \text{ А*ч}$. Нужно рассчитать необходимое средневывпрямленное напряжение заряда U_{d0} с учетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении АКБ и падения напряжения на тиристорах, чтобы узнать необходимое фазное напряжение вторичной обмотки трехфазного трансформатора. Напряжение вторичной обмотки трансформатора подобрано таким образом, чтобы при угле отпирания тиристоров в точках естественной коммутации (0 градусов), средневывпрямленное напряжение заряда было равно напряжению полностью заряженной АКБ, при этом период переключений тиристоров в естественных точках коммутации равен $\pi/3$. Для выбора необходимых тиристоров, следует учитывать максимальное обратное напряжение между анодом и катодом тиристора и среднее значение прямого тока, протекающего через тиристор.

Максимальное напряжение заряда и максимальный ток заряда наступает в момент перехода от режима заряда постоянным током к режиму заряда постоянным напряжением, поэтому в этот промежуток времени, выходная мощность зарядного устройства максимальна, что является предельным режимом работы для выпрямительного моста, поэтому расчет будет производиться именно для условий эксплуатации в этот промежуток времени.

Необходимое средневывпрямленное напряжение заряда, без учета падения напряжения на тиристорах, при внутреннем сопротивлении сборки АКБ

$r_{\text{вн сб}} = 10 \text{ мОм}$ и максимальном токе заряда $I_{\text{зар max}} = 230 \text{ А}$.

$$U'_{d0} = U_{\text{зар сб}} + r_{\text{вн сб}} * I_{\text{зар max}} = 116 + 0,01 * 230 = 118,3 \text{ В}.$$

Необходимое действующее значение фазного напряжения трехфазного трансформатора, без учета падения напряжения на тиристорах, рассчитывается по формуле:

$$U'_{2\phi} = U'_{d0} * \frac{\pi}{3 * \sqrt{6}} = 118,3 * \frac{3,14}{3 * \sqrt{6}} = 50,55 \text{ В}.$$

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Ориентировочное максимальное обратное напряжение на тиристорах:

$$U'_{\text{обр max}} = U'_{2\phi} * \sqrt{2} * \sqrt{3} = 50,55 * \sqrt{2} * \sqrt{3} = 123,8 \text{ В.}$$

Максимальное значение тока тиристора в открытом состоянии:

$$I_{\text{ос max}} = I_{\text{зар max}} = 230 \text{ А.}$$

Средневыпрямленное значение тока:

$$I_{d0} = I_{\text{зар max}} = 230 \text{ А.}$$

Среднее значение прямого тока каждого из тиристоров в трехфазной выпрямительной схеме Ларионова:

$$I_{\text{ос ср}} = \frac{I_{d0}}{3} = \frac{230}{3} = 76,6 \text{ А.}$$

Действующее значение прямого тока каждого из тиристоров в трехфазной выпрямительной схеме Ларионова:

$$I_{\text{ос}} = \frac{I_{d0}}{\sqrt{2}} = \frac{230}{\sqrt{2}} = 164,3 \text{ А.}$$

Выбран оптотиристорный модуль МТОТО160-4.

Характеристики тиристора:

- напряжение в открытом состоянии $U_{\text{ос}}, 1,04 \text{ В};$
- максимальный средний ток в открытом состоянии $I_{\text{ос ср}}, 160 \text{ А};$
- максимальный действующий ток в открытом состоянии $I_{\text{ос}}, 250 \text{ А};$
- максимально допустимое постоянное обратное напряжение $U_{\text{обр}}, 300 \text{ В};$
- максимально допустимое постоянное напряжение в закрытом состоянии $U_{\text{зс}}, 300 \text{ В};$
- повторяющийся импульсный обратный ток $I_{\text{обр п}}, 6 \text{ мА};$
- ударный ток в открытом состоянии $I_{\text{ос удр}}, 3200 \text{ А};$
- критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии $(du_{\text{зс}}/dt)_{\text{кр}}, 100 \text{ В/мкс};$
- критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии $(di_{\text{ос}}/dt)_{\text{кр}}, 70 \text{ А/мкс};$
- отпирающий постоянный ток управления $I_{\text{у от}}, 80 \text{ мА};$

- отпирающее постоянное напряжение управления $U_{y\text{от}}, 2,5 \text{ В}$;
- время включения $t_{\text{вкл}}, 10 \text{ мкс}$;
- время выключения $t_{\text{выкл}}, 100 \text{ мкс}$.

Необходимое напряжение заряда, с учетом падения напряжения на тиристорах:

$$U_{d0} = U'_{d0} + (2 * U_{oc}) = 118,3 + (2 * 1,04) = 120,4 \text{ В.}$$

Необходимое действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки трехфазного трансформатора, с учетом падения напряжения на фототиристорах в открытом состоянии:

$$U_{2\phi} = U_{d0} * \frac{\pi}{3 * \sqrt{6}} = 120,4 * \frac{3,14}{3 * \sqrt{6}} = 51,45 \text{ В.}$$

Максимальное обратное напряжение на тиристоре:

$$U_{\text{обр max}} = U_{2\phi} * \sqrt{2} * \sqrt{3} = 51,45 * \sqrt{2} * \sqrt{3} = 126 \text{ В.}$$

Действующее значение линейного напряжения вторичной обмотки трехфазного трансформатора напряжения:

$$U_{2л} = U_{2\phi} * \sqrt{3} = 51,45 * \sqrt{3} = 89,11 \text{ В.}$$

Амплитудное значение тока вторичной обмотки трансформатора:

$$I_m \approx I_{d0} = 230 \text{ А.}$$

Действующее значение Линейного тока вторичной обмотки трансформатора, учитывая, что обмотки соединены «звездой»:

$$I_{2л} = I_{2\phi} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{230}{\sqrt{2}} = 162,6 \text{ А.}$$

Максимальная требуемая мощность трансформатора:

$$S_T = \sqrt{3} * U_{2л} * I_{2л} = \sqrt{3} * 89,11 * 162,6 = 25096 \text{ ВА.}$$

Выбран серийно выпускаемый трехфазный трансформатор напряжения ТС-25-380/110. Характеристики трансформатора представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Характеристики трансформатора

Номинальная мощность трансформатора S_T , кВА	25
Материал обмоток	Алюминий
Вид охлаждения	Естественное воздушное
Схема и группа соединения	Y/Y-0
Номинальное действующее значение линейного напряжения обмотки ВН $U_{1л}$, В	380
Номинальное действующее значение линейного напряжения обмотки НН $U_{2л}$, В	110
Частота питающей сети f , Гц	50

Действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки выбранного трансформатора:

$$U_{2\phi} = \frac{U_{2л}}{\sqrt{3}} = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,51 \text{ В.}$$

Средневыпрямленное напряжение, с выбранным трансформатором и угле отпирания тиристоров 0 градусов:

$$U_{d0} = U_{2\phi} * \frac{3 * \sqrt{6}}{\pi} - (2 * U_{oc}) = 63,51 * \frac{3 * \sqrt{6}}{3,14} - (2 * 1,04) = 145,8 \text{ В.}$$

Необходимое средневыпрямленное напряжение для заряда АКБ в режиме заряда напряжением постоянной величины:

$$U_{dH} = 116 \text{ В.}$$

Угол отпирания тиристоров, в режиме заряда напряжением постоянной величины:

$$\alpha_H = \arccos\left(\frac{U_{dH}}{U_{d0}}\right) = \arccos\left(\frac{116}{145,8}\right) = \arccos(0,796) = 0,65 \text{ рад} = 37^\circ$$

Падение напряжения на внутреннем сопротивлении сборки АКБ в режиме заряда током постоянной величины $I_{зар \max} = 230 \text{ А}$:

$$U_{п сб} = r_{вн} * I_3 = 0,01 * 230 = 2,3 \text{ В.}$$

Необходимое средневывпрямленное напряжение для заряда АКБ в режиме заряда током постоянной величины, при полностью разряженной сборке АКБ $U_{\text{раз сб}} = 90 \text{ В}$ и при токе заряда $I_{\text{зар max}} = 230 \text{ А}$:

$$U_{d\tau 1} = U_{\text{раз сб}} + U_{\text{п сб}} = 90 + 2,3 = 92,3 \text{ В.}$$

Угол отпирания тиристоров в начале режима заряда током постоянной величины, при полностью разряженной сборке АКБ $U_{\text{раз сб}} = 90 \text{ В}$, при токе заряда $I_{\text{зар max}} = 230 \text{ А}$ с учетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении сборки АКБ:

$$\alpha_{\tau 1} = \arccos\left(\frac{U_{dH}}{U_{d0}}\right) = \arccos\left(\frac{92,3}{145,8}\right) = \arccos(0,633) = 0,885 \text{ рад} = 51^\circ$$

Необходимое средневывпрямленное напряжение для заряда АКБ в режиме заряда током постоянной величины, при напряжении сборки АКБ $U_{\text{акб сб}} = 116 \text{ В}$ и при токе заряда $I_{\text{зар max}} = 230 \text{ А}$:

$$U_{d\tau 2} = U_{\text{акб сб}} + U_{\text{п сб}} = 116 + 2,3 = 118,3 \text{ В.}$$

Угол отпирания тиристоров в конце режима заряда током постоянной величины, при напряжении сборки АКБ $U_{\text{акб сб}} = 116 \text{ В}$, при токе заряда $I_{\text{зар max}} = 230 \text{ А}$ с учетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении сборки АКБ:

$$\alpha_{\tau 1} = \arccos\left(\frac{U_{dH}}{U_{d0}}\right) = \arccos\left(\frac{118,3}{145,8}\right) = \arccos(0,811) = 0,625 \text{ рад} = 36^\circ$$

9.4 Расчет управляющей схемы зарядного устройства

Для питания микроконтроллера, схемы «детектора нуля» и измерительной цепи, выбран 2-ух канальный источник питания *TDK-Lambda KMD40-512*. Характеристики источника питания представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Характеристики источника постоянного напряжения *KMD40-512*

Переменное входное напряжение $U_{\text{вх}}$, В	115...230
Постоянное выходное напряжение первого канала $U_{\text{вых1}}$, В	5

Продолжение таблицы 23

Постоянное выходное напряжение второго канала $U_{\text{вых}2}$, В	12
Максимальный выходной ток первого канала $I_{\text{вых}1}$, А	5
Максимальный выходной ток второго канала $I_{\text{вых}2}$, А	1,25
Выходная мощность P , Вт	40

Схема детектора нуля позволяет получать информацию о моменте времени, в котором синусоидальное напряжение фазы равно нулю. Относительно этого момента времени микроконтроллер задает угол открывания тиристора. Для упрощения схемы детектора нуля и обеспечения гальванической развязки между силовой цепью и низковольтной схемой управления используются быстродействующие транзисторные оптопары.

При переходе синусоидального напряжения в положительную полуволну, активируется светодиод оптопары, воздействуя на базовый слой фототранзистора, при котором начинает протекать ток коллектор-эмиттер при приложенном напряжении коллектор-эмиттер. Выбрана транзисторная оптопара CNY64ABST.

Характеристики транзисторной оптопары представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Характеристики транзисторной оптопары CNY64ABST

Максимальный прямой ток светодиода $I_{\text{ос max}}$, мА	75
Максимальное обратное напряжение светодиода, $U_{\text{обр max}}$,	5
Прямое напряжение светодиода, $U_{\text{пр}}$, В	1,32
Коэффициент передачи по току $I_K / I_{\text{ос ср max}}$	2,4
Напряжение пробоя коллектор-эмиттер $U_{\text{КЭО max}}$, В	32
Напряжение насыщения фототранзистора $U_{\text{нас}}$, В	0,3
Суммарная рассеиваемая мощность P , мВт	250
Максимальный ток коллектора I_K , мА	50

Во избежание выхода из строя светодиода транзисторной оптопары приложенным обратным напряжением, необходимо включить встречный параллельно

соединенный диод, близкий по характеристикам к светодиоиду оптопары. Выбран диод MA2C029W. Его характеристики представлены в таблице 25.

Таблица 25 – Характеристики диода MA2C029WB

Максимальный прямой ток диода $I_{oc\ max}$, мА	100
Максимальное обратное напряжение диода, $U_{обр\ max}$,	6
Прямое напряжение светодиода, $U_{пр}$, В	1,32

Схема «детектора нуля» необходима каждой из трех фаз, поэтому используются три транзисторных оптопары, и расчет номиналов токоограничивающих резисторов одинаков для каждой из них. Аноды светодиодов каждой оптопары подключаются к каждой фазе вторичной обмотки трансформатора, а катоды подключаются к нулевому проводу трехфазной сети. Для ограничения тока в катодно-анодной цепи светодиодов и диодов в необходим токоограничительный резистор, учитывая амплитудное значение фазного напряжения трансформатора.

Расчет номинала резистора производится для ограничения тока до 10 мА:

$$U_{2\phi\ max} = U_{2\phi} * \sqrt{2} = 63,51 * \sqrt{2} = 89,55\ В;$$

$$R_{огр\ min} = \frac{U_{2\phi\ max}}{I_{oc}} = \frac{89,55}{0,01} = 8955\ \text{Ом}.$$

Минимальная требуемая рассеиваемая мощность токоограничительного резистора:

$$P_{огр\ min} = I_{oc}^2 * R_{огр\ min} = 0,01^2 * 8870 = 0,887\ \text{Вт}.$$

Из ряда номиналов Е96 выбираем сопротивление токоограничительного резистора цепи светодиодов оптопары и диодов 8,87 кОм и рассеиваемой мощностью 1 Вт.

В технической документации приведено оптимальное значение сопротивления нагрузочного резистора в цепи коллектора $R_L = 1000\ \text{Ом}$, при напряжении питания в цепи коллектора $U_{пк} = 5\ \text{В}$. При этом ток коллектора составляет

$I_K = 5\ \text{мА}$, при котором скорость включения и выключения фототранзистора будет максимальной.

Необходимая рассеиваемая мощность нагрузочного резистора R_L при токе коллектора $I_K = 5 \text{ мА}$:

$$P_L = I^2 * R_L = 0,005^2 * 1000 = 0,025 \text{ Вт.}$$

Из ряда номиналов E96 для нагрузочного резистора цепи коллектора выбираем номинал 1,00 кОм и рассеиваемой мощностью 0,05 Вт.

Для измерения зарядного тока выбран датчик тока *Honeywell CSLA2DH*. Характеристики датчика в таблице 26.

Таблица 26 – Характеристики датчика тока *Honeywell CSLA2DH*

Производитель	<i>Honeywell</i>
Номинальное напряжение питания $U_{п}$, В	12
Максимальный ток питания $I_{п}$, мА	20
Максимальный измеряемый ток $I_{из \text{ max}}$, А	235
Выходная величина	Напряжение
Чувствительность, $U_{вых}/I_{из}$, В/А	0,0098
Время отклика, мкс	3

Выходное напряжение датчика при максимальном токе заряда $I_{зар \text{ max}} = 230 \text{ А}$:

$$U_{вых} = \frac{U_{вых}}{I_{из}} * I_{зар \text{ max}} = 0,0098 * 230 = 2,254 \text{ В.}$$

Датчик зарядного тока устанавливается на зарядный провод положительной полярности. Питание датчика производится от первого канала источника постоянного напряжения 12 В. Контакт выходного напряжения датчика тока соединяется с одним из выводов АЦП микроконтроллера.

Для измерения напряжения АКБ использован измерительный датчик напряжения *HVS-AS3.3-10*. Характеристики датчика напряжения в таблице 27. Функциональная схема датчика изображена на рисунке 36.

Таблица 27 – Характеристики датчика напряжения *HVS-AS3.3-10*

Производитель	<i>Coretech</i>
Напряжение питания, В	3,3
Номинальный ток первичной цепи, мА	10
Диапазон измерений выходного тока, мА	0...20
Максимальное измеряемое напряжение, В	500
Напряжение смещения, В	1,65
Выходная величина	Напряжение
Время отклика, мкс	5

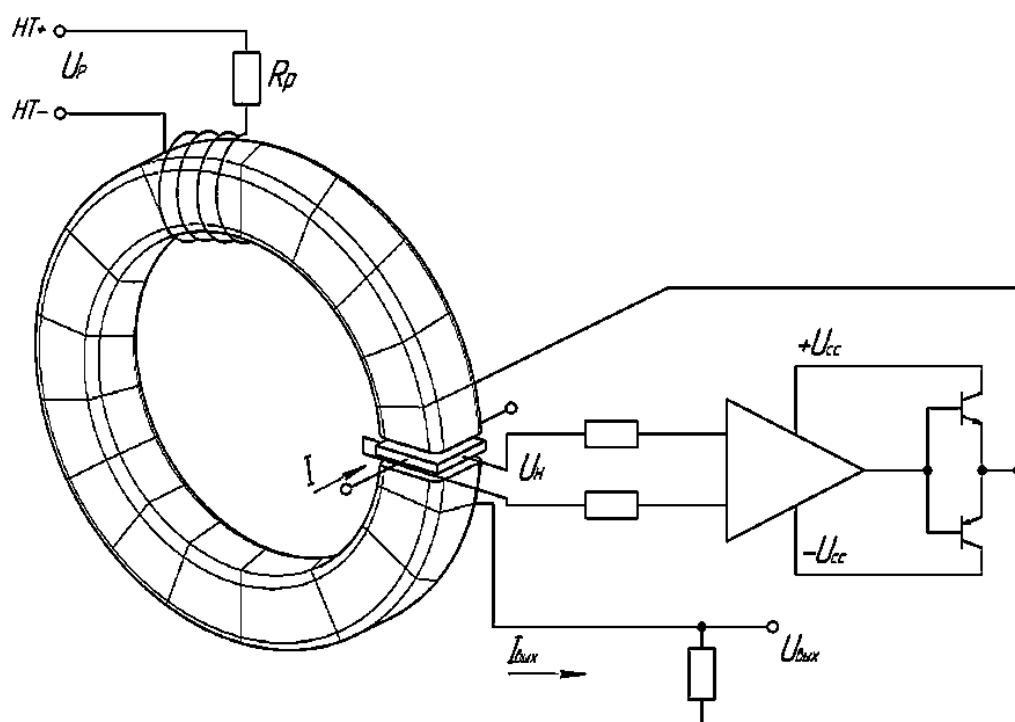


Рисунок 36 – Функциональная схема датчика напряжения *HVS-AS3.3 10*

Установка напряжения смещения $U_{см} = 1,65$ В и питание датчика $U_{пит} = 3,3$ В будет производиться от источника постоянного напряжения 5 В через делитель напряжения из трех резисторов, для получения двух номиналов напряжений: 3,3 и 1,65 В. Необходимо рассчитать делитель напряжения для получения необходимых значений напряжений для питания датчика.

Принимаем общее сопротивление резисторов $R_{\text{общ}} = 400 \text{ Ом}$, напряжение второго канала источника постоянного тока $U_{\text{вх}} = 5 \text{ В}$, требуемое выходное напряжение с делителя напряжения $U_{\text{вых}} = 3,3 \text{ В}$.

Расчет общего сопротивления второго и третьего резисторов:

$$R_2 + R_3 = R_{\text{общ}} * \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 400 * \frac{3,3}{5} = 264 \text{ Ом.}$$

Номинальное сопротивление первого резистора:

$$R_1 = R_{\text{общ}} - (R_2 + R_3) = 400 - 264 = 136 \text{ Ом.}$$

Так как напряжение смещения ровно в 2 раза меньше напряжения питания, то номиналы резисторов R_2 и R_3 будут одинаковы:

$$R_2 = R_3 = \frac{R_2 + R_3}{2} = \frac{264}{2} = 132 \text{ Ом.}$$

Расчет силы тока в цепи делителя напряжения, при этом учитывая малый ток потребления датчика напряжения, которым можно пренебречь:

$$I_{\text{дн}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{общ}}} = \frac{5}{400} = 0,013 \text{ А.}$$

Необходимая рассеиваемая мощность для первого резистора:

$$P_1 = I^2 * R_1 = 0,013^2 * 137 = 0,023 \text{ Вт.}$$

Необходимая рассеиваемая мощность для второго и третьего резисторов:

$$P_2 = P_3 = I^2 * R_2 = 0,013^2 * 133 = 0,022 \text{ Вт.}$$

Из ряда номиналов E96 для первого резистора выбираем номинал 137 Ом и рассеиваемой мощностью 0,05 Вт.

Из ряда номиналов E96 для второго и третьего резисторов выбираем номинал 133 Ом и рассеиваемой мощностью 0,05 Вт.

Для работы датчика напряжения, необходимо рассчитать сопротивление нагрузочного резистора первичной обмотки, для установки номинального тока первичной цепи $I_{\text{п}} = 10 \text{ мА}$, при напряжении полностью заряженной АКБ $U_{\text{з.акб}} = 116 \text{ В}$. Также необходимо рассчитать сопротивление измерительного резистора.

стора при максимальном выходном токе датчика $I_{из} = 20$ мА, учитывая, что максимальный порог выходного напряжения с измерительного резистора должен быть равен опорному напряжению микроконтроллера, которое используется для работы встроенного АЦП $U_{оп} = 5$ В.

Расчет сопротивления резистора первичной цепи датчика напряжения $R_{п}$:

$$R_{п} = \frac{U_{з.акб}}{I_{п}} = \frac{116}{0,01} = 11600 \text{ Ом.}$$

Необходимая рассеиваемая мощность резистора первичной цепи датчика напряжения:

$$P_{п} = I^2 * R_{п} = 0,01^2 * 11800 = 1,18 \text{ Вт.}$$

Из ряда номиналов Е96 выбираем сопротивление для нагрузочного резистора номиналом 11,8 кОм и рассеиваемой мощностью 2 Вт.

Расчет сопротивления измерительного резистора датчика напряжения $R_{из}$:

$$R_{из} = \frac{U_{оп}}{I_{из}} = \frac{5}{0,02} = 250 \text{ Ом.}$$

Необходимая рассеиваемая мощность измерительного резистора датчика напряжения:

$$P_{из} = I^2 * R_{из} = 0,02^2 * 249 = 0,1 \text{ Вт.}$$

Из ряда номиналов Е96 выбираем сопротивление для измерительного резистора датчика напряжения номиналом 249 Ом и рассеиваемой мощностью 0,125 Вт.

Управление углом отпирания каждого из шести фототиристоров в силовых оптотиристорных модулях МТОТО160-4 производится микроконтроллером посредством транзисторных ключей путем подачи прямого напряжения на каждый из шести светодиодов оптотиристорных модулей в нужный момент времени, при этом микроконтроллер управляет подачей напряжения на вывод базы транзисторов. Согласно технической документации на силовой оптотиристорный модуль МТОТО160-4, отпирающее постоянное напряжение управления $U_{у от}$ составляет 2,5 В, а отпирающий постоянный ток управления $I_{у от}$ составляет 80 мА. Необходимо

использовать транзистор с допустимым током коллектора I_K не менее 80 мА. Выбран транзистор *FJV3105R*, его характеристики представлены в таблице 29. Для управления углом отпирания фототириستоров, обработки сигналов с датчиков напряжения и тока, а также для контролирования процесса заряда сборки АКБ выбран 8-битный микроконтроллер *PIC16F15324*. Его характеристики представлены в таблице 30.

Таблица 29 – Характеристики транзистора *FJV3105R*

Максимально допустимый постоянный ток коллектора I_K , мА	100
Коэффициент передачи по току h_{21}	30
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер, $U_{KЭ\text{ нас}}$, В	0,3
Обратное напряжение коллектор – база $U_{КБО}$, В	50
Обратное напряжение коллектор – эмиттер $U_{КЭО}$, В	50
Обратное напряжение база-эмиттер $U_{БЭО}$, В	10

Таблица 30 – Характеристики микроконтроллера *PIC16F15324*

Производитель	<i>Microchip</i>
Номинальное напряжение питания U_n , В	5
Разрядность шины данных, бит	8
Максимальная тактовая частота, МГц	23
Размер программной памяти, Кб	7
Размер оперативной памяти, Б	512
Разрешение АЦП, бит	10
Количество каналов АЦП	10
Количество выводов	14
Максимальный ток питания, мА	250
Максимальный ток выводов, мА	50
Общая мощность рассеивания, Вт	0,8
Входное напряжение низкого уровня $U_{вхн}$, В	0 – 0,8

Продолжение таблицы 31

Входное напряжение высокого уровня $U_{ВХВ}$, В	4 – 5
Выходное напряжение низкого уровня $U_{ВЫХН}$, В	0 – 0,6
Выходное напряжение высокого уровня $U_{ВЫХВ}$, В	4,3

Обозначения программно настроенных выводов микроконтроллера, а также номера выводов изображены на рисунке 36.

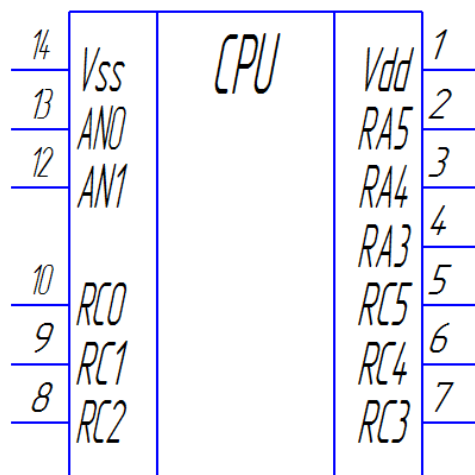


Рисунок 36 – УГО микроконтроллера PIC16F15324

Назначения выводов:

- AN0, AN1 – аналоговый вход АЦП;
- Vss, Vdd – выводы питания;
- RA3...RA5, RC0...RC5 – цифровой вход/выход.

Напряжение питания светодиодов оптодиристорного модуля составляет 5 В. Напряжение питания светодиодов оптодиристорного модуля с учетом напряжения насыщения транзистора:

$$U_{y \text{ от}} = U_{\text{пит}} - U_{\text{нас}} = 5 - 0,3 = 4,7 \text{ В.}$$

Ток коллектора:

$$I_K = I_{y \text{ от}} = 80 \text{ мА.}$$

Сопротивление токоограничительного резистора в цепи коллектора:

$$R_{\text{огрК}} = \frac{U_{\text{у от}}}{I_{\text{К}}} = \frac{4,7}{0,08} = 58,75 \text{ Ом.}$$

Необходимая рассеиваемая мощность токоограничительного резистора цепи коллектора:

$$P_{\text{огрК}} = I_{\text{К}}^2 * R_{\text{огрК}} = 0,08^2 * 59 = 0,38 \text{ Вт.}$$

Из ряда номиналов E96 выбрано сопротивление токоограничивающего резистора для цепи коллектора биполярного транзистора номиналом 59 Ом, и рассеиваемой мощностью 0,5 Вт.

Ток базы транзистора:

$$I_{\text{Б}} = \frac{I_{\text{К}}}{h_{21}} = \frac{0,079}{30} = 0,0026 \text{ А.}$$

Сопротивление токоограничительного резистора в цепи базы и микроконтроллера:

$$R_{\text{огрБ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ В}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{4,3}{0,0026} = 1654 \text{ Ом.}$$

Необходимая рассеиваемая мощность токоограничительного резистора цепи базы транзистора:

$$P_{\text{огрБ}} = I_{\text{Б}}^2 * R_{\text{огрБ}} = 0,0026^2 * 1650 = 0,011 \text{ Вт.}$$

Из ряда номиналов E96 выбрано сопротивление токоограничительного резистора цепи базы номиналом 1,65 кОм и рассеиваемой мощностью 0,05 Вт.

Расчет произведен для каждого из шести токоограничительных резисторов баз биполярных транзисторов.

Выбор транзистора и сопротивления токоограничительного резистора произведен для всех шести светодиодов оптодиристорных модулей.

Разработка и расчет зарядного устройства для акб силовой установки с мотор-колесами, напряжением 75 В и максимальным зарядным током 270 А производится аналогично.

Принципиальная схема зарядного устройства представлена в приложении А. Перечень элементов представлен в приложении Б.

9.5 Принцип действия зарядного устройства

После включения зарядного устройства в сеть, микроконтроллер ожидает сигнала от датчика напряжения о текущем напряжении сборки АКБ, после чего, выбирается режим заряда. Сигнал с датчика напряжения, сообщающий о напряжении менее 90 Вольт означает, что АКБ не подключена к зарядному устройству и включается режим ожидания подключения зарядного устройства к АКБ. При напряжении АКБ менее 116 В, но более 90 В означает, что батарея частично или полностью разряжена, включается режим заряда током постоянного значения. При получении сигнала от цепи «детектора нуля» о переходе определенной фазы через «0», следует задержка управления углом отпирания фототиристоров, в течение которой фаза достигает точки естественной коммутации. Далее вычисляется угол отпирания фототиристоров и устанавливается соответствующая задержка. Через определенный момент времени, установленным углом отпирания, контроллер устанавливает уровень логической «1» на определенных цифровых выводах, соединенные с базами биполярных транзисторов. Транзисторы открываются и начинает протекать ток управления через светодиоды, отпирая фототиристоры. Контроль зарядного тока происходит при помощи датчика тока, при превышении или снижении зарядного тока, соответственно увеличивается или уменьшается задержка на сигналы отпирания тиристоров. При достижении АКБ напряжения, равному напряжению заряженной батареи, зарядное устройство переключается в режим заряда напряжением постоянной величины. В этом режиме зарядный ток не контролируется, и выставляется постоянный угол отпирания тиристоров, при котором напряжение заряда равно напряжению полностью заряженной батареи. При достижении зарядного тока 10 % от максимального, управление тиристорами прекращается, и напряжение не подается. После этого батарея полностью заряжена.

Алгоритм работы зарядного устройства изображен на рисунке 37.

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

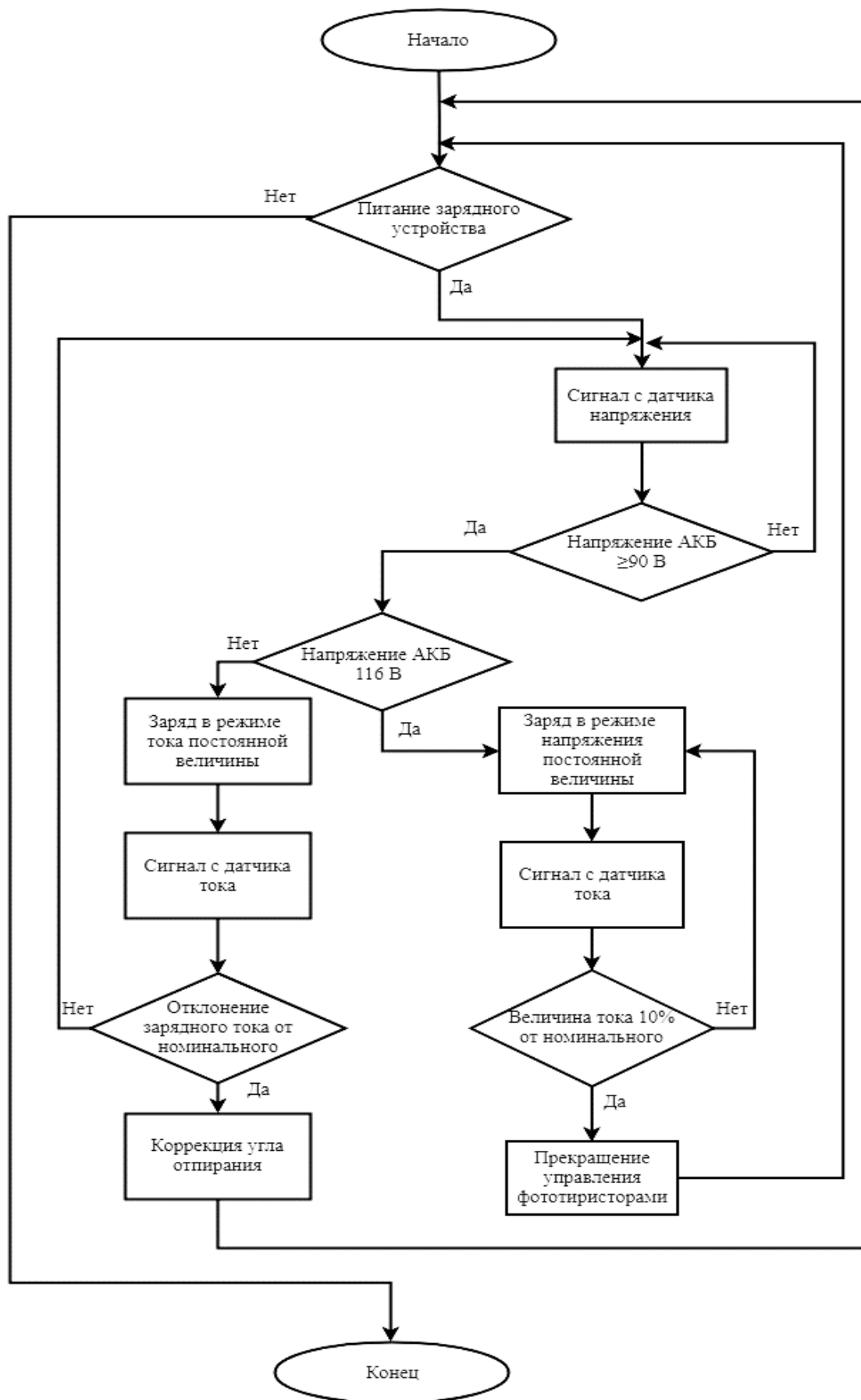


Рисунок 37 – Алгоритм работы зарядного устройства

Заключение

В результате выполненной работы, разработаны структурные схемы энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с механической трансмиссией мощностью 20 кВт и энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с мотор-колесами мощностью 16 кВт. Произведен выбор элементов для данных силовых установок, а также расчет элементов и разработка электронного дифференциала для энергетической силовой установки полноприводного электромобиля с мотор-колесами. Выполнена разработка принципиальных схем данных силовых установок и произведен сравнительный расчет их энергетической эффективности. Также в результате выполненной работы разработана структурная схема зарядного устройства с комбинированным режимом заряда для АКБ энергетической силовой установки, произведен расчет и выбор элементов и разработана принципиальная схема зарядного устройства.

Применение разработанных энергетических силовых установок обеспечивает высокую проходимость электромобиля за счет использования полного привода, при этом обеспечивая высокую экологичность транспортного средства.

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Список использованных источников

1 Влияние выбросов вредных веществ на атмосферу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2014/603/3325>

2 aCar — электромобиль для суровых африканских дорог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hightech.fm/2017/09/19/aCar>

3 Полноприводный электромобиль *Land Rover Defender electric* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.express.co.uk/life-style/cars/867108/Land-Rover-Defender-electric-car-engine>

4 Полноприводный электромобиль *Tesla model 3* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.drive.ru/news/597ace44ec05c4624700001b.html>

5 Полноприводный электромобиль *Protean Ford F-150* [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.drive.ru/news/597ace44ec05c4624700001b.html>

6 Полноприводный электромобиль *Bolinger B1* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.drive.ru/news/597ace44ec05c4624700001b.html>

7 Поисковая система ФИПС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1528928901108

8 Поисковая система ФИПС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1528929274076

9 Поисковая система ФИПС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1528929633993

10 Поисковая система ФИПС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1528929763999

11 Электродвигатель *HPM-20KW* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.goldenmotor.com/>

12 Литий-железо-фосфатная АКБ *230/C₃-Ah-50V* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sskgroup.ru/files/li-ion.pdf>

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

13 Контроллер-инвертор *HPC700H* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.goldenmotor.com/>

14 Силовой контактор *Albright RW400* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.albrightinternational.com/products/rw400/>

15 Предохранитель *Littelfuse L15S004.T* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.littelfuse.com/~media/electrical/datasheets/fuses/semiconductor-fuses/littelfuse_fuse_semiconductor_datasheet.pdf

16 Предохранитель *Eaton FWA-250B* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.digikey.co.il/product-detail/en/eaton/FWA-250B/FWA-250B-ND/5434973>

17 Педаль акселератора *Sayoon JKH* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sayoon.com/en/ProductView.Asp?ID=303>

18 Электродвигатель *Qs Motor QS273 4000W V3* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.qs-motor.com/product/qs273-4000w-single-shaft-electric-car-hub-motor-v2-type-2/>

19 Контроллер-инвертор *Kelly KEB72801X* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.qs-motor.com/product/5kw-6kw-kelly-programmable-motor-controllerkeb72801/>

20 Силовой контактор *Albright SW200-6* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.albrightinternational.com/products/sw200/>

21 Описание модели ЛУАЗ-969М [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autoopt.ru/auto/encyclopedia/car/luaz/mark/luaz-969/>

22 Силы, действующие на электромобиль [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sdisle.com/ev/calc/engine.html>

					ПГУ 1.08-ВКР.13.03.02.212 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		