



## Содержание

Введение.....	4
1 Аналитический обзор литературы.....	7
1.1 Электрооборудование автомобилей.....	7
1.2 Обзор аналогичных решений.....	12
1.3 Сравнительный анализ характеристик суперконденсаторов .....	14
2 Конструкция, принцип работы, области применения и особенности суперконденсаторов. Методы балансировки .....	19
2.1 Эксплуатация суперконденсаторов.....	27
2.2 Методы балансировки суперконденсаторов .....	32
3 Определение характеристик суперконденсатора для обеспечения работы бортовой электрической сети автомобиля .....	40
3.1 Потребители электрической энергии автомобиля.....	40
3.2 Порядок выбора суперконденсатора.....	41
3.3 Определение емкости суперконденсатора .....	42
3.4 Определение характеристик сборки суперконденсатора .....	46
3.5 Подключение сборки в бортовую сеть автомобиля .....	50
4 Экспериментальные работы влияния суперконденсатора в бортовой сети автомобилей на включение различных нагрузок.....	53
4.1 Цель и объект испытаний.....	53
4.2 Условия проведения испытаний.....	53
4.3 Методика испытаний .....	54
4.4 Измерительное оборудование.....	55
4.5 Программа испытаний.....	56

4.6 Результаты испытаний.....	57
Заключение .....	63
Список используемых источников.....	66
Приложение А .....	73

## Введение

**Актуальность работы и научная значимость настоящего исследования.**

На сегодняшний день проблема повышения эффективности работы электрооборудования становится все более актуальной. Появляются новые электрические системы автомобилей (например система старт-стоп), которые потребляют большое количество энергии, в результате чего происходят различные падения напряжений в бортовой электрической сети автомобилей, что негативно сказывается на стабильную работу остальных электронных компонентов и систем. В транспортных средствах используются электрохимические аккумуляторы энергии: традиционные свинцово-кислотные, AGM (гелевые), щелочные и новейшие литий-ионные. Данные аккумуляторы имеют серьезные недостатки: ограниченный ресурс при циклической работе (от нескольких десятков до нескольких тысяч циклов зарядов и разрядов), сравнительно небольшую удельная мощность (при увеличении мощности снижаются: энергоемкость, коэффициент возврата энергии и ресурс), ухудшенные характеристики при эксплуатации в отрицательных температурах окружающей среды. Возможно, решить проблему помогут суперконденсаторы – это накопители энергии нового поколения с высокой плотностью энергии и мощности заряда.

**Объектом исследования** является бортовая электрическая сеть автомобиля.

**Предметом исследования** является падение напряжения бортовой сети при различных резких увеличениях нагрузки.

**Целью работы** является повышение эффективности работы систем электрообеспечения силовых установок автомобиля, при различных нагрузках на бортовую сеть.

**Гипотеза исследования** состоит в том, что с подключенным суперконденсатором к бортовой сети автомобиля, при включении различных

электропотребителей автомобиля, резкие падения напряжений уменьшатся, связано это с тем, что суперконденсатор в сила мгновенно обеспечить пиковые токи потреблений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

- провести аналитический обзор конструкций суперконденсаторов, рассчитать и собрать суперконденсатор с необходимыми характеристиками для проведения экспериментальных работ;
- реализовать схему подключения суперконденсатора к бортовой электрической сети автомобиля и провести экспериментальные работы по определению влияния суперконденсатора на напряжение бортовой сети, при различных потребителях энергии;
- по полученным результатам сделать выводы о влиянии суперконденсатора на бортовую электрическую сеть автомобиля в качестве дополнительного источника тока в бортовой электрической сети автомобилей.

**Метод исследования** применялся экспериментального характера.

**Научная новизна исследования** заключается в влиянии суперконденсатора, на падения напряжений, при резких нагрузках в бортовой электрической сети автомобилей.

**Личное участие автора** в организации и проведении исследования состоит в том, что автор принимал непосредственное участие в формировании аналитического обзора по направлению исследований, подготовки элементов суперконденсатора и его сборки, а также в выполнении экспериментальных работ и получении результатов.

**Апробация и внедрение результатов** велись в течении всего исследования. Его результаты докладывались на семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления».

- Опубликована 1 научная статья в издании «Научный альманах 2022» № 4-2 (90) «Анализ токсичности двигателя на сжатом природном газе по

результатам моделирования» Смоленский В.В., Аминов Ш.Т.,  
Финогенов Н.В., Зайнетдинов И.М., Минаев Е.В., Гончаренко П.А. /С.  
49-54

**На защиту выносятся:**

- Разработанная концепция применения суперконденсатора совместно с бортовой электрической сетью автомобилей.

**Структура магистерской диссертации:**

Данная магистерская диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения с основными результатами, содержит 27 рисунков, 6 таблиц, списка использованных источников (61 источник), 1 приложения. Основной текст изложен на 74 страницах.

# 1 Аналитический обзор литературы

## 1.1 Электрооборудование автомобилей

«Автомобильные системы электрообеспечения – это совокупность оборудования, в зависимости от типа автомобиля выполняющая функции хранения, производства электрической энергии необходимого качества, распределения и передачи её потребителям.

На автомобилях и электромобилях применяют системы электроснабжения постоянного тока. В систему электроснабжения могут входить:

- источники электрической энергии (генератор, аккумуляторная батарея (далее – АКБ));
- регулирующие устройства (регулятор напряжения и др.);
- коммутационная аппаратура, элементы контроля и защиты (электромагнитные реле, токовые реле, предохранители)» [53].

На автомобилях используют 2 основных типа АКБ: стартерные (основная функция – питание стартера для пуска двигателя внутреннего сгорания (далее – ДВС)) и тяговые – электромобили, системы старт-стоп. Электромобиль использует тяговую АКБ как основной источник энергии, её заряд производится за счёт внешних источников энергии и рекуперации.

В автомобилях с ДВС основным источником электрической энергии в системе электроснабжения является генератор переменного тока с выпрямителем, который приводится во вращение от шкива коленчатого вала посредством ремня привода вспомогательных агрегатов.

«Основные требования к системе электроснабжения: надежное обеспечение потребителей электрической энергией в различных условиях эксплуатации автомобиля (от -40 до +60 С). Режим работы потребителей электроэнергии на автомобиле характеризуется широким диапазоном и случайным характером нагрузки. Особенностью работы таких систем

является то, что генератор не способен мгновенно выдать необходимое количество энергии при резком включении его больших потребителей, т.к. ротор приводится во вращение от двигателя и имеет случайный характер. Но при этом, при частоте вращения коленчатого вала двигателя, соответствующей режиму холостого хода, генератор развивает мощность, минимально достаточную для электроснабжения электронной системы впрыскивания топлива, системы зажигания, информационно-измерительной системы, габаритных огней и фонарей освещения номерного знака.

Кроме электроснабжения потребителей, входящих в систему электрооборудования автомобиля, генератор обеспечивает заряд аккумуляторной батареи при работающем двигателе. Выходные параметры генератора выбираются таким образом, чтобы на любых режимах движения автомобиля не происходил прогрессивный разряд аккумуляторной батареи. При наличии электронных устройств особые требования предъявляют к характеру изменения выходного напряжения генератора. Импульсное напряжение возникает в системе электроснабжения как при нормальных режимах работы в результате действия переключающих устройств (диодов выпрямителя и транзисторов регулятора напряжения), так и в аварийных режимах, например, при внезапном отключении аккумуляторной батареи. Кратковременные импульсы напряжения в системе электроснабжения не должны превышать 150 В» [53].

Надежность функционирования системы электроснабжения предопределяет безопасность движения автомобиля. Система электроснабжения должна выполнять заданные функции, сохраняя требуемые эксплуатационные показатели в заданных пределах, при заданных режимах и условиях работы в течение требуемого периода времени.

В автомобильных системах электрооборудования АКБ играют роль химического источника запасенной электрической энергии, вырабатываемой генератором переменного тока. АКБ должна быть способна давать ограниченный по продолжительности, но высокий по значению ток,



предназначенный для запуска двигателя (особенно при низких температурах), и обеспечивать все другие важные компоненты системы электрической энергией в течение ограниченного времени работы двигателя на холостом ходу или при его выключении.

При работе генератора предъявляется ряд основных требований:

- выходные параметры генератора должны быть такими, чтобы в любых режимах движения автомобиля не происходил прогрессивный разряд аккумуляторной батареи;
- напряжение в бортовой сети автомобиля, питаемой генератором, должно находиться в заданных пределах при изменении частоты вращения двигателя и нагрузок в широком диапазоне;
- генератор должен иметь достаточную прочность, большой ресурс, малые массу и габариты, низкий уровень радиопомех и шума.

Генератор постоянного тока имеют следующие основные недостатки:

- при работе на холостом ходу отсутствует возможность заряда АКБ;
- наличие коллектора и щёточных контактов снижает надёжность работы генератора.

Суперконденсаторы известны довольно таки давно, начиная с 1962 года, «Роберт Райтмаер, химик американской компании «Standard Oil Company» (SOHIO), располагавшейся в городе Кливленд, штата Огайо, подал заявку на получение патента, где подробно описывался механизм сохранения электрической энергии в конденсаторе, обладающем «двойным электрическим слоем» (далее – ДЭС).

Если в обычном конденсаторе алюминиевые обкладки, традиционно, были изолированы слоем диэлектрика, то в предлагаемом изобретателем варианте акцент делался непосредственно на материал обкладок. Электроды должны были иметь различную проводимость: один электрод должен был обладать ионной проводимостью, а другой – электронной.

Таким образом, в процессе заряда конденсатора происходило бы разделение электронов и положительных центров в электронном проводнике, и разделение катионов и анионов в ионном проводнике.

Электронный проводник предлагалось сделать из пористого углерода, тогда ионным проводником мог бы быть водный раствор серной кислоты. Заряд в таком случае сохранялся бы на границе раздела этих особых проводников (тот самый двойной слой). Разность потенциалов этих первых ионисторов могла достигать значения в 1 вольт, а емкость – единиц фарад, ведь теперь расстояние между обкладками было меньше 5 нанометров» [22].

«В 1971 году лицензия была передана японской компании «NEC», занимающейся к тому моменту всеми направлениями электронной коммуникации. Японцам удалось успешно продвинуть технологию на рынок электроники под названием «Суперконденсатор» (далее – СК).

Спустя семь лет, в 1978 году, компания «Panasonic», выпустила «Золотой конденсатор» («Gold Cap»), который завоевал успех на рынке. Успех был обеспечен удобством применения СК для питания энергозависимой памяти SRAM. Но данные суперконденсаторы обладали высоким внутренним сопротивлением, которое ограничивало возможность быстрого извлечения энергии, вследствие, сильно сужала диапазон сфер применения.

В 1982 году специалисты американского Научно-исследовательского Института Pinnacle (PRI), расположенного в городе Лос-Гатос, штат Калифорния, работая над улучшением материалов электродов и электролитов, разработали СК с чрезвычайно высокой плотностью энергии, которые появились на рынке под названием «PRI Ultracapacitor» [22].

В настоящее время широкое распространение получили устройства, потребляющие высокую мощность в течение короткого интервала времени, например, электронные замки, реле, двигатели, импульсные излучатели. Для них не всегда можно использовать аккумуляторную батарею в качестве буферного источника энергии. Могут возникнуть сложности с

формированием мощных кратковременных токов. Для таких ситуаций стали использовать СК, которые можно устанавливать вместо аккумулятора или в комбинации с ним. Для изготовления этих элементов применяется технология, основанная на использовании эффекта образования ДЭС. Этим они выгодно отличаются от батарей и аккумуляторов [6].

Суперконденсаторы позволили внедрить в жизнь экологические технологии экономии энергии. В перспективе предусмотрено расширение сфер применения СК для отраслей автотранспорта, мобильной техники и средств связи [11].

Некоторые аспекты практического использования суперконденсаторов:

- Ведущие производители электромобилей, такие как Тесла и Ниссан, пользуясь международными выставками, представляют каждый раз новые модели, системы питания которых построены на суперконденсаторах. Российский опытный образец Е-мобиль использует суперконденсатор как основной источник энергии.
- В Минске на дороги общего пользования вышли на маршрутные электробусы совместного производства южно-корейской компании «Hyundai Motor» и белорусского предприятия «Белкоммунмаш». Новый общественный транспорт оснащён электродвигателем, который потребляет энергию бортовых суперконденсаторов.
- В Москве, в мае 2019 года вышли на городской маршрут, электрические автобусы отечественного производства. Автобусы на суперконденсаторах способны проходить маршрут до конечной остановки с подзарядкой на 2-3 остановках. Время подзарядки занимает 2-3 минуты, которого достаточно для высадки и посадки пассажиров. Полная зарядка суперконденсаторов, происходит на конечных станциях в течение 8-10 минут.
- «Проект глубоководного порта «Yangshan» в Китае, расположенного недалеко от Шанхая. 23 портовых крана постоянно создавали

значительные изменения (падения) напряжения длительностью 10-15 секунд. Так как порт расположен в 20 милях от берега, увеличение подводимой мощности и прокладка дополнительных силовых кабелей были очень дорогим решением. В качестве альтернативного решения был разработан и установлен СК накопитель мощностью 3 МВт / 17,2 кВт-ч, обеспечивающий 20-секундную поддержку и компенсацию падения напряжения при работе кранов. К настоящему моменту система эксплуатируется более двух лет. В результате обеспечено 38 % сокращение потребления электроэнергии в пиковых режимах, экономия потребления электроэнергии составила 2,9 млн долларов, а экономия за счёт повышения эффективности и сокращения эксплуатационных издержек составила 41 млн долларов» [32].

## **1.2 Обзор аналогичных решений**

Известны аналогичные технические решения, в частности полезная модель в патенте RU 160556 – «Устройство пуска двигателя внутреннего сгорания транспортного средства» [46].

«Полезная модель относится к электрооборудованию транспортных средств, эксплуатируемых в регионах с холодным климатом. Устройство включает пусковой и буферный суперконденсаторные блоки и связанный с пусковым суперконденсаторным блоком, блок преобразования напряжения. Устройство параллельно подключают к аккумуляторной батарее (АКБ) ТС через буферный суперконденсаторный блок, последовательно подключают к АКБ через блок преобразования напряжения пускового суперконденсаторного блока с одной стороны и непосредственно подключают к стартеру ТС через пусковой суперконденсаторный блок - с другой. Подобная конструкция позволяет существенно повысить надежность запуска ДВС в условиях низких температур.» [46]. Схема полезной модели из патента показана на рисунке 1.

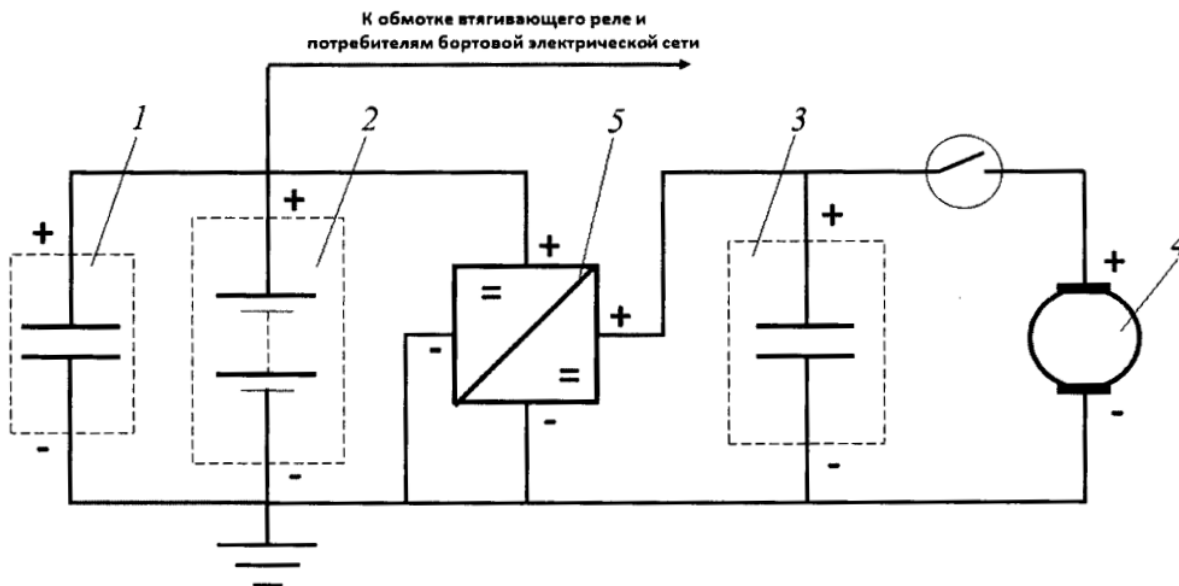


Рисунок 1 – Схема устройства пуска двигателя внутреннего сгорания транспортного средства [46]

Одним из недостатков устройства, является невозможность его подключения к аккумуляторной батарее транспортного средства при разряженном буферном суперконденсаторе.

Для устранения этого недостатка служит полезная модель, описанная в патенте RU 190312 – «Устройство гарантированного пуска двигателя внутреннего сгорания» [47]. В нем предлагается подключить буферный суперконденсатор через зарядно-разрядный блок.

«Устройство гарантированного пуска двигателя внутреннего сгорания транспортного средства, состоящее из корпуса с установленными в нем пусковым и буферным суперконденсаторами, зарядно-разрядным блоком и преобразователем напряжения, причем вход зарядно-разрядного блока подключается к аккумуляторной батарее транспортного средства, выход зарядно-разрядного блока подключается к буферному суперконденсатору и входу преобразователя напряжения, выход преобразователя напряжения подключается к пусковому суперконденсатору и втягивающему реле транспортного средства, отличающееся тем, что буферный накопитель

подключен к аккумуляторной батарее транспортного средства через зарядно-разрядный блок.

Достоинства такого устройства по сравнению с аналогами: снижение нагрузки на аккумуляторную батарею и бортовую сеть транспортного средства при подключении устройства, защита аккумуляторной батареи и бортовой сети транспортного средства от неправильного подключения устройства.» [47]. Схема полезной модели представлена на рисунке 2.

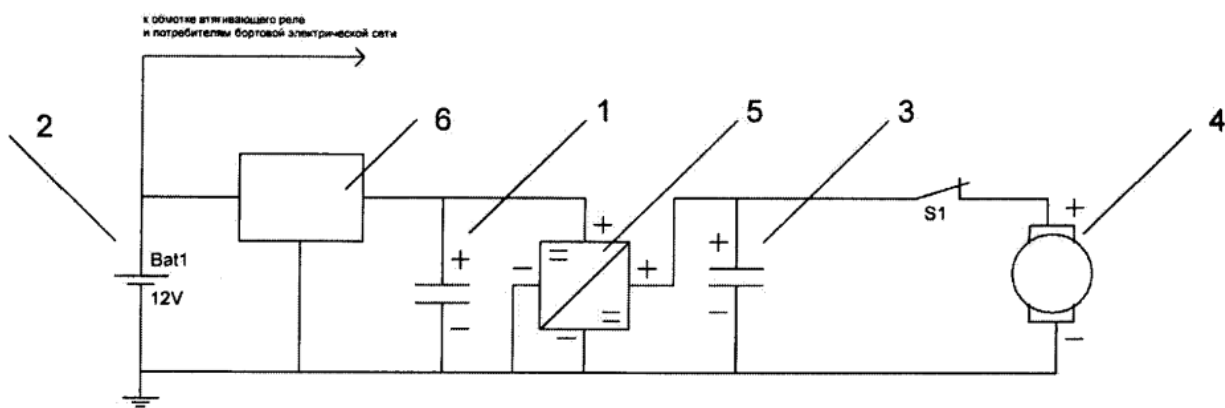


Рисунок 2 – Схема устройства гарантированного пуска двигателя внутреннего сгорания [47]

### 1.3 Сравнительный анализ характеристик суперконденсаторов

На рынке Российской Федерации присутствуют как зарубежные, так и отечественные модели суперконденсаторов. Основными производителями СК на сегодняшний день являются компании: Maxwell; Wima; ТЭЭМП; Феникс.

Maxwell Technologies – компания, которая является одной из ведущих производителей инновационных энергосберегающих решений. Основной упор Maxwell делает на СК, устройства накопления энергии, которые характеризуются высокой плотностью мощности, способностью выдерживать большое количество циклов заряд-разряд, высокой надежностью, способностью заряжаться и разряжаться очень быстро и

приемлемыми рабочими характеристиками при экстремальных температурах. Продукты на основе суперконденсаторов Maxwell являются решением проблемы накопителей электроэнергии и источников пиковой мощности для применения в различных областях промышленности, включая автомобильную, тяжелый транспорт, возобновляемые источники энергии, резервное электропитание, беспроводную связь и промышленную и бытовую электронику [42].

Wima – компания, которая выпускает суперконденсаторы для силовых систем. А также изготавливают различные виды пленочных суперконденсаторов: фольговые с пластиковым диэлектриком, с картонным диэлектриком, с полиэстеровым или же полипропиленовым диэлектриком. Продукция сертифицирована в соответствии DIN EN 9000 и формирование всех продуктов отвечает IEC/CECC. СК выделяются высоким качеством и размерными данными [43].

ТЭЭМП – компания находится в городе Химки, создает эффективные СК и модули на их базе. Каждый год предприятие может изготавливать до 200 тысяч суперконденсаторных (СК) ячеек. Разработкой электролитов для суперконденсаторов занимался Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» – один из главных партнеров компании «ТЭЭМП». Особенностью суперконденсаторов ТЭЭМП считается модульная разработка, которая гарантирует низкое внутреннее сопротивление, и, в соответствии с этим, высокие импульсные токи. Токовые поля распределяются размеренно по ячейке, что гарантирует равномерное тепловыделение и меньший износ интенсивного слоя электрода, что гарантирует долговечность [44].

Феникс – компания, которая выпускает СК, а также СК модули и сборки на их основе как с преобразователями, так и без преобразователя напряжения. ООО «УКФ» реализовывает и проводит испытания СК накопителей для мощного промышленного оборудования. После завершения серии испытаний начнется серийное производство. Компания ООО «УКФ»

представляет сборки суперконденсаторные бескорпусные (СКБК) специально разработанные для применения в корпусах заказчика и позволяющие использовать все преимущества СК по минимальной цене [45].

В таблице 1 показаны технические характеристики наиболее распространенных суперконденсаторов, емкостью 3000 Ф:

- MaxwellTechnology (США) [42];
- Wima (Германия) [43];
- ТЭЭМП (Россия, г.Химки) [44];
- Феникс (Россия, г.Москва) [45].

Таблица 1 - Технические характеристики суперконденсаторов

Параметр	Единицы измерения	Производитель			
		Maxwell	Wima	ТЭЭМП	Феникс
Напряжение максимальное	В	2,85	2,7	3,0	2,85
Напряжение номинальное	В	2,7	2,5	2,85	2,7
Внутреннее сопротивление	МОм	0,29	0,7	0,15	0,26
Максимальный ток	А	1900	3000	1000	2396
Ток утечки	мА	5,2	-	5,0	-
Масса	г	510	615	450	525
Удельная мощность	кВт/кг	12	-	14	-
Удельная энергия	Вт*ч/кг	6	7	7.52	-
Накапливаемая энергия	Вт*ч	3,04	-	3,4	-
Диапазон рабочих температур	С	от -40 до +65	от -30 до +65	от -55 до +65	от -40 до +65
Количество циклов		1000000	-	1000000	1000000
Заявленный срок службы	лет	10	5	5	10



Стоимости суперконденсаторов емкостью 3000 Ф, с официальных сайтов производителей за единицу товара (по данным на 14.05.22г):

- MaxwellTechnology – 1695,66 рублей;
- Wima – 1690,25 рублей;
- ТЭЭМП – 1918,10 рублей;
- Феникс – 1757,18 рублей.

Компания Maxwell Technologies является одним из лидирующих производителей СК, заявленный срок службы 10 лет. Максимальная сила тока 1900 А и напряжение 2,85 В. Но отечественная продукция компании «ТЭЭМП» не уступает по многим параметрам. СК успешно справляются при температурах до -55 С. Они отличаются от остальных низким внутренним сопротивлением 0,15 МОм, а это значит, способность обеспечить большие импульсные токи. Собственная конструкция ячеек и модулей позволяет снизить массу и размер СК сборки ячеек на 30% по сравнению с аналогичными устройствами.

Также существуют некоторые уникальные решения, к числу которых относятся сверхтонкие суперконденсаторы DMHA14R5V353M4AT от компании Murata (рисунок 3). Данные суперконденсаторы имеют толщину 0,4 мм [52].

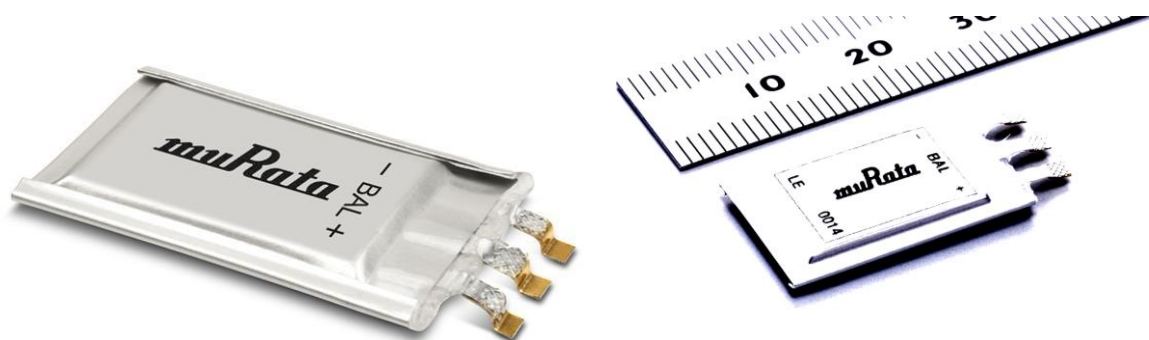


Рисунок 3 – Сверхтонкий суперконденсатор от компании Murata [52]

Суперконденсаторы Murata – трехвыводные и представляют собой последовательное включение двух суперконденсаторов, выполненных в одном корпусе (см. рисунок 1.3), с отводом от точки их внутреннего соединения.

Выводы по первому разделу:

Вопросы использования суперконденсаторов являются актуальными, как видно из обзора литературы.

Обзор аналогичных технических решений показал, что уже существуют подобные устройства, которые гарантируют запуск ДВС в различных условиях эксплуатации транспортных средств. В свою очередь снижая нагрузки на аккумуляторную батарею и бортовую сеть транспортного средства.

Технические характеристики и параметры СК такие как: максимальное напряжение, ток утечки, количество циклов разных фирм идентичные, но СК компании ТЭЭМП превосходят другие по удельной и накапливаемой энергиям, это на 10% больше чем у СК фирмы Maxwell.



«Процесс сохранения энергии в суперконденсаторе выполняется за счет разделения противоположных по знаку зарядов, сопровождающихся образованием на электродах значительных по амплитуде потенциалов. Разность потенциалов обуславливается величиной напряжения распада электролита. При использовании водяных электролитов напряжение распада электролита составляет около 1 Вольта (В); при использовании органических электролитов 2,5 – 4 В.

Процессы, протекающие в ДЭС на границе раздела двух проводников, схожи с теми, которые протекают в обыкновенном конденсаторе, вследствие этого – расстояние между несущими различный заряд обкладками составляет несколько межатомных длин. Одна обкладка представлена электронами в электронном проводнике, а вторая – сорбированными на поверхности электронного проводника положительными ионами электролита. На втором электроде слой формируется из-за обеднения электронами электронного проводника и сорбции отрицательных ионов электролита. Для обеспечения максимальной емкости конденсатора необходимо обеспечить большую поверхность контакта электролита с электрическим проводником. Водяной электролит, помимо электродов, заключен в пористый полимерный либо асбестовый сепаратор, разделяющий электроды для предотвращения их замыкания» [13].

Суперконденсаторы обладают большой емкостью и низким внутренним сопротивлением, поэтому при подключении разряженного СК к источнику питания или аккумулятору создается большой зарядный ток, который может вызвать включение защиты от перегрузки по току и отключению источника питания. Для решения этой проблемы необходимо использование устройств ограничения тока заряда СК (более перспективными в настоящее время являются специальные микросхемы ограничения тока заряда). Главным недостатком СК является малое значение напряжения, которое не превышает 3 В. С целью увеличения напряжения, СК подключают последовательно. При этом напряжения на суперконденсаторах ввиду разброса значений ёмкостей

и токов утечки становятся неравными, т.е. разбалансированными. Для выравнивания напряжений СК разработаны множественные методы и системы балансировки.

«Поверхность хранения заряда обычных электролитических конденсаторов состоит из тонких пластин плоского проводящего материала. Высокая емкость достигается за счет наматывания большой длины материала. Конденсатор разделяет свои заряженные пластины диэлектрическим материалом: пластиковыми, бумажными или керамическими пленками. Чем меньше по толщине диэлектрик, тем больше площадь может быть создана в пределах определенного объема. Ограничения толщины диэлектрика определяют достижимую площадь поверхности. Площадь поверхности обеспечивается применением пористого материала на основе углерода. Площадь деления заряда суперконденсатора обуславливается размерами ионов в электролите, которые притягиваются к заряженному электроду. Она много меньше, чем может быть достигнуто с внедрением обычных диэлектрических материалов. Использование большой площади поверхности и маленькой площади деления заряда дает преимущество суперконденсаторам – его кардинально большую емкость по сравнению с обычными конденсаторами» [5].

Конструкция суперконденсаторов зависит от области применений и условий в которых он будет применяться. Существует несколько исполнений: цилиндрическое; плоское. На рисунке 5 пример исполнения конструкции: цилиндрического (а) и плоского СК (б).

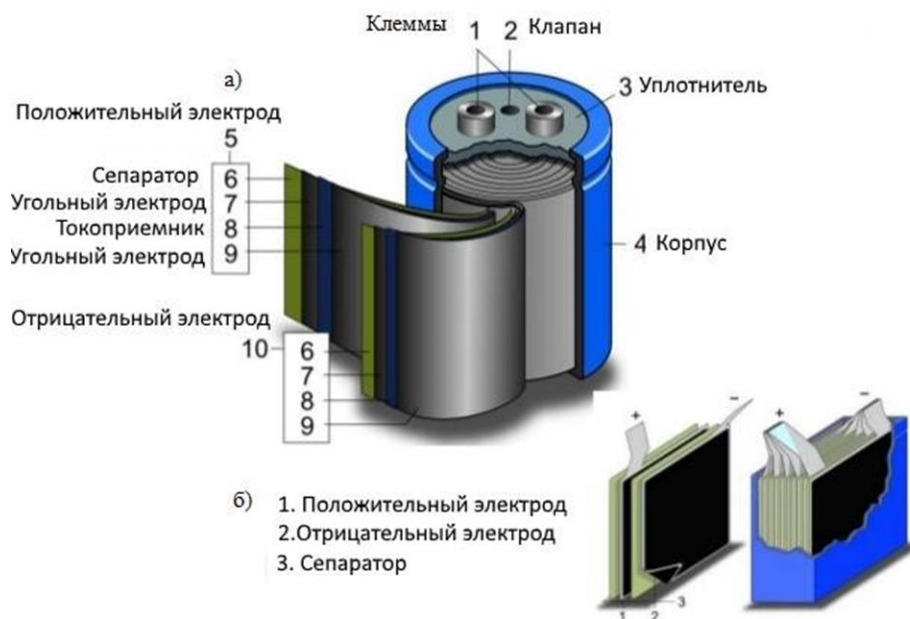


Рисунок 5 – Конструкция суперконденсаторов: а) цилиндрического  
б) плоского [26]

Общее между цилиндрическим и плоским суперконденсатором заключается в том, что они состоят из положительного электрода, отрицательного электрода, разделителя между этими двумя электродами и электролита, заполняющего пористости двух электродов и сепаратора.

Технология сборки СК может варьироваться. В суперконденсаторах плоской или призматической формы каждый однополярный слой пористого электрода соединен с шиной, обеспечивающей контакт электрода с внешней клеммой (внешним токовым терминалом).

В суперконденсаторах цилиндрической формы электроды наматываются в рулоны. Электроды имеют удлинения фольги, которые затем привариваются к клеммам, чтобы обеспечить возможность прохождения тока за пределы СК [20].

Продукция суперконденсаторов очень широка. Суперконденсаторы используются в различных отраслях промышленности для обеспечения многих потребностей в энергии и мощности. Они охватывают как миллиамперную или милливаттную мощность, так и тысячи ампер тока или

мегаватты. Основными отраслями, где использование суперконденсаторов наиболее распространено, являются: автомобильная промышленность, гибридный и электротранспорт, энергетика и промышленность, бытовая электроника и портативные устройства [10].

«Автомобильная промышленность – системы старт/стоп, стабилизация бортовой сети, усилители электроприводов, активная подвеска, электромагнитные клапаны, стартерные генераторы, электрические двери, рекуперативное торможение, гибридный электропривод, активные ремни безопасности, GPS.

Транспорт (трамвай, метро и т.п.) - рекуперативное торможение, запуск двигателей, стабилизация бортовой сети, аварийное открывание дверей, электропитание трамваев, компенсация падения напряжения.

Промышленность - бесперебойное электропитание, системы контроля ветровых турбин, буферизация переходных процессов, автоматическое считывание показаний счетчика, резервное копирование питания лифтов, аварийное питание защитных дверей, вилочные погрузчики, краны, электроприводы и телекоммуникации.

Бытовая электроника и портативные устройства – ноутбуки, цифровые фотоаппараты, автоматизированные устройства, игрушки, фонарики, солнечное акцентное освещение и пейджинговые устройства для ресторанов, кассовые аппараты.

Широкое применение СК в вышеуказанных и других индустриях, основывается тем, что они являются эффективным решением в ряде применений, таких как: компенсация импульсной мощности, кратковременное поддержание нагрузки, основной источник энергии/мощности и источник энергии для резервного копирования» [17].

«СК подходят для работы с импульсными нагрузками. Процесс накопления энергии в суперконденсаторе не является химической реакцией, поэтому скорость заряда/разряда суперконденсаторов высокая. Суперконденсаторы имеют низкое внутреннее сопротивление. Это

обеспечивает большие токи на выходе, вследствие этого устанавливаются параллельно с батареями, для обеспечения комфортного режима работы батарей, тем самым увеличив срок их службы. Суперконденсаторы разгружает батарею, принимая на себя большие пиковые токи. Эта методика используется для таких устройств, как цифровые камеры, гибридные системы приводов и рекуперативное торможение» [8].

«СК используются как временные источники энергии, где мгновенная отдача энергии может быть затруднена. Это, например, системы резервного электроснабжения, использующие дизель-генераторы, топливные элементы или маховики в качестве источника резервного питания. Для всех этих систем требуется кратковременное поддержание нагрузки на время запуска источника резервного питания. СК в подобных использованиях существенно эффективнее традиционных аккумуляторных источников блока питания (ИБП) за счет существенно большего срока службы, меньших размеров, отсутствия требований по обеспечению климатических условий, пожаро и взрывобезопасности, не обслуживаемости» [7].

«Для применений, которые требуют мощности только в течение коротких промежутков времени или приемлемых для обеспечения короткого времени зарядки перед использованием, суперконденсаторы могут применяться в качестве основного источника энергии. Примерами такого использования являются игрушки, аварийные фонари, устройства пейджинга в ресторане, кассовые аппараты, солнечное зарядное освещение, источник энергии для различных аварийных систем и путей эвакуации.

Суперконденсаторы могут поддерживаться в полном заряженном состоянии и действовать как резервный источник энергии/мощности при выполнении критически важных функций в случае отключения основного электроснабжения. СК в настоящее время массово применяются для резервирования постоянного запоминающего устройства и часов реального времени, для обеспечения резервного питания процессов передачи



сообщений об отключении питания, в микроконтроллерах и платах памяти» [19].

Потребители энергии функционируют в двух режимах – стационарном и переходном. Стационарный режим – это режим, при котором уровень потребления энергии почти никак не меняется. Переходный режим – это режим, при котором совершается неожиданное изменение потребления энергии как в сторону возрастания, так и в сторону уменьшения.

«При использовании СК в качестве источников мощности появляется вспомогательная вероятность рекуперации энергии торможения. На основе СК формируется система накопления энергии, которая считается вспомогательным источником энергии. Комбинированная энергетическая установка оказывается системой из двух энергетических источников. Осуществление сохраняющих энергию технологий сформирована на использовании комбинированных или гибридных энергетических конструкции, в которых применяется физически известный источник энергии (АКБ) и источник мощности (СК). Источник энергии – генератор, стационарное электропитание, аккумуляторная батарея или батарея топливных элементов, обеспечивает работу системы в стационарном режиме работы. Источник мощности – система сохранения энергии на базе суперконденсаторов. На рисунке 6 приведены типы комбинированных энергоустановок, в которых реализуются энергосберегающие технологии с применением систем накапливания энергии» [21].



Рисунок 6 – Комбинированные электроустановки с использованием СК [27]

В автомобильных системах, сохранение энергии добывается за счет возобновления до 25% энергии, используемой при торможении автомобиля. Кроме того, в таких автомобильных системах можно экономить энергию, снижая мощность основного источника энергии и работая только стационарно, так как пиковые нагрузки компенсируются дополнительным источником энергии. Использование комбинированных автомобильных электростанций, которые запускаются не с широко используемым, форсированным двигателем внутреннего сгорания, а с экологически чистой энергией СК, позволяя тем самым более чем в десять раз уменьшить выбросы загрязняющих веществ. Кроме того, малообъемные двигатели внутреннего сгорания на гибридных электростанциях могут уменьшить затрату топлива более чем в два раза [16].

Использование систем хранения энергии СК позволяет уменьшить установленную емкость батарей, в два раза от 450 до 250 Ач, увеличить срок службы аккумуляторов в 1,5 – 2 раза; сэкономить около 16т топлива в год за счет сокращения времени простоя дизеля [18].

Особенно перспективным является использование суперконденсаторных систем хранения энергии в переработанных

энергетических системах, которые производят электроэнергию на основе элементов водородного топлива в качестве почти безальтернативного буферного устройства, которое обеспечивает пиковую нагрузку потребителей [14].

## **2.1 Эксплуатация суперконденсаторов**

Суперконденсаторы способны работать в диапазоне между номинальным напряжением и нулевым напряжением. Номинальное напряжение определяется электрохимической устойчивостью диэлектриков внутри конденсатора. В СК используется органический электролит. Преимуществом органического электролита перед водяным электролитом, является более высокое рабочее напряжение.

В зависимости от частоты и продолжительности пиков напряжения, срок службы СК будет уменьшаться. Эффективное использование суперконденсаторов достигается при использовании широкого диапазона рабочих напряжений.

Большинство электроники имеет ограниченный диапазон напряжения при использовании, тем самым ограничивая эффективное напряжение питания СК, хотя сам СК не имеет ограничений.

Возможно эффективно использовать примерно 75% доступной энергии СК, если применение позволяет работать в диапазоне от номинального напряжения до половины номинального напряжения СК.

«СК ячейки не должны работать с напряжением, превышающим максимального напряжения этого СК. Превышение верхнего порога напряжения сокращает срок службы СК, т.к. может привести к выделению газов, образующихся в суперконденсаторах из-за длительного перенапряжения и выходу из строя. Степень влияния превышающего напряжения на работу ячейки зависит от величины и времени, в течение которого конкретная ячейка работает в этом состоянии» [25].

Максимальное, рекомендуемое для долговечной надежной работы всех типов ячеек значение непрерывного удельного тока DC составляет 50 мА на Фарад. Суперконденсаторы работают эффективно при токах выше, чем это рекомендуемое значение, но может произойти отрицательное воздействие для них в зависимости от величины удельного тока и его продолжительности рабочего цикла / импульсов высокого тока в использовании.

СК часто используются с высоким напряжением, которое требует их последовательного соединения. Создание такой линейки ячеек или модулей требует тщательного рассмотрения требований к возможным утечкам и сопротивлению изоляции. Необходимо сверяться со спецификацией о сопротивлении изоляции модулей, соединяемых последовательно, чтобы узнать, какой зазор требуется между модулями или другими заземляющими конструкциями. В случае создания модуля из одиночных СК необходимо подбирать рабочее напряжение модуля в окончательной конфигурации последовательно соединяемых СК и убедиться, что модуль спроектирован с требуемыми токами утечки и зазорами, а также с соответствующими изоляционными материалами. Тестирование на сопротивление изоляции всегда должно проводиться на отдельных модулях и на последовательно соединенных модульных цепях, чтобы точно оценить безопасность изоляции. В случае, когда изоляция недостаточна на уровне модуля, и зазор не является достаточным на системном уровне, максимальное рабочее напряжение последовательной цепи должно быть доведено до безопасного уровня. В общем случае напряжение использования выше 50 В считается потенциальной опасностью для человеческого организма.

Накопление энергии в СК основан на электрическом взаимодействии и не зависит от химических реакций в отличие от аккумуляторных батарей, поэтому скорость заряд / разряд СК определяется не химическим, а электромагнитным взаимодействием. СК могут заряжаться различными способами. Это может быть источник постоянного тока/мощности или зарядное устройство от сети переменного тока.

Другим преимуществом органического электролита является его низкая точка замерзания. Это позволяет использовать СК в широком диапазоне температур, преимущества особенно заметны при более низких температурах. Производительность СК не существенно зависит от температуры, поскольку хранение заряда не является химической реакцией, емкость очень стабильна во всем диапазоне рабочих температур СК. На сопротивление СК влияет подвижность ионов внутри электролита, таким образом, когда температура падает ближе к точке замерзания электролита, подвижность ионов снижается, что приводит к более высокому сопротивлению.

Эксплуатация при температурах ниже  $-40\text{ C}$  невозможна. Связано это с тем, что электролит в СК при такой температуре и ниже, замерзнет и не сможет выполнить свою функцию.

Эксплуатация с температурой выше  $65\text{ C}$  невозможна. Связано это с тем, что при такой температуре и выше начинает выкипать электролит, что в конечном итоге, приводит повышению давления, а также происходит быстрая деградация емкости и увеличению внутреннего сопротивления. Для контроля температуры СК применяются датчики, которые устанавливаются на положительную или отрицательную клемму. Это самые лучшие места для контроля температуры, поскольку они не покрыты чем-либо подобным лакам или термоусадочной пленкой и поэтому непосредственно доступны для точного измерения температуры.

Не рекомендовано удалять термоусадочную пленку, т.к. воздействие на корпус ячейки может привести к короткому замыканию, в случае контакта или близкого расстояния с другими проводниками.

Суперконденсаторы способны эффективно работать при высоком уровне влажности. Во время работы не требуются особые меры предосторожности, только лишь предотвращение образования и накопления конденсата, которые могут мешать работе любого электрического устройства.

Влажность при хранении отрицательно влияет на суперконденсаторы. Они поставляются в упакованных в вакууме пакетах, для исключения попадания влаги при хранении и транспортировки. Силовые клеммы/терминалы СК чувствительны к окислению и, в конечном итоге, к коррозии из-за высокого уровня влажности в течение длительных периодов времени. При пайке на месте клеммы/терминалы больше не подвержены этим коррозионным воздействиям. При хранении СК необходимо сохранять оригинальную упаковку без повреждений. Если оригинальная вакуумная упаковка повреждена или открыта и СК остается после использования, необходимо повторно запечатать упаковку, введя вакуум, чтобы клеммы не подвергались воздействию влажности.

Правильный уход за суперконденсатором в отношении защиты от влажности при хранении, необходим для предотвращения проблем с пайкой. Окисленные клеммы/терминалы очистить с помощью абразивной наждачной бумаги/ткани. Необходимо удалять только окисление, а не удалять лужение, нанесенное на заводе на терминалы/клеммы. Удаление оловянного слоя приведет к затруднению или невозможности припаивания терминалов/клемм.

Все суперконденсаторы выдерживают работу при низком давлении, без отрицательных последствий. Допускается работа при высоком давлении (до 1 атмосферы). Испытания суперконденсаторов при давлении выше 1 атмосферы не проводились, поэтому необходимо выполнить специальное тестирование, для убеждения, что в результате режима работы с повышенным давлением нет отрицательных воздействий.

В отличие от многих накопителей анод и катод СК состоят из одного и того же материала. При одинаковых материалах положительной и отрицательной клемм и корпуса, суперконденсатор не имеет истинной полярности.

В случаях если терминалы/клеммы СК имеют обозначение полярности, рекомендуется их соблюдать.

Степень отрицательного воздействия изменения полярности на СК может меняться в зависимости от серии. В частности, для ячеек серии МС срок службы будет значительно сокращен, когда ячейка будет соединена положительно обозначенной клеммой к отрицательной клемме источника заряда. Это относится и для ячеек серии ВС, но в меньшей степени. В ячейках серии РС изменение полярности может не показать каких-либо отрицательных последствий для работы до тех пор, пока ячейка не будет снова повторно подключена после использования в обратном состоянии. В этот момент ячейка будет показывать ухудшенные характеристики производительности, срок службы сократится.

Таким образом, следует обратить внимание на правильную полярность ячеек при их подключении, чтобы избежать негативных последствий, приводящих к сокращению срока службы и ухудшению производительности.

В зависимости от использования, условий эксплуатации где требуется увеличение напряжения, либо увеличение емкости, необходимо обеспечить сборки определенного количества суперконденсаторов. Существует два способа соединений СК: параллельное; последовательное – рисунок 7. При последовательном соединении увеличивается рабочее напряжение, но уменьшается емкость кратно количеству СК в цепи. При параллельном соединении увеличивается емкость СК, напряжение остается неизменным.

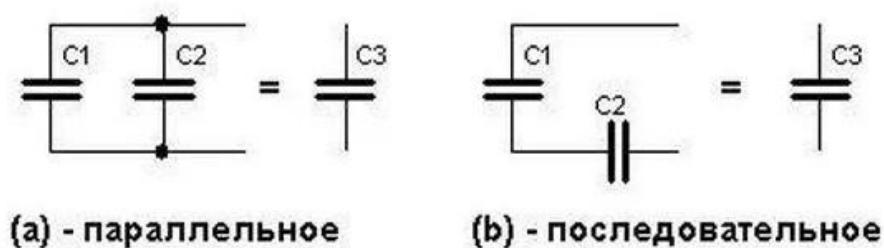


Рисунок 7 – Схемы соединений суперконденсаторов

Теоретически срок службы СК неограничен, но с учетом эксплуатационных фактов таких, как: температура, влажность, перегрев,

перезаряд, фактический срок службы ограничивается 5-10 годами. Это связано со старением материалов, старением электролита.

Окончание срока службы наступает, когда производительность СК больше не соответствует требованиям конкретного использования. Срок службы может отличаться от указанного в спецификации.

При необходимости замене вышедшего из строя СК, необходимо учитывать его номинальное напряжение и емкость. Новая ячейка СК будет иметь более высокую емкость, чем остальная часть цепи. Это приведет к увеличению напряжения на других ячейках и дальнейшему ускорению процесса их старения. Этот эффект будет еще более усугубляться, если новая ячейка отличается от других ячеек по каким-либо характеристикам.

При замене полной сборки СК несмотря на более высокую стоимость, этот способ не только гарантирует правильную сбалансированность ячеек, но также обеспечивает дополнительный срок службы системы.

## **2.2 Методы балансировки суперконденсаторов**

«Так как последовательно соединенные суперконденсаторы имеют разбросы характеристик, то с течением времени разброс возрастает. Зарядные устройства осуществляют только контроль общего напряжения на всей цепочке батарей и обеспечивают необходимый ток заряда. Расхождение между параметрами, такими как: емкость, внутреннее сопротивление, ток утечки – считается причиной различия необходимого времени для заряда накопленной энергии в отдельных накопителях. К примеру, ячейка с меньшей емкостью заряжается быстрее, чем ячейка с большей емкостью, если через нее протекает одинаковый ток. После полной зарядки, следует прекратить заряд либо до заряжать суперконденсаторы током, равным током утечки, т.к. продолжение заряда приведет к повышению напряжения на одной ячейке выше допустимого и случится ускоренное деградирование элемента. СК могут безопасно работать только при нормальном напряжении



заряда. В случае если величина напряжения превышает 2,8 В, в элементе начинают происходить необратимые последствия, которые приводят к повышенному нагреву компонента и стремительному его выхода из строя. В частности, происходит увеличение температуры на каждые десять градусов, относительно номинальной температуры, тем самым уменьшая срок службы суперконденсатора в 2-3 раза.

Учитывая все перечисленные выше особенности, сохранение и обеспечение максимального срока службы суперконденсатора возможно только в том случае, если происходит постоянный контроль и мониторинг состояния отдельных ячеек. Для решения проблемы неравномерного заряда суперконденсаторов, следует применять методы балансировки (выравнивания), обеспечивающие оптимальное значение напряжения, емкости и отдельных элементов электрохимических источников тока. Данные системы могут являться как автономными, так и управляемыми. Невозможно определить один лучший метод балансировки, так как любой из них имеет свои преимущества и недостатки» [40].

Понимая принципы работы суперконденсаторов, его рекомендаций по использованию, можно предложить наиболее лучшие методы балансировки применимые в автотранспортных средствах рисунок 8.

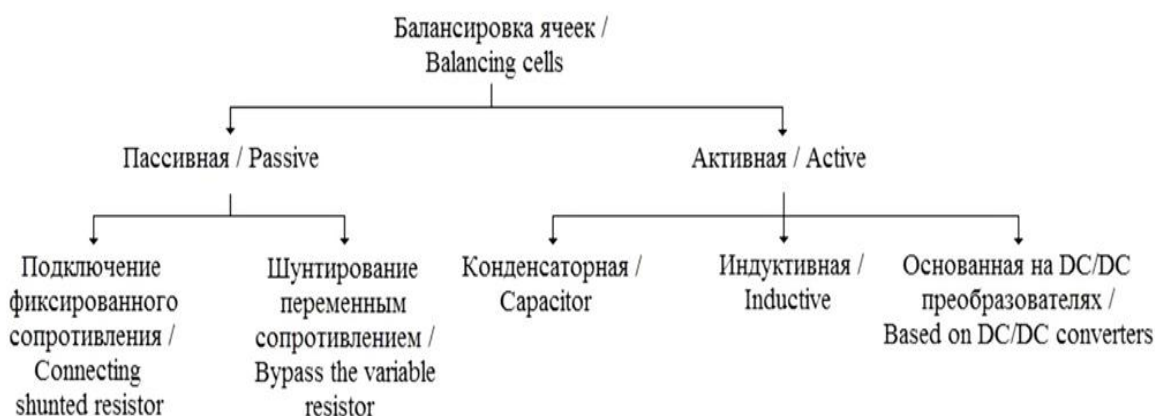


Рисунок 8 – Способы балансировки накопителей энергии СК [40]

«При разработке методов и устройств используются общеинженерные подходы. На основе изучения и анализа принципов работы систем выравнивания рассмотрены схемотехнические решения, основанные как на одном методе выравнивания заряда, так и на комбинации таких методов» [40].

### 2.2.1 Метод пассивной балансировки

Схема системы балансировки суперконденсаторов методом подключения резистора с постоянным сопротивлением показана на рисунке 9 а.

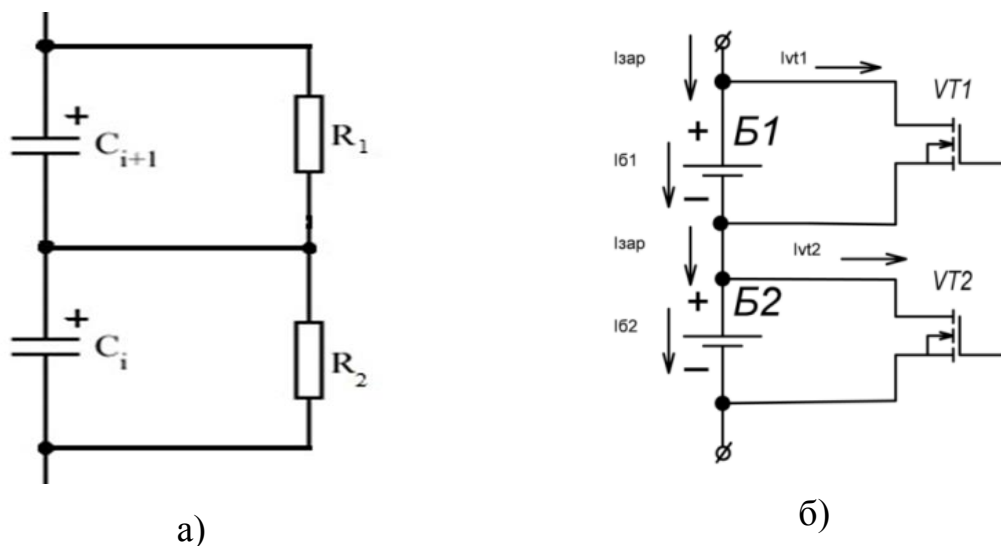


Рисунок 9 – Схема пассивной балансировки конденсаторов с помощью резистора; а) резистор с постоянным сопротивлением; б) резистор с переменным сопротивлением [40]

«Суть данного метода заключается в шунтировании резистором СК ячейки, которая уже заряжена до 100%, но при этом не завершен заряд всего накопителя. Резисторы R1-R2 ограничивают ток через ячейки и тем самым препятствуют перезаряду СК. Главным достоинством рассматриваемого метода является простота его реализации. Разновидностью способа, представленного на рисунке 9 б, является вариант шунтирования ячейки, достигшей максимального заряда, резистором с не постоянным, а с

переменным сопротивлением. Этого можно добиться, поменяв в схеме рисунок 2.6 а. резисторы R1-R2 на транзисторы и контролируя их сопротивление с помощью управляющего сигнала (рисунок 2.6 б)» [40].

### 2.2.2 Методы активной балансировки

«Суть активной балансировки заключается в обеспечении требуемого напряжения на ячейках суперконденсатора за счет перераспределения энергии от ячеек с высоким уровнем заряда к ячейкам с его более низким уровнем заряда» [40].

Один из методов – применение стабилитронов (рисунок 10).

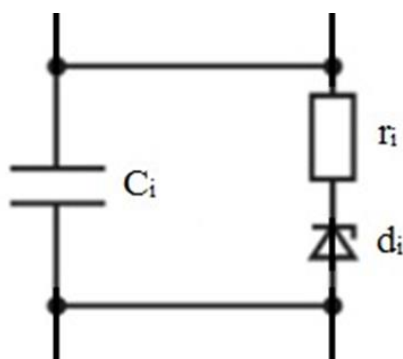


Рисунок 10 – Схема балансировки СК с помощью стабилитрона [2]

«Стабилитрон  $d_i$  в обратном смещении шунтирует суперконденсатор при перенапряжении, а в прямом - при переполюсовке. Для ограничения тока стабилитрона можно применять резистор  $r_i$ . Данный метод хорошо подходит для борьбы с медленным механизмом устройством дисбаланса, т.к. требуются небольшие токи шунтирования, и стабилитрон в закрытом состоянии может незначительно повышать ток утечки СК. Устранение быстрого механизма балансировки требует огромных токов шунтирования, сравнимых с величиной максимального зарядного тока. Однако на современном рынке микроэлектроники не так легко найти низковольтные стабилитроны мощностью более 0.5 Вт» [40].

Другой метод активной балансировки – применение операционного усилителя, метод, осуществляющий балансировку напряжений СК вне

зависимости от уровня заряда модуля. На рисунке 11 представлена схема, выравнивающая напряжение с помощью операционного усилителя.

«Операционный усилитель DA1 включен согласно схеме повторителя напряжения. Два равных сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  делят напряжение пары суперконденсаторов  $C_i$  и  $C_{i+1}$  пополам, и повторитель пытается установить это напряжение на СК  $C_i$ , стабилизируя его заряд выходным током, проходящим через токоограничивающее сопротивление  $r$ . Автоматически выравняется и напряжение на СК  $C_{i+1}$ , так что напряжения на конденсаторах со временем оказываются равными. Для выравнивания напряжений на всех  $N$  суперконденсаторах необходимо  $N$  таких схем, подключенных к парам суперконденсаторов:  $C_1, C_2 \dots C_{N-1}, C_N$ » [40].

Корректирующий заряды СК ток (нагрузочная способность операционного усилителя) может быть увеличен внедрением в схему двухтактного транзисторного повторителя.

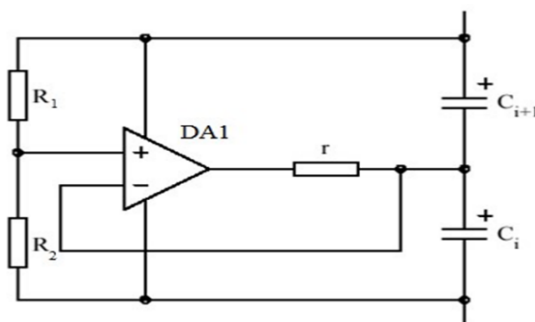


Рисунок 11 – Схема балансировки на базе операционного усилителя [2]

К недостатку можно отнести громоздкость схемы, так как потребуется  $N$ -количество схем, и схема должна подсоединяться не к одному, а к двум СК.

Еще один метод активной балансировки - с помощью переключения дополнительного конденсатора (рисунок 12).

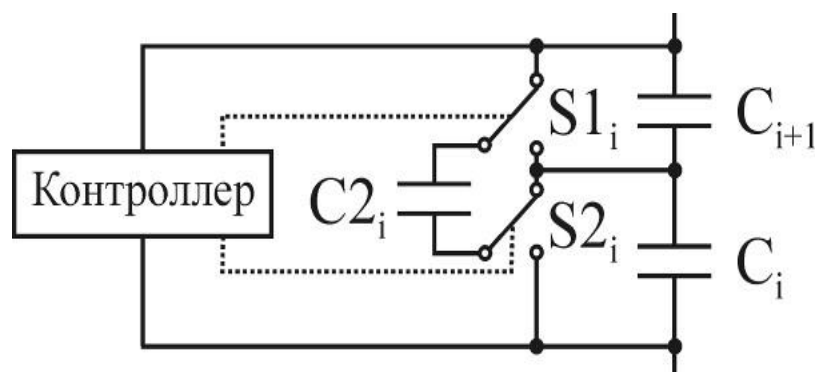


Рисунок 12 – Схема балансировки с помощью переключения дополнительного конденсатора [2]

«Конденсатор  $C2_i$  с помощью ключей  $S1_i$ ,  $S2_i$ , управляемых контроллером, подключается параллельно к одному из СК  $C_i$  либо  $C_{i+1}$ , заряд которого больше, а затем к СК, заряд которого меньше. После серии переключений напряжения на СК выравниваются. Несмотря на сложность схемы балансировки и массивность размеров модуля за счёт внедрения дополнительных конденсаторов большой ёмкости, метод рассматривается как перспективный, в случае если одно из основных требований к эксплуатации модуля – высокий к.п.д.» [40].

Последний метод активной балансировки - применение DC-DC преобразователей.

В связи с развитием импульсной электроники, в частности, импульсных преобразователей напряжения типа DC-DC стало перспективным использованием подобных преобразователей с целью устранения проблемы балансировки напряжений СК.

Метод балансировки зарядом DC-DC преобразователей, успешно применяется, при необходимости заряда - очень большими токами. Пример схемы балансировки с помощью DC-DC преобразователей, показан на рисунке 13.

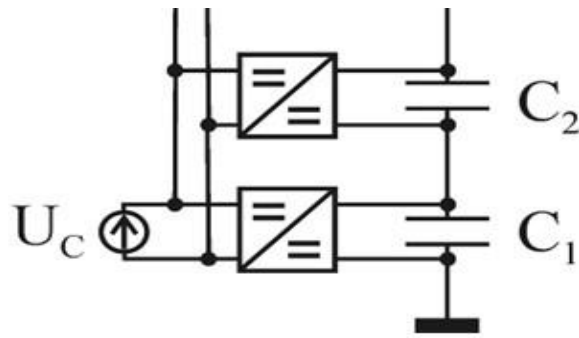


Рисунок 13 – Схема балансировки с помощью DC – DC преобразователей [2]

«Заряд каждого СК модуля осуществляется от отдельного DC-DC преобразователя с гальванической развязкой входа и выхода. Напряжение источника электрической энергии  $U_C$  определяет напряжение, до которого будут заряжаться СК. Разброс напряжений станет обусловлен только разбросом характеристик DC-DC преобразователей. Основной недостаток метода – ограничение возможностей эксплуатации модуля: балансировка гарантируется только лишь при заряде СК от источника  $U_C$ , а не от силовых выводов модуля, которые только отдают ток» [40].

Выводы по второму разделу:

В отличие от аккумуляторных батарей, СК обладают одинаковой эффективностью при заряде и разряде, т.е. разряжается суперконденсатор очень быстро без ограничения тока (используя ток, требуемый в конкретном использовании), и далее быстро принимает заряд.

Основными отраслями, применений суперконденсаторов являются: автомобильная промышленность, гибридный и электротранспорт, энергетика и промышленность, бытовая электроника и портативные устройства

Рассмотрены рекомендации эксплуатации суперконденсаторов, основными из них являются: эксплуатация суперконденсаторов при температурах, рекомендованных производителем (от -40 до + 60 С); недопущение превышения максимального напряжения заряда; не рекомендуется менять полярность СК (если она обозначена); при выходе из

строю, рекомендовано заменить на СК характеристики которого полностью совпадают с вышедшим из строя, либо заменить всю сборку элементов.

Потери эффективности СК связаны с внутренним сопротивлением, которое увеличивается в процессе его работы. При эксплуатации эффективность СК составляет 98%.

Проблемы СК связаны с режимом заряда большими токами. Из-за низкого рабочего напряжения СК для его увеличения необходимо последовательное соединение. Разброс параметров СК батареи может привести к неравномерности заряда и недопустимому повышению напряжения отдельного СК.

Рассмотрены различные методы балансировок суперконденсаторов, которые служат для существенного повышения срока службы элемента. Применение любого метода балансировки суперконденсаторов для эксплуатации, позволит существенно повысить срок службы СК. Каждый метод балансировки имеет, как свои преимущества, так и недостатки.

### **3 Определение характеристик суперконденсатора для обеспечения работы бортовой электрической сети автомобиля**

#### **3.1 Потребители электрической энергии автомобиля**

Потребители энергии бывают: основные, длительные, кратковременные.

К основным относятся:

- топливная система (электрический бензиновый насос);
- система впрыска (топливные форсунки);
- система зажигания (свечи зажигания, катушки);
- система пуска двигателя (стартер);
- система освещения (лампы ближнего/дальнего/противотуманных/габаритных огней).
- система отопления (мотор отопителя салона);

К дополнительным относятся (работа неограниченна по времени):

- система охлаждения (вентилятор охлаждения, электрическая помпа);
- система активной безопасности;
- система пассивной безопасности;
- автоматическая коробка передач (соленоиды, блок управления);
- электроусилитель рулевого привода;
- кондиционер (вентилятор охлаждения радиатора);
- аудиосистема (магнитола, динамики);
- система навигации (навигатор, эра глонасс).

К кратковременным относятся (работа до 1 минуты):

- свечи накаливания (дизельный ДВС);
- звуковой сигнал;
- прикуриватель.



### 3.2 Порядок выбора суперконденсатора

Как уже отмечалось выше, суперконденсаторы могут использоваться либо в качестве основного накопителя энергии, либо в качестве буферного элемента при работе в связке с основным аккумулятором. Расчет емкости суперконденсатора в этих случаях будет отличаться, но основные шаги будут одинаковыми.

Необходимо определить основные параметры суперконденсатора – емкость, рабочее напряжение и максимально выходной ток.

Суперконденсаторы не любят перенапряжений, по этой причине при выборе подходящего накопителя следует позаботиться о соблюдении рабочего напряжения. Для увеличения рабочего напряжения можно использовать последовательное включение суперконденсаторов.

Далее следует рассчитать величину емкости. Рассмотрим алгоритм расчета, предложенный компанией SPSCAP [41]. Для начала необходимо выбрать сценарий разряда суперконденсатора. Разряд может происходить либо с постоянным током, либо с постоянным напряжением.

«При разряде с постоянным током, ток разряда имеет постоянное значение, а емкость будет рассчитываться по формуле:

$$C = It / (V_{work} - V_{min}) \quad (1),$$

где,  $V_{work}$  – номинальное рабочее напряжение, В;

$V_{min}$  – минимальное напряжение, В;

$I$  – ток разряда (постоянная величина в данном случае), А;

$t$  – время разряда, с.

При выборе конкретной модели суперконденсатора необходимо предусмотреть некоторый запас по емкости, а именно на 15% больше, чем по рассчитанному значению. Кроме того, следует учесть температурную зависимость емкости. После выбора конкретной модели суперконденсатора следует свериться с температурной характеристикой, чтобы убедиться в том,

что емкость превышает рассчитанное значение во всем диапазоне рабочих температур.

При разряде с постоянной мощностью, мощность разряда остается постоянной, а емкость будет рассчитываться по формуле:

$$C = 2Pt / (V_{work}^2 - V_{min}^2) \quad (2),$$

где,  $V_{work}$  – номинальное рабочее напряжение, В;

$V_{min}$  – минимальное напряжение, В;

$P$  – мощность разряда (постоянная величина в данном случае), Вт;

$t$  – время разряда, с.

В данном случае также следует предусмотреть некоторый запас и температурную зависимость емкости» [41].

### 3.3 Определение емкости суперконденсатора

Для подбора емкости суперконденсатора необходимо знать мощности потребителей электрической энергии автомобиля. Наиболее мощными являются:

- Система пуска ДВС – стартер (Номинальная мощность стартера у автомобилей с двигателями объемом 1.6 л. в среднем 800 – 900 Вт и 120 – 135 А.);
- Внешние осветительные приборы автомобиля – передние/задние фары (лампы ближнего/дальнего мощность одной лампы ближнего света – 55 Вт; лампы дальнего света – 60 Вт. В сумме при включении ближнего и дальнего света фар автомобиля, потребление будет примерно 300-350 Вт);
- Система отопления, охлаждения салона – мотор отопителя (в среднем потребляет 100-200 Вт).

Учитывая эти данные самым большим потребителем энергии является стартер ДВС автомобиля. Поэтому подбор емкости СК будем учитывать по его мощности потребления.

Расчет емкости будем вычислять по разряду с постоянной мощностью (см. формулу 2), т.к. при потреблении электроэнергии стартером возникает падение напряжения, сила тока при этом остается постоянной.

$$C = 2Pt / (V_{work}^2 - V_{min}^2),$$

где,  $P$  – мощность стартера (Вт);

$t$  – время пуска двигателя (с);

$V_{work}$  – номинально рабочее напряжение (В);

$V_{min}$  – минимально допустимое напряжение.

Если предполагается разряд СК в течении 1 с при постоянной мощности 900 Вт, а диапазон рабочего напряжения составляет 12,5 В – 11,5 В, то требуемая емкость составит:

$$C = 2 \cdot 900 \cdot 1 / (12,5^2 - 11,5^2) = 75 \text{ Ф}$$

Таким образом, расчетная емкость необходимого СК составляет примерно 75 Ф. С учетом необходимого запаса по емкости в 15%, примем емкость 87 Ф, с рабочим напряжением не менее 14,7 В (максимальное выдаваемое напряжение генератором автомобиля).

По расчетным данным был собран суперконденсатор (сборка) общей емкостью 100 Ф и максимально допустимым рабочим напряжением 16 В. Общий вид сборки показан на рисунке 14.



Рисунок 14 – Суперконденсатор емкостью 100 Ф

Сборка состоит из 6 последовательно соединенных суперконденсаторных ячеек: емкостью 600 Ф и напряжением 2.7 В каждая. Вес сборки составил 1020г.

Балансировочная плата (рисунок 15) построена по схеме пассивной балансировки с использованием постоянного номинала сопротивлений резисторов в 4,7 Ом.



Рисунок 15 – Балансировочная плата

Схема балансировочной платы показана на рисунке 16. В схеме присутствуют элементы:

- C1 ... C6 – суперконденсаторы по 600Ф;
- Q1 ... Q6 – биполярные транзисторы (BC857BMTF);
- U1 ... U6 – линейные регуляторы напряжений (LM1117S-2.5);
- 23 резистора номиналом по 4,7 Ом (RTT254R7JTE).

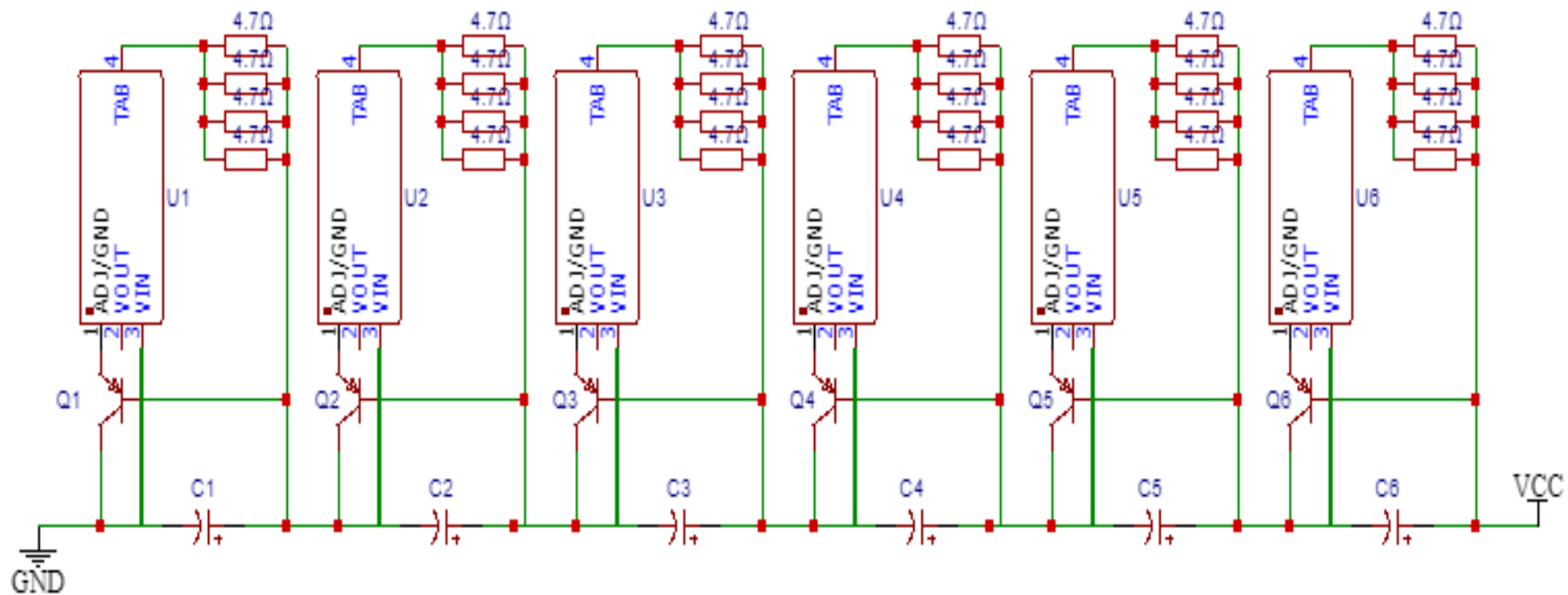


Рисунок 16 – Схема балансирующей платы

Расчет сечений подсоединяемых проводов.

Для правильного подбора минимально допустимых сечений соединяемых проводов, необходимо определить максимальную выдаваемую сборкой силу тока. Сила тока сборки определяется по формуле 3.

$$I = \frac{C_{\text{общ}} \cdot U_{1\text{элемента}}}{2}, \quad (3)$$

где,  $I$  – сила тока, А;

$C_{\text{общ}}$  – общая емкость сборки СК, Ф;

$U_{1\text{элемента}}$  – напряжение одной ячейки СК, В.

$$I = \frac{100 \cdot 2,7}{2} = 135 \text{ А}$$

Максимальная выдаваемая сила тока составила 135 А. Таким образом сечение подсоединяемых проводов будет достаточно 6 AWG т.е. 13,3 мм<sup>2</sup> с небольшим запасом, (которые рассчитаны до 180А). Для безопасности от короткого замыкания установлен автоматический предохранитель в разрыв плюсового провода, рассчитанным на 150 Ампер.

### 3.4 Определение характеристик сборки суперконденсатора

Для эксперимента была проведена оценка основных базовых характеристик суперконденсатора (сборки) вне автомобиля, по ГОСТ 28885-90, а именно:

- Определение «фактической» емкости;
- Определение тока утечки;
- Определение сопротивления.

Перечень оборудования и их характеристики, входящие в состав для проверки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Средства измерения

Наименование средств измерений	Тип, фирма	Класс точности или погрешность	Диапазон измерений
1	2	3	4
Секундомер	электронный	$\pm 0,01$ в интервале 0,1-60 с	0 - 9ч 59 мин 59,99с
Мегаомметр	MC-05	$\pm 1,5\%$ от длины рабочей части шкалы	- 1+1000м; - 0,1+100м; - 0,01+10м;
Лабораторный источник питания	M&R APS-3005D	$\leq 0.4\%$ от измеренного значения	0 – 30 В
Вольтметр	Pro connect DT-832	$\pm 0,5\%$	200мВ-1000В

«Перед измерением и испытанием суперконденсатора (сборки) произвести его начальную стабилизацию, выдержать сборку при нормальных климатических условиях не менее 24 ч. При этом суперконденсатор должен быть расположен таким образом, чтобы к ним был обеспечен свободный доступ воздуха. При измерении последовательно несколько параметров сборки, то начальную стабилизацию проводить только перед началом измерения первого параметра. Во время измерений и испытаний суперконденсатор не должен подвергаться воздействию каких-либо дополнительно влияющих факторов, которые могут привести к изменению измеряемых параметров суперконденсатора и к дополнительной погрешности в измерениях, например, прямы/ солнечных лучей, воздушных потоков и др. факторов» [23].

### 3.4.1 Определение «фактической» емкости

Емкость сборки СК определялась следующим образом: путем подачи рабочего напряжения на последовательно соединенные ячейки СК, и измерением емкостного тока, при зарядке и разрядке.

Для определения емкости СК следует включить его в цепь из резистора и лабораторного источника питания (рисунок 17). Входное напряжение

выбирается максимально допустимым напряжением СК, оно составляет – 16 В. Для исключения влияния внутреннего сопротивления источника питания на параметры цепи, на входе устанавливается выключатель.

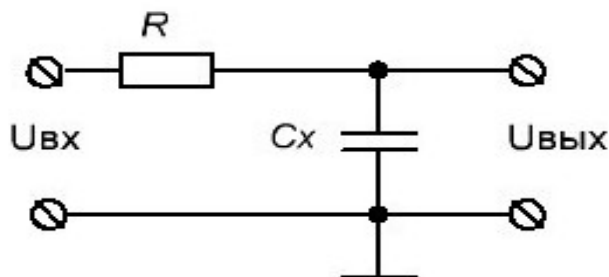


Рисунок 17 – Схема измерения емкости СК

Определение емкости при зарядке: сборку необходимо полностью разрядить (любым способом, например, запитать лампу накаливания мощностью 10 Ватт до полного его не свечения); подключить резистор (R) сопротивлением 0,1 Ом на плюсовой провод сборки; подать рабочее напряжение на сборку СК и запустить секундомер; напряжение контролировать вольтметром до достижения сборки 16В; выключить лабораторный блок питания при достижении сборкой 16В. Время (t) отсчитывается с момента включения питания.

Зарядка сборки СК до достижения напряжения 16 В заняла ровно 9 минут.

По формуле 4, имея известные величины сопротивления и времени, вычислить емкость.

$$t = RC \quad (4).$$

Из формулы 3.3:  $C = \frac{t}{R} = \frac{9}{0.1} = 90 \text{ Ф.}$

Удобнее отсчитывать время разрядки СК и отмечать значения в 90 % или 95 % от начального напряжения, в этом случае расчёт ведётся по формулам 5 или 6 соответственно.



$$2.2t = 2.2RC \quad (5);$$

$$3t = 3RC \quad (6).$$

Таким способом можно узнать емкость СК с точностью, определяемой погрешностями измерений времени, напряжения и сопротивления.

Определение емкости при разрядке: зарядить суперконденсатор до 95 % от максимального напряжения, т.е. 15,3 В; подключить резистор к плюсовому проводу и включить секундомер; разрядить сборку СК до напряжения 0,1 В.

Время разряда ( $t$ ) до 0,01 В составил 8,5 минут.

Подставляем полученные значения в формулу 3.5

$$3t = 3RC \Rightarrow C = 85 \text{ Ф.}$$

В результате полученных данных фактическая емкость СК сборки оказалась ниже ожидаемых на 15 %.

Кроме того, измерение ёмкости можно произвести с помощью многофункционального измерительного прибора MS2000.

### **3.4.2 Определение тока утечки**

Ток утечки/саморазряд СК определяет время при котором сохраняется емкость, при длительном его бездействии. Ток утечки определяют по падению максимального напряжения при температуре в диапазоне от +15 до +25С (высчитывают путем измерения остаточного напряжения при длительном хранении СК).

Для определения тока утечки, необходимо: зарядить суперконденсатор до 16 В током зарядки от 0,2 до 0,5 А; сделать замер напряжения после полной зарядки; сделать следующий замер напряжения через 24 часа, и так далее в течении 8 дней. Измерение показаний напряжения СК производить ежедневно, в одно и то же время.

Таблица 3 – Время падения напряжения СК от времени нахождения в состоянии покоя

Дни, д	Время, ч	Напряжение, в
0	00.00	16.00
1	24.00	15.01
2	48.00	14.67
3	72.00	14.28
4	96.00	14.12
5	120.00	13.98
6	144.00	13.86
7	168.00	13.74
8	192.00	13.62

Наиболее интенсивные падения напряжения наблюдались в первые 24 часа, связано это с тем, что происходило уравнивание и успокоение реакций в двойном электрическом слое суперконденсаторной сборки. По истечении 96 часов потеря в напряжении у СК приходит к показаниям в 0,20-0,16 В в сутки. На шестые сутки потери у СК строго сравнивается в один показатель – 0,12 В. Так, по истечении 144 часов имеется ток утечки 0,3 мА.

Определенный ток утечки составил 0,3 мА, при допустимом для СК до 0,5 мА, что полностью входит в допуски с экспериментальным результатом.

### **3.4.3 Определение сопротивления**

Измерение внутреннего сопротивления сборки производилось с помощью мегаомметра МС-05, при рабочем напряжении суперконденсатора 16 В ( $\pm 1$  В). Сопротивление составило 19 МОм, (паспортное значение СК 20  $\pm 1$  МОм).

### **3.5 Подключение сборки в бортовую сеть автомобиля**

Для исключения АКБ автомобиля от дополнительных утечек электричества (определено, что суперконденсатор имеет ток утечки 0,3 мА), суперконденсатор подключался от силового реле рассчитанного на 12 В и

200 А (рисунок 18), который включает сборку в бортовую сеть автомобиля в момент включения зажигания. При выключенном зажигании автомобиля, СК будет отключен.



Рисунок 18 – Реле силовое (4-х контактное)

Была реализована схема подключения суперконденсатора к бортовой электрической сети автомобилей через реле (рисунок 19).

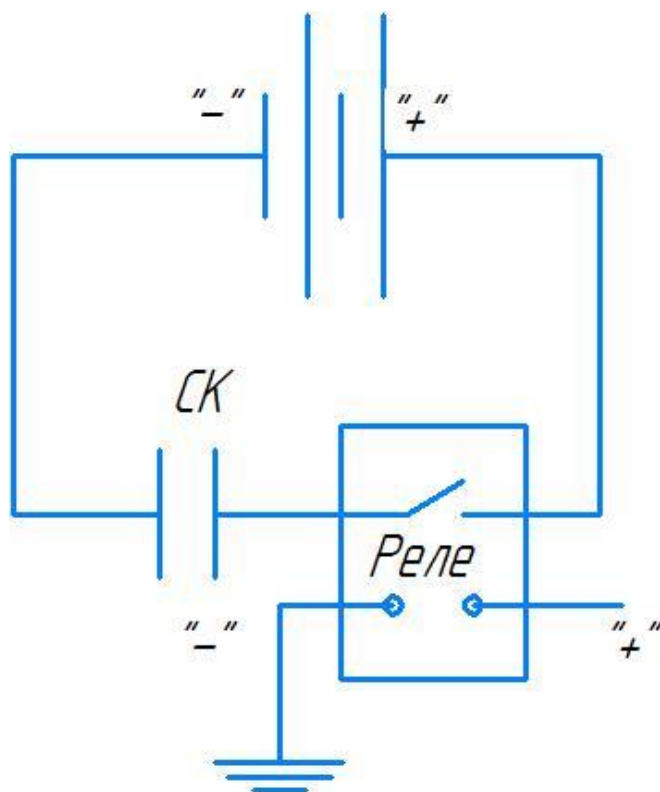


Рисунок 19 – Схема подключения суперконденсатора к бортовой электрической сети автомобиля через реле

Выводы по третьему разделу:

Определены мощные потребители электрической энергии автомобиля, и на основании мощности стартера пуска ДВС (900 Вт), рассчитана и реализована сборка СК требуемой емкости (100Ф)

Определены необходимые сечения проводов, для подключения СК к бортовой электрической сети автомобиля (6 AWG т.е. 13.3 мм<sup>2</sup>).

Реализована схема балансировки (пассивная с использованием постоянного номинала сопротивления резисторов в 4,7 Ом).

Предложена схема подключения СК в бортовую электрическую сеть автомобиля, обеспечивающая устранение АКБ автомобиля от утечки тока.

Определены базовые характеристики сборки: фактическая емкость – 85Ф; ток утечки – 0,3 мА; внутреннее сопротивление – 19 МОм.

## **4 Экспериментальные работы влияния суперконденсатора в бортовой сети автомобилей на включение различных нагрузок**

### **4.1 Цель и объект испытаний**

При выполнении работы применялся экспериментальный характер исследований, который заключался в снятии показаний напряжения с бортовой сети автомобиля. Это объясняется невозможностью выполнить исследование теоретическим методом, в связи со сложностью процесса и теоретического описания.

Работа направлена на изучение и сравнение полученных результатов, а также влияние суперконденсатора на напряжение бортовой сети автомобиля на показатели, такие как «пуск ДВС» и «стабильность напряжения вырабатываемым генератором автомобиля» при работе бензинового двигателя. По полученным замерам определить оптимальную емкость СК для контролируемого значения пуск бензинового двигателя.

Цель работы: повышение эффективности работы систем электрообеспечения силовых установок автомобиля, при различных нагрузках на бортовую сеть.

Объектами испытаний являлась бортовая электрическая сеть автомобилей: Lada Largus и «Сержант».

Электрические схемы бортовых сетей автомобилей Lada Largus и «Сержант» представлены в приложении А.

### **4.2 Условия проведения испытаний**

Испытания проводились при температуре окружающей среды  $T$  (20 – 30С) и давлении, соответствующем диапазону значений атмосферного давления.

Во время испытаний автомобили поддерживались в технически исправном состоянии, удовлетворяющем ТУ, установленные заводом изготовителем.

### **4.3 Методика испытаний**

Подготавливается измерительное оборудование, проводится предварительное испытание, по результату которого, уточняются и определяются параметры и настройки измерительного оборудования (для определения диапазона измеряемых величин).

Выполнение экспериментальных работ и их последовательность.

Работы выполнялись в следующей последовательности:

- производится пуск двигателя, при температуре окружающей среды. Определяется изменение падения напряжения при пуске двигателя;
- производится включение внешних осветительных приборов автомобиля. Определяется изменение падения напряжения при включении внешних осветительных приборов;
- производится включение мотора отопителя салона. Определяется изменение падения напряжения при включении мотора отопителя;
- измеряется амплитуда колебаний напряжения бортовой сети автомобиля при работе двигателя в режиме холостого хода.

Порядок обработки результатов испытания.

В ходе выполнения работы могло изменяться количество измеряемых параметров, с целью повышения точности измерений и получения дополнительных информации.

Регистрация результатов измерений производилось в соответствии с возможностями осциллографа.

В режиме каждого цикла фиксировались следующие показатели бортовой сети автомобиля:

- падение напряжения,  $U$ , В;
- период падения напряжения,  $T_1$ , с;
- период выхода бортовой сети на рабочее напряжение,  $T_2$ , с.

Измеряемые величины осциллографических результатов представлены на рисунке 20

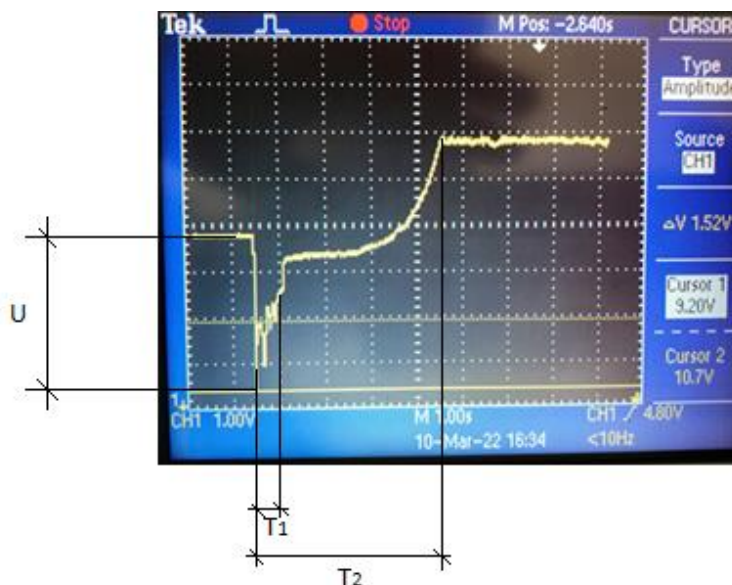


Рисунок 20 – Измеряемые величины осциллографических результатов

#### 4.4 Измерительное оборудование

Измерительное оборудование и его характеристики, которым происходило измерение напряжений, приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Измерительное оборудование

Наименование средств измерений	Тип, фирма	Класс точности или погрешность	Диапазон измерений
1	2	3	4
Осциллограф	Tektronix TDS 2024B	$\pm 3\%$	6 разрядов, 10 кГц...200 МГц

## 4.5 Программа испытаний

Испытания проводились последовательно согласно их нумерации в порядке возрастания.

Перед началом работы необходимо убедиться в правильности подключения оборудования (полярность, сила затяжки клемм).

На первом этапе определялось падение напряжения бортовой сети в момент пуска двигателя. Для этого производился пуск ДВС с выходом в режим холостого хода. Осциллографом определялось изменение напряжения бортовой сети в период пуска двигателя.

На втором этапе определялось падение напряжения бортовой сети при включении внешних осветительных приборов автомобиля при работе двигателя в режиме холостого хода. Для этого производилось включение внешних осветительных приборов автомобиля. Осциллографом определялось изменение напряжения бортовой сети в период включения внешних осветительных приборов.

На третьем этапе определялось падение напряжения бортовой сети при включении системы отопления салона автомобиля на максимальную мощность при работе двигателя в режиме холостого хода. Для этого производилось включение мотор отопителя салона на максимальную скорость вращения. Осциллографом определялось изменение напряжения бортовой сети в период включения системы отопления салона.

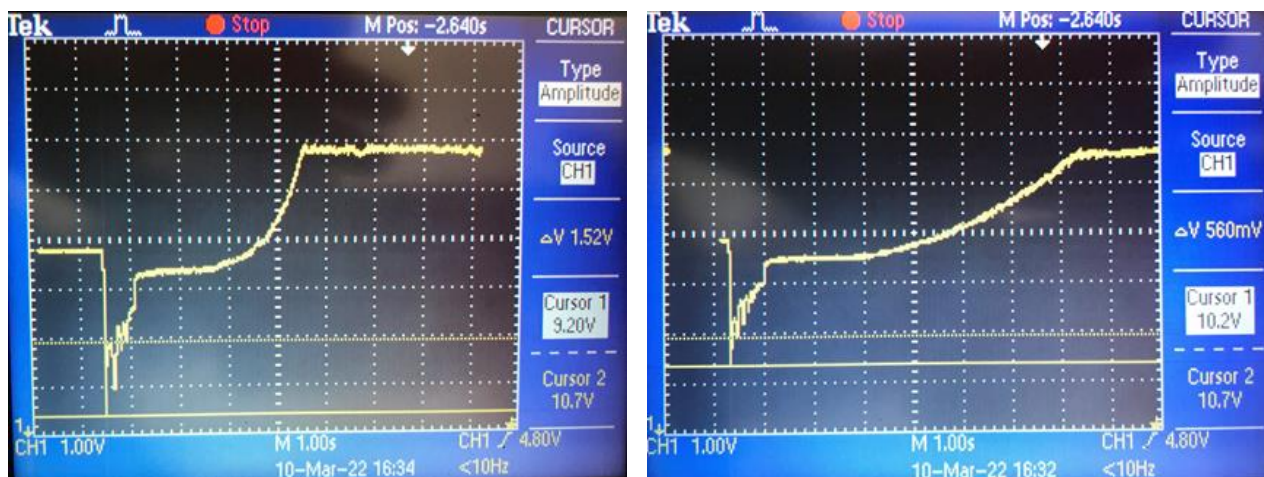
На четвертом этапе измерялась амплитуда колебаний напряжения бортовой сети автомобиля при работе двигателя в режиме холостого хода. Для этого осциллографом измерялась амплитуда колебаний напряжения бортовой электрической сети.

Далее программа испытаний повторялась с применением суперконденсатора с подключенным по схеме (см. рисунок 19) к бортовой сети автомобиля.



## 4.6 Результаты испытаний

Первичные результаты испытаний бортовой сети автомобиля Lada Largus представлены на рисунках: 21; 22; 23; 24 в виде осциллограмм.



а)

б)

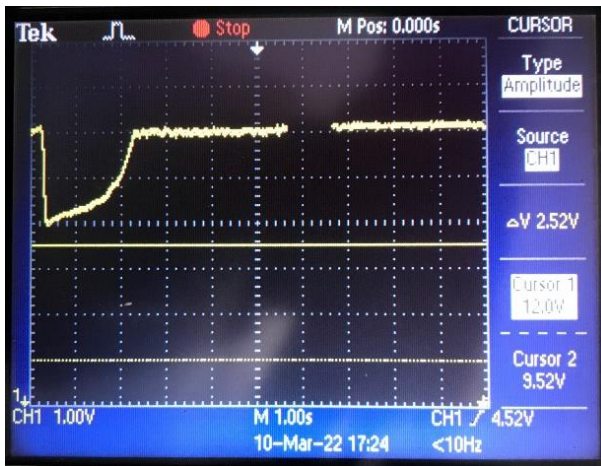
Рисунок 21 – Осциллограммы изменения напряжения бортовой сети во время пуска двигателя: а) без СК; б) с использованием СК



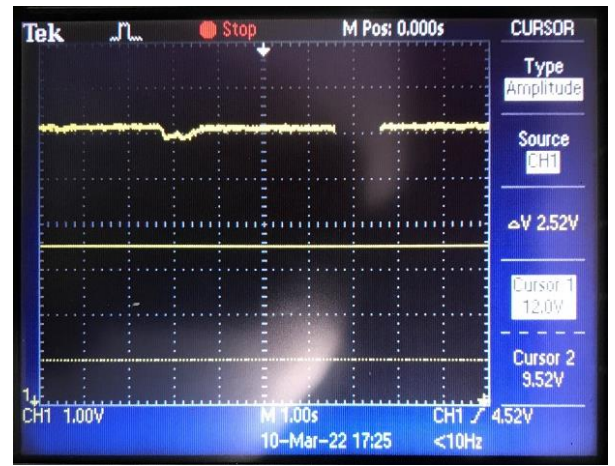
а)

б)

Рисунок 22 – Осциллограммы изменения напряжения бортовой сети во время включения внешних осветительных приборов автомобиля: а) без СК; б) с использованием СК

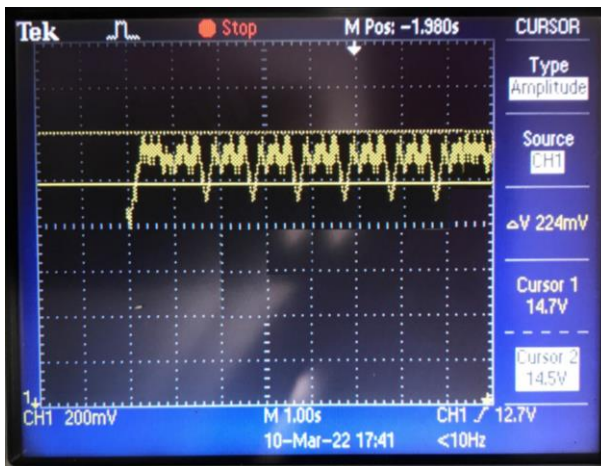


а)

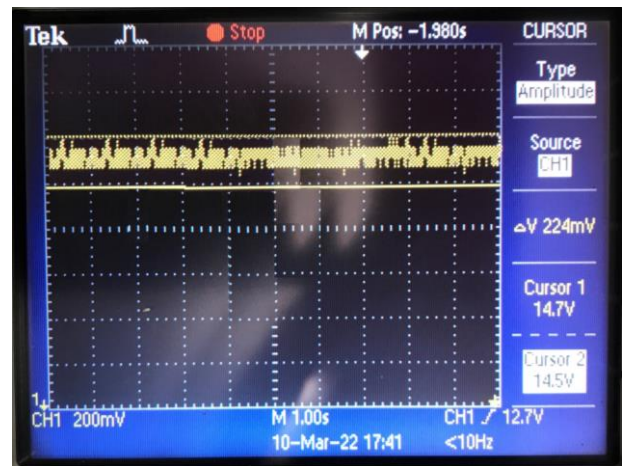


б)

Рисунок 23 – Осциллограммы изменения напряжения бортовой сети во время включения мотора отопителя салона автомобиля: а) без СК; б) с использованием СК



а)



б)

Рисунок 24 – Осциллограммы напряжения вырабатываемого генератором автомобиля: а) без СК; б) с использованием СК

Результаты определений:  $U_{min}$ ;  $T_1$ ;  $T_2$  представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты определений  $U_{min}$ ;  $T_1$ ;  $T_2$  бортовой сети автомобиля Lada Largus

Программа испытания	Без суперконденсатора			С суперконденсатором		
	$U_{min}$ , В	$T_1$ , с	$T_2$ , с	$U_{min}$ , В	$T_1$ , с	$T_2$ , с
Пуск ДВС	9,2	0,6	4,0	10,2	0,8	6,0
Включение внешних осветительных приборов	12,5	3,5	1,0	13,4	1,5	1,5
Включение мотор отопителя салона	12,5	1,0	2,0	14,0	0,2	1,0
Амплитуда напряжений	$14,6 \pm 0,3$	-	-	$14,6 \pm 0,1$	-	-

На рисунке 21 представлена осциллограмма изменения напряжения в момент пуска ДВС, на которой видно, что падение напряжения в бортовой сети с суперконденсатором по сравнению без СК: уменьшается на 1 В, период выхода бортовой сети на рабочее напряжение увеличивается на 2 с.

На рисунке 22 представлена осциллограмма изменения напряжения в момент включения внешних осветительных приборов, на которой видно, что падение напряжения в бортовой сети с суперконденсатором по сравнению без СК: уменьшается на 0,9 В, период выхода бортовой сети на рабочее напряжение увеличивается на 0,5 с.

На рисунке 23 представлена осциллограмма изменения напряжения в момент включения мотор отопителя салона, на которой видно, что падение напряжения в бортовой сети с суперконденсатором по сравнению без СК, вовсе не происходит.

На рисунке 24 представлена осциллограмма напряжения бортовой сети, на которой видно, что амплитуда колебаний напряжения в бортовой электрической сети с суперконденсатором уменьшается до диапазона напряжений  $U = 14,6 \pm 0,1$  В.

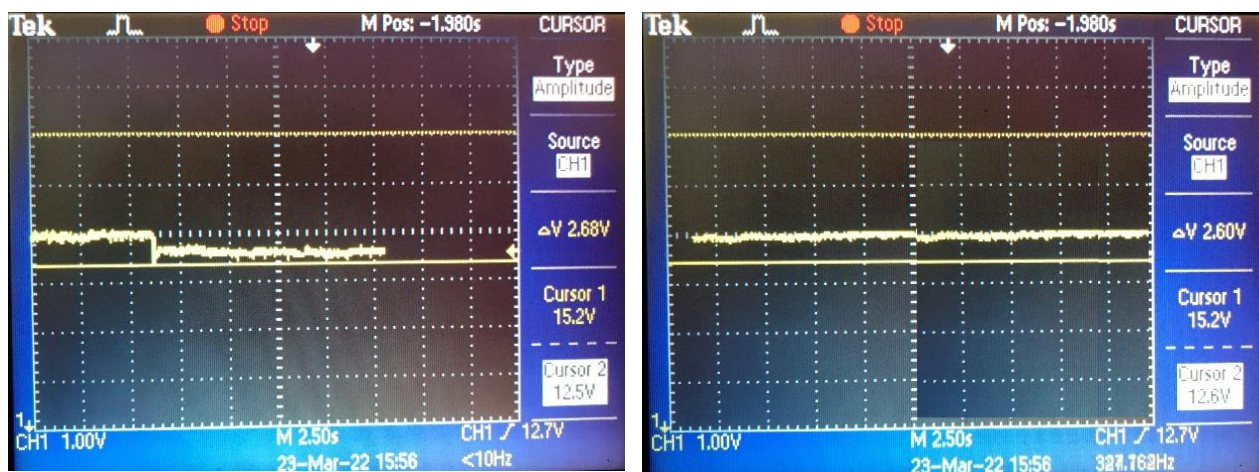
Первичные результаты испытаний бортовой сети автомобиля «Сержант» представлены на рисунках: 25; 26; 27 в виде осциллограмм.



а)

б)

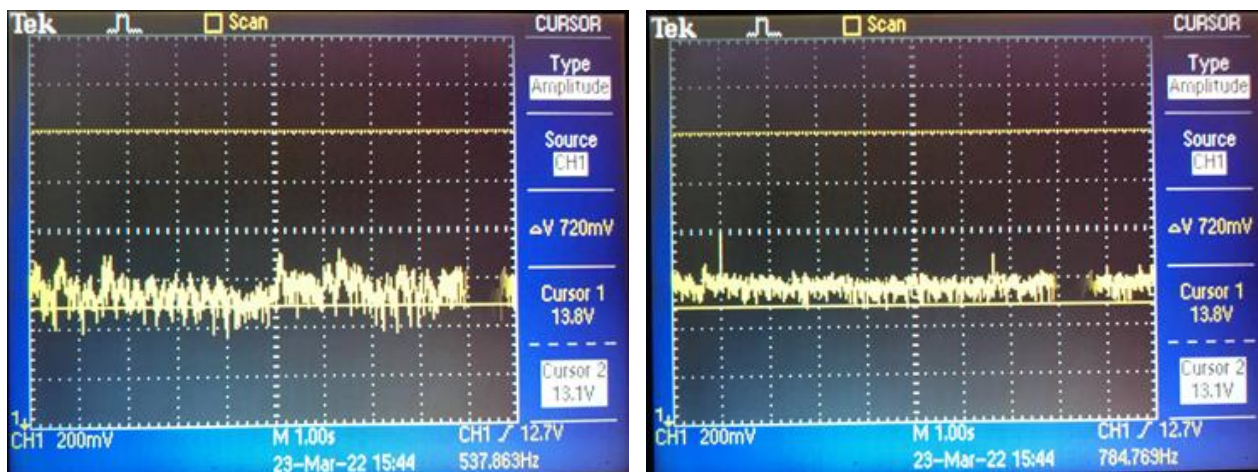
Рисунок 25 – Осциллограммы изменения напряжения бортовой сети во время пуска двигателя: а) без СК; б) с использованием СК



а)

б)

Рисунок 26 – Осциллограммы изменения напряжения бортовой сети во время включения внешних осветительных приборов автомобиля: а) без СК; б) с использованием СК



а)

б)

Рисунок 27 – Осциллограммы напряжения вырабатываемого генератором автомобиля: а) без СК; б) с использованием СК

Результаты определений:  $U_{min}$ ;  $T_1$ ;  $T_2$  представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты определений  $U_{min}$ ;  $T_1$ ;  $T_2$  бортовой сети автомобиля «Сержант»

Программа испытания	Без суперконденсатора			С суперконденсатором		
	$U_{min}$ , В	$T_1$ , с	$T_2$ , с	$U_{min}$ , В	$T_1$ , с	$T_2$ , с
Пуск ДВС	8,16	0,5	1,5	9,24	0,5	3,0
Включение внешних осветительных приборов	12,5	1,0	1,0	13	0,2	0,5
Амплитуда напряжений	$13,2 \pm 0,4$	-	-	$13,2 \pm 0,2$	-	-

На рисунке 25 представлена осциллограмма изменения напряжения в момент пуска ДВС, на которой видно, что падение напряжения в бортовой сети с суперконденсатором по сравнению без СК: уменьшается на 1,08В, период выхода бортовой сети на рабочее напряжение увеличивается на 1,5с.

На рисунке 26 представлена осциллограмма изменения напряжения в момент включения внешних осветительных приборов, на которой видно, что падение напряжения в бортовой сети с суперконденсатором по сравнению

без СК: уменьшается на 0,5 В, период выхода бортовой сети на рабочее напряжение уменьшается на 0,5 с.

На рисунке 27 представлена осциллограмма напряжения бортовой сети, на которой видно, что амплитуда колебаний напряжения в бортовой электрической сети с суперконденсатором уменьшается до диапазона напряжений  $U = 13,2 \pm 0,2$  В.

По результатам экспериментальных работ, можно сделать выводы:

- фактическая емкость сборки составила 85 Ф (заявленная по техническому паспорту 100 Ф), не соответствует полному обеспечению потребностей мощности включения нагрузки на бортовую сеть автомобиля;
- период стабилизации напряжения в бортовой электрической сети автомобиля с суперконденсатором (по сравнению без СК): при пуске ДВС (мощностью стартера 900 Вт) увеличивается на 2с; при включении внешних осветительных приборов (общей мощностью 250 Вт) увеличивается на 1с; при включении мотор отопителя (мощностью 150 Вт) салона уменьшается на 1с;
- амплитуда колебаний напряжения бортовой сети при наличии суперконденсатора уменьшается: Lada Largus  $U = 14,6 \pm 0,1$  В, (как видно на рисунке 24); «Сержант»  $U = 13,2 \pm 0,2$  В, (как видно на рисунке 27). Напряжение стабилизируется, что благоприятно сказывается на работу электронных приборов и компонентов в бортовой сети автомобиля.

Ориентировочное значение емкости для полного исключения падений напряжений при различных нагрузках, должно быть увеличено минимум в 2 раза и составлять примерно 180 – 220Ф.

## Заключение

На основании выполненных работ можно сделать следующие выводы.

Анализ конструкций и сравнительных характеристик суперконденсаторов, различных производителей показал:

- суперконденсатор гораздо эффективнее традиционных химических источников энергии (АКБ);
- быстрое время зарядки (от 1 до 10 с);
- большой диапазон рабочих температур эксплуатации (от – 40 до + 65 С) по сравнению с АКБ;
- удельная мощность суперконденсаторов выше АКБ в 3 – 4 раза;
- технические характеристики и параметры суперконденсаторов такие как: максимальное напряжение, ток утечки, количество циклов, различных производителей идентичны, но СК фирмы «ТЭЭМП» превосходят других производителей на 10 % по удельной и накапливаемой энергиям.
- потеря емкости суперконденсатора определяется его внутренним сопротивлением, которое зависит: от температуры эксплуатации, силы тока при зарядке, перезарядки.

Основными отраслями, применений суперконденсаторов являются: автомобильная промышленность, гибридный и электротранспорт, энергетика и промышленность, бытовая электроника и портативные устройства.

Применение различных методов балансировки суперконденсаторов увеличивают их срок службы до 10 лет. Пассивная балансировка является более выгодной по цене, из-за применения наименьшего количества электронных компонентов, и более простой схемы реализации электронной платы.

В ходе выполнения работ рассчитан и собран суперконденсатор требуемой емкости. Фактическая емкость суперконденсатора составила 85Ф, с максимальным напряжением 16 В.

Определены сечения необходимых проводов для уменьшения электрических потерь.

Предложена схема балансировки (пассивная с использованием постоянного номинала сопротивления резисторов в 4,7 Ом).

Реализована схема подключения суперконденсатора в бортовую электрическую сеть автомобиля.

Определены характеристики сборки: ток утечки составил 0,3 мА; внутреннее сопротивление составило 19 МОм.

В ходе выполнения работ была разработана программа и методика испытаний суперконденсатора, по которым были проведены эксперименты по повышению эффективности работы систем электрообеспечения силовых установок при резких увеличениях нагрузки путем применения суперконденсатора совместно с бортовой сетью автомобилей. В экспериментах было установлено:

- фактическая емкость сборки 85Ф не достаточна полному обеспечению потребностей мощности включения нагрузки;
- период стабилизации напряжения в бортовой электрической сети автомобиля с суперконденсатором в зависимости от мощностей потребителей увеличилась от 0,5 до 2 с, связано это с тем, что в момент резкого потребления энергии различными потребителями - суперконденсатор отдает часть накопленной энергии, вследствие этого образуется не дозаряженный элемент в системе питания бортовой сети (увеличилась основная емкость электрического хранения энергии);
- амплитуда колебаний напряжения, с суперконденсатором уменьшается: для Lada Largus с  $U = 14,6 \pm 0,3$  В до  $U = 14,6 \pm 0,1$  В; для «Сержант»  $U = 13,2 \pm 0,4$  В; до  $U = 13,2 \pm 0,2$  В, что благоприятно сказывается на работу электронных приборов в бортовой сети автомобилей.



Проведенный анализ показал положительную возможность использования суперконденсатора в составе бортовой электрической сети автомобилей, с целью повышения эффективности работы систем электрообеспечения силовых установок автомобилей.

## Список используемых источников

1. Беляков, А.И. Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы развития / А.И. Беляков // Электрохимическая энергетика. – 2006. – Т. 6, № 3. – С. 146-149.
2. Умняшкин, В.А. Основы методики расчета и обоснования базовых параметров гибридной энергосиловой установки легкового автомобиля / В.А. Умняшкин, Н.М. Филькин [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве.– 2008.– № 1.– С. 164-174.
3. Ломакин, В. В. К расчету баланса мощности комбинированной энергоустановки гибридного автомобиля / В. В. Ломакин, А. В. Шабанов, А. А. Шабанов // Журнал автомобильных инженеров. – 2014. – № 1 (84). – С. 24 – 27.
4. Агупов, В.В. Особенности активной балансировки напряжений суперконденсаторов / В.В. Агупов, М.Ю. Чайка, Ю.Ю. Разуваев [и др]. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж, 2011. – Т. 7. – № 10. – С. 85-88.
5. Кузнецов, В.П, Панькина О.Н., Мачковская Н.И., Шувалов Е.К., Востриков И.С. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство // Компоненты и технологии. - 2005, №6. С. 21-25.
6. Суперконденсаторы или ионисторы вместо аккумулятора. Новая технология Ё-мобиль. [Электронный ресурс] / GREEN-CAR. – Режим доступа: \ www/URL: http://green-car.com.ua/index.php?option=com\_content&view=article&id=2&Itemid=78.
7. Шидловский, А. К. Суперконденсаторы в системах электропитания электромобилей [Текст] / А. К. Шидловский, В. Б. Павлов, А. В. Попов, В. Е. Павленко // Техническая электродинамика. Тематический выпуск "Силовая электроника и энергоэффективность ". - 2010. - Ч. 1. - С. 48-51.
8. Бахмутов, С. В. Совершенствование процесса рекуперации энергии гибридного автомобиля / С. В. Бахмутов, А. И. Филонов, Е. Е. Баулина //

Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана: Наука и образование. – 2013. – № 7. – С. 101–114.

9. Есаулов, С.М. Проектирование компонентов для систем автоматического диагностирования транспорта. / С.М. Есаулов, О.Ф. Бабичева, Н.П. Лукашова // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – Вып.5/3(41). – С.28 – 32.

10. Есаулов С.М. Применение эталонной модели для автоматической системы диагностирования оборудования на транспорте. / С.М. Есаулов, О.Ф. Бабичева, А.В. Будченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – Вып.4/7(40). –С. 19 – 22

11. Панкрашкин А. Ионисторы Panasonic : физика, принцип работы, параметры / А. Панкрашкин // Компоненты и технологии. – 2006. – № 9.

12. Шурыгина, В. Суперконденсаторы. Помощники или возможные конкуренты батарейным источникам питания // Электроника : Наука. Технология. Бизнес. – 2003. – № 3. – 20 с.

13. Способ заряда блока ионисторов и устройство для его осуществления. – Заявка на изобретение № 2013145662/07 от 04.10.13.

14. Пат. РФ № 2488198 Стабилизированный комбинированный источник электропитания. – Оpubл. 23 мая 2013 г.

15. Агупов, В. В., Разуваев, Ю. Ю., Чайка М. Ю., Чопоров О. Н. Особенности активной балансировки напряжений суперконденсаторов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Воронеж : Изд-во Воронежского государственного технического университета, 2011. – С. 85–88.

16. Балансир для зарядки литиевых аккумуляторов. Сми сайт-паяльник 1999–2016. – URL: <http://schem.net/pitanie/5-295.php> (дата обращения: 10.05.2022).

17. Патон, Б. Е., Коротынский А. Е., Драченко Н. П. и др. Использование суперкондесаторов для повышения энергоэффективности устройств для точечной контактной сварки // Тр. Междунар. научно-практ.

конф. «Энерго и ресурсосбережение в промышленности, энергетике и транспорте. – Киев, 2009. – С. 54–58.

18. Еременко В, Воронцов К, Варламов Д. Аппаратные методы повышения энергетической эффективности высоковольтных аккумуляторных батарей // Электр. компоненты – Украина. – 2007. – № 7/8. – С. 62–66.

19. Титце У. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство / Титце У., Шенк К. -М.: Мир-1983.- 512 с.

20. Maxwell active cell voltage management electronics// maxwell.com: Document #1011130 | Revision 1.0, February 17, 2007.

21. Патент 2488198 Российская Федерация, МПК H01M10/00 / Галушко, А. И., Гром, Ю. И., Лазарев, А. Н., Салихов, Р. С. Стабилизированный комбинированный источник электропитания; заявитель и патентообладатель ОАО «Научно-исследовательский институт электромеханики». – № 2012121375/07; заявл. 23.05.2012. – 3 с.

22. Электрик Инфо » Электрическая энергия в быту и на производстве » Интересные электротехнические новинки » Что такое суперконденсаторы, Андрей Повный – URL: <http://elektrik.info/main/news/902-что-такое-superkondensatory.html> (дата обращения: 10.05.2022).

23. ГОСТ 28885-90. Конденсаторы Методы измерений и испытаний.

24. Суперконденсаторы: что это, зачем и где применяется, Хабр – URL: <https://teemp.ru/news/superkondensatory-что-это-zachem-i-gde-primenyaetsya/> (дата обращения: 10.05.2022).

25. Supercapacitors: what they are, what they're used for – and where, URL: <https://zaorotec.com/content/supercapacitors-what-they-are-what-they-re-used-for-and-where/> (дата обращения: 11.05.2022).

26. Use Of Supercapacitors In Defence And Transport, URL: <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/tech-focus/supercapacitors-use-defence-transport> (дата обращения: 11.05.2022).

27. Суперконденсаторы: принципы построения, техника и применения, Деньщиков К.К. – URL: <https://auto-ally.ru/ekonomika/9514/index.html?page=3> (дата обращения: 12.05.2022).

28. Lithium-Ion/Supercapacitors storage system powered microcar: development and testing, Fernando Ortenzia, Giovanni Pedeza, Ennio Rossi, Energy Procedia 81 ( 2015 ) 422 – 429.

29. Погрешности осциллографических измерений, URL - <https://helpiks.org/4-44029.html> (дата обращения: 13.05.2022).

30. Conway B.E. Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications // New York: Springer, 1999. 698 p.

31. V. V. Sleptsov, N. K. Kulikov, Kyaw Zaw Lwin, P. A. Shchu, V. A. Govorov and D. Yu. Kukushkin. Thin-film coating technologies on porous materials for chemical current sources // 18th International Conference "Aviation and Cosmonautics – 2019: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 868 (2020) 012014 (Scopus).

32. В.В. Ворожейкин// Применение суперконденсаторов EDLC в возобновляемой энергетике. Мировая практика/ Энергосбережение журнал– 2016.

33. Александр Деспотули, Александра Андреева. Суперконденсаторы для электроники (часть 1) // Современная электроника – №5. 2006.

34. Kotz R., Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors // Electrochimica Acta. 2000. Vol. 45, N 15-16, P. 2483-2498.

35. Burke A. Ultracapacitors: why, how, and where is the technology // Journal of Power Sources. 2000. Vol. 91. P. 37-50.

36. Т. А. Писарева. Физические основы накопления энергии и электродные материалы электрохимических конденсаторов // Физика и химия – 2014. Вып. 3.

37. Д. Д. Аманбае. Анализ гибридного источника энергии на основе суперконденсаторов и топливных элементов // Отчет на предприятии ООО «Тайтэн Пауэр Солюшн» - 2016.

38. Zhu Y, Murali S and Stoller MD et al. Carbon-based supercapacitors produced by activation of graphene // Science 2011; 332: 1537–41.
39. Балыкшов, А. Ионисторы / А.Балыкшов // Электронные компоненты – Украина. – 2005. - № 11. – С.91-97.
40. Шаркович Р. П. Проблемы эксплуатации суперконденсаторов. Минск, Республика Беларусь – С.8
41. Supercapacitor Discharge Curve, URL: <https://www.spscap.com/supercapacitor-discharge-curve.html> (дата обращения: 14.05.2022).
42. Суперконденсаторы Maxwell, URL – <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/> (дата обращения: 14.05.2022).
43. Суперконденсаторы Wima, URL – <https://www.wima.de/en/> (дата обращения: 14.05.2022).
44. Суперконденсаторы ТЭЭМП, URL – <https://teemp.ru/> (дата обращения: 14.05.2022).
45. Суперконденсаторы Феникс, URL – <https://www.ultracapacitor.ru> (дата обращения: 14.05.2022).
46. Патент RU 160556 – Устройство пуска двигателя внутреннего сгорания транспортного средства.
47. Патент RU 190312 – Устройство гарантированного пуска двигателя внутреннего сгорания.
48. Vangari M., Pryor T., Jiang L. Supercapacitors: review of materials and fabrication methods // Journal of Energy Engineering. – 2012. – Т. 139. – №. 2. – С. 72-79.
49. Upadhyay S., Sharma M. P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Т. 38. – С. 47-63.
50. Lahyani A. et al. Battery/supercapacitors combination in uninterruptible power supply (UPS) // IEEE transactions on power electronics. – 2013. – Т. 28. – №. 3. – С. 1509-1522.

51. Thounthong P. et al. Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source //Journal of power sources. – 2011. – Т. 196. – №. 1. – С. 313- 323.

52. Суперконденсаторы Murata, URL – <https://www.murata.com/~media/webrenewal/support/library/catalog/products/k70e.ashx> (дата обращения: 16.05.2022).

53. Бериллов А.В., Сугробов А.М., Грузков С.А., Станкевич И.В. Системы электроснабжения и электрозапуска двигателей автомобилей и тракторов. 2011. – С. 96

54. Balaguer I. J. et al. Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation // IEEE transactions on industrial electronics. – 2011. – Т. 58. – №. 1. – С. 147-157

55. Rehman S. et al. Feasibility study of a wind–pv–diesel hybrid power system for a village //Renewable Energy. – 2012. – Т. 38. – №. 1. – С. 258-268.

56. Lin W. M., Hong C. M., Chen C. H. Neural-network-based MPPT control of a stand-alone hybrid power generation system //IEEE transactions on power electronics. – 2011. – Т. 26. – №. 12. – С. 3571-3581.

57. Склезнёв А.А. Анализ основных тенденций развития химических источников тока и других накопителей энергии // Отчёт, шифр «ТОК», Москва, 2017

58. Гоффман В.Г., Гороховский А.В., Бурте Э.П., Слепцов В.В., Горшков Н.В., Ковынева Н.Н., Викулова М.А., Никитина Н.В. Модифицированные титановые электроды для накопителей энергии // Электрохимическая энергетика, 2017, №.4, с. 225-234.

59. Anthony J. Stevenson, Denys G. Gromadskyi, Di Hu, Junghoon Chae, Li Guan, Linpo Yu, and George Z. Chen. Supercapatteries with Hybrids of Redox Active Polymers and Nanostructured Carbons // 2015 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

60. Peng, C., Zhang, S., Jewell, D., and Chen, G.Z. (2008). Carbon nanotube and conducting polymer composites for supercapacitors // *Prog. Nat. Sci.*, 18, 777 – 788.

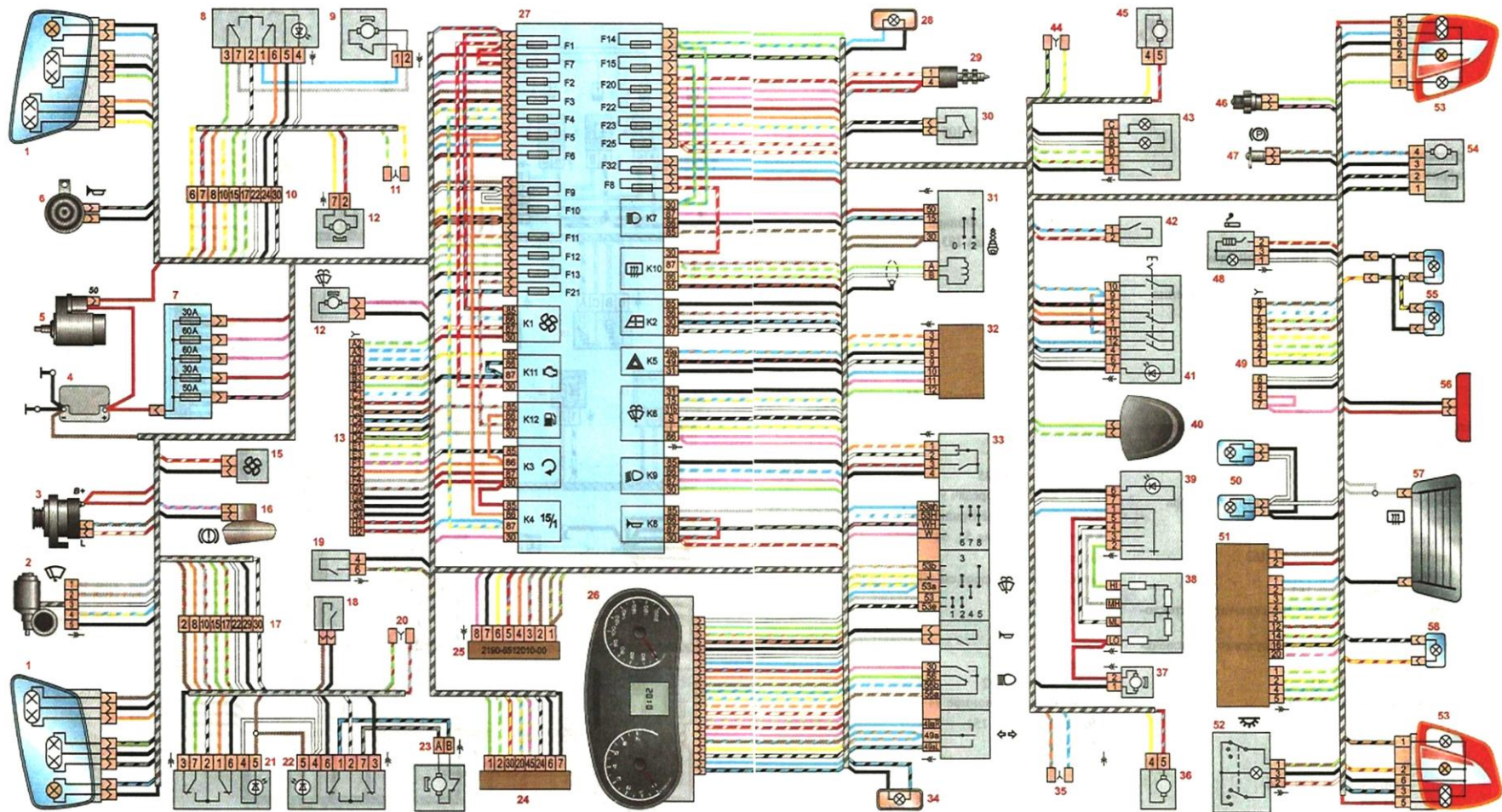
61. Zhu Y, Murali S and Stoller MD et al. Carbon-based supercapacitors produced by activation of graphene // *Science* 2011; 332: 1537–41



# Приложение А

(справочное)

## Электрическая схема бортовой сети автомобиля Lada Largus



Продолжение приложения А

Электрическая схема бортовой сети автомобиля «Сержант»

