

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**
Институт «Политехнический», факультет «Энергетический»
Кафедра «Автоматизированный электропривод»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

_____/А.Н. Шишков/

“ _____ ” _____ 2017 г.

ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ЛИТИЙ-ФОСФАТНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ
БАТАРЕИ

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОМУ
КВАЛИФИКАЦИОННОМУ ПРОЕКТУ**

ЮУрГУ-13.03.02.2017.414.00 ВКП

Руководитель проекта:
Доцент, к.т.н.

_____/Е.В. Белоусов/

“ _____ ” _____ 2017 г.

Автор проекта
студент группы П-477

_____/А.С. Плешивцев/

“ _____ ” _____ 2017 г.

Нормоконтролер:
Доцент, к.т.н.

_____/Т.А. Функ/

“ _____ ” _____ 2017 г.

Челябинск 2017 г.

АННОТАЦИЯ

Плешивцев А.С. Зарядное устройство литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареи. - Челябинск: ЮУрГУ, Э; 2017, 53 с., 45 ил., 5 табл., библиографический список – 5 наим.

В проекте разработано зарядное устройство аккумуляторной батареей персонального электротранспорта. Проект включает обзор существующих систем заряда аккумуляторных батарей, сравнение различных типов заряда, как переменным, так и постоянным током.

Произведена разработка математической модели аккумуляторной батареи, а также модель системы заряда для данной батареи. Приведены результаты в виде диаграммы заряда-разряда аккумуляторной батареи при помощи разработанной системы.

Также в работе производится выбор аккумуляторной батареи, системы управления для заряда аккумулятора.

					ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Плешивцев А.С			Зарядное устройство литий-железо-фосфатной аккумуляторной батареи	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Белоусов Е.В.					3	97
Реценз						ЮУрГУ		
Н. Контр.		Функ Т.А.				Кафедра «АЭП»		
Утверд.		Шишков А.Н.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТИПОВ ЗАРЯДНЫХ СИСТЕМ	7
2 РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ	11
3 ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ.	17
3.1 Батарея.....	17
3.2 Тип системы управления вентилями	24
3.3 Тип системы заряда аккумуляторной батареи	30
4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БАТАРЕИ ИСПОЛЬЗУЕМАЯ В ПРОГРАММЕ MATLAB	33
4.1 Описание математической модели.....	33
4.2 Блок параметров батареи	36
5 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ.	43
5.1 Система основана на базе идеальных элементов с поддержанием постоянного уровня тока на батарее.....	45
5.2 Система основана на базе идеальных элементов с поддержанием постоянного уровня напряжения на батарее.	47
5.3 Система основана на базе реальных элементов для заряда батареи постоянным током	49
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	54

									Лист
									5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ				

ВВЕДЕНИЕ

В наше время с развитием технологии электромобиль стал общедоступным видом личного транспорта. Который в свое время широко внедряется в массы. Наряду с распространением данного вида транспорта возник ряд проблем с его распространением, а также с эксплуатацией.

Электромобиль — автомобиль, приводимый в движение одним или несколькими электродвигателями с питанием от автономного источника электроэнергии (аккумуляторов, топливных элементов и т. п.), а не двигателем внутреннего сгорания. В связи с использованием автономных источников питания у данного транспорта, встала проблема с пополнением заряда данных аккумуляторов.

Целью дипломного проекта является разработка системы зарядного устройства для личного электротранспорта. Ознакомиться с существующими решениями данной проблемы. Провести анализ данных систем. Разработать модель системы в Matlab-Simulink. Исследовать разработанную модель и провести исследование заряда-разряда модели аккумуляторной батареи.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТИПОВ ЗАРЯДНЫХ СИСТЕМ

Главным преимуществом электрических авто является возможность заряжать их в любом месте, где есть обычная бытовая электросеть. Большинство электромобилей приспособлены для зарядки двумя способами: переменным или постоянным током. Последний предназначен для подключения к станциям быстрой зарядки вроде CHAdeMO. Требования к зарядке электромобиля не очень специфичны и для заряда аккумуляторной батареи может подойти и обычная сеть. В своем большинстве в электромобили встраивают 6.6 кВт зарядное устройство, способное зарядить батарею за время от 4 до 5 часов. Но мощность данного бортового зарядного устройства довольно часто ограничена стоимостью размерами и тепловыделением. Все зарядные станции поделены на 3 категории исходя из параметров.

1 Категория. Подключение к обычной бытовой сети 220В. Это однофазное подключение имеет малую мощность около 1,5 кВт, а время зарядки от 7 до 30 часов, в зависимости от ёмкости аккумуляторной батареи.



Рисунок 1.1 Кабель для заряда батареи электромобиля от бытовой сети

									Лист
									7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ				

2 Категория. Двухполюсное подключение, 230 В, время зарядки средне размерного электромобиля составляет от 4 до 5 часов. Зарядные станции этой категории являются наиболее распространёнными как в домашних, так и в общественных условиях. Такая станция имеет мощность около 7кВт, что вполне достаточно для 6,6 кВт бортового зарядного устройства электромобиля.



Рисунок 1.2 Зарядная станция Schneider Electric EV230WS Evlink.

Отличным примером станции данной категории будет станция EV230WS Evlink от компании Schneider Electric, её мощность составляет 7.2 кВт

3 категория. Устройство «быстрого заряда», основанное на постоянном токе. Служит для быстрого заряда аккумуляторной батареи в обход бортового зарядного устройства путем подачи питания непосредственно к аккумуляторной батарее. С довольно большой мощностью такие станции заряжают батареи до 80% в течении 30 минут.



Рисунок 1.3 Станция для заряда электромобиля с переменным и постоянным током

3 категория устройств заряда электромобиля по словам инженеров, самая предпочтительная, по причине высоких мощностей, а вследствие и скорости самого заряда. На данный момент самая мощная станция «быстрой зарядки», принадлежит компании Tesla. Мощность данной станции составляет 120кВт.

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ				



Рисунок 1.4 Зарядная станция от компании Tesla «SuperCharger»

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10

2 РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

В 1990-е годы производители электромобилей предприняли совместные усилия по разработке универсального порта для зарядки, что привело к появлению SAE J1772, 5-клемного разъема для переменного тока с возможностью передачи данных. Недостатком данного порта являлась время заряда, соответствующей 2 категории, то есть длящееся несколько часов.

Производители электромобилей согласились, что будущее электротранспорта лежит в быстрой зарядке. В то время как вторая категория обеспечивала около 40 километров пробега за один час зарядки, то быстрая зарядка постоянным током заполнит аккумулятор до 80% всего лишь за 30 минут. Что позволяет избавить электромобиль от привязанности к городам и позиционировать как и туристический транспорт.

Впервые быстрая зарядка основанная на постоянном токе была разработана в Японии для марок таких автомобилей как, Nissan Leaf и Mitsubishi MiEV и получила название CHAdeMO, данный стандарт состоит из 2 разъемов. Один двухклемный непосредственно для зарядки постоянным током, а второй для передачи данных через CAN-BUS. Данный стандарт был разработан в 2008 году компаниями TEPSCO, Nissan, Mitsubishi и Toyota. Расшифровывается данная аббревиатура как “Charge on the Move”, что в переводе с английского – «Зарядка на ходу»

										Лист
										11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ					

10kw portable charger

Dimension:40*30*15 cm
gross weight:35KG



20kw wall-mount charger

Dimension:90*57*28 cm
Gross weight:100KG



30KW-100kw charger

Dimension:226*80*60 cm



Рисунок 2.1 Зарядная станция CHAdeMO

Несмотря на одно из лучших решений в проблеме быстрого заряда и отличных рекомендаций данный разъем не зарекомендовал себя на Западе и его не поддержали в разработке, ссылаясь на технические проблемы. Официального заявления от сообщества SAE (Society of Automotive Engineers) не последовало, но разъем CHAdeMO был отвергнут.



Рисунок 2.2 – Разъем стандарта CHAdeMO

Через несколько лет SAE разработал собственный стандарт разъема для быстрой зарядки также известный как Combo Charging System (CCS).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ

Лист

12

Чтобы сохранить совместимость с зарядкой на переменном токе, CCS был создан на основе существующего стандарта J1772 путем добавления к нему дополнительного двухклеммного разъема для постоянного тока. Во время зарядки от сети переменного тока CCS работает аналогично своему родителю, используя клеммы для переменного тока и для передачи данных, которые включают в себя информацию для регулировки напряжения, скорости зарядки и момента окончания зарядного процесса. Ультрабыстрая зарядка постоянным током использует тот же протокол связи, но уже другие зарядные клеммы. На рисунке 2.3 показаны штепсели и разъемы для зарядки переменным и постоянным током.

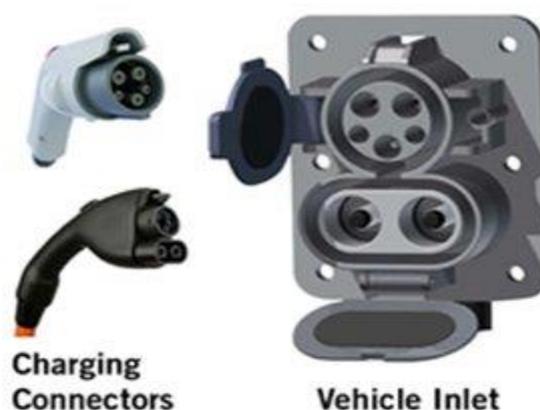
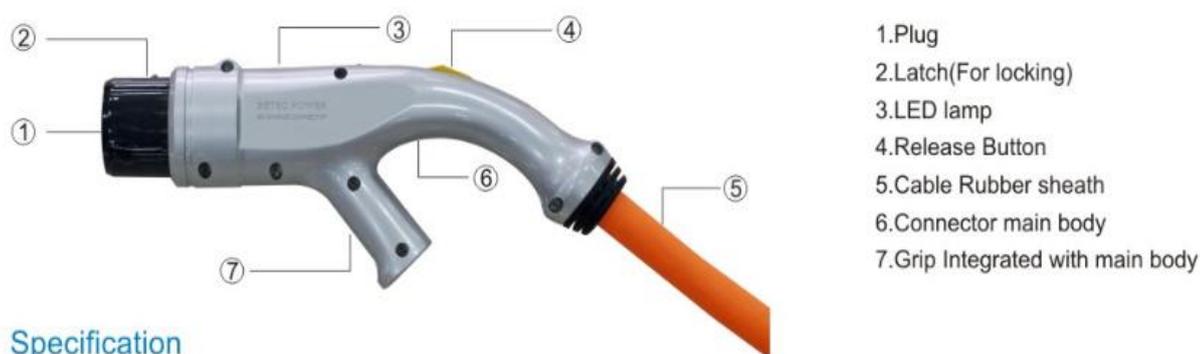


Рисунок 2.3 – SAE J1772 Combo Charging System (CCS)

Стандарт SAE Combo или CCS де-факто является мировым стандартом для зарядки второй и третьей категории, так как его в 2011 году поддержали такие автопроизводители как Audi, BMW, Daimler, Ford, General Motors, Porsche и Volkswagen. Chevy Spark, выпущенный в 2013 году, стал первым электромобилем с поддержкой SAE Combo. В связи с этим ведутся разговоры о прекращении использования CHAdeMO. Для совместимости некоторые электромобили с CHAdeMO, например, новые Nissan Leaf, дополнительно оборудуются разъемом SAE J1772, способным производить зарядку второй категории. Некоторые же производители зарядных устройств, в том числе и АВВ, размещают оба зарядных разъема на своих устройствах.

Компания Tesla Motors имеет собственное мнение насчет стандартов зарядки и решила пойти по пути создания уникальной системы.

Их эксклюзивная «Суперзарядка» заполняет аккумуляторную батарею до 80% в течение 40 минут, обеспечивая этим дальность пробега в 270 км. В то время как некоторые игроки рынка электромобилей критикуют Tesla за создание собственного стандарта зарядки, другие вполне понимают их желание возглавить это направление. Tesla ведет переговоры с Nissan и BMW, предлагая этим автопроизводителям присоединиться к своему стандарту, но в то же время и разрабатывает адаптер, который позволял бы заряжать на их зарядных станциях электромобили с разъемами CHAdeMO и SAE J1772.



Specification

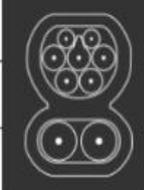
Item	CHAdeMO		CCS		GB/T	
Rated voltage	500VDC		200-850VDC		400-750VDC	
Rated current	125A		200A		63A-250A	

Рисунок 2.3 разъем зарядной станции tesla «SuperCharger»

Зарядка Tesla S85 с помощью «суперзарядки» стартует с 375 В и 240 А, потребляя 90 кВт. По мере зарядки аккумуляторной батареи напряжение повышается до 390 В, а ток падает примерно до 120 А. Соответственно, первоначальная мощность зарядного устройства в 85-90 кВт имеет скорость зарядки лишь немного выше C-рейтинга [BU-402] 1С, и то, такое воздействие не особо продолжительное, вскоре C-рейтинг опускается до 0,8С, а затем дальше снижается, защищая аккумуляторную батарею от вредного воздействия ультрабыстрой зарядки [BU-401a].

Противостояние трех несовместимых систем зарядки явно не входит в планы производителей электромобилей, но вина за эту ситуации лежит на них самих, ведь вполне можно было бы принять уже имеющуюся технологию или не задерживать разработку новых стандартов. Tesla захватила лидерство в сфере электротранспорта со своей собственной технологией зарядки, и в данный момент вкладывает большие средства в развитие эксклюзивной сети “суперзарядок”, услуги которых полностью бесплатны. Стоит отметить, что и другие производители электромобилей предлагают бесплатную зарядку, по крайней мере сейчас.

Удвоение мощности не сокращает время зарядки в два раза, зависимость в этом случае не линейная. Основной причиной существования мощных зарядных устройств являются размеры аккумуляторных батарей. Например, BMW i3 комплектуется 22 кВт*ч аккумуляторной батареей в сравнении с 85 кВт*ч монстром в Tesla S85. Обе зарядные системы будут поддерживать зарядный C-рейтинг на уровне около 1C при быстрой зарядке, чтобы сдерживать излишний износ. Быстрая зарядка постоянным током сложна тем, что необходимо оценивать состояние аккумуляторной батареи и применять безопасные параметры. Холодный аккумулятор должен заряжаться меньшим током в сравнении с теплым, также уменьшение зарядного тока необходимо при высоком внутреннем сопротивлении и при неспособности балансировочной цепи компенсировать несоответствие элементов.

Ультрабыстрая зарядка постоянным током не предназначена для полного заполнения аккумуляторной батареи, необходимо лишь обеспечить транспортное средство энергией, достаточной для достижения следующей зарядной станции. Использование зарядки второй категории является более предпочтительным для ежедневного использования.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		15

Таблица 2.1 – Оценочное время зарядки при применении различных категорий зарядного процесса

Категории зарядки	Категория 1 Через розетку 1,5 кВт 240 В 6 А	Категория 2 Двухполюсное подключение 6,6 кВт* 240 В 30 А**	Категория 3 Быстрая зарядка постоянным током 20-120 кВт 400-600 В до 300 А
Дальность пробега	8 км за 1 час зарядки	36 км за 1 час зарядки	110, 270 км за 30 минут зарядки
4.4 кВт•ч Toyota Prius	4 часа	1 час	Данных нет
16 кВт•ч Chevy Volt	12 часов	3 часа	Данных нет
22 кВт•ч BMW i3	15 часов	3 часа	24 кВт: до 80% за 30 минут
32 кВт•ч Nissan Leaf	16 часов	5 часов	50 кВт: до 80% за 20 мин
90 кВт•ч Tesla S85	60 часов	15 часов	120 кВт: до 80% за 40 минут

* - электромобили Tesla поставляются с 10 кВт и 20 кВт бортовыми зарядными устройствами; Renault использует 3-43 кВт трехфазные бортовые зарядные устройства.

** - 30 А зарядная станция требует предохранитель с ограничением силы тока в 40 А, некоторые электромобили поставляются с более мощным бортовым зарядным устройством.

3 ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ.

В данной главе будет производиться выбор элементов для модели системы заряда батареи.

3.1 Батарея.

Для выбора батареи приведем таблицу с основными характеристиками батарей. Для сравнения мы возьмем самые распространённые виды батарей. AGM (свинцовых), Li-ion (литий-ионных), Li-PO (липолей), LiFePO₄ (литий-железо-фосфатных) аккумуляторов на примере типа 36В.

Таблица 3.1 – Виды батареи и их характеристики

Тип батареи	AGM (свинец)	Li-Ion	LiPO (липоль)	LiFePO ₄
Ёмкость	36В-12Ач	36В-12Ач	36В-10Ач	36В-12Ач
Вес, кг.	10.5 кг	3.0 кг	2.5 кг	5.5 кг
Максимальный непрерывный ток разряда, А	12 А	12 А	50 А	35 А
Максимальная непрерывная выдаваемая мощность, Вт	432 Вт	432 Вт	1800 Вт	1260 Вт
Максимальная пиковая выдаваемая мощность (~10 сек), Вт	1000 Вт	864 Вт	3600 Вт	2160 Вт
Реальное количество циклов зарядки, раз	150-200	300-400	300-400	> 2000
Скорость зарядки, часов	8ч	8ч	2ч	4ч
Максимальная скорость зарядки с мощным ЗУ, часов	8ч	8ч	1ч	2ч
Пожаробезопасность	отличная	плохая	очень плохая	отличная

Продолжение таблицы 3.1

Тип батареи	AGM (свинец)	Li-Ion	LiPO (липоль)	LiFePO4
Рекуперация	запрещена	запрещена	разрешена	разрешена
Температура эксплуатации:	от -10С до 50С	от 0С до 50С	от 0С до 50С	от -20С до 50С

Также опишем плюсы и недостатки батарей.

Li-ion – литий-ионные батареи.



Рисунок 3.1 – Li-Ion батарея

Преимущества:

- Обладают самой высокой энергоплотностью.

Недостатки:

- Быстро разряжаются при использовании на сильном холоде.
- Портятся при разряде ниже своего минимального значения.
- Взрывоопасны при перезаряде.
- Теряют емкость со временем, даже от простого лежания на полке.
- Особенно быстро теряют емкость при высокой температуре.

Именно недостаток взрыво- и пожароопасности не позволяет использовать данный тип батарей в электромобилях, поэтому многие Li-ion-банки имеют под корпусом специальную плату, которая отключает ток при напряжении ниже минимального или выше максимальных значений.

Таблица 3.2 – Разрядочные характеристики от времени, без эксплуатации

температура	при хранении с зарядом в 40%	при хранении с полным (100%) зарядом
0°C	теряет 2% за год	теряет 6% за год
25°C	теряет 4% за год	теряет 20% за год
40°C	теряет 15% за год	теряет 35% за год
60°C	теряет 25% за год	теряет 40% за 3 месяца

Li-polymer — литий-полимерные батареи



Рисунок 3.2 – LiPO батарея

Преимущества:

- Полностью совместимы с Li-ion. В отличие от Li-ion, могут отдавать сильные токи — 10—40С. Могут быть какой угодно толщины и формы.
- Продаются, как правило, в уже собранной батарее, с защитными платами и шлейфами для балансировки.

Недостатки:

- Еще более взрыво- и пожароопасны. Еще хуже работают на морозе.

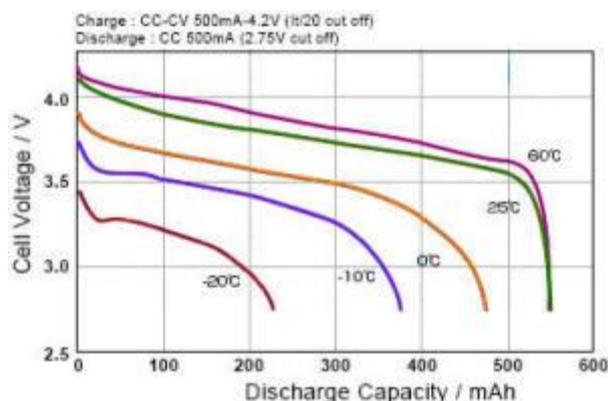


Рисунок 3.3 – разрядочная характеристика LiPO батареи.

LiFePO₄ – литий-железо-фосфатные батареи



Рисунок 3.4 – LiFePO4 батарея

Преимущества:

- не боятся мороза.
- не пожароопасны;
- отдают токи до 50С.
- могут быть заряжены сильным током за 15 минут.
- имеют огромное число циклов заряд-разряд (2000-8000 до потери 20% емкости).
- практически не подвержены потере емкости при хранении.

Недостатки:

- стоят дорого
- имеют меньшую энергоемкость;
- не совместимы с привычными Li-ion-элементами из-за другого диапазона напряжений.
- требуют соблюдения своего диапазона напряжений.

AGM — свинцовые батареи



Рисунок 3.5 – AGM батарея

Недостатки:

- Обладают самой низкой энергоплотностью.
- Медленно заряжаются — до нескольких часов.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

- На высоких токах (по их меркам — это то, что выше 0.1С) могут не отдать и половины емкости батареи.
- Очень чувствительны к температурам.
- Имеют малое число циклов заряд-разряд — от 200 при жестком обращении до 800 при щадящем.

Преимущества:

- Очень дешевы.

Из данных батарей, была выбрана батарея типа LiFePO₄, из ряда преимуществ. Основным преимуществом является выдаваемая мощность, данной батарее, при равных емкостях данная батарея может обеспечить систему большим количеством мощности. Хотя LiPO и обеспечивает более высокую мощность, безопасность данной батареи оставляет желать лучшего. Также отличительной чертой батареи типа LiFePO₄ является высокое количество циклов заряда батареи, что является очень важным качеством для постоянного использования батареи.

Батарея вида LiFePO₄ может обеспечить хорошую мощность и безопасность при зарядке данных аккумуляторов, при достаточно большом количестве циклов заряда и хорошей переносимостью температурных условий, данная батарея лучшим образом подходит для эксплуатации её в электромобиле.

Одним из самых больших производителей LiFePO₄ аккумуляторов является компания A123 Systems. Они же и открыли этот новый подтип литиевых аккумуляторов. История литий-железо-фосфатного аккумулятора насчитывает всего не-сколько десятилетий. Впервые использование перспективного материала - фосфа-та литий железа в качестве катодного материала для литиевых аккумуляторных батарей было описано исследователем Техасского университета Джоном Гудена-фом в 1996 году. По причине сравнительно низкой стоимости, не токсичности, содержания природного железа, значительной термостойкости, безопасности, высокого уровня производительности литий-железо-фосфатные аккумуляторы получили мировое признание.

Проблема низкой электропроводности была решена покрытием частиц LiFePO_4 шаром, проводящим материалов – алюминия, марганца или титана.

В последующем технология литий-железо-фосфатных аккумуляторов была усовершенствована профессором Цзян Йе-Мином и иными сотрудниками Массачусетского технологического института, положив основы их промышленного производства. В настоящее время высококачественный LiFePO_4 материал изготавливается по технологии одного из двух производственных методов: жидкофазного, позволяющего получать продукт с лучшими мощностными характеристиками, или же трехфазного, дающего продукт с лучшими емкостными характеристиками.

Из каталога продукции компании нам подходит батарея емкостью 20 А·ч, номинальное напряжение ячейки 3,3 В.

Ниже приведены основные характеристики ячейки:

- 1) Номинальное напряжение ячейки 3,3 В
- 2) Максимальное напряжение ячейки 3,6 В
- 3) Минимальное напряжение ячейки 2 В
- 4) Номинальная емкость 20 А·ч
- 5) Максимальная емкость 20,37 А·ч
- 6) Емкость при номинальном напряжении 18 А·ч
- 7) Внутреннее сопротивление < 2 мОм
- 8) Номинальный разрядный ток 19,37 А
- 9) Экспоненциальное напряжение 3,35 В
- 10) Экспоненциальная емкость 1 А·ч

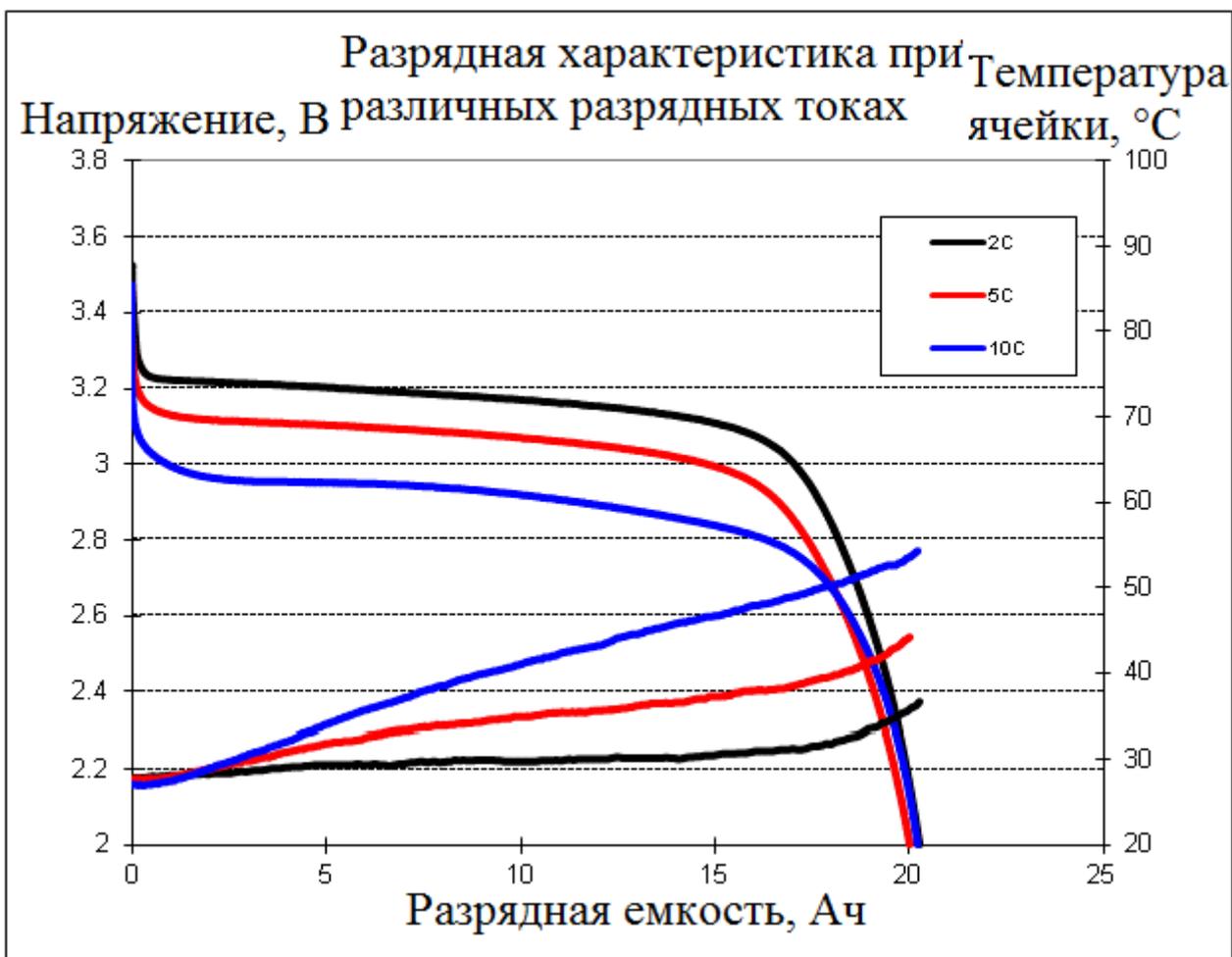


Рисунок 3.6 – Разрядная характеристика батареи при разных токах, и температурная характеристика.

Ячейка имеет малые экспоненциальные емкость и напряжение в следствии мы наблюдаем длинный линейный участок разрядной характеристики. Стабильное напряжение на выходе ячейки позволяет получать на выходе инвертора постоянную мощность, что улучшает качество регулирования электропривода.

Благодаря хорошей температурной стабильности, не требуется установка дополнительных охлаждающих радиаторов, что улучшает массо-габаритные показатели автономного транспортного средства.

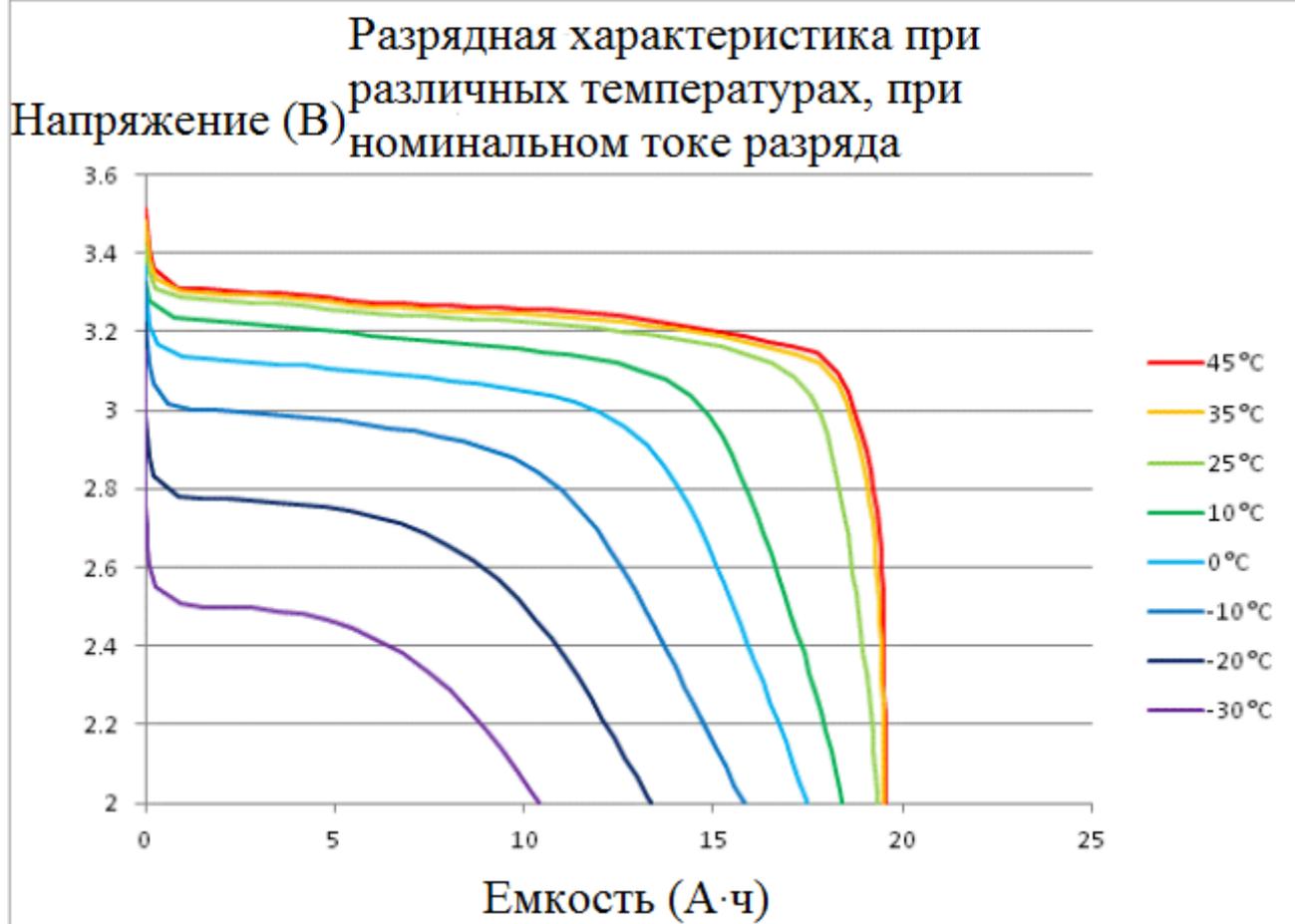


Рисунок 3.7 – Разрядная характеристика при номинальном разрядном токе

На рисунке показана разрядная характеристика, при разных температурах, как видно батарею можно эксплуатировать до -10°C и не получать сильные просадки напряжения, падение емкости батареи достигает лишь 20%, что является актуальным для автономного электротранспорта в зимних условиях эксплуатации.

3.2 Тип системы управления вентилями

Нагрузкой в приводах постоянного тока является двигатель постоянного тока. Питание ШИП осуществляется от источника постоянного тока, шунтированного конденсатором.

Наиболее простой способ управления ШИП по цепи якоря симметричный. При симметричном способе управления в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа моста, а напряжение на выходе ШИП представляет собой знаки переменные импульсы, длительность которых регулируется входным сигналом. В ШИП с симметричным управлением среднее напряжение $U_{я}$ на выходе ШИП равно нулю, когда относительная продолжительность включения $g = 0,5$. Временные диаграммы ШИП при симметричном способе управления приведены на рисунке 3.8. Симметричный способ управления обычно используется в маломощных приводах постоянного тока. Его преимуществом является простота реализации и отсутствие зоны нечувствительности в регулировочной характеристике. Недостатком ШИП с симметричным управлением является двухполярное напряжение на нагрузке и, в связи с этим, повышенные пульсации тока в якоре исполнительного двигателя.

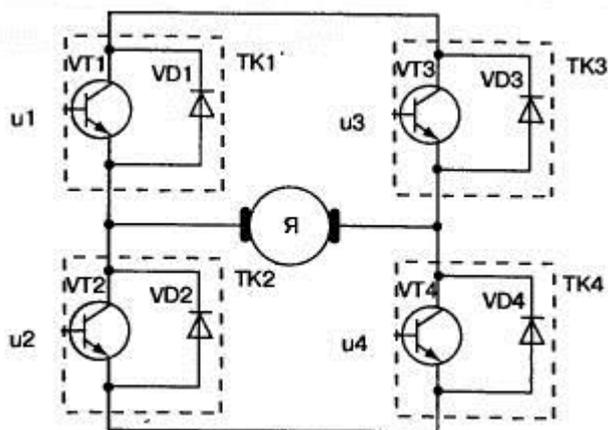


Рисунок 3.8– Схема транзисторного ШИП

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

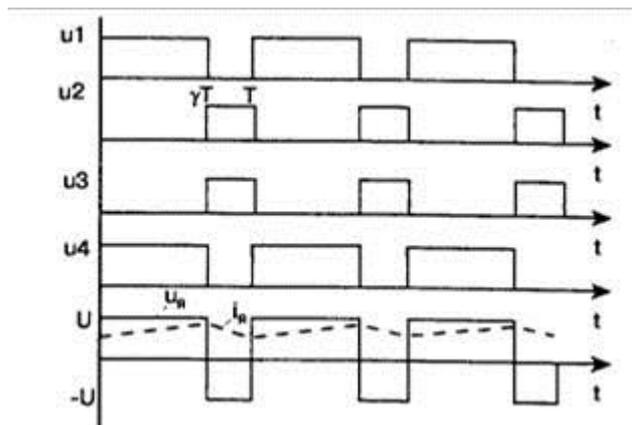


Рисунок 3.9 Диаграммы поясняющие работу ШИП при симметричном управлении

Стремление исключить этот недостаток привело к разработке способов, обеспечивающих однополярное напряжение на выходе ШИП. Простейшим из них является несимметричный.

Несимметричное управление представлено на рисунке 3.10. В этом случае переключаются транзисторные ключи фазной группы ТК3 и ТК4 (ключи ТК1 и ТК2 при противоположной полярности входного сигнала), транзисторный ключ ТК1 постоянно открыт и насыщен, а ключ ТК2 постоянно закрыт. Транзисторные ключи ТК3 и ТК4 переключаются в противофазе, обеспечивая протекание тока якоря от противо-эдс двигателя. При этом на выходе ШИП формируются однополярные импульсы и среднее напряжение на выходе равно нулю, когда относительная продолжительность включения одного из нижних по схеме транзисторов $g=0$.

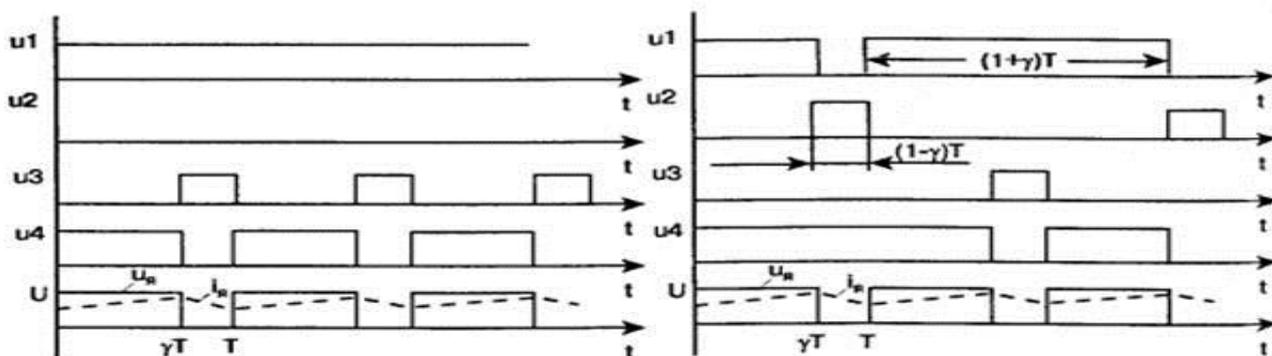


Рисунок 3.10 Диаграммы поясняющие работу ШИП при несимметричном управлении

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Недостатком рассмотренного способа управления является то, что верхние по схеме транзисторные ключи (ТК1, ТК3) по току загружены больше, чем нижние. Этот недостаток устранён при поочерёдном управлении.

Здесь при любом знаке входного сигнала в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа моста, при этом частота переключения каждого из них в два раза меньше частоты напряжения на выходе. Управляющие напряжения транзисторных ключей одной фазы моста ТК1, ТК2 и ТК3, ТК4 постоянно находятся в противофазе; при этом ключи переключаются через период выходного напряжения T . Этим достигаются одинаковые условия работы полупроводниковых приборов в мостовой схеме.

При некотором знаке входного сигнала управляющие импульсы u_1, u_4 длительностью $t=(1+g)T$ подаются на диагонально расположенные транзисторные ключи (рисунок 3.10) со сдвигом на полпериода, а управляющие импульсы u_2, u_3 длительностью $t=(1-g)T$, также со сдвигом на полпериода, подаются на транзисторы противоположной диагонали (ТК2, ТК3). В этом случае на интервале нагрузка подключена к источнику питания с помощью диагонально расположенных ключей, а на интервале $(1-g)T$ нагрузка закорочена с помощью верхних или нижних транзисторных ключей. При изменении знака входного сигнала порядок управления диагональными ключами изменяется на противоположный. При поочерёдном управлении на нагрузке формируются однополярные импульсы длительностью T , пропорциональной сигналу на входе.

Обобщенная функциональная схема управления транзисторным ШИП изображена на рисунке 3.11. Она содержит генератор (Г), генератор пилообразного напряжения (ГПН), схему сравнения (СС), распределитель импульсов (РИ) и усилители (У). Как правило, между усилителями сигнала управления и распределителем включены элементы гальванической развязки (оптотранзисторы). Диаграммы на рисунке 3.12 поясняют принцип работы схемы управления ШИП.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		27

Электромагнитные процессы в нагрузке (например, якоре двигателя постоянного тока) при двухполярном выходном напряжении (симметричном управлении транзисторными ключами ШИП) изображены на рисунке 3.13.

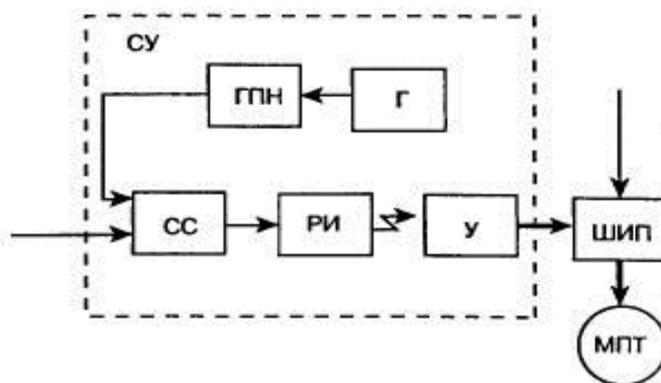


Рисунок 3.11 – Обобщенная функциональная схема управления транзисторным ШИП

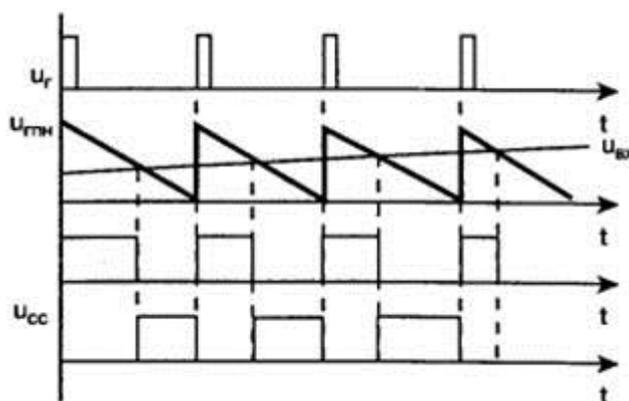


Рисунок 3.12 – Диаграммы поясняющие принцип работы схемы управления ШИП

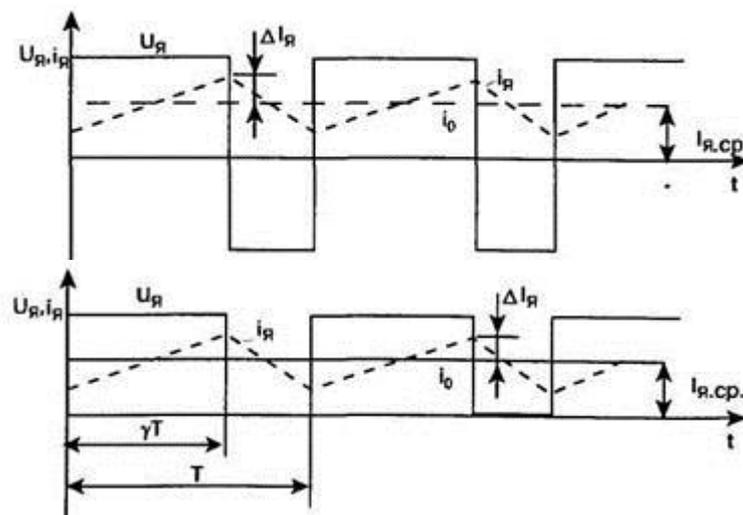


Рисунок 3.13 – Электромагнитные процессы в нагрузке при симметричном и несимметричном управлении ШИП

Из рисунка 3.13 видно, что ток в якоре содержит среднюю (гладкую) составляющую $I_{я.ср.}$ и пульсирующую составляющую $\Delta I_{я.}$. Гладкая составляющая тока обусловлена средним значением напряжения на якоре и установившейся скоростью вращения.

Среднее напряжение на выходе ШИП определяется следующими выражениями:

– при двухполярном напряжении (симметричное управление):

$$= (2 \cdot \dots - 1) \cdot$$

– при однополярном напряжении (несимметричное управление):

$$= \dots$$

Регулировочные характеристики широтно-импульсного преобразователя линейны и построить их не составляет труда.

При выборе способа управления необходимо исходить из требований, предъявляемых к регулировочным и энергетическим характеристикам электропривода. Симметричное управление ШИП позволяет получить линейные регулировочные характеристики двигателя.

Однако энергетические характеристики ШИП при этом способе управления ухудшены вследствие повышенных пульсаций тока в якоре и в полупроводниковых приборах.

При несимметричном и поочерёдном управлении ШИП в регулировочной характеристике электропривода имеет место зона нечувствительности. Схемные способы уменьшения этой зоны ухудшают устойчивость электропривода.

Энергетические характеристики ШИП с несимметричным и поочерёдным управлением лучше, чем у ШИП с симметричным управлением, так как пульсации тока здесь в два раза меньше.

Преимуществом симметричной системы управления является простота реализации и отсутствие зоны нечувствительности в регулировочной характеристике. Недостатком ШИП с симметричным управлением является двухполярное напряжение на нагрузке и, в связи с этим, повышенные пульсации тока.

Преимуществом несимметричной системы управления является уменьшенные пульсации тока и исчезновение двухполярного напряжения. Недостатком является усложнение алгоритмов управления.

Из двух типов управления следует выбрать несимметричную систему управления по ряду преимуществ. Основным из них это более высокий КПД из-за уменьшенных пульсаций тока и отсутствия двухполярного напряжения.

3.3 Тип системы заряда аккумуляторной батареи

Для упрощения выбора системы заряда, все категории, представленные в главе 1 мы разделим на 2 группы систем заряда. 1 группа - группа систем заряда, основанная на переменном токе. 2 группа – группа систем заряда, основанная на постоянном токе.

При выборе системы следует исходить от требований к системе, а также к показателям востребованности систем.

Обе системы имеют ряд своих достоинств и недостатков.

Группа систем заряда, основанная на переменном токе.



Рисунок 3.14 станции заряда батареи, основанные на переменном токе

Преимущества:

- Достаточно просты для серийного производства
- Относительно дешевы
- Очень мобильные, ряд устройств, данной категории, даже предполагает расположение в личных домах

Недостатки:

- Малая мощность заряда, из-за чего большое время пополнение заряда аккумуляторной батареи

Группа систем заряда, основанная на постоянном токе.



Рисунок 3.15 станции заряда батареи, основанные на постоянном токе

Преимущества:

- Огромные мощности, вследствие чего быстрое пополнение заряда аккумуляторной батареи

Недостатки:

- Из-за больших потребляемых мощностей, сильная нагрузка на сеть
- Установка данных станций требует огромной подготовки
- Заряд батареи с использованием полной мощности станции, опасен для батареи

Из двух групп была выбрана 2 группа, зарядные станции которой основаны на постоянном токе по ряду причин. Данная категория станций более востребована в наши дни, так как скорость заряда аккумуляторных батареи очень велика относительно станций на переменном токе. Заряд 80% полной ёмкости батареи можно заполнить примерно за 30 минут, и позволит продолжать движение электромобиля на большое расстояние за относительно короткий промежуток времени заряда.

									Лист
									32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ				

4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БАТАРЕИ ИСПОЛЬЗУЕМАЯ В ПРОГРАММЕ MATLAB

4.1 Описание математической модели

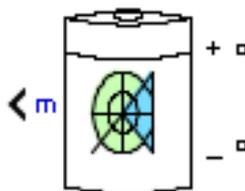


Рисунок 4.1 – модель батареи в программе MatLab

Блок батарей реализует общую модель для моделирования наиболее популярных типов аккумуляторных батарей.

Эквивалентная схема батареи приведена ниже:

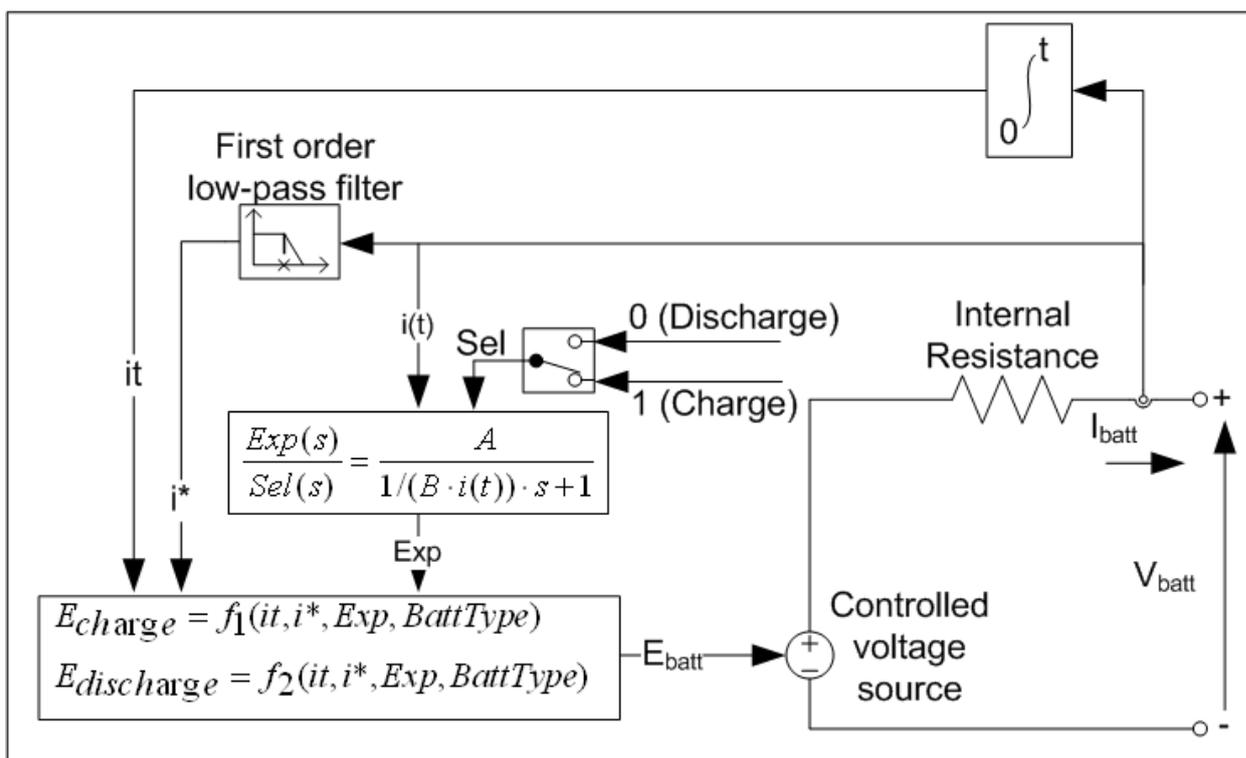


Рисунок 4.2 – Эквивалентная схема батареи

Свинцово-кислотная модель:

Разрядная характеристика ($i^* > 0$)

$$f_1(i^*, i, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - i^*} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i} \cdot i + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right).$$

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

Зарядная характеристика ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Laplace - 1 \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right).$$

Литий ионная модель:

Разрядная характеристика ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Laplace - 1 \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right).$$

Зарядная характеристика ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{|it| + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it),$$

где, E_{Batt} – Нелинейное напряжение (В),

E_0 – Начальное напряжение (В),

$Exp(s)$ – Экспоненциальная зона динамики (В),

$Sel(s)$ – представляет собой режим батареи,

$Sel(s) = 0$ при разряде батареи,

$Sel(s) = 1$ во время зарядке аккумулятора,

K – постоянная Поляризация (Ач)⁻¹ или поляризационное сопротивление (Ом),

I^* – низкочастотный ток (А),

I – ток батареи (А),

it – емкость (Ач),

Q – максимальная емкость батареи (А),

A – экспоненциальное напряжение (В),

B – экспоненциальная емкость (Ач)⁻¹.

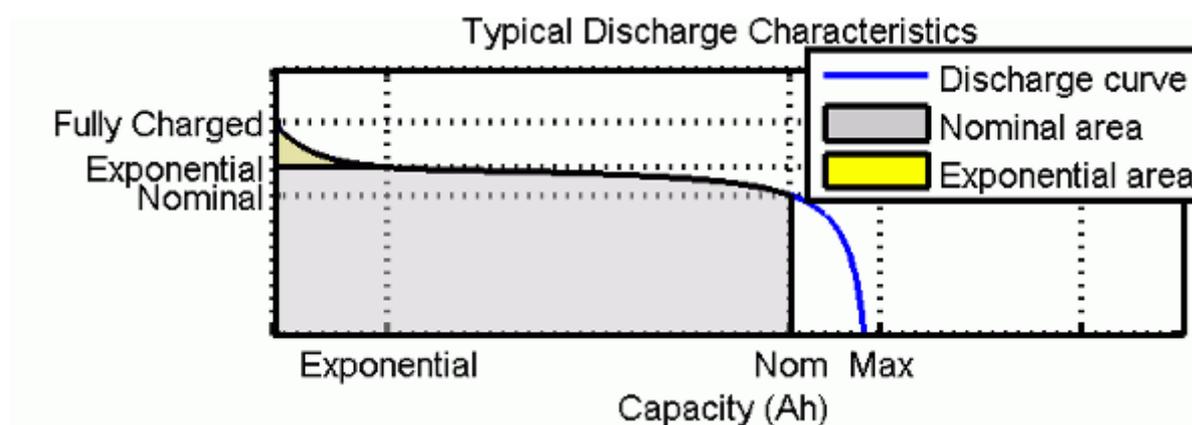


Рисунок 4.3 – разрядочная характеристика батареи

Данный рисунок показывает 3 зоны при разряде батареи.

Первая зона представляет собой экспоненциальное падение напряжения, когда батарея заряжается. В зависимости от типа аккумулятора, эта область более или менее широкая.

Вторая зона представляет собой заряд, который может быть потрачен из батареи до тех пор, пока напряжение не упадет ниже номинального напряжения батареи.

Третья зона представляет собой полный разряд батареи, когда напряжение быстро падает.

4.2 Блок параметров батареи

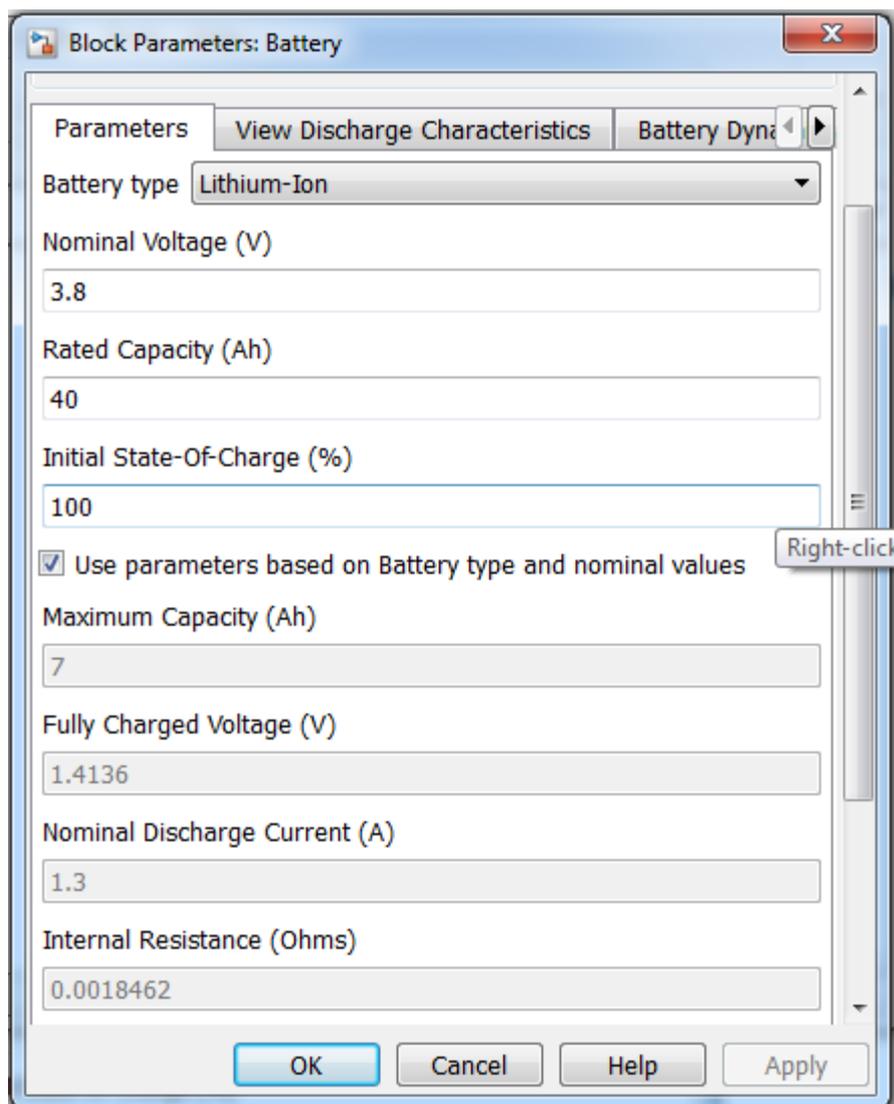


Рисунок 4.4 – Окно блока параметров батареи в MatLab

Вкладка параметры обеспечивает изменение параметров ячейки:

1) Тип батареи предоставляет набор заранее определенного поведения заряда для четырех типов батареи:

- ✓ Свинцово-кислотный;
- ✓ Литий-ионный;
- ✓ Никель-кадмиевый;
- ✓ Никель-металл-гидридный.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ

Лист

36

Параметр разрядный ток позволяет задавать различные значения тока разряда. Разрядные характеристики этих токов представлены во второй части графика.

Единицы измерения. Нужно выбрать время или ампер-часы для просмотра по оси X.

Временные диаграммы батареи.

Время переходного процесса (95% от конечного значения).

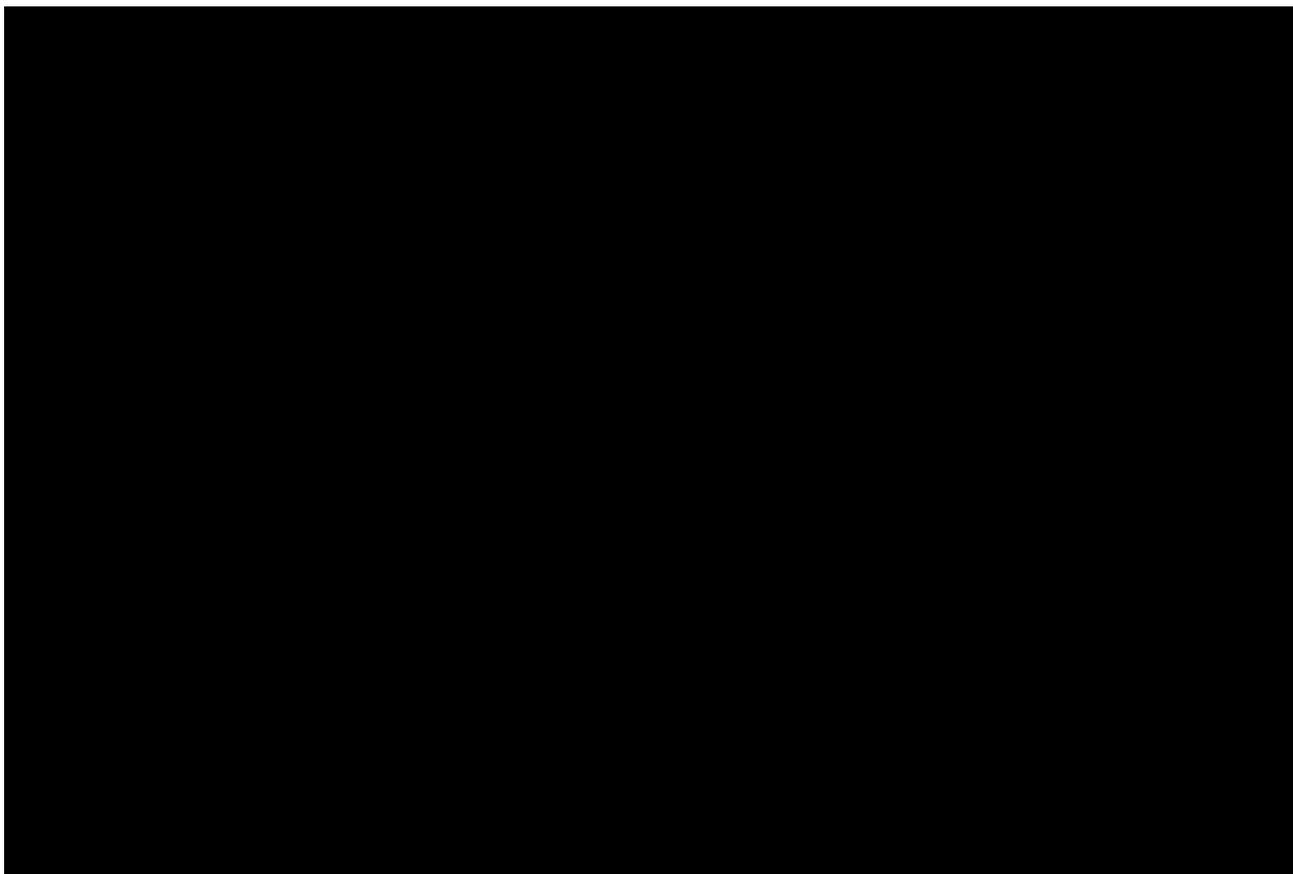


Рисунок 4.6 – Временные диаграммы батареи

В этом примере, постоянная времени 30 секунд. Внесем параметры нашей $LiFePO_4$ ячейки в диалоговое окно. Для получения заданной характеристики заряда-разряда нам нужны ключевые параметры. Ниже приведем их данные:

- 1) Номинальное напряжение 3,3 В;
- 2) Номинальная емкость 20 А·ч;
- 3) Максимальная емкость 20,37 А·ч – определяется по разрядной характеристике батареи;
- 4) Напряжение полностью заряженной ячейки 3,6 В;

									Лист
									39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ				

- 5) Номинальный ток разряда батареи 19,37 В;
- 6) Внутреннее сопротивление ячейки 0,001 Ом;
- 7) Емкость при номинальном напряжении 18 А·ч определяется по графику заряда-разряда, в нашем случае при 3.3 В;
- 8) Экспоненциальная зона напряжения 3,35 В и емкость 1 А·ч снимается с характеристики зоны.

Использование параметров батарей из Data Sheet:

В этом разделе приведен детальный пример, взятой из техпаспорта батареи Panasonic NiMH-HHR650D

Specifications

	mm	inch
Diameter	33.0+0/-0.1	1.3+0/-0.04
Height	61+0/-1.5	2.40+0/-0.08
Approximate Weight	Grams	Ounces
	170	6.0

Nominal Voltage		1.2V		
Discharge Capacity*	Average**	6800 mAh		
	Rated (Min.)	6500 mAh		
Approx. Internal impedance at 1000Hz at charged state.		2mΩ		
Charge	Standard	650mA (0.1It) x 16hrs.		
	Rapid	6500mA (1It) x 1.2 hrs.		
Ambient Temperature	Charge	Standard	°C	°F
			0°C to 45°C	32°F to 113°F
	Rapid	0°C to 40°C	32°F to 104°F	
		Discharge		-10°C to 65°C
Storage	< 2 years	-20°C to 45°C	-4°F to 113°F	
	< 6 months	-20°C to 55°C	-4°F to 131°F	

Typical Discharge Characteristics

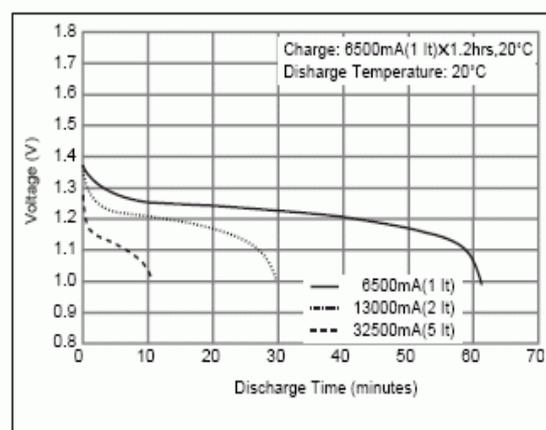
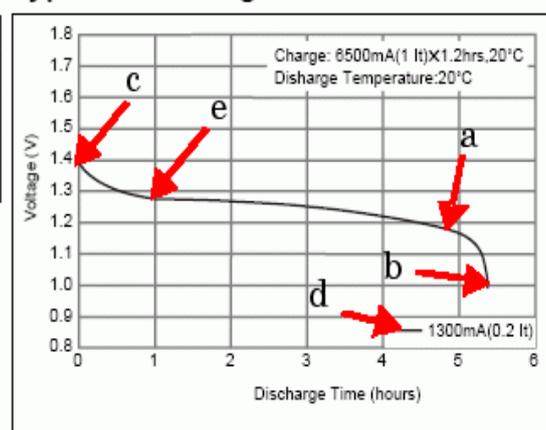


Рисунок 4.7 – спецификация и характеристика NiMH-HHR650D

Из таблиц спецификации, мы получаем номинальную емкость и внутреннее сопротивление. Остальные подробные параметры выводятся из типичных характеристик разряда участка:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ

Лист

40

Таблица 4.1 – основные характеристики NiMH-NHR650D

Параметр	Значение
Номинальная емкость	6.5 Ач
Внутреннее сопротивление	2 мОм

Продолжение таблицы 4.1

Параметр	Значение
Номинальное напряжение (<i>a</i>)	1,18 В
Максимальная емкость (<i>b</i>)	7 Ач(5,38ч*1,3А)
Напряжение заряженной батареи (<i>c</i>)	1,39 В
Номинальный ток разряда (<i>d</i>)	1,3 А
Емкость при номинальном напряжении (<i>a</i>)	6,25 Ач
Экспоненциальное напряжение (<i>e</i>)	1,28 В
Экспоненциальная емкость (<i>e</i>)	1,3 Ач

Эти параметры являются приблизительными и зависят от точности точек, полученных из кривой разряда. Параметры, полученные из Data Sheet вводятся в маске блока батареи, как на рисунке ниже:

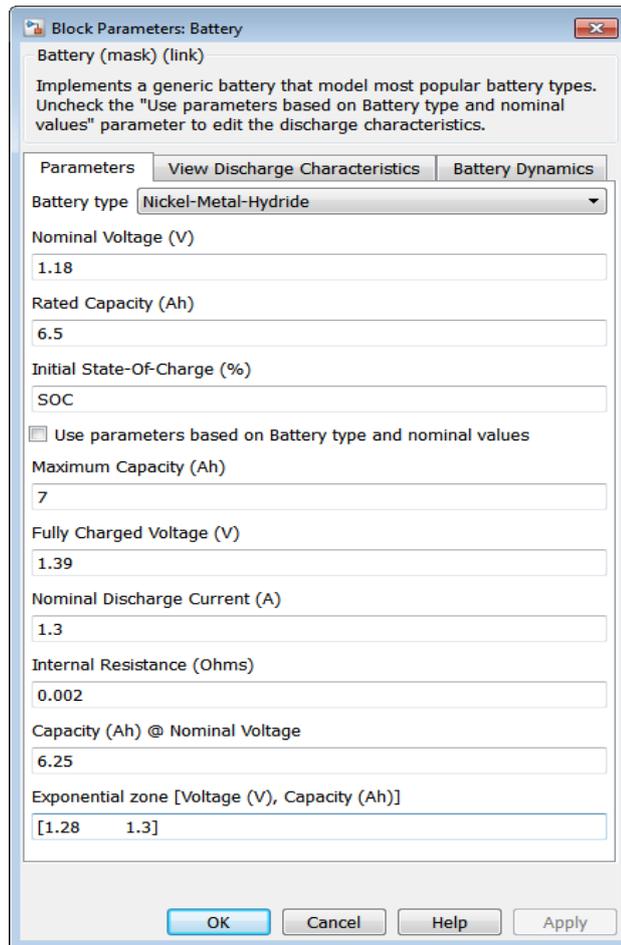


Рисунок 4.8 – Окно блока параметров с измененными данными.

5 МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ.

Моделировать систему заряда батареи мы будем в системе MatLab. Для обеспечения зарядки данной батареи изменим её данные подходящие для выбранного типа батареи.

Таблица 5.1 – Основные характеристики батареи типа LiFePO4

Номинальное напряжение, В	3.3
Номинальная ёмкость, А-ч	20
Начальное состояние заряда, %	0...100
Максимальная ёмкость, А-ч	20.37
Полное напряжение заряженной батареи, В	3.6
Номинальный ток разряда, А	19.37
Внутреннее сопротивление, Ом	0.001
Ёмкость при номинальном напряжении, А-ч	22
Экспоненциальная зона, В-А	3.35 4

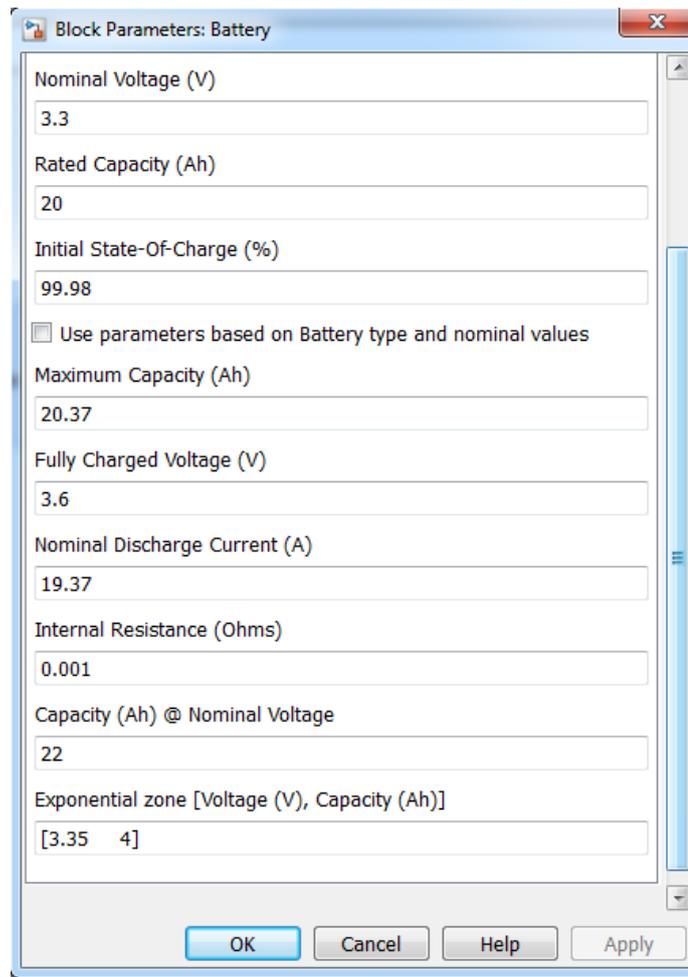


Рисунок 5.2 – Окно блока параметров с характеристиками батареи типа LiFePO4

Исследование характеристик данного типа батареи мы проведем в 3 системах заряда.

5.1 Система основана на базе идеальных элементов с поддержанием постоянного уровня тока на батарее.

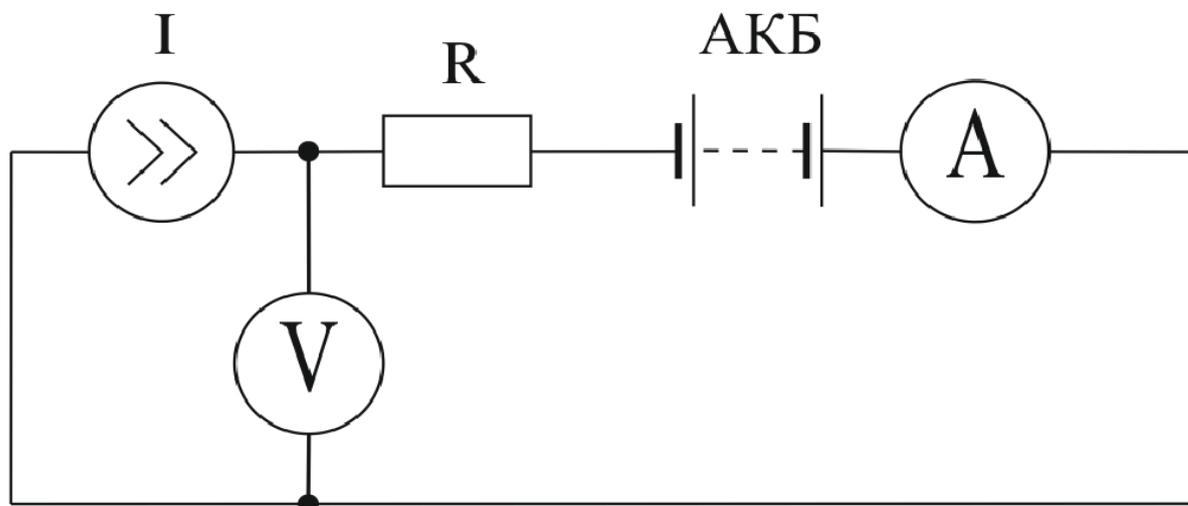


Рисунок 5.3 – Функциональная схема системы заряда батареи током

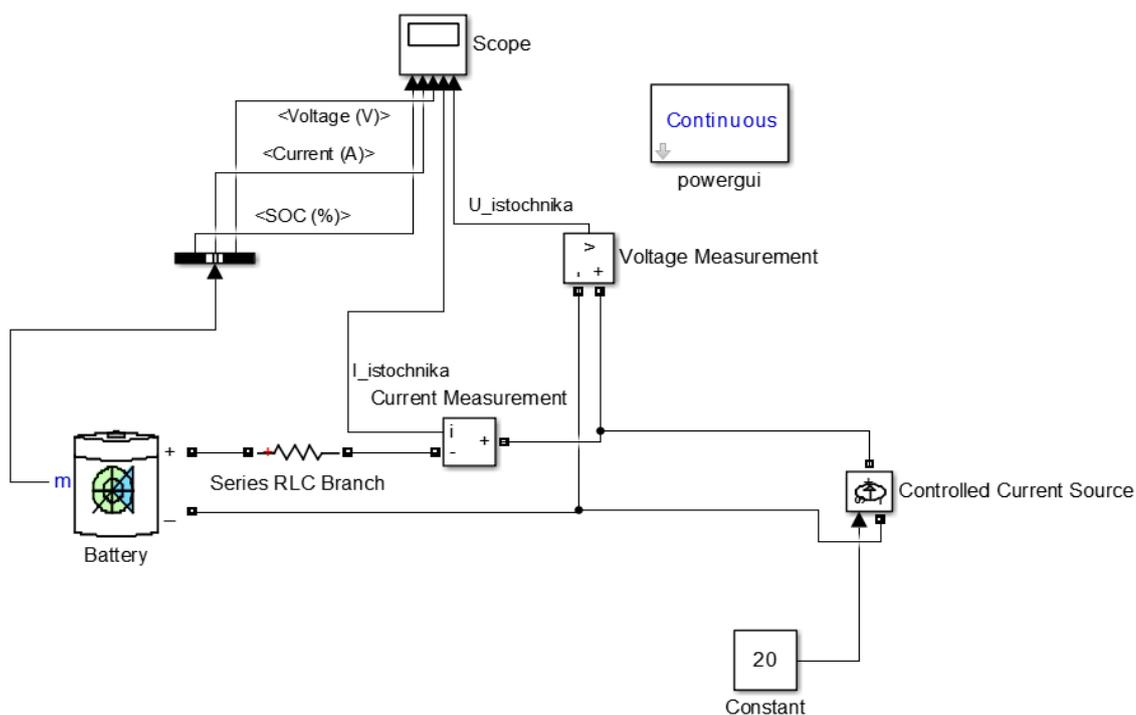


Рисунок 5.4 – Модель системы заряда батареи током на базе идеальных элементов

В данной схеме последовательно соединены источник напряжения, активная нагрузка, и аккумулятор. Для измерения тока и напряжения, в схему присутствуют амперметр и вольтметр, подключенные последовательно и параллельно соответственно.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

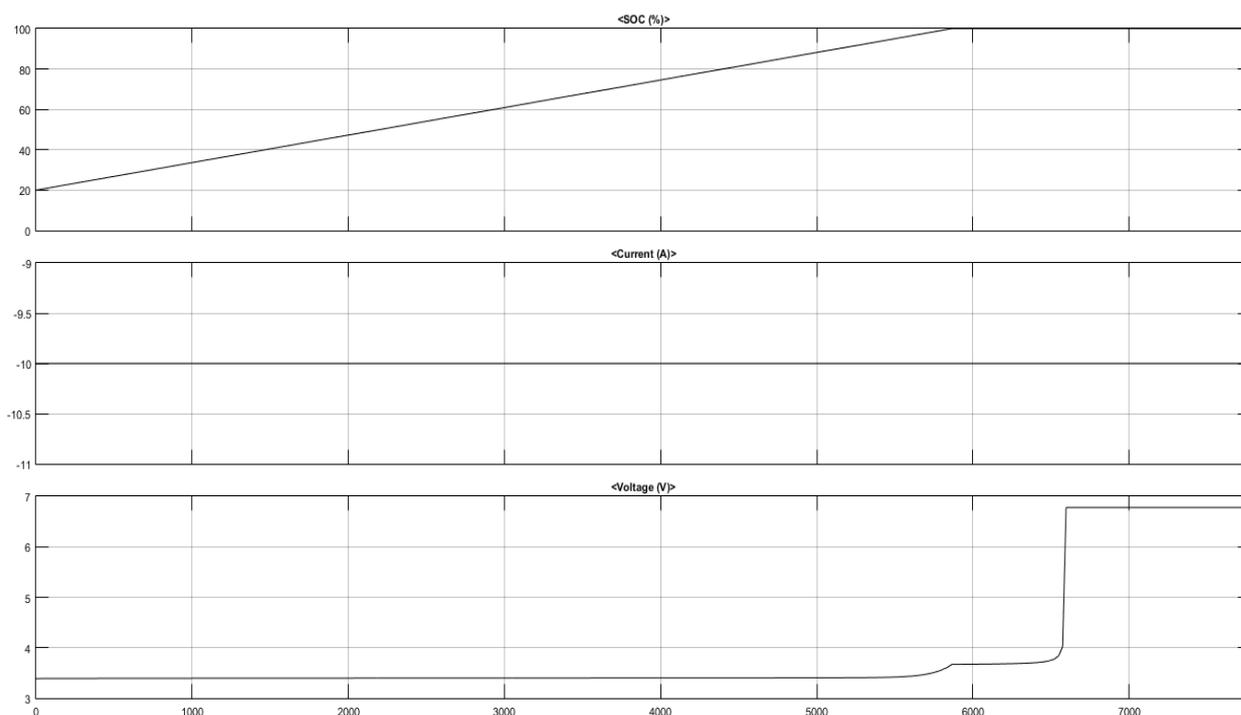


Рисунок 5.5 – Показания осциллографа при заряде батареи током на базе идеальных элементов

По графику на рисунке 5.4 видно что при постоянстве тока батарея заряжается достаточно быстро при начальном заряде в 20%, аккумуляторная батарея достигла 100% заряда при малой мощности и токе 10 А, всего за 96 минут. При не прекращении подачи питания на батарею таким способом через некоторое время, аккумуляторная батарея придет в негодность по причине её пробоя.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ

Лист

46

5.2 Система основана на базе идеальных элементов с поддержанием постоянного уровня напряжения на батарее.

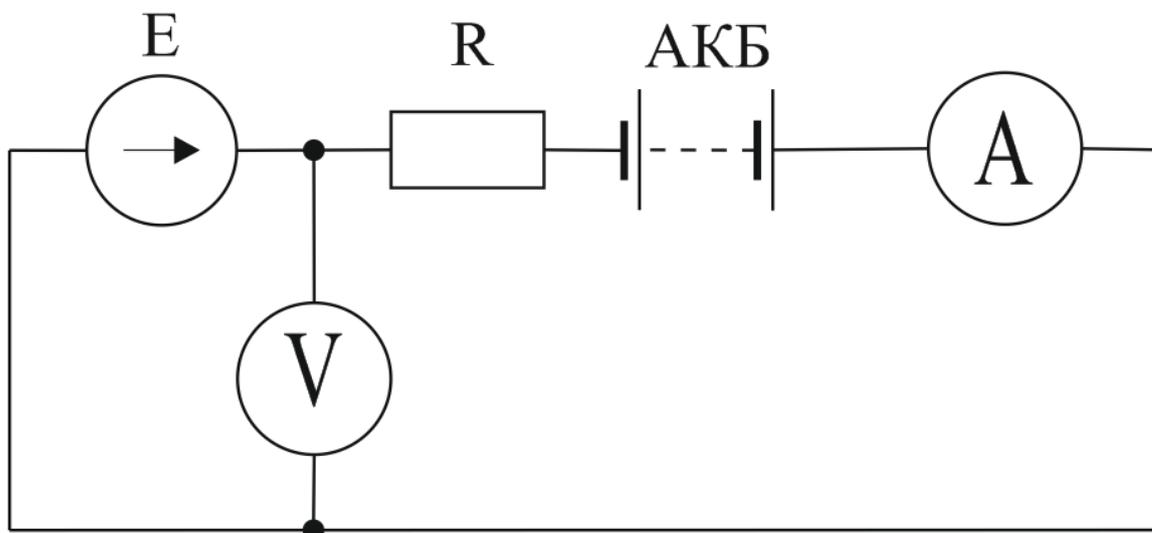


Рисунок 5.6 – Функциональная схема системы заряда батареи напряжением

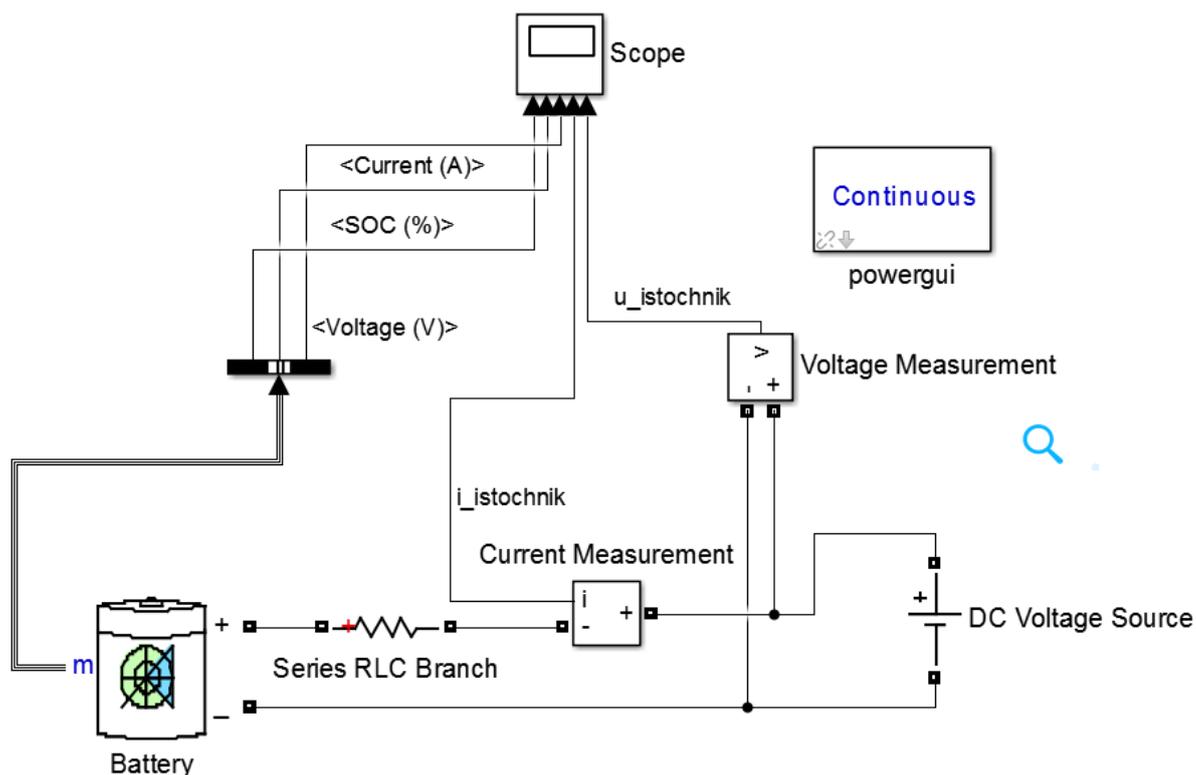


Рисунок 5.7 – Модель зарядки батареи напряжением на базе идеальных элементов

В данной схеме последовательно соединены источник напряжения, активная нагрузка, и аккумулятор. Для измерения тока и напряжения, в

схему присутствуют амперметр и вольтметр, подключенные последовательно и параллельно соответственно.

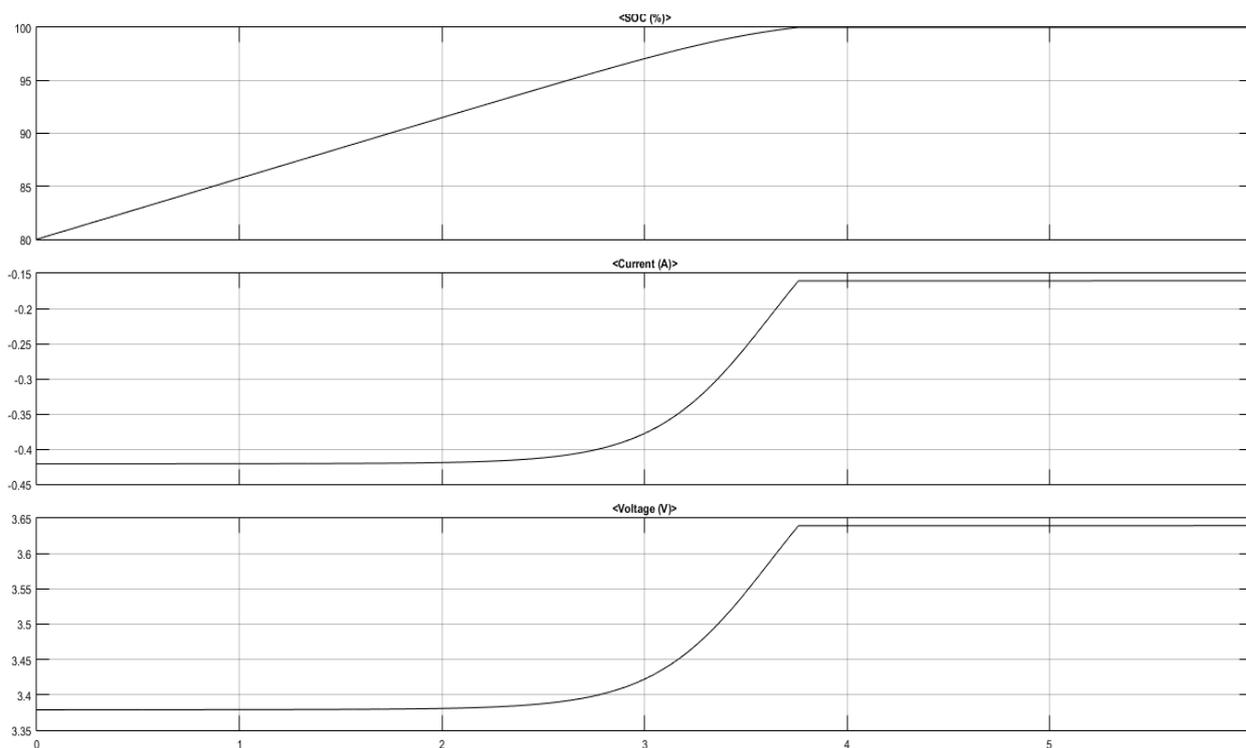


Рисунок 5.8 – Показания осциллографа при зарядки батареи напряжением на базе идеальных элементов

По графику на рисунке 5.7 видно что процесс заряда батареи теперь занимает большое количество времени для заряда от 80 до 100 %, потребовалось 10 часов. Также заметно, что процесс идет не прямолинейно, а по экспоненте. При достижении 100% заряда и не отключении питания батарея не пробивается.

5.3 Система основана на базе реальных элементов для заряда батареи ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

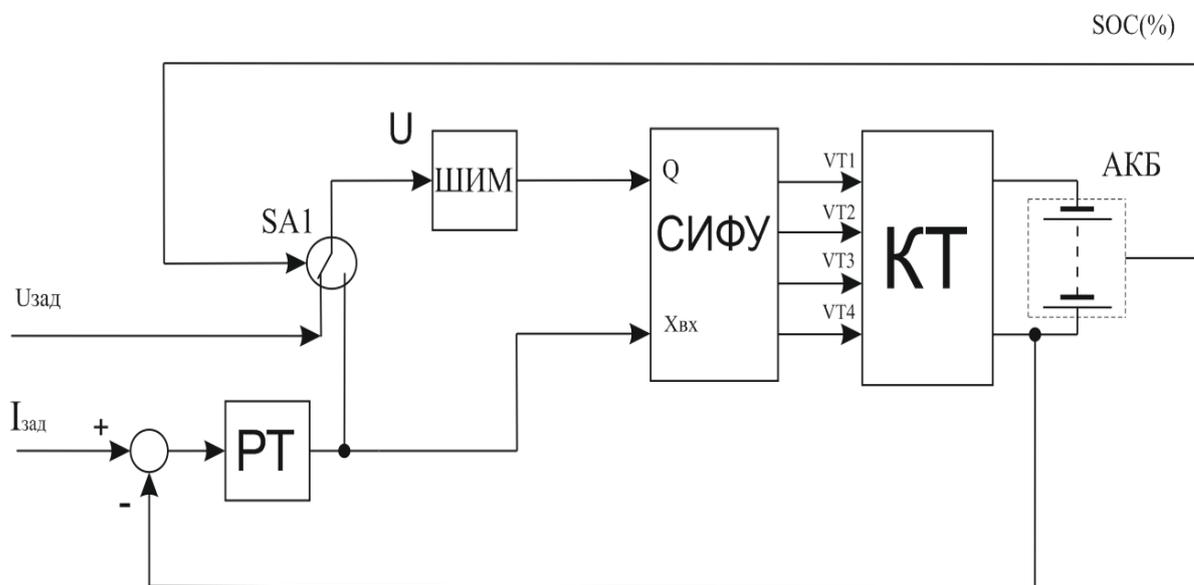


Рисунок 5.9 – Функциональная схема системы заряда реальным источником тока

В данной схеме присутствует АКБ, аккумуляторная батарея (LiFePO₄), которую мы заряжаем в ходе данной работы. РТ – регулятор тока с помощью которого мы регулируем ток, подаваемый на батарею. СИФУ – система импульсно-фазного управления, с помощью данной системы, мы создаем импульсы для управления транзисторами (КТ-комплект транзисторов). С помощью ШИМ-шиотно-импульсная модуляция, мы модулируем широту импульсов для правильной работоспособности СИФУ. С помощью СИФУ мы формируем сигналы для несимметричного управления транзисторами. Для сохранения основных функций батареи и во избежание её пробоя, в работе используется, как заряд током, так и заряд напряжением. С помощью ключа SA1, мы управляем номиналом, который подается на батарею, вследствие заряда. При достижении батареей заряда 80 и более%, ключ переключается, и система переходит на более низкую скорость заряда.

Для исправной работы данной системы следует правильно управлять комплектом транзисторов, в связи с этим для управления данным комплектом был смоделирован алгоритм несимметричного управления ключами

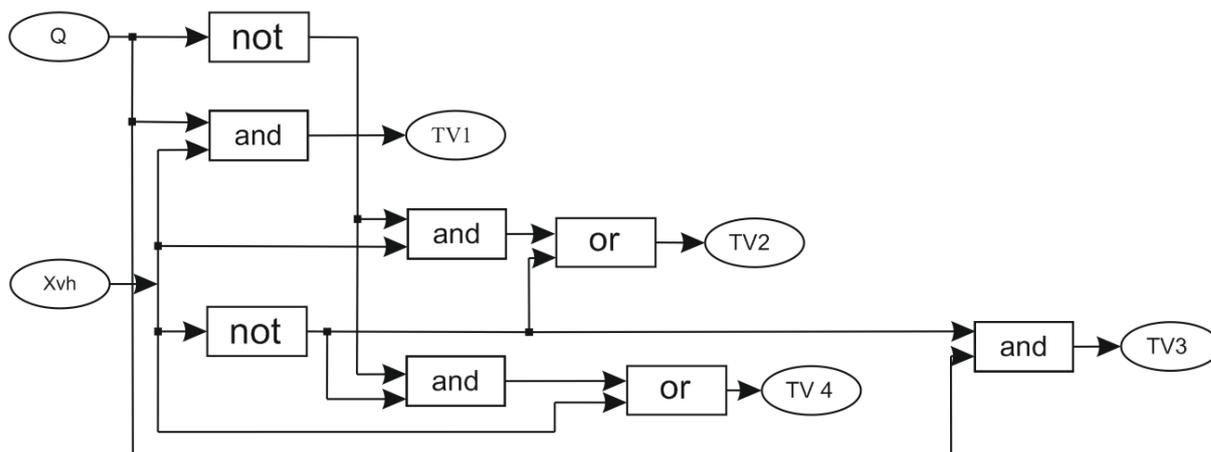


Рисунок 5.10 – Система управления ключами

Данный алгоритм представляет собой, несимметричное управление ключами, данные сигналы подаются на ключи. Для данной работы выбран именно несимметричный режим работы, при данном режиме работы ключей происходит однополярная модуляция. При этом один из ключей закрыт, второй всегда открыт, а остальные 2 коммутируют между собой.

На рисунке 5.10 представлены осциллограммы сигналов приходящих на комплект транзисторов, с помощью которых они управляются.

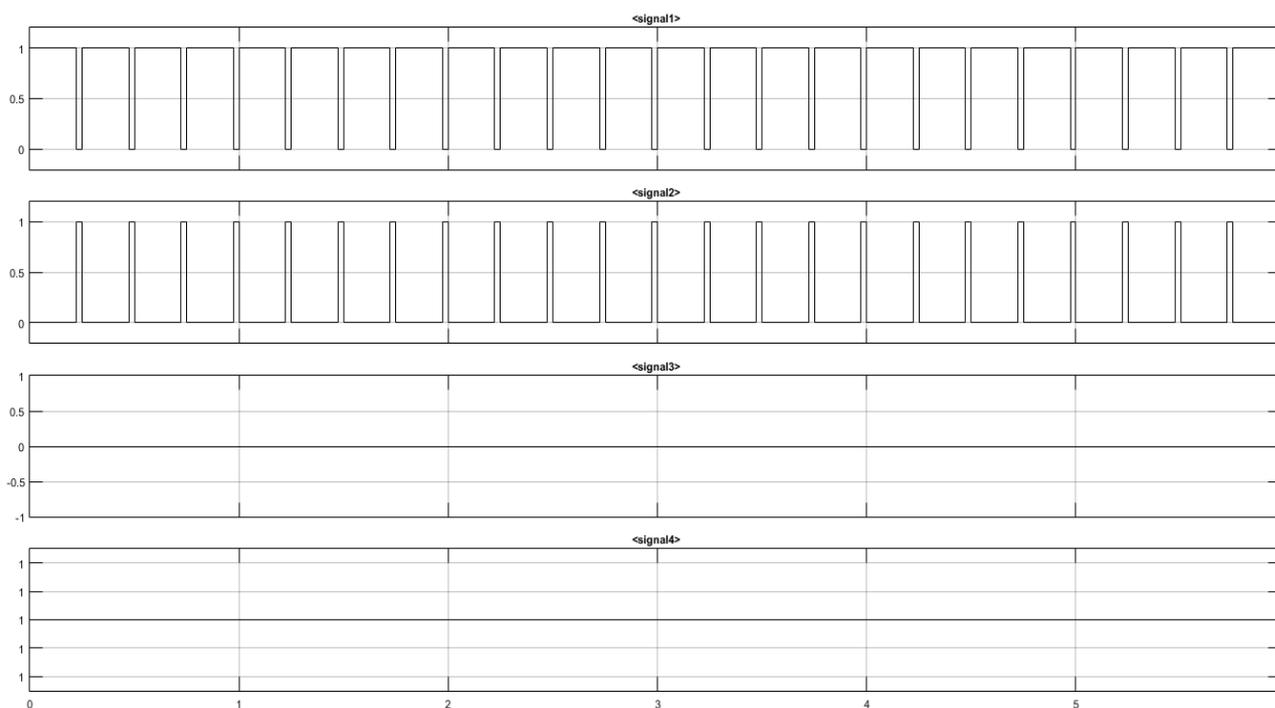


Рисунок 5.11 – Сигналы управление транзисторами

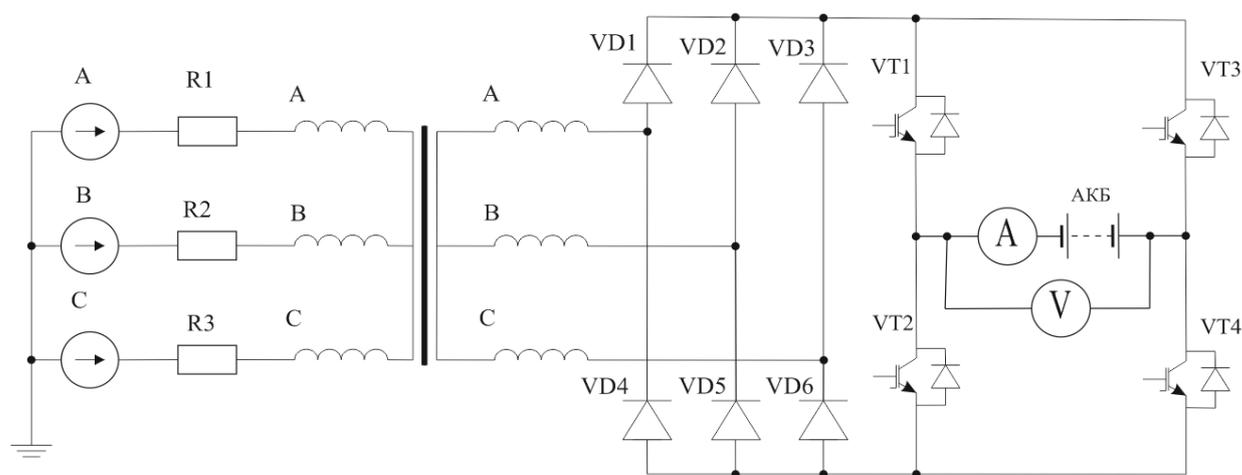


Рисунок 5.12 – Принципиальная схема системы заряда батареи

В данной схеме присутствует трехфазная сеть с последовательной присоединённой активной нагрузкой, далее последовательно подключен понижающий трансформатор. После трансформатора напряжение сети выпрямляется с помощью трехфазного выпрямителя по схеме Ларионова.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Далее выпрямленное напряжение проходит через мост на IGBT транзисторах, которые подключены к аккумулятору.

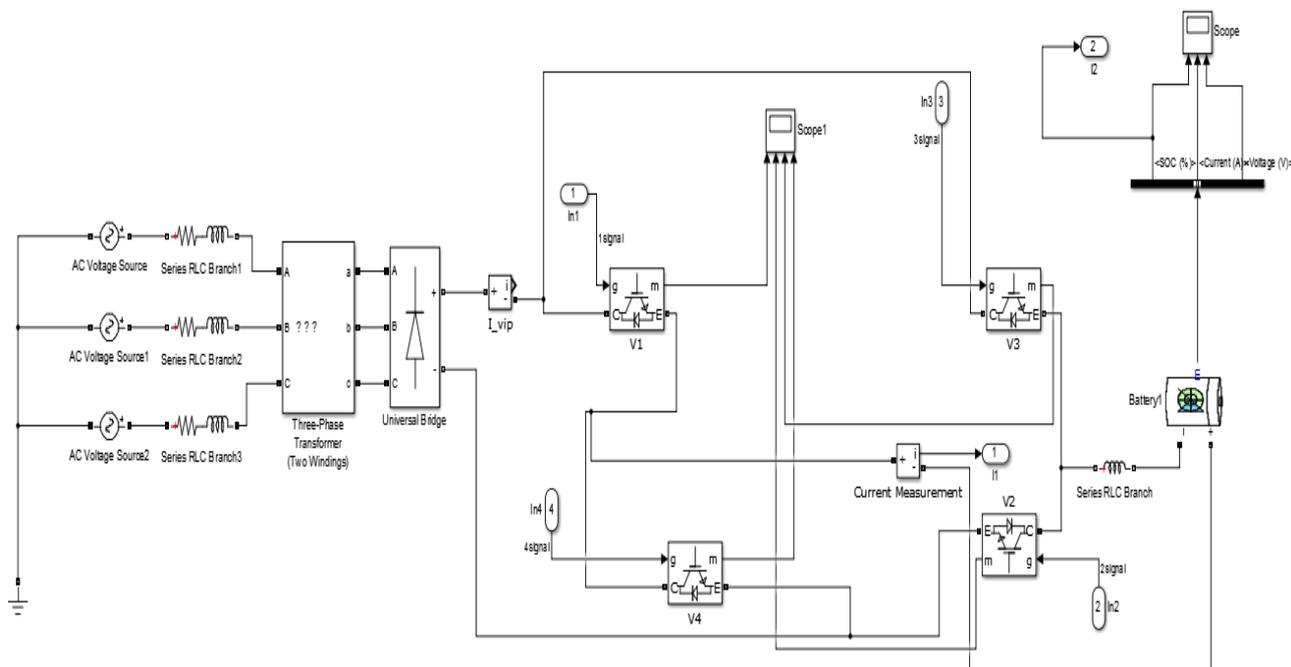


Рисунок 5.13 – Модель системы заряда батареи

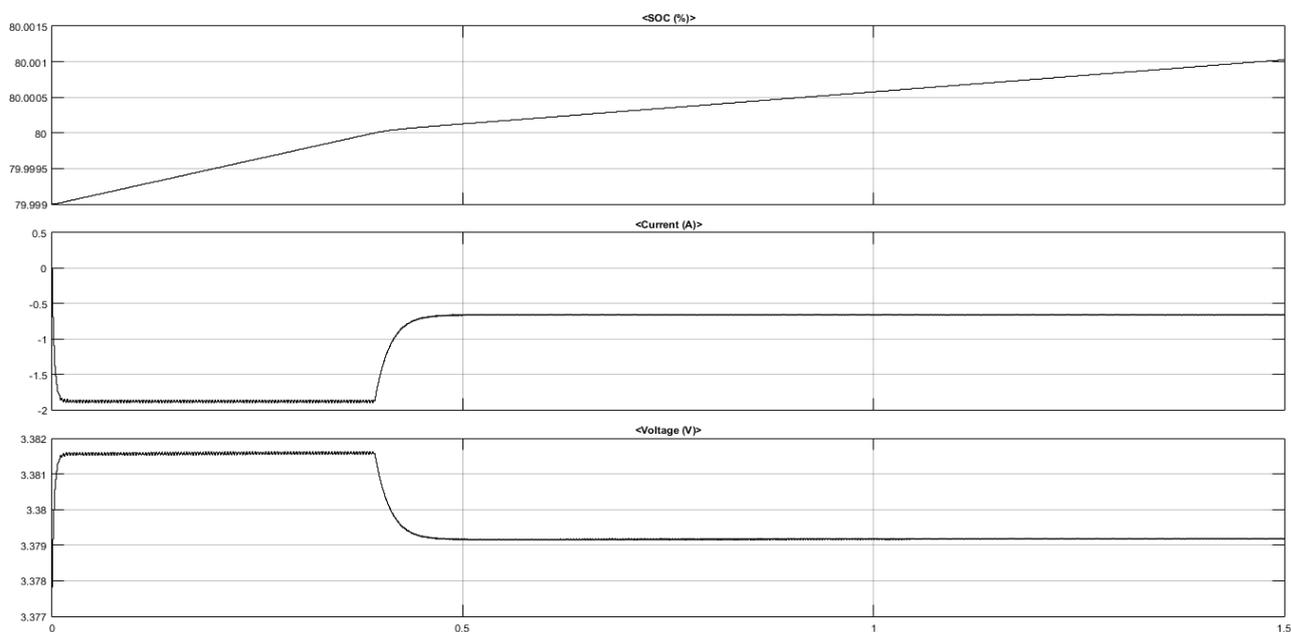


Рисунок 5.14 – Показания осциллографа при заряде батареи постоянным током на базе реальных элементов

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

ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускного квалификационного проекта, исходя из данных технического задания, были построены математическая модель системы заряда аккумуляторной батареи.

Оптимальным типом аккумуляторных ячеек, используемых в качестве источника питания автономного электротранспортного средства являются LiFePO_4 , несмотря на достаточно скромные масса-габаритные показатели, они являются более безопасными в эксплуатации и имеют большой ресурс.

Разработанная система заряда аккумуляторной батареей позволила заряжать за короткий промежуток времени батарею до 80%, и переходить на менее мощный режим заряда, для увеличения срока службы батареи и уменьшения опасности при заряде батареи до её номинала.

									Лист
									53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

2 Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание, 2007 – 288 с.

3 Абрамова О.Г. Поддержка по зарядным станциям электромобиля\ О.Г. Абрамова. – <https://best-energy.com.ua/support/chargers/1184-bu-1004>.

4 LiFePo4 ячейка аккумуляторной батареи: <http://www.a123systems.com/>

5 Жук, А.З., Электромобиль на алюминиевом топливе / А.З. Жук, Б.В. Клейменов, В.Е. Фортов, А.Е. Шейндлин, – М: Наука, 2012. – 171 с.

									Лист
									54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.03.02.2017.159.01ПЗ				