

Общество с ограниченной ответственностью «Смартер»

УДК 621.314.5

Регистрационный № 115040710084

Инв. № 3

УТВЕРЖДАЮ

Директор

_____ Швед А. А.

« _____ » _____ 2016 г.

М.П.

ОТЧЕТ

о выполнении НИОКР по теме:

«Разработка экспериментального образца пускового модуля двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и его испытания в составе системы пуска ДВС»
(договор №245ГС1/8724 от 12.02.2015)

(заключительный)

Руководитель работ

_____ Швед А. А.

подпись, дата.

Челябинск 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работ	_____	А. А. Швед	(введение, заключение, разделы 1, 4)
	подпись, дата		
Исполнители работ	_____	А. В. Велин	(разделы 2.1, 2.2)
	подпись, дата		
	_____	А. В. Духин	(раздел 2.3, приложение А)
	подпись, дата		
	_____	Л. И. Каюмова	(раздел 3)
	подпись, дата		
Нормоконтролер	_____	А. В. Велин	
	подпись, дата		

Работа выполнена при поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере».

РЕФЕРАТ

Заключительный отчет 59 с., 20 рис., 3 табл., 14 источников, 2 прил.

ПУСК ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, ПРОКРУТКА, СТАРТЕР, НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ, СТАРТ-СТОП, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Объектом исследования являются системы пуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с конденсаторными накопителями энергии.

Цель работы – разработка экспериментального образца пускового модуля с конденсаторным накопителем энергии и его испытания в составе системы пуска ДВС.

В процессе работы проводились исследования, направленные на выбор и оптимизацию технических решений, используемых в пусковом модуле.

В результате исследования создан пусковой модуль ДВС с управляемой вольт-амперной характеристикой выхода. Данное свойство обеспечивается DC/DC-преобразователем, выполненным на основе МОП-транзисторов по четырехключевой схеме (H-bridge).

Основные технико-эксплуатационные показатели: исключение дефицита энергобаланса аккумуляторной батареи при частых пусках, увеличение ресурса работы стартера за счет снижения динамических перегрузок, обеспечение надежного пуска ДВС в условиях экстремально низких температур окружающего воздуха.

Образец пускового модуля успешно прошел испытания и рекомендуется к внедрению на легковых автомобилях с системами «Старт-Стоп». На основе созданных технических решений планируется разработка продуктовой линейки пусковых модулей для коммерческих автомобилей, грузовиков и автобусов.

Задачи НИОКР решены в полном объеме.

СОДЕРЖАНИЕ

Нормативные ссылки	5
Определения, обозначения и сокращения	6
Введение	7
1 Выбор направления исследований	11
1.1 Обзор вариантов подключения накопителей к бортовой сети	11
1.2 Методика выбора типа электрохимических конденсаторов	14
1.3 Выбор варианта построения DC/DC преобразователя	15
2 Разработка пускового модуля	17
2.1 Принципиальная схема пускового модуля	17
2.2 Функциональная блок-схема DC/DC преобразователя	18
2.3 Конструкция пускового модуля	20
3 Испытания пускового модуля	21
3.1 Схема и конструкция нагрузочного стенда	21
3.2 Лабораторные испытания	23
3.3 Испытания в составе легкового автомобиля	25
4 Обобщение и оценка результатов исследований	32
Заключение	34
Список использованных источников	35
Приложения:	
А Эскизные конструкторские документы	36
Б Протокол лабораторных испытаний пускового модуля ПМ-12В/180А	40

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем отчете о НИОКР использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 959-2002 Батареи аккумуляторные свинцовые стартерные для автотракторной техники. Общие технические условия

ГОСТ 14254-80 Изделия электротехнические. Оболочки. Степень защиты. Обозначения. Методы испытаний

ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды

ГОСТ Р 52230-2004 Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия

ГОСТ Р МЭК 60095-2-2010 Батареи стартерные свинцово-кислотные. Часть 2. Размеры батарей и размеры и маркировка выводов

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АБ – аккумуляторная батарея

ВАХ – вольт-амперная характеристика

ДВС – двигатель внутреннего сгорания

КБ – конденсаторная батарея

Конденсаторный накопитель – функционально законченное устройство на основе КБ

НКУ – нормальные климатические условия

ПН – продолжительность нагрузки перемежающегося режима работы (%)

Пусковой модуль – конденсаторный накопитель, предназначенный для использования в составе системы пуска ДВС

DC/DC преобразователь – преобразователь постоянного тока

E (энергоемкость) – максимально возможное количество энергии, запасаемой накопителем (энергоемкость конденсаторного накопителя $E = CU_{\max}^2/2$, где C – электрическая емкость КБ, U_{\max} – максимально допустимое напряжение на выводах КБ)

$k=W/E$ (*коэффициент полезного использования энергоемкости*) – отношение выведенной энергии накопителя к его энергоемкости.

P-функция – аппроксимирующая функция выходной постоянной мощности накопителя в зависимости от максимально-возможной длительности разряда T

T – максимально-возможная длительность разряда накопителя постоянной мощностью

W (выведенная энергия) – интегральное количество энергии, полученное от накопителя на определенном интервале времени

ВВЕДЕНИЕ

Стартерные аккумуляторные батареи (АБ), традиционно применяемые для пуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС) транспортных машин, энергетически неэффективны: с одной стороны, запасаемая в аккумуляторах энергия в сотни раз выше, чем необходимо для пуска, а с другой стороны, она используется крайне неполно из-за высокого внутреннего сопротивления, особенно при отрицательных температурах.

В мире постоянно ведутся разработки систем пуска ДВС, использующих, наряду с традиционными АБ, дополнительные накопители энергии различных типов:

- пневматические накопители применяются на бронетанковой технике и тяжелых тракторах (из-за усложнения конструкции двигателей и ограниченного запаса энергии широкого распространения не получили);

- инерционные накопители применяются главным образом на судовых и авиационных двигателях (широкому распространению препятствуют длительный цикл пуска, большие масса и габариты);

- наиболее перспективными считаются конденсаторные накопители, что связано с развитием нанотехнологий и совершенствованием производства электрохимических конденсаторов на их основе.

Наилучшие результаты в производстве конденсаторных накопителей энергии достигнуты компанией MAXWELL (США). Рассмотрим опубликованные этой компанией осциллограммы [1] стеновой прокрутки вала электростартера мощностью 1 кВт от конденсаторной батареи (КБ) с параметрами $C = 300 \text{ Ф}$, $U = 12,5 \text{ В}$ (рис.1). Выведенная

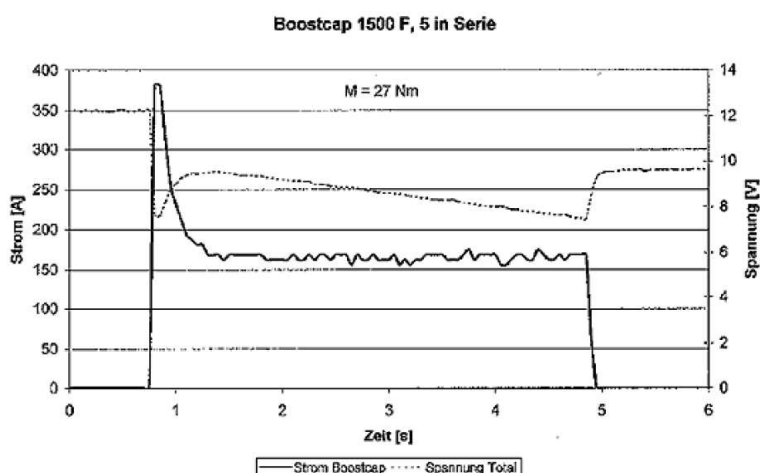


Рисунок 1

Осциллограммы прокрутки стартера. Сплошная линия — ток, потребляемый стартером от КБ, пунктир — напряжение КБ.

энергия КБ составляет $W \approx 5,8$ кДж ($160 \text{ А} \times 9 \text{ В} \times 4 \text{ с}$); в то же время энергоемкость $E = 23,4$ кДж ($300 \text{ Ф} \times 12,5 \text{ В}^2/2$). Таким образом, в рассмотренном примере коэффициент полезного использования энергоемкости $W/E \approx 25\%$.

Аналогичная картина наблюдается при пуске ДВС с использованием различных инерционных накопителей: коэффициент полезного использования энергоемкости маховика составляет около 25% (см. стр. 173 в кн. [2]).

Общие недостатки существующих систем обусловлены тем, что отбор энергии от дополнительного накопителя энергии происходит практически неуправляемо – путем прямого подключения при помощи контактора либо фрикционной муфты:

- в первый момент после подключения возникают динамические перегрузки и существенные тепловые потери энергии (скольжение в муфте, потери в электрической цепи из-за выбросов пускового тока);

- в процессе прокрутки скорость вращения снижается, так как уменьшается напряжение КБ либо скорость маховика;

- после снижения скорости вращения до порогового уровня и отключения стартера значительная часть энергии накопителя остается недоиспользованной.

Низкий коэффициент полезного использования энергоемкости ведет к увеличению стоимости и массы дополнительного накопителя. Динамические перегрузки на валу стартера сокращают ресурс его работы. Снижение скорости вращения вала ДВС в процессе прокрутки уменьшает вероятность успешного зимнего пуска.

Научно-техническая задача, решаемая в рамках проекта, заключается в создании энергоэффективных (имеющих повышенный коэффициент полезного использования энергоемкости) систем пуска ДВС на основе конденсаторных накопителей с *управляемой вольт-амперной характеристикой* (ВАХ). Энергоэффективные системы пуска должны обладать следующими конкурентными преимуществами: исключать дефицит энергобаланса АБ при частых пусках, увеличивать ресурс работы стартера за счет снижения динамических перегрузок, обеспечивать надежный пуск ДВС в условиях экстремально низких температур окружающего воздуха.

Бездефицитный энергобаланс АБ при частых пусках и увеличение ресурса работы стартера позволят без существенных дополнительных затрат реализовать режим «Старт-Стоп» (данный режим уменьшает выбросы выхлопных газов и снижает расход топлива в городских условиях в среднем на 8% [3]).

Повышение надежности пуска позволит сократить применяемую в холодных регионах РФ практику непрерывной работы ДВС зимой [4]. Указанная практика ведет к ежегодному перерасходу топлива более 1 млн. тонн.

Новизна предлагаемых в проекте решений подтверждена результатами патентной экспертизы планируемых к использованию изобретений [5], [6].

До проведения НИОКР проверка работоспособности энергоэффективных систем пуска ДВС осуществлена путем имитационного компьютерного моделирования. По сравнению с аналогами, полученные результаты позволяют рассчитывать на 2-х кратное повышение коэффициента полезного использования энергоемкости конденсаторных накопителей, что обеспечит конкурентные стоимость, массу и габариты проектных продуктов.

Проведение НИОКР обусловлено необходимостью получения экспериментальных данных, подтверждающих ожидаемое повышение коэффициента полезного использования энергоемкости конденсаторных накопителей, и проверки работоспособности применяемых технических решений. Полученный экспериментальный материал позволяет уточнить технические требования к базовой модели пускового модуля для легкового автомобиля, а также сформулировать требования к перспективной продуктовой линейке для использования в составе коммерческих автомобилей, грузовиков и автобусов.

План НИОКР включает в себя три этапа:

1) Результаты первого этапа представлены в промежуточном отчете (регистрационный № 115040710084, инв. № 1). На первом этапе НИОКР разработана эскизная КД экспериментального образца пускового модуля ДВС, собран экспериментальный образец пускового модуля ДВС.

2) Результаты второго этапа представлены в промежуточном отчете (регистрационный № 115040710084, инв. № 2). На втором этапе НИОКР проведены лабораторные испытания экспериментального образца пускового модуля ДВС. В процессе испытаний проверены рабочие режимы и энергоэффективность пускового модуля.

3) На третьем этапе НИОКР проведены испытания экспериментального образца в составе легкового автомобиля. По результатам испытаний откорректированы технические требования и доработана конструкция экспериментального образца пускового модуля ДВС.

Данный отчет является заключительным и включает в себя обобщенные материалы предыдущих промежуточных отчетов, а также результаты работ третьего этапа. Все расчетные, экспериментальные и конструктивные данные представлены в заключительном отчете с учетом проведенных корректировок.

Технические требования к пусковому модулю ПМ-12В/180А, откорректированные по результатам испытаний:

- Номинальное рабочее напряжение: 12 В.
- Максимальный рабочий ток¹, не менее: 180 А.
- Максимальная выведенная энергия², не менее: 7 кДж.
- Место установки: моторное отделение автомобиля.
- Режим работы: перемежающийся, ПН не более 2,5%.
- Климатическое исполнение по ГОСТ 15150: О2.
- Рабочая температура окружающей среды: от -40°С до +60°С.
- Степень защиты по ГОСТ 14254 (МЭК 529): IP65.
- Схема: двухпроводная.
- Техническое обслуживание и ремонт не требуются.
- Гамма процентная наработка до отказа: 500000 циклов при Y=95% .
- Габаритные размеры, мм: 82*175*190.
- Масса, не более: 2,7 кг.
- Остальные требования: по ГОСТ Р 52230 «Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия»

Метрологическое обеспечение НИОКР включает в себя следующий перечень измерительного оборудования:

- источник питания лабораторный Б5-71 ГОСТ 19164-88 (30В, 10А);
- мультиметр цифровой VC89В;
- мультиметр цифровой UT209;
- осциллограф электронно-лучевой С1-65А ГОСТ 22261-76;
- осциллограф цифровой HDS1022М-N;
- секундомер СОСпр-2б-2-000.

¹ При температуре окружающей среды -18°С

² При длительности разряда 20с (мощность нагрузки 350 Вт)

1 Выбор направления исследований

1.1 Обзор вариантов подключения накопителей к бортовой сети

Существенное влияние на функциональные возможности и потребительские свойства конденсаторных накопителей энергии оказывает схема подключения. Наиболее простой и распространенный вариант – *параллельное подключение* КБ к бортовой сети (рис. 2). Один из недостатков данной схемы обусловлен низким сопротивлением на

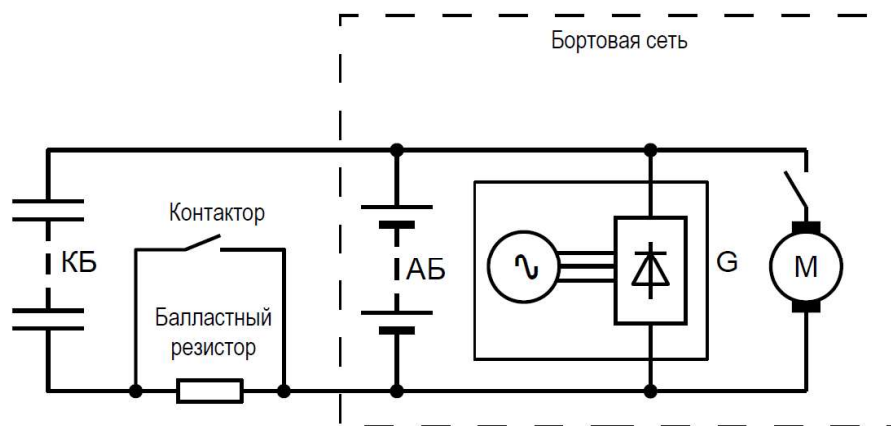


Рисунок 2
Параллельное подключение

выводах КБ (единицы миллиом), что требует повышенных мер предосторожности при монтаже из-за риска короткого замыкания: необходим предварительный заряд КБ непосредственно перед подключением, либо использование дополнительной электротехнической обвязки (контактор, балластный резистор). К достоинствам схемы следует отнести возможность совместной работы АБ и КБ на общую нагрузку.

Другая известная схема (рис. 3) использует *каскадное подключение* [7]. В этом

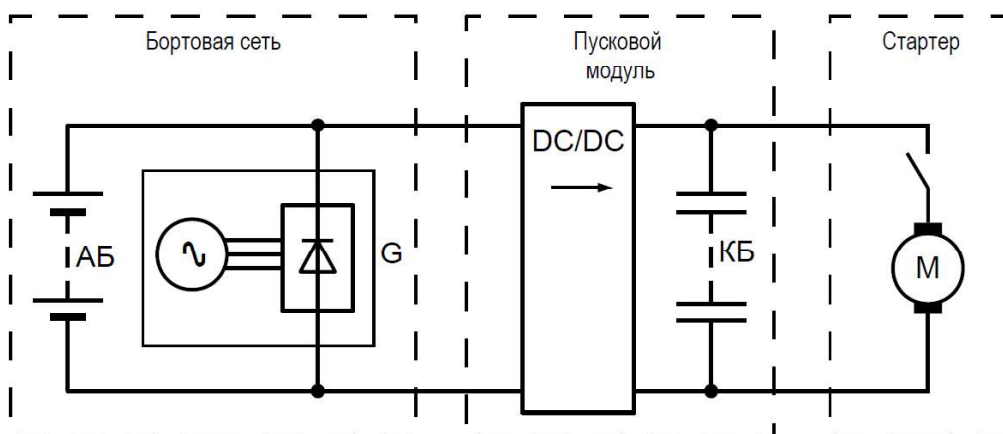


Рисунок 3
Каскадное подключение

случае накопитель энергии представляет собой специализированный функционально-законченный пусковой модуль. Для заряда конденсаторов используется встроенный DC/DC преобразователь небольшой мощности. Данная схема не требует дополнительной внешней электротехнической обвязки, упрощена процедура монтажа. К недостаткам схемы следует отнести: отсутствие совместной работы АБ и КБ на общую нагрузку; длительное время заряда КБ; изменение штатной схемы подключения стартера.

Кроме того, оба рассмотренных варианта имеют недостатки, отмеченные в разделе «Введение»: низкий коэффициент полезного использования энергоемкости; динамические перегрузки; снижение скорости вращения вала стартера в процессе прокрутки.

Проектные пусковые модули будут использовать вариант подключения (рис. 4), в

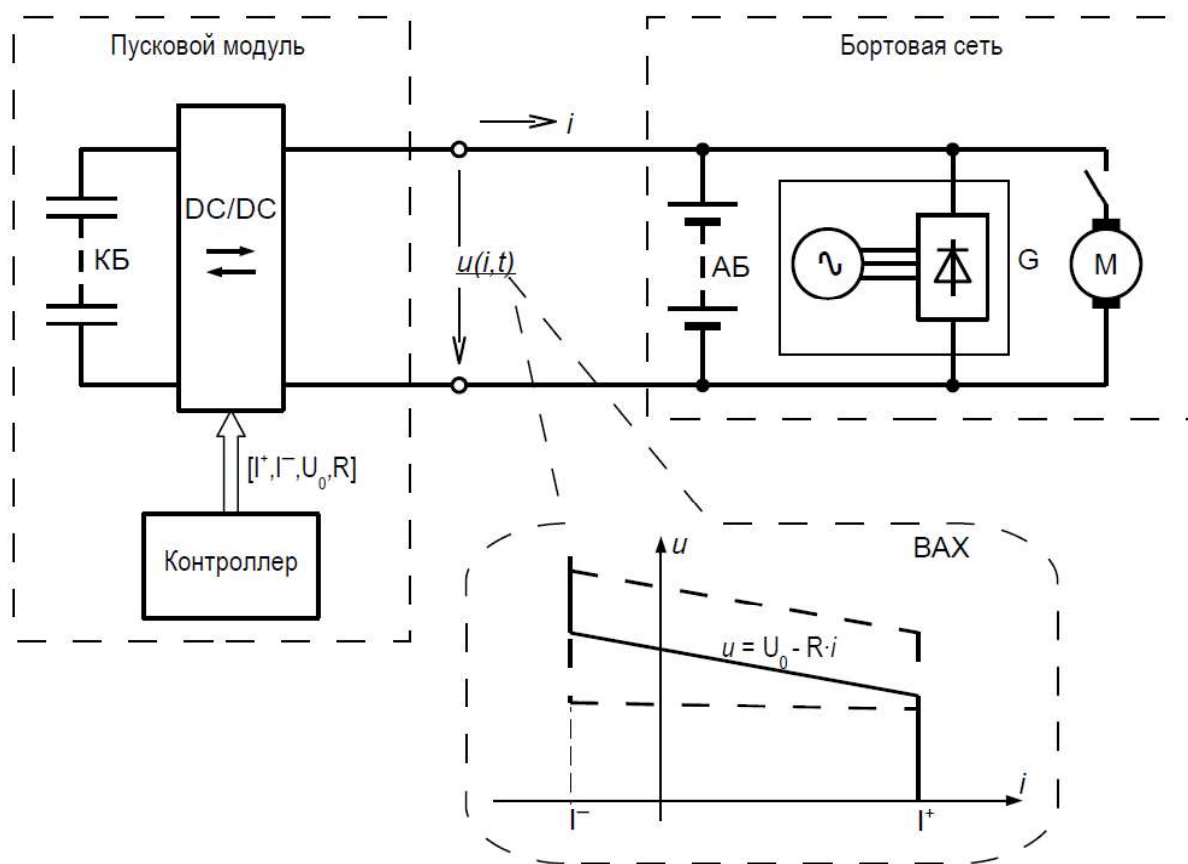


Рисунок 4
Подключение через обратимый преобразователь

котором связь КБ с бортовой сетью осуществляется через встроенный обратимый силовой DC/DC преобразователь. Данная схема, по сравнению с известными схемами параллельного и каскадного подключения, обладает следующими преимуществами:

- ВАХ на выводах пускового модуля может изменяться по интеллектуальным (программно управляемым) алгоритмам, что позволяет осуществлять «мягкое» включение стартера и более полное расходование запасенной энергии;

- АБ и КБ совместно работают на общую нагрузку;

- пусковой модуль в исходном (нерабочем) состоянии обладает внутренним сопротивлением в десятки килоом, что делает его подключение простым и безопасным, при этом пусковой модуль является функционально законченным устройством и может устанавливаться по принципу «plug & play».

1.2 Методика выбора типа электрохимических конденсаторов

По общепризнанной классификации все электрохимические конденсаторы разделяются на 4 поколения (в соответствии с последовательностью их разработок) [8]:

1 – конденсаторы, имеющие положительные и отрицательные электроды из активированного угля с водными растворами электролитов (KOH, H₂SO₄,...);

2 – электроды из активированного угля с неводными растворами электролитов (этиленкарбонат, ацетонитрил + ионогены Li⁺ и др.);

3 – один из электродов выполнен из активированного угля, а второй — фарадеевский электрод с водными растворами электролитов (NiOOH/KOH/C, PbO₂/H₂SO₄/C,...);

4 – один из электродов выполнен из активированного угля, другой — фарадеевский электрод, обратимо работающий в неводных электролитах.

3-е и 4-е поколения часто называют «гибридными» или «асимметричными».

Поколения электрохимических конденсаторов различаются по удельным показателям мощности и энергемкости. Самые мощные — электрохимические конденсаторы 1-го поколения — до 15 кВт/кг в импульсе, но всего лишь до 4 кДж/кг. Самой большой удельная энергоемкость у 4-го поколения — больше 30 кДж/кг, но импульсная мощность ниже — 1 кВт/кг.

Выбор типа электрохимических конденсаторов для накопителя энергии является многокритериальной задачей, требующей анализа удельных показателей энергоемкости, мощности и стоимости, с учетом предполагаемых режимов эксплуатации. В общем случае, для оптимального выбора необходим расчет электрических процессов по каждому из возможных вариантов реализации.

Указанная задача может быть существенно упрощена за счет использования аппроксимирующей *P-функции*:

$$P = \frac{P_0}{(T/\tau)^{0,96} + 1} \quad (1)$$

где T – максимально-возможная длительность разряда накопителя постоянной мощностью P .

В формуле (1) коэффициенты определяются как:

$$P_0 = \frac{U_{\max}^2}{4R} \quad (2)$$

$$\tau = 1,7RC \quad (3)$$

где R – эквивалентное последовательное сопротивление постоянному току, C – емкость, U_{\max} – максимально допустимое напряжение конденсатора.

Исходя из (1-3) получим формулу для определения максимально-возможного коэффициента полезного использования энергоемкости конденсатора при разряде постоянной мощностью:

$$k_{\max} = \frac{W_{\max}}{E} = \frac{PT}{E} = \frac{T/2RC}{(T/1,7RC)^{0,96} + 1} \quad (4)$$

На рис. 5 представлены графики зависимости коэффициента k_{\max} от T .

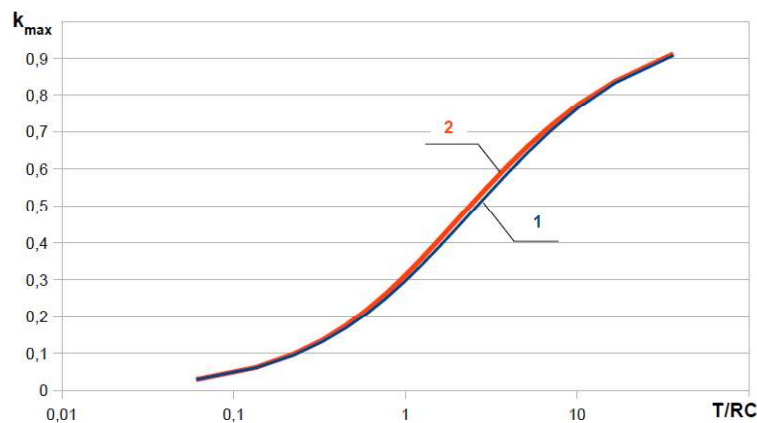


Рисунок 5

1 – результаты компьютерного моделирования при различных условиях разряда конденсаторного накопителя; 2 – результат расчета по упрощенной формуле (4)

В диапазоне $T \in [0, 100RC]$ погрешность расчета по формуле (4) составляет 2%, что приемлемо для решения задачи оптимального выбора типа электрохимических конденсаторов. Выбор может быть сведен к определению минимальной взвешенной суммы, рассчитанной для каждого типа конденсаторов:

$$F_i = \frac{(\alpha M_i + \beta D_i)}{k_{\max i}} \quad (5)$$

где i – тип конденсатора; α, β – весовые коэффициенты; M_i (кг/кДж) – отношение масса/энергоемкость i -го типа; D_i (\$/кДж) – отношение стоимость/энергоемкость i -го типа.

1.3 Выбор варианта построения преобразователя

Ключевой проблемой создания пускового модуля является разработка силового обратимого DC/DC преобразователя, который должен удовлетворять следующим условиям:

- минимальные тепловые потери энергии;
- минимальные масса и объем;
- минимальная стоимость комплектующих элементов.

Условию минимизации тепловых потерь энергии соответствуют импульсные преобразователи. Рассмотрим возможные варианты построения силового импульсного обратимого DC/DC преобразователя на основе известных решений.

1.3.1 Встречно-параллельный преобразователь (рис. 6) основан на использовании

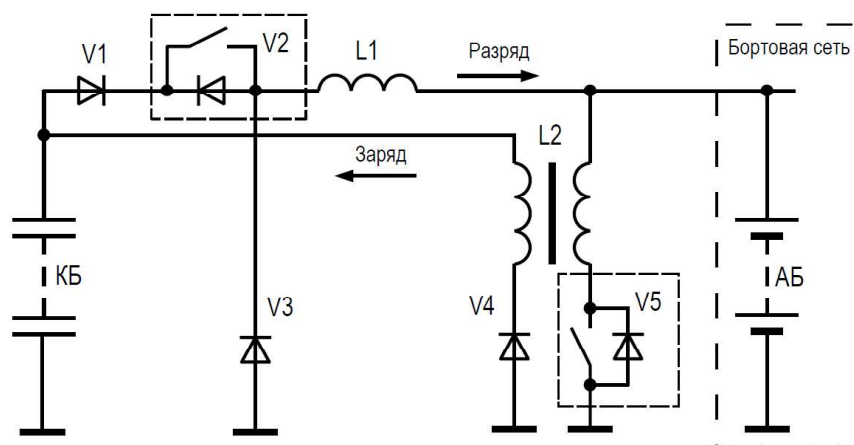


Рисунок 6
Встречно-параллельный преобразователь

двух необратимых преобразователей:

- в режиме заряда КБ работает обратноходовой инвертор L2, V4, V5;
- в режиме разряда КБ работает понижающий преобразователь L1, V1-V3.

В совокупности они работают как обратимый преобразователь: повышающе-понижающий в режиме заряда КБ, понижающий в режиме разряда КБ. При этом максимальное рабочее напряжение КБ должно превышать напряжение бортовой сети, по меньшей мере, вдвое.

Достоинством рассматриваемого варианта является наличие стандартных схемотехнических решений по управлению необратимыми преобразователями и широкой номенклатуры необходимых для этого интегральных схем. К недостаткам относятся избыточные масса и объем (два силовых дросселя L1, L2) и высокая стоимость силовых диодов Шоттки (V1, V3, V4).

1.3.2 Четырехключевой преобразователь (рис. 7) имеет минимальные массу и

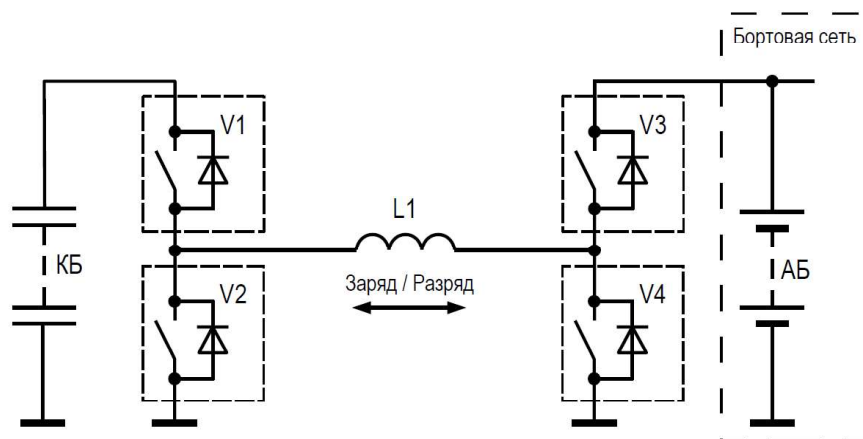


Рисунок 7
Четырехключевой преобразователь

объем, так как содержит единственный дроссель. Кроме того, стоимость ключей V1-V4 на МОП транзисторах с изолированным затвором существенно ниже стоимости сопоставимых с ними по максимальному току диодов Шоттки. Схема симметрична – работает в области прямых и инверсных токов в режимах как повышения, так и понижения напряжения.

Следует отметить отсутствие стандартных решений и интегральных микросхем, предназначенных для управления четырехключевым преобразователем с требуемым рабочим током (180А) – представленные на рынке варианты интегральных ШИМ контроллеров и преобразователей рассчитаны на рабочий ток до 10 А [9]. Несмотря на это, достоинства четырехключевого преобразователя оправдывают дополнительные усилия на создание оригинальной схемы управления и позволяют выбрать данный вариант в качестве направления для дальнейших исследований.

2 Разработка пускового модуля

2.1 Принципиальная схема пускового модуля

Схема электрическая принципиальная ПМ-12В/180А.000.ЭЗ (Приложение А), разработана в соответствии с выбранным вариантом четырехключевого преобразователя (рис. 7).

Схема содержит набор силовых элементов, которые расположены на общем монтажном шасси, и плату управления ПМ-12В/180А.080.

Через контрольный разъем ХР1 обеспечивается питание пускового модуля (сигнал «Вкл.»), и подключение измерительных приборов для контроля тока дросселя (сигнал «I»), напряжения АБ (сигнал «V_{АБ}») и напряжения КБ (сигнал «V_{КБ}»).

При выборе типа электрохимических конденсаторов исследовались продуктовые линейки конденсаторов и КБ компаний MAXWELL (США) [10], NESSCAP (Корея) [11], ЭЛИТЕХ (Курск) [12], ЭЛТОН (Троицк) [13] и др. Для каждого типа конденсаторов определялась взвешенная сумма (5); при расчетах экспертно были приняты весовые коэффициенты $\alpha = 50$ кДж/кг, $\beta = 1$ кДж/\$; длительность разряда $T = 2$ с. Выборочные результаты расчетов в НКУ представлены в табл. 1.

Таблица 1 – расчет взвешенных сумм для оценки электрохимических конденсаторов

i	Производитель	Тип (поколение)	RC с	$k_{\max i}$	M_i кг/кДж	D_i \$/кДж	F_i
1	ЭЛИТЕХ	12ПП-4/0,005 (1)	0,28	0,72	0,95	17,3	90,0
2	MAXWELL	BCAP 0310 P270 (2)	0,68	0,55	0,05	7,1	17,5
3	MAXWELL	BCAP 0650 P270 (2)	0,52	0,60	0,07	12,7	27,0
4	NESSCAP	ESHSR-0325 (2)	0,62	0,57	0,05	10,7	23,2
5	ЭЛТОН	10ЭК501 (3)	2,1	0,30	0,15	23,8	104,3

Наименьшая взвешенная сумма получена во втором варианте – конденсатор BCAP 0310 P270 компании MAXWELL – выбираем данный тип. Параметры выбранного конденсатора при -18°C (номинальный режим): 310 Ф; 2,7 мОм; 2,6 В. Для данных параметров (при $T = 2$ с): $k_{\max} = 0,50$; $E = 1,05$ кДж; $W_{\max} = 0,52$ кДж.

Пусковой модуль должен обеспечивать прокрутку стартера в течение 2 секунд при напряжении 10 В и токе 180 А. Выведенная энергия модуля в указанном режиме составляет 3,6 кДж. Необходимое количество конденсаторов BCAP 0310 P270

(с 15% запасом на потери в DC/DC преобразователе) должно быть не меньше, чем $1,15 \times \frac{3,6}{0,52}$, то есть – 8 штук.

Соединение конденсаторов в батарее последовательное, так как при этом обеспечиваются максимальное напряжение КБ и, соответственно, минимальные потери в преобразователе. Параметры КБ (приложение А: конденсаторы С1-С8) для дальнейших расчетов: напряжение 20,5 В; емкость 38,7 Ф; энергоемкость 8132 Дж, эквивалентное последовательное сопротивление постоянному току 18 мОм в НКУ, 22 мОм при -18°С; максимальный допустимый ток 250 А; рабочий температурный диапазон -40 ÷ 65°С.

2.2 Функциональная блок-схема DC/DC преобразователя.

Обратимый преобразователь (рис.8) содержит два полумоста на МОП-

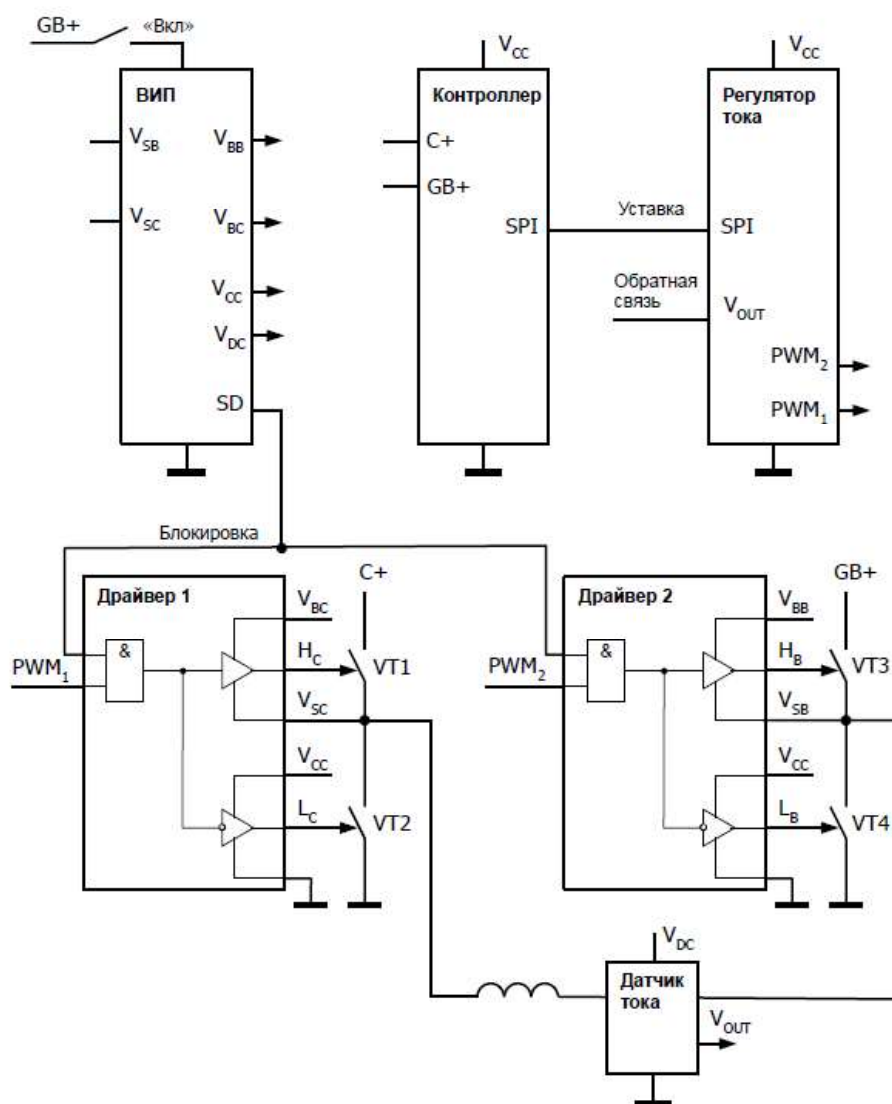


Рисунок 8
Функциональная блок-схема DC/DC преобразователя

транзисторах, подключенных параллельно к КБ (С+, VT1, VT2) и АБ (GB+, VT3, VT4) соответственно. Полумосты через драйверы управляются импульсными сигналами PWM₁, PWM₂ и общим сигналом блокировки SD.

Схема управления преобразователем включает в себя:

- вторичный источник питания (ВИП) с выходами V_{ВВ}, V_{ВС}, V_{СС} для питания драйверов и микросхем (12В), а также с выходом V_{DC}, используемым для питания датчика тока и в качестве источника опорного напряжения (5В);
- регулятор тока, который обеспечивает минимальное рассогласование сигналов обратной связи по току дросселя (V_{OUT}) и уставки (SPI);
- контроллер, который задает сигнал уставки (SPI), обеспечивая формирование на выходе (GB+) пускового модуля требуемой ВАХ (рис. 9).

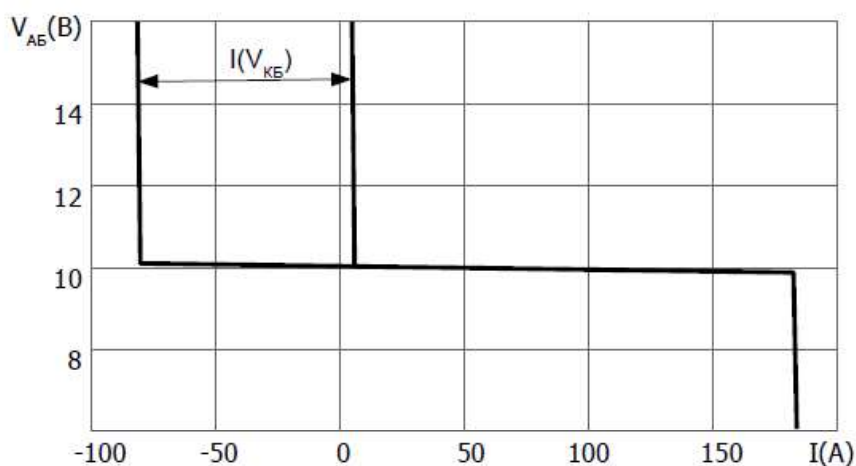


Рисунок 9
Вольт-амперная характеристика пускового модуля

ВАХ имеет участки:

- ограничения зарядного (отрицательного) тока пускового модуля $-80\text{A} \leq I \leq 0$, который является функцией от напряжения V_{КБ} (на выводе С+ относительно общего провода);
- стабилизации напряжения V_{АБ} = 10 В (на выводе GB+ относительно общего провода);
- ограничения разрядного (положительного) тока пускового модуля, который является убывающей функцией от температуры (сопротивления терморезистора R9 на схеме ПМ-12В/180А.000.ЭЗ, приложение А). В диапазоне температур ниже 25°C ограничение разрядного тока I = 180А.

2.3 Конструкция пускового модуля

Эскизные конструкторские документы пускового модуля (приложение А) представлены в отчете спецификацией и чертежом общего вида ПМ-12В/180А.000 ВО.

Корпус пускового модуля (рис. 10) выполнен из стеклотекстолита толщиной 3мм. На корпусе закреплены выводы (клеммы ПМ-12В/180А.060 СБ, ПМ-12В/180А.070 СБ) для подключения АБ. Размеры корпуса и выводов соответствуют ГОСТ Р МЭК 60095-2, что обеспечивает удобную компоновку модуля в автомобиле.

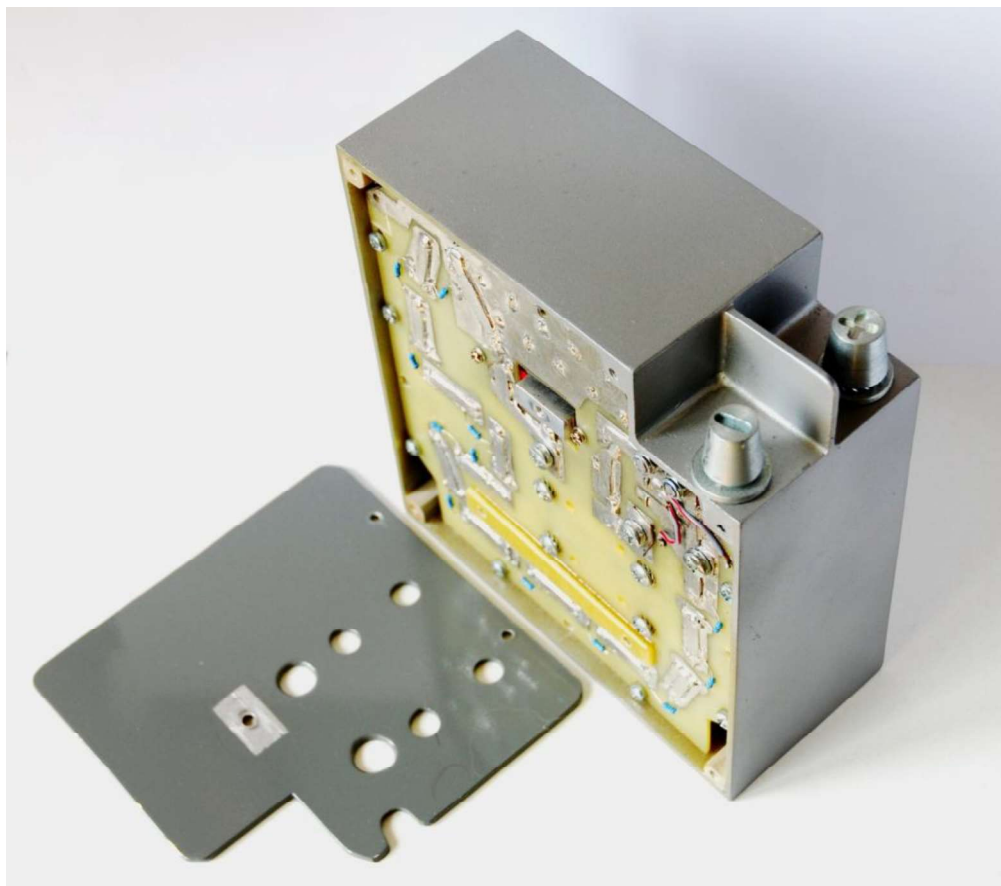


Рисунок 10
Внешний вид экспериментального образца пускового модуля ПМ-12В/180А, без крышки, со снятым радиатором.

Все силовые элементы модуля размещены на общем монтажном шасси.

Силовые транзисторы (поз. 42) установлены на алюминиевом теплоотводе (ПМ-12В/180А.040 СБ) с размерами 10 x 40 x 75 мм. Данные размеры обеспечивают достаточную теплоемкость для кратковременного поглощения тепла, выделяемого транзисторами при работе пускового модуля на максимальной мощности в течение 2 секунд. Для обеспечения перемежающегося режима работы и постоянного отвода тепла силовых транзисторов служит радиатор (ПМ-12В/180А.000.05), установленный между теплоотводом и крышкой.

3 Испытания пускового модуля

3.1 Схема и конструкция нагрузочного стенда

Нагрузочный стенд (именуемый далее «стенд») предназначен для подключения пускового модуля к источнику питания с параметрами, аналогичными параметрам бортовой сети автомобиля, а также для имитации подключения нагрузки к бортовой сети и измерения выходных электрических параметров пускового модуля.

Электрическая принципиальная схема стенда представлена на рис. 11.

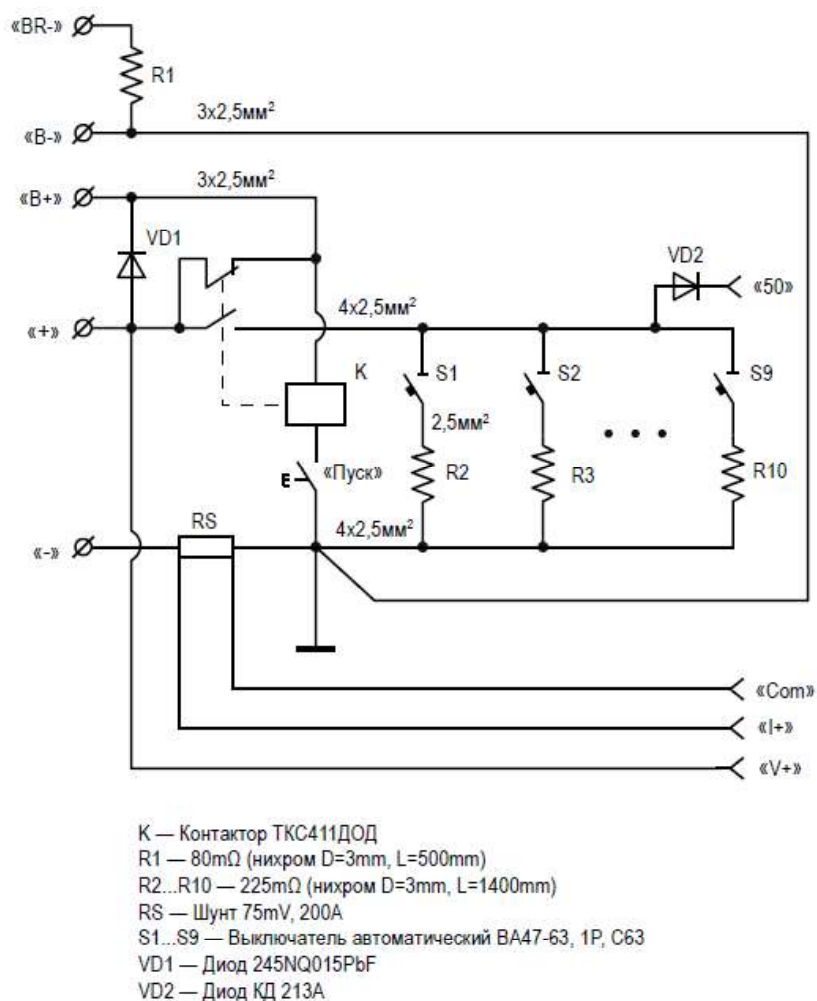


Рисунок 11
Схема нагрузочного стенда

Стенд содержит:

- Плюсовую «+» и минусовую «-» силовые клеммы для присоединения пускового модуля.
- Плюсовую «B+» и минусовые «B-», «BR-» силовые клеммы для присоединения аккумуляторной батареи (АБ), или иного источника питания. В случае

присоединения минуса АБ к клемме «BR-» имитируется состояние разряженной АБ с внутренним сопротивлением R1.

- Клеммы «Com», «V+» для подключения вольтметра и измерения напряжения на выводах пускового модуля.
- Шунт RS, измерительные зажимы которого выведены на клеммы «Com», «I+» для подключения милливольтметра и измерения тока на выводах пускового модуля.
- Силовые тумблеры S1-S9 для выбора нагрузочных резисторов R2-R10.
- Кнопку «Пуск», связанную с обмоткой контактора К, который обеспечивает подключение выбранных нагрузочных резисторов к выводам пускового модуля.
- Силовой диод VD1 и перемычку (на схеме не показана) для шунтирования диода. При установке перемычки выводы АБ и пускового модуля соединяются параллельно (как в бортсети автомобиля). Снятие перемычки позволяет нагружать пусковой модуль без участия АБ.
- Выпрямительный диод VD2 и клемму «50» для включения тягового реле стартера.

Внешний вид стенда приведен на фотографии (рис. 12).



Рисунок 12
Нагрузочный стенд

Клеммы и органы управления расположены на верхней панели стенда.

Вентиляционные отверстия в корпусе служат для охлаждения резисторов R1-R10.

3.2 Лабораторные испытания

Промежуточные результаты лабораторных испытаний приведены в Приложении Б.

Схема подключения, используемая для лабораторных испытаний пускового модуля, представлена на рис. 13.

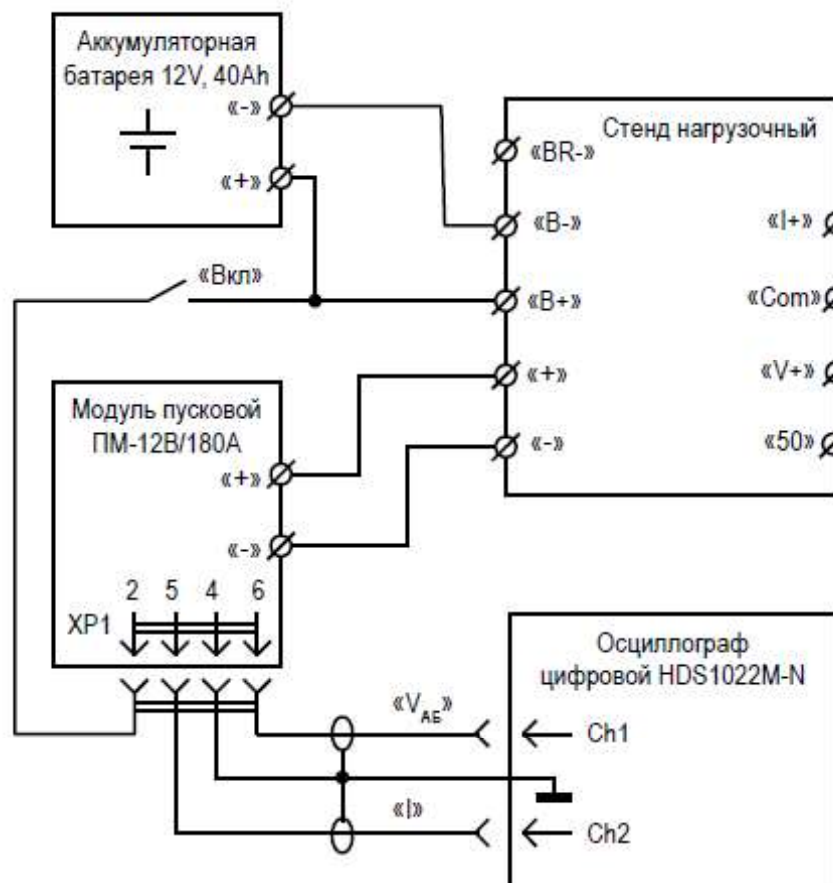


Рисунок 13
Схема подключения для лабораторных испытаний

В процессе лабораторных испытаний контролировались напряжение V_{AB} и ток I пускового модуля при подключении к его выводам резистивной нагрузки. Сопротивление нагрузки задавалось тумблерами S1÷S9 стенда. Для измерений использовался цифровой осциллограф. Измерения проводились в НКУ ($T_{окр.} = 25^{\circ}\text{C}$) и при пониженной температуре ($T_{окр.} = -18^{\circ}\text{C}$).

На рис.14 в качестве типичного примера представлены осциллограммы, снятые при $T_{окр.} = -18^{\circ}\text{C}$ и включении тумблеров S2, S4, S6, S8 стенда:

- До подключения нагрузки (нажатие кнопки «Пуск» стенда в момент времени $t = 0$) напряжение $V_{AB} \approx 12\text{В}$ (напряжение холостого хода аккумуляторной батареи). Данный режим соответствует участку $I(V_{KB}) = 0$ на рис.9 (нулевой зарядный ток при максимальном напряжении $V_{KB} = 20,5\text{В}$).

- После подключения нагрузки пусковой модуль переходит в режим стабилизации напряжения $V_{AB} = 10$ В. В промежутке времени $0 \div 2,4$ с DC/DC преобразователь пускового модуля работает в понижающем режиме ($V_{KB} > V_{AB}$), при этом ток дросселя I равен току нагрузки пускового модуля и в рассматриваемом примере составляет 147 А. В промежутке времени $2,4 \div 2,65$ с DC/DC преобразователь пускового модуля работает в повышающем режиме ($V_{KB} < V_{AB}$), при этом напряжение и ток нагрузки пускового модуля остаются постоянными, а ток дросселя I увеличивается.
- В момент времени $t = 2,65$ с мощность КБ становится ниже мощности нагрузки и разряд КБ завершается.

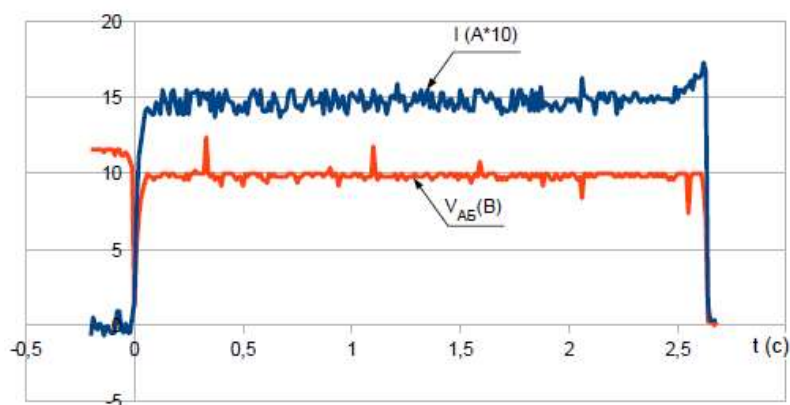


Рисунок 14
Осциллограммы при подключении резистивной нагрузки

Результаты лабораторных испытаний сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты лабораторных испытаний при различных условиях разряда

Включение тумблеров стенда	Токр. = 25°C				Токр. = -18°C			
	I (А)	V_{AB} (В)	t (с)	W (Дж)	I (А)	V_{AB} (В)	t (с)	W (Дж)
S1	41	10,0	17,5	7175	41	9,9	17,0	6900
S2, S4	85	10,0	7,4	6290	84	9,9	7,1	5904
S1, S3, S5	115	10,0	4,5	5175	115	9,9	4,2	4782
S2, S4, S6, S8	147	10,0	2,9	4263	147	9,9	2,6	3784
S1, S3, S5, S7, S9	172	10,0	2,2	3784	170	9,9	2,1	3534
S1 ÷ S9	183	6,9	3,6	4545	180	6,9	3,4	4223

Данные результаты позволяют оценить коэффициент полезного использования энергоемкости пускового модуля и коэффициент полезного действия DC/DC преобразователя. Выведенная энергия W пускового модуля определялась как произведение тока I , напряжения V_{AB} и длительности разряда t . На рис. 15 приведены

предельные (рассчитанные для идеального DC/DC преобразователя без потерь) и экспериментальные графики зависимости выведенной энергии от длительности разряда.

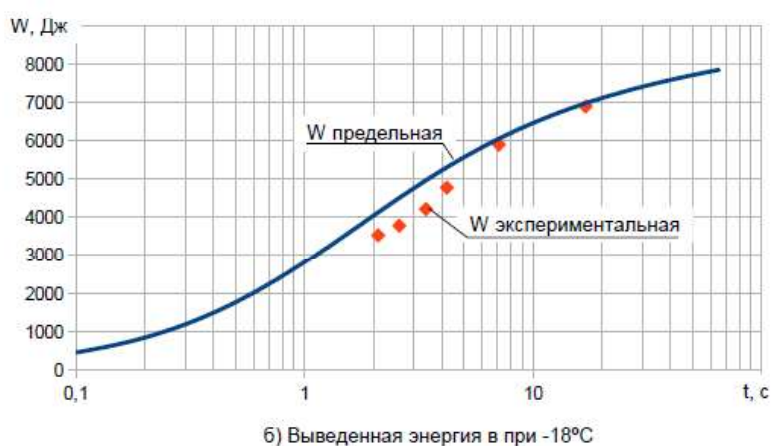
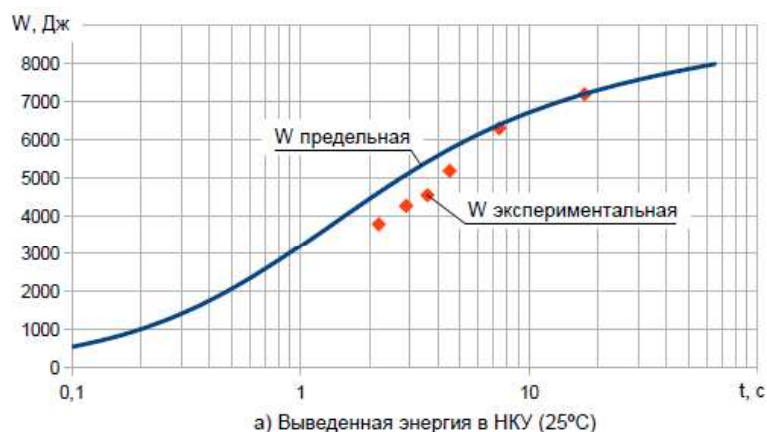


Рисунок 15

Как видно из рисунка, выведенная в процессе экспериментов энергия пускового модуля близка к предельно-возможной при длительности разряда, превышающей 7 секунд. При снижении длительности разряда до 2 секунд экспериментально полученное значение выведенной энергии составляет около 85% предельного значения.

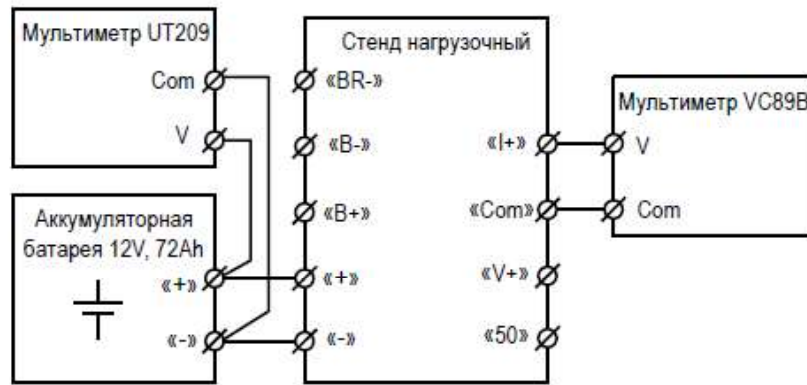
Таким образом, при энергоемкости КБ 8132Дж, экспериментально полученный коэффициент W/E полезного использования энергии пускового модуля составляет 43÷88%, коэффициент полезного действия DC/DC преобразователя – не менее 85%.

3.3 Испытания в составе легкового автомобиля

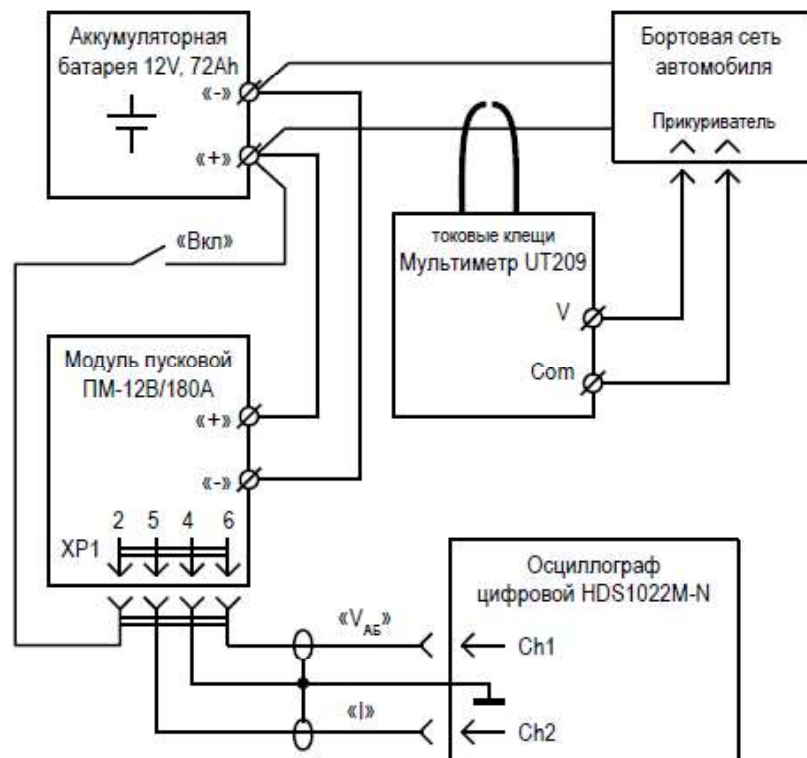
Схемы подключения для испытаний пускового модуля в составе легкового автомобиля представлены на рис. 16:

а) Схема для снятия вольт-амперных характеристик АБ; позволяет контролировать изменение внутреннего сопротивления АБ в процессе испытаний.

б) Схема для испытаний в режиме пуска ДВС и контроля разряда АБ; позволяет контролировать изменение остаточной емкости АБ, ток и напряжение пускового модуля.



а) Схема для снятия вольт-амперных характеристик АБ



б) Схема для испытаний в режиме пуска ДВС

Рисунок 16

Схемы подключения для испытаний в составе легкового автомобиля

Условия проведения испытаний:

- Место и время: г. Челябинск, 06.01.2016, 10.30 ÷ 12.57.
- Температура окружающего воздуха: -18°C .
- Автомобиль: Volkswagen Golf, 2012 г.в., пробег 25000км.
- ДВС: CLC 036748, дизельный, $V=1968\text{см}^3$, 110л.с.
- Стартер (штатный): VAG 02Z911024K, номинальная мощность 1,7кВт.
- Аккумуляторная батарея (штатная): 5K0915105G, 12В, 72Ач.

Методика испытаний в составе легкового автомобиля включает в себя следующие пункты:

3.3.1 Время выполнения операций контролировать при помощи секундомера.

3.3.2 Отсоединить штатную АБ от бортсети автомобиля и подключить ее к стенду по схеме рис. 16а. Тумблеры S1÷S9 стенда должны находиться в выключенном состоянии.

3.3.3 Включить один из тумблеров стенда.

3.3.4 Через 15÷20 секунд нажать и удерживать кнопку «Пуск» стенда; через 4÷5 секунд измерить ток $I_{АБ}$ и напряжение $V_{АБ}$ мультиметрами VC89В и UT209 соответственно; отпустить кнопку «Пуск» стенда; результаты измерений занести в протокол.

3.3.5 Если включены не все тумблеры стенда, увеличить количество включенных тумблеров на 1÷2 штуки и повторить п. 3.3.4 методики.

3.3.6 Отсоединить штатную АБ от стенда и подключить ее к бортсети автомобиля. Подключить пусковой модуль и измерительные приборы по схеме рис. 16б. Для подключения пускового модуля к АБ использовать провода сечением 10мм² длиной 0,5÷0,6м с зажимами типа «крокодил». Тумблер «Вкл» должен находиться в разомкнутом состоянии (пусковой модуль выключен).

3.3.7 Произвести контролируемый разряд АБ: включить нагрузки (дальний свет фар, вентиляцию и освещение салона автомобиля); мультиметром UT209 контролировать напряжение и ток АБ (ток должен находиться в пределах 29÷34 А, напряжение в процессе разряда должно уменьшиться на 0,5÷0,8 В, но не ниже 9 В); измерить длительность разряда, выключить нагрузки; определить разрядную емкость путем умножения средней величины тока (А) на длительность разряда (ч), результат занести в протокол.

3.3.8 Через 10÷15 минут произвести пуск ДВС автомобиля от штатной АБ. Во время пуска цифровым осциллографом HDS 1022M-N снять осциллограмму $V_{АБ}$, сохранив ее на внешнем USB-носителе. Заглушить ДВС.

3.3.9 Включить пусковой модуль (тумблер «Вкл» должен находиться в замкнутом состоянии). Через 3÷4 минуты произвести пуск ДВС автомобиля от штатной АБ и пускового модуля. Во время пуска цифровым осциллографом HDS 1022M-N снять осциллограммы I и $V_{АБ}$, сохранив их на внешнем USB-носителе. Заглушить ДВС.

3.3.10 Повторять пункты 3.3.2÷3.3.9 настоящей методики до достижения предельного уровня разряда АБ (уменьшения контролируемого напряжения по п. 3.3.7 до 9÷9,5 В).

Испытания по приведенной выше методике включают в себя 3 цикла разряда АБ с последующими пусками ДВС.

Изменение ВАХ штатной АБ в процессе испытаний показано на рис. 17. Как видно

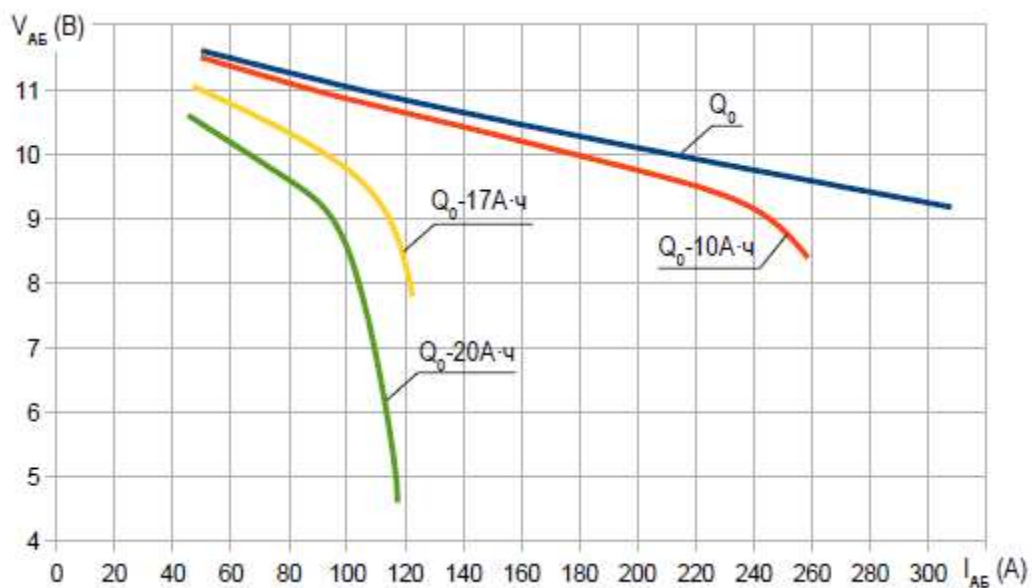


Рисунок 17
Вольт-амперные характеристики АБ (12В, 72Ач) при -18°C

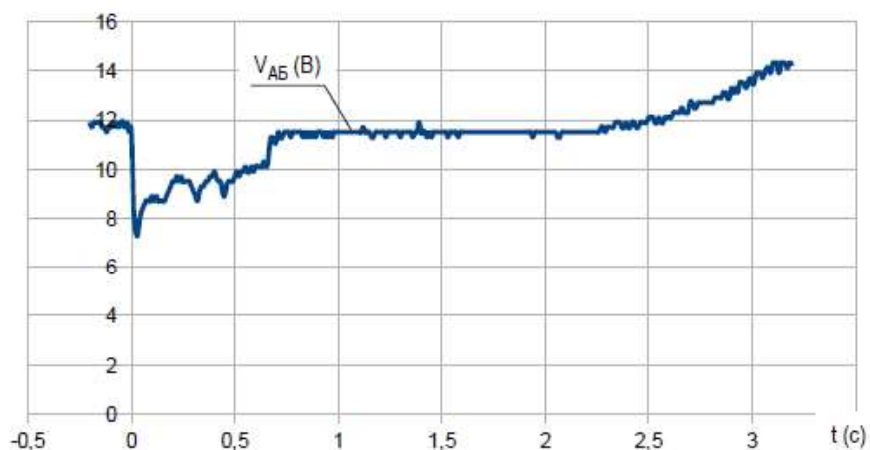
из рисунка, при уменьшении остаточной емкости и увеличении разрядного тока внутреннее сопротивление АБ резко возрастает, что связано с повышением концентрационной поляризации электродов (см. стр. 179, 180 в кн. [14]). Это может приводить к существенному (вплоть до полной остановки) снижению скорости прокрутки вала ДВС стартером. В начальном состоянии АБ имела остаточную емкость Q_0 и соответствующую ей на рис. 17 ВАХ; при этом обеспечивался штатный пуск ДВС без участия пускового модуля (осциллограммы пуска не приводятся).

Ниже представлены полученные в результате испытаний осциллограммы пуска ДВС при уменьшении остаточной емкости АБ:

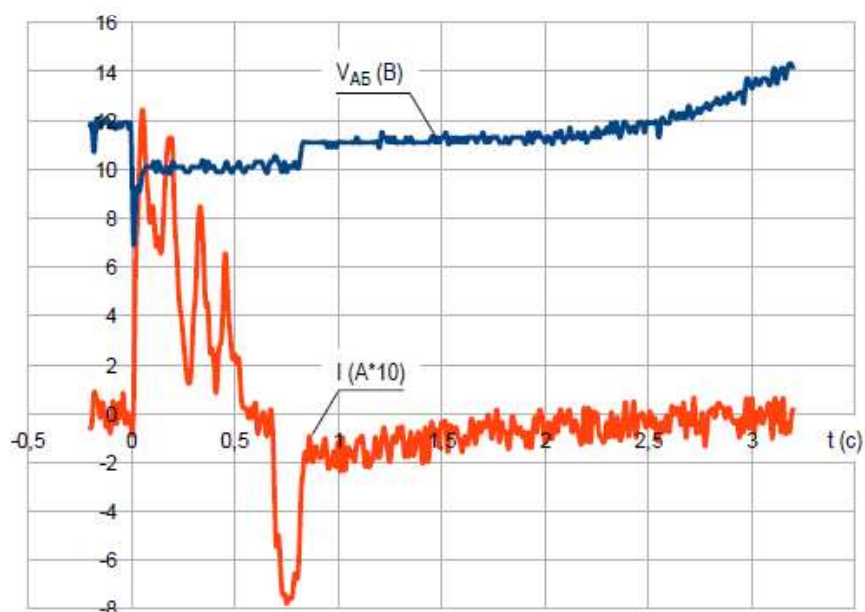
- после разряда АБ с уменьшением остаточной емкости до уровня $Q = Q_0 - 10А \cdot ч$ произведен пуск ДВС от АБ без пускового модуля (рис. 18а) и пуск от АБ с пусковым модулем (рис. 18б);

- после разряда АБ с уменьшением остаточной емкости до уровня $Q = Q_0 - 17А \cdot ч$ произведен пуск ДВС от АБ без пускового модуля (рис. 19а) и пуск от АБ с пусковым модулем (рис. 19б);

- после разряда АБ с уменьшением остаточной емкости до уровня $Q = Q_0 - 20А \cdot ч$ произведена неудачная попытка пуска ДВС от АБ без пускового модуля (рис. 20а) и пуск от АБ с пусковым модулем (рис. 20б).



а) Пуск ДВС от АБ без пускового модуля



б) Пуск ДВС от АБ с пусковым модулем

Рисунок 18

Осциллограммы пуска ДВС при -18°C и остаточной емкости АБ $Q=Q_0-10\text{A}\cdot\text{ч}$

Обобщенные параметры осциллограмм сведены в табл. 3:

- минимальное напряжение V_{AB}^{\min} на выводах АБ во время прокрутки вала ДВС стартером (без учета просадки в момент включения), от которого зависит скорость вращения вала ДВС в конце такта сжатия и, соответственно, вероятность воспламенения рабочей смеси и успешного пуска ДВС;
- длительность $t_{\text{ПР}}$ прокрутки вала ДВС стартером;
- минимальный I_{AB}^{\min} и максимальный I_{AB}^{\max} ток, потребляемый от АБ в процессе прокрутки, который определялся по напряжению АБ и соответствующей ВАХ (рис. 17);
- минимальный I^{\min} и максимальный I^{\max} ток, потребляемый от пускового модуля в процессе прокрутки.

Таблица 3 – Обобщенные параметры осциллограмм по результатам пуска ДВС

Остаточная емкость АБ	Пуск от АБ без пускового модуля		Пуск от АБ с пусковым модулем					
	$V_{АБ}^{min}, В$	$t_{ПР}, с$	$V_{АБ}^{min}, В$	$t_{ПР}, с$	$I_{АБ}^{min}, А$	$I_{АБ}^{max}, А$	$I^{min}, А$	$I^{max}, А$
Q ₀ -10А·ч	8,8	0,7	10,0	0,6	175	175	7	110
Q ₀ -17А·ч	6,1	0,8	10,0	0,6	95	95	80	165
Q ₀ -20А·ч	3,0	-	8,5	0,8	67	100	130	180

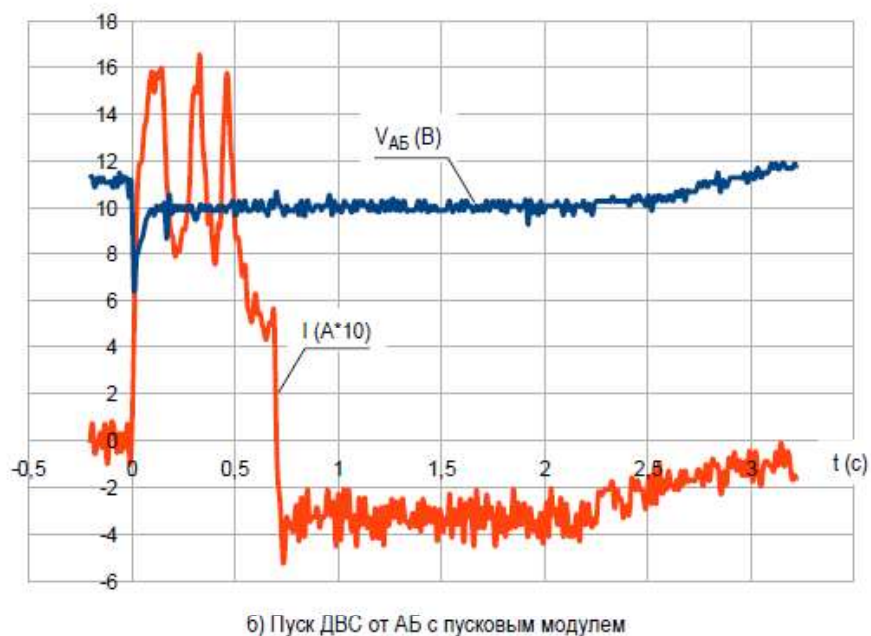
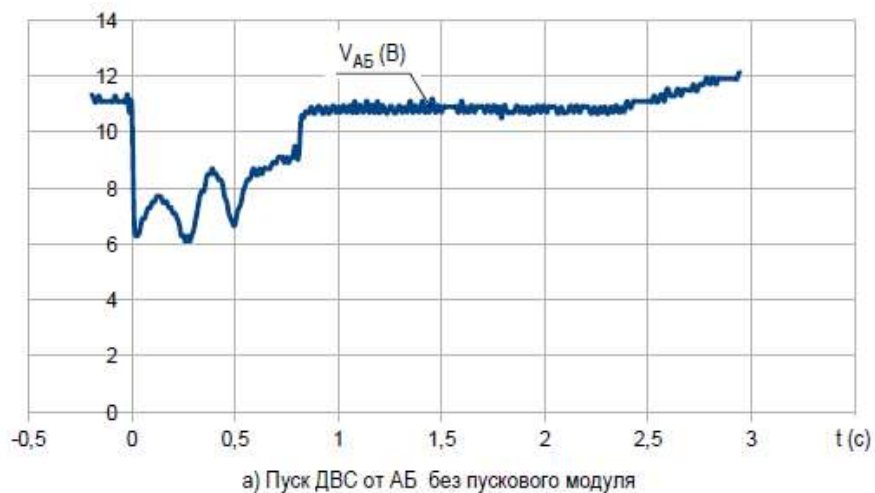
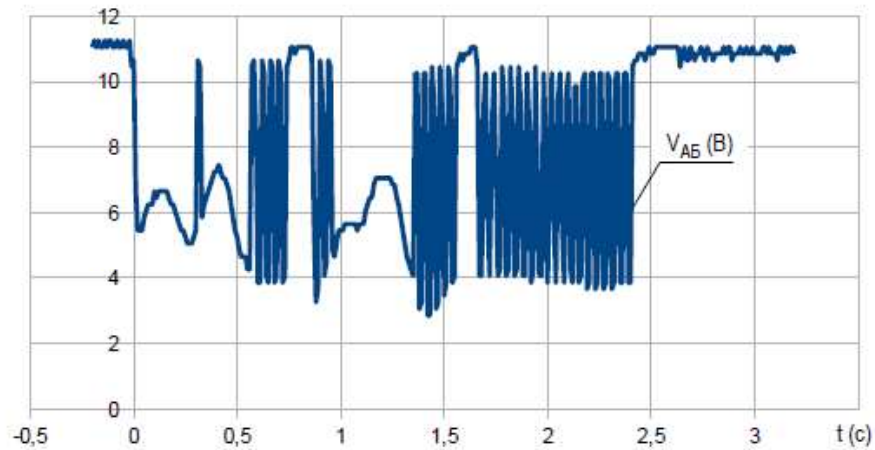
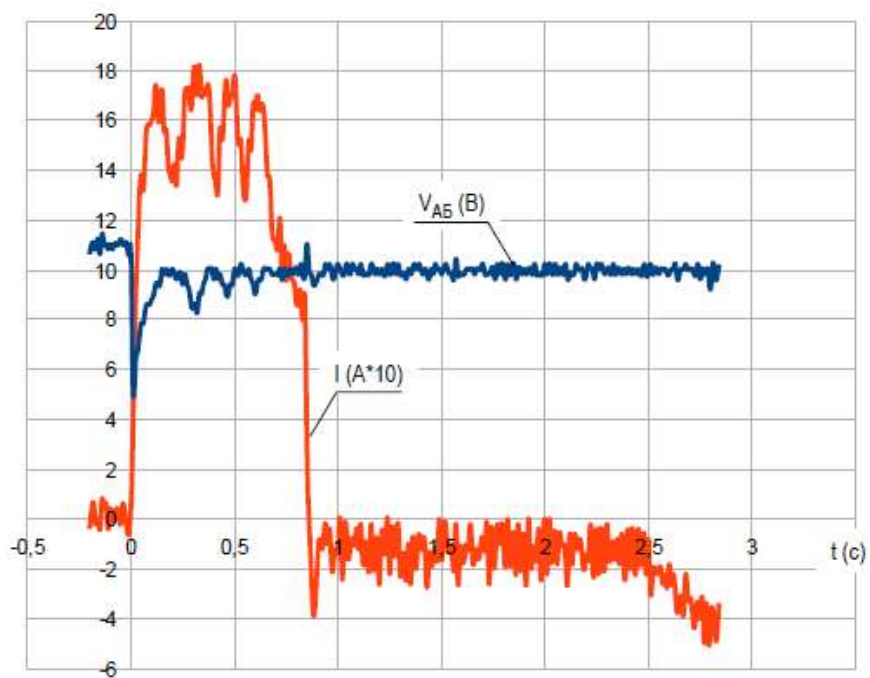


Рисунок 19
Осциллограммы пуска ДВС при -18°С и остаточной емкости АБ Q=Q₀-17А·ч



а) Пуск ДВС от АБ без пускового модуля



б) Пуск ДВС от АБ с пусковым модулем

Рисунок 20
Осциллограммы пуска ДВС при -18°C и остаточной емкости АБ $Q=Q_0-20\text{А}\cdot\text{ч}$

На рис.20а показана осциллограмма неудачной попытки пуска ДВС от АБ без пускового модуля: напряжение V_{AB} просаживается ниже 4В, в результате чего тяговое реле стартера отключается; затем V_{AB} возрастает и включение/отключение тягового реле начинает периодически повторяться. В тех же условиях, при включении пускового модуля (рис. 20б) осуществлен успешный пуск ДВС.

4 Обобщение и оценка результатов исследований

Экспериментальный образец пускового модуля ПМ-12В/180А является прототипом базовой модели, предназначенной для наиболее распространенных типов автомобилей и условий эксплуатации. Исходя из этого, были выбраны условия испытаний экспериментального образца:

- легковой автомобиль с рабочим объемом цилиндров ДВС 1968 см^3 (больше, чем у большинства легковых автомобилей);
- дизельный ДВС, так как в общем случае для его пуска необходима более высокая мощность стартера, чем для пуска бензинового ДВС;
- температура окружающего воздуха -18°C (при указанной температуре нормируется ток холодной прокрутки в соответствии с ГОСТ 959-2002).

Максимальный рабочий ток единичной ячейки H-bridge DC/DC преобразователя определяется предельными параметрами датчика тока DA1 и силовых транзисторов VT1-VT4 (см. приложение А: ПМ-12В/180А.000.ЭЗ) и составляет $I^{\max} = 180\text{А}$ – данная величина достигается с минимальными технологическими издержками изготовления пускового модуля. Экспериментально измеренный максимальный ток ($I_{\text{АБ}}^{\max} + I^{\max}$) при прокрутке вала ДВС составляет 285А (см. табл. 3). Следовательно, для надежного пуска ДВС от пускового модуля совместно с АБ, ток последней должен составлять не менее 105А. Вместе с тем, для улучшения энергобаланса и увеличения ресурса АБ желательно, чтобы напряжение АБ в процессе холодной прокрутки не опускалось ниже 10В. Указанным условиям соответствуют стартерные АБ емкостью 30 А·ч и более.

Таким образом, применение пускового модуля с максимальным током 180А обеспечит надежный пуск ДВС большинства легковых автомобилей при двукратном уменьшении емкости АБ, увеличении их ресурса и возможности эксплуатации в режиме «Старт-Стоп».

В соответствии с табл.3 выведенная энергия пускового модуля не превышает 1100 Дж. Для повышения надежности данный показатель должен обеспечиваться с двукратным запасом. Кроме того, в течение 10-ти лет эксплуатации производителем электрохимических конденсаторов допускается ухудшение параметров, которое может привести к уменьшению выведенной энергии в 1,5 раза. Следовательно, на момент поставки выведенная энергия пускового модуля при разряде максимальной мощностью должна составлять не менее 3300 Дж, что соответствует результатам лабораторных испытаний (см. табл. 2). При этом выведенная энергия, нормируемая для условий

20-тисекундного разряда, составляет 7000 Дж. Первоначально заданная величина (9500 Дж) была избыточна, и откорректирована по результатам испытаний во избежание необоснованного увеличения стоимости пускового модуля.

В соответствии с табл.3 длительность прокрутки вала ДВС стартером составляет $0,6 \div 0,8$ с. Предполагаемая средняя периодичность пусков в режиме «Старт-Стоп» составляет не менее 30 с. Следовательно, ПН перемежающегося режима работы составляет не более 2,5%. Первоначально заданная величина (5%) была избыточна, и откорректирована по результатам испытаний, что позволит упростить требования по установке пускового модуля на автомобиле для обеспечения необходимых условий охлаждения.

Соответствие остальным пунктам технических требований (стр. 10) обеспечивается характеристиками выбранных материалов и комплектующих элементов пускового модуля ПМ-12В/180А.

В сравнении с аналогами, результаты испытаний подтвердили ожидаемое 2-х кратное повышение коэффициента W/E полезного использования энергоемкости конденсаторных накопителей:

- в приведенном на рис. 1 примере $W/E \approx 25\%$;
- сопоставимые по мощности и длительности условия разряда конденсаторов в пусковом модуле ПМ-12В/180А представлены в табл. 2 (включение тумблеров S1÷S9 в НКУ). При этом $W/E = 4545/8132 = 55\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно-техническими результатами данной НИОКР являются эскизная КД пускового модуля ПМ-12В/180А, изготовленный по ней экспериментальный образец и материалы испытаний последнего.

На первом этапе НИОКР разработана эскизная КД экспериментального образца пускового модуля, проведены исследования, направленные на выбор и оптимизацию используемых технических решений. В процессе исследований впервые использован метод оптимального выбора электрохимических конденсаторов на основе Р-функции. Предложено новое техническое решение по управлению ВАХ пускового модуля в зависимости от температуры (заявка РФ на изобретение № 2015127182 от 06.07.2015). По договору со сторонней организацией изготовлены детали пускового модуля. Собран экспериментальный образец пускового модуля.

На втором этапе НИОКР разработана методика лабораторных испытаний пускового модуля ПМ-12В/180А; по договору со сторонней организацией изготовлен нагрузочный стенд для лабораторных испытаний; проведены лабораторные испытания экспериментального образца пускового модуля по разработанной методике с использованием нагрузочного стенда. В процессе испытаний проверены рабочие режимы и энергоэффективность пускового модуля.

На третьем этапе НИОКР проведены успешные испытания экспериментального образца пускового модуля ПМ-12В/180А в составе легкового автомобиля. По результатам испытаний откорректированы технические требования и доработана конструкция экспериментального образца пускового модуля ДВС.

По сравнению с представленными на рынке пусковыми модулями на основе конденсаторных накопителей энергии исследуемый экспериментальный образец обладает управляемой вольт-амперной характеристикой выхода, что позволяет более полно использовать запасаемую энергию, обеспечивает оптимальный алгоритм расходования энергии в процессе прокрутки вала ДВС. Данное свойство обеспечивается встроенным силовым DC/DC преобразователем на основе МОП-транзисторов, выполненным по четырехключевой схеме (H-bridge).

Полученные данные позволяют: уточнить технические требования к базовой модели пускового модуля для легкового автомобиля; сформулировать требования к перспективной продуктовой линейке для использования в составе коммерческих автомобилей, грузовиков и автобусов; снизить риски инвесторов проекта.

Таким образом, задачи НИОКР выполнены в полном объеме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 http://www.maxwell.com/images/documents/whitepaper_%20boostcaps_start_ice.pdf
- 2 Квайт С.М., Менделевич Я.А., Чижков Ю.П. // Пусковые качества и системы пуска автотракторных двигателей.- М.: Машиностроение, 1990.- 256с.
- 3 http://ru.bosch-automotive.com/ru/parts/parts_and_accessories/engine_systems_1/start_stop_system/overview_start_stop_sytem_1
- 4 Безверхий С.Ф., Марамашкин А. В. Испытания автомобилей на севере // Полигонные испытания, исследования и совершенствование автомобилей. Тр. НАМИ. М.,1985. С.11-22.
- 5 Система электростартерного пуска двигателя внутреннего сгорания / А.А. Швед // Описание изобретения к патенту РФ № 2502889. – 2013, Бюл. №36.
- 6 Система электроснабжения / А.А. Швед // Описание изобретения к патенту РФ №2513025. – 2014, Бюл. №11.
- 7 <http://www.maxwell.com/esm/>
- 8 Беляков А.И. Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы развития // Электрохимическая Энергетика - том 6 №3 2006, С.146-149.
- 9 Иоффе Д. Обзор микросхем для импульсных повышающе-понижающих преобразователей с одной индуктивностью // Компоненты и технологии. №5, 2009. С. 77-80
- 10 <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors>
- 11 <http://www.nesscap.com/ultracapacitor/EDLC/Supercapacitor/family.jsp>
- 12 <http://elitechpro.com/>
- 13 <http://www.elton-cap.com/products/capacitor-modules/>
- 14 Вырыпаев В.Н. и др. Химические источники тока//Учебное пособие для химико-технологических специальностей ВУЗов. - М.: Высшая школа,1990. -240с.