ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Радко Стоянов Стоянов

Заглавие:

ЕЛЕКТРОННИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ ЗА ЗАРЯД НА АКУМУЛАТОРНИ БАТЕРИИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна степен „доктор“

по докторска програма: ш. 02.20.08 „Електронизация (по отрасли и групи научни специалности)“
към професионално направление: 5.2 „Електротехника, електроника и автоматика“

Научен ръководител: проф. д-р инж. Венцислав Цеков Вълчев

Рецензенти:

1. ……
2. ……

Варна
2017 г.

Дисертационният труд е обсъден на 11.04.2017 г. в катедра „Електронна техника и микроелектроника“ и е насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Теоретична и измервателна електротехника“

Автор: инж. Радко Стоянов Стоянов

Заглавие: Електронни преобразуватели за заряд на акумулаторни батерии

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Радко Стоянов Стоянов

Заглавие:

ЕЛЕКТРОННИ ПРЕОБРАЗУВАТЕЛИ ЗА ЗАРЯД НА АКУМУЛАТОРНИ БАТЕРИИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна степен „доктор“

Варна
2017 г.

Дисертационният труд съдържа 135 страници, включително 70 фигури, 20 таблици и 2 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 129 заглавия, от които 11 на кирилица и 118 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на ..... г. от ……..... ч. в ..... на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора № ...../..... г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се във ФД "Докторанти", стая 318 НУК

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В нашето съвремие производството, разпределението и съхранението на електрическа енергия са ключови за развитието на индустриалното общество. Акумулаторните батерии (АБ) са основни средства за осигуряване на ефективно съхранение и захранване на множество отговорни системи и устройства в индустрията и бита. Следователно системите за заряд и поддържане на АБ са с изключителна важност за оптималното функциониране на множество устройства, технологични процеси и нови технологии.

Второто основно изискване, дефинирано от ЕС - използването на чисти технологии, е свързано със навлизането на електрически автомобили, като вече са приети съответни норми за техния дял за ЕС и за някои от страните. Германия вече гласува, че всички нови автомобили в страната до 2030-та година трябва да не отделят вредни емисии. За да постигне това, правителството заедно с производителите достигнаха до споразумение, съвместно да инвестират в индустрията на електрическите автомобили 1.4 милиарда долара. Прогнозата е в Германия да се продават 500 000 електрически автомобила годишно до 2020-та година.

Това навлизане на електрическите автомобили определя нови изисквания към използването на литиево-йонните батерии и начините за заряд и обслужване.

Проблем

Акумулаторните батерии и зарядните устройства асоциирани с тях намират голямо приложение в бита на човечеството. Това е един от най-ефективните начини за захранване на портативни устройства. Въпреки това възможностите на тази технология ограничават широкото ѝ приложение до малогабаритни устройства, като мобилни устройства, преносими компютри и инструменти или неподвижни устройства с голяма маса, като банките за аварийно захранване.

След двеста и петдесет години развитие технологията вече е достъпна и за портативни устройства от среден клас, като електрическите автомобили. В представения дисертационен труд интерес представляват възможностите за разработване на нови и усъвършенстване на съществуващите схеми в структурата на зарядните устройства за АБ от този клас. Създадени, анализирани и имплементирани са модели на електронните преобразуватели в структурата на зарядното устройство, подпомагащи оценката и проектирането на възможни приложения на разглежданите топологии. Предложена е нова схема за ограничаване на пусковите токове (мек старт) на изправителни схеми, базирана на комбиниран модул от два тиристора и два диода, като част от универсално зарядно устройство. Предложената схема за мек старт позволява стартиране при ток с по-ниска стойност от номиналната.

Цел и задачи на изследването

Целта на дисертационния труд е анализиране, изследване и проектиране на електронни преобразуватели в система за заряд на акумулаторни батерии постигаща повишена ефективност, ограничени пускови токове и подобрен фактор на мощност.

Задачите, които се решават в дисертационното изследване, са следните:

1. Критичен анализ на известните схемни решени за заряд на акумулаторни батерии и обосноваване на параметри, които да бъдат подобрени с настоящия труд.
2. Разработване, анализиране и изследване на подобрени схеми за ограничаване на пусковите токове (мек старт) на изправителни схеми, за подобряване фактора на мощност и за галваническа развръзка.
3. Създаване на универсални модели за симулационно изследване и анализ на основни параметри и характеристики на предложените схеми. Компютърна верификация на основни параметри на предложените схеми.
4. Разработване на методики за електрическо проектиране на предложените схеми с подобрени параметри в система за заряд на АБ.
5. Проектиране и експериментална реализация, изследване и верификация на основни параметри и характеристики на предложените схеми.

Обект и предмет на изследване

Обект на изследване са електронните преобразуватели в структурата на типично зарядно устройство за електрически автомобили. Това са входен токоизправител, възможни схемни решения за ограничаване на пусковите токове, преобразувател за подобряване фактора на мощността и изходно „стъпало“ (преобразувател осигуряващ галванично разделяне и адаптиращ параметрите на електрическата енергия в такива подходящи за заряда на АБ). След направения критичен анализ е заключено, че не е наличен подходящ изправител предлагащ ограничаване на пусковите токове, най-подходящ за коригиране фактора на мощността за конкретното приложение е обратния повишаващ безтрансформаторен преобразувател, а за изходното „стъпало“ – полумостов резонансен DC/DC преобразувател.

Предмет на научно изследване са възможностите за разработване на ново схемно решение за ограничаване на пусковите токове с подобрени параметри. Предлагане на методика за оразмеряване на новото схемно решение и симулационен модел представящ неговата работа и даващ възможност за настройка на основните параметри. Разработване на опитна постановка за верификация на предложеното схемно решение. В допълнение са разработени математически и симулационни модели, описващи възможностите за понижаване на загубите в изследваните електронни схеми за подобряване фактора на мощността и галванично разделяне, както и експериментални постановки за верификация на получените резултати.

Методи на изследване

Методите, чрез които са постигнати поставените задачи в дисертацията, включват:

- Математически методи за определяне на моделните параметри на схемата за ограничаване на пусковите токове (методика за проектиране);
- Математически методи за определяне на загубите в силовите електронни ключове на преобразувателя за подобряване фактора на мощността и на резонансният DC/DC преобразувател;
- Съвременни програмни продукти за моделиране и симулиране на силови електронни преобразуватели, преходни процеси, работа в установен режим, загуби по време на преходните процеси, загуби в установен режим, загуби в силовите електронни ключове;
- Провеждане на експериментални изследвания за верифициране на предложените модели.

Място на изследване

Изследванията, представени в дисертацията, са проведени на следните места:

- Технически Университет – Варна, България – лаборатории по „Силова електроника" и „Сензорна техника" към катедра „Електронна техника и микроелектроника";
- Университет Гент, Белгия – лаборатория „Електрическа енергия (EELAB)" – в рамките на проект „Подкрепа за развитието на докторанти, постдокторанти, специализанти и млади учени" и мобилност за докторанти и постдокторанти по програма „ЕРАЗЪМ".

Научна новост на изследването

Изследването, направено в дисертацията, изяснява възможностите за разработване на иновативно схемно решение за ограничаване на пусковите токове в изправителни схеми, както и възможностите за понижаване на загубите в преобразувателя за корекция фактора на мощността и резонансният преобразувател, чрез използването на нови полупроводникови ключове.

Разработен е симулационен модел на схемата за ограничаване на пусковите токове и специализирана методика за определяне на нейните параметри.

Разработени са симулационни модели на обратният повишаващ безтрансформаторен преобразувател и полумостовия резонансен DC/DC преобразувател, даващи възможност да се изследват загубите в полупроводниковите ключове.

Практическа ценност на изследването

Предложената схема за ограничаване на пусковите токове може да намери приложение във всяко устройство захранвано от еднофазната захранваща мрежа с изходна мощност от няколко десетки вата до няколко киловата подложено на завишени нива на токовете по време на преходния процес. Предложената универсална методика дава възможност за избор на компонентите при зададени от потребителя входни параметри съответстващи на конкретното приложение. Предложеният симулационен модел онагледява принципа на действие на схемата и дава възможност да се наблюдават сигнали, които на практика трудно могат да бъдат измерени. Симулационният модел дава възможност за бърза и лесна настройка на основните параметри на схемата, като времето до отпушване на тиристорите. При представяне на разработения експериментален прототип са коментирани особености с практическа ценност, като поведение на термистори с положителен температурен коефициент в първите няколко работни цикъла и разработване на печатна платка за среда с повишено ниво на вибрации.

Предложените модели, симулации, постановки и експерименти свързани с обратния безтрансформаторен преобразувател и резонансния DC/DC преобразувател могат да се използват при решаването на конкретни инженерни задачи извън заряда на АБ.

Резултатите от изследванията върху зарядното устройство могат да послужат за основа на по-нататъшни разработки, усъвършенстване и намиране на нови приложения.

Апробация на изследването

Основните теоретични и приложни резултати от дисертационния труд са представени в общо 10 публикации, от които:

- 1 статия в списание „IET Power Electronics”, 2017 г. (приета за печат);
- 2 доклада в сборник „Annual Journal of Electronics“, ТУ-София, 2014;
- 1 доклад на конференция „IEEE XXV International Scientific Conference Electronics 2016“, 2016, Созопол, България;
- 1 доклад в годишник на ТУ-Варна, 2014 г.;
- 1 доклад на конференция „SIELA 2016“, 2016 г., Бургас, България;
- 3 доклада на конференция „UNITECH“, 2016, 2015, 2016, Габрово, България
- 1 доклад на конференция „IEEE PEMC2016”, 2016 г., Варна, България.

Конференциите „IEEE PEMC2016“, „SIELA 2016“ и „Electronics 2016“ са индексирани в електронната база данни „SCOPUS“.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1: Анализ на класическите схеми за заряд на акумулаторни батерии

В Първа глава е представен обзор на съвременното ниво на класически схеми за заряд на акумулаторни батерии. Акцентирано е на особеностите на електрическите превозни средства в това отношение. Анализирани са възможности за повишаване на ефективността при електрическите превозни средства. Предложена е класификация на електрическите превозни средства. Разгледани са основни схеми използвани при заряда на акумулаторните батерии. След направения критичен анализ е установена нужда от нови схемни решения и компоненти.

Формулирани са задачите и целта на дисертацията.

1.1. Избор на направление

След направен анализ на проблемите в България, плановете за развитие на ЕС и направленията включени в рамка HORIZON 2020 за поле на работа е избрана електрическата мобилност.

1.2. Области на възможна иновация при електрическите автомобили

Възможностите за повишаване на ефективността при електромобилите от страна на силовата електроника могат да бъдат разделени на три големи групи (електрическо задвижване, заряд на АБ и преобразуватели захранващи периферни устройства). Като най-перспективна е отличена групата отговаряща за заряд на батериите.

1.3. Видове електрически автомобили и съществуващи проблеми

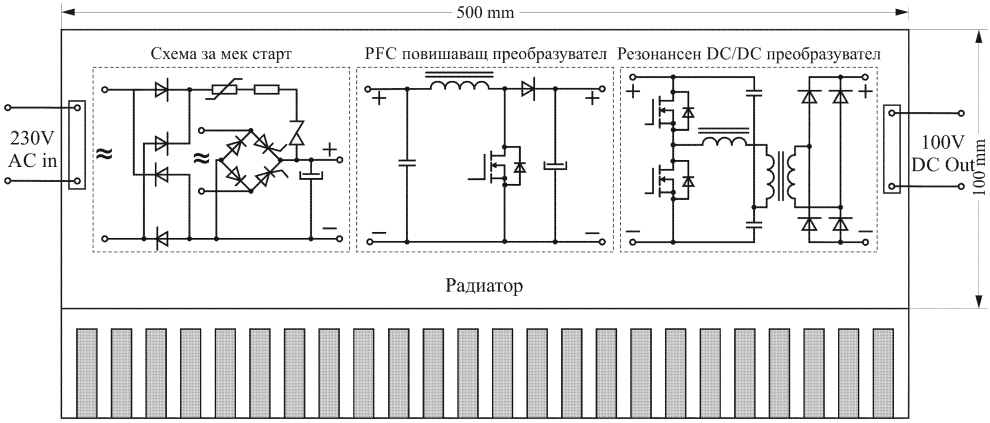
Предложена е класификация на електрическите автомобили, използваните в практиката батерии и изходната мощност на типични зарядни устройства за свръх-леки електромобили. Въпреки значителният ръст в продажбите на електрически автомобили все още не е налична класификация. В настоящият дисертационен труд е предложена такава, като основни критерии са тип на електрическия автомобил (хибриден, хибриден с възможност за заряд от електрическата мрежа и изцяло електрически) и тегло, където електромобилите са разделени в три класа (конвенционални, леки и свръх-леки).

1.4. Основни параметри на необходимото зарядно устройство за акумулаторни батерии

Определени са основните параметри на зарядното устройство, тъй като се планира неговото внедряване в прототип на свръх-лек електрически автомобил в Университет Гент в Белгия. Изходната мощност е съобразена с параметрите на еднофазната захранваща мрежа, като са отчетени и проблемите при разработване на тестов образец.

1.5. Анализ на класическите схемни решения при заряда на акумулаторни батерии (при изходна мощност около 1500 W)

След направения анализ на класическите схеми за заряд на АБ с близка до избраната изходна мощност е отличена една топология на конвенционално зарядно устройство. Устройството се състои от три преобразувателя: 1. Start up circuit (система за меко стартиране и ограничаване на пусковите токове), 2. PFC converter (преобразувател за подобряване фактора на мощността), 3. DC/DC converter providing galvanic isolation (DC/DC преобразувател осигуряващ галванично разделяне на първичната верига от товара). Блокова схема на зарядното устройство е представена на Фигура 1.



Фигура 1: Блокова схема на зарядно устройство за електромобил

За разлика от конвенционалните решения зарядното устройство предложено в настоящия дисертационен труд се състои от модулна структура от три отделни модула. По този начин може да бъде постигнато по-добро разположение на цялото устройство, по-лесна поправка, както и дава възможност за използване на всеки блок отделно.

Анализирани са схемни решения за входен токоизправител и възможни схемни решения за ограничаване на пусковите токове (последователно свързване на NTC термистор, резистор и реле или използване на полупроводников ключ). Резултатите от анализа са обобщени в Таблица 1 и дават предпоставка за разработване на новата схема за ограничаване на пусковите токове.

Анализирани са класическите схеми за ограничаване фактора на мощността. Като най-подходяща за конкретното приложение е отличена топологията на обратния повишаващ безтрансформаторен преобразувател.

Анализирани са класическите схеми осигуряващи галванично разделяне. Като най-подходяща е отличена топологията на полу-мостовият резонансен DC/DC преобразувател.

Таблица 1: Качествено сравнение между различните подходи за ограничаване на пусковите токове

	MOSFET	NTC	Реле
Защита от късо съединение при стартиране	Не	Не	Не
Стартиране при по-нисък от номиналния ток	(Не)	Не	Да
Stand-by консумация	0.1–0.2 W	0 W	1–2 W
Необходимост от допълнително захранване	Не	Не	Да
Постояннотокови приложения	Да	Да	Да

Обобщения и изводи

Като заключение върху направения обзор и анализ на досегашните научни изследвания на проблема, са направени следните обобщения и изводи, изясняващи нерешените проблеми в разглежданата тематика:

1. Проучени са видовете електрически автомобили и съществуващите тенденции и задачи за подобряване на силовите преобразуватели използвани в тях. Установено е, че разработване на зарядно устройство с подобрени параметри би повлияло положително на отрасъла;
2. Направен е анализ на консумацията и съхранение на електрическа енергия и е обоснована необходимостта от акумулаторни батерии с по-добри параметри и съответно електронни устройства за заряд и поддържане (изправител, DC/DC преобразуватели и BMS), които да отговарят на съвременните изисквания за потребление и съхранение на енергия;
3. Анализирани са електронните устройства в електрическите автомобили и са класифицирани основни изисквания пред силовите преобразуватели в тях, в частност на електронните преобразуватели за поддържане на електрическата батерия (изправител, DC/DC преобразуватели и BMS);
4. Направен е критичен обзор и анализ на известните схемни решения за заряд на акумулаторни батерии с изходна мощност близка до тази на зарядно устройство, необходимо за свръх леки електрически автомобили и са дефинирани основни параметри, които да бъдат подобрени (повишаване на функционалността, понижаване на загуби и тегло).

Глава 2: Схема за ограничаване на пусковите токове при токоизправители

2.1. Симулационен анализ на съществуващите схемни решения за ограничаване на пусковите токове

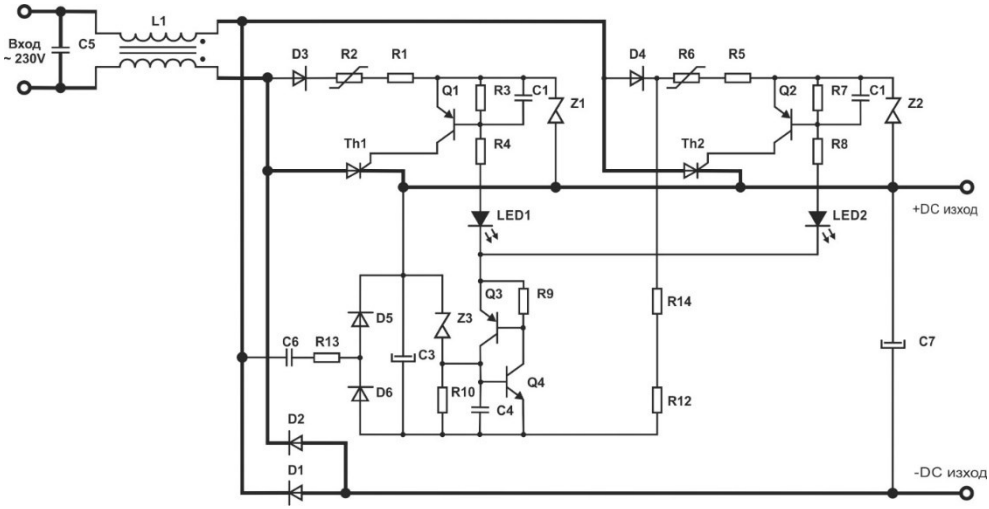
За да бъдат потвърдени заключенията направени в Първа глава са изготвени три модела отговарящи на трите топологии за ограничаване на пусковите токове разгледани в нея. Пусковите токове протичащи по време на преходните процеси при трите схеми са изследвани в широк диапазон от мощности типични за еднофазната мрежа. Изследвани са загубите по време на преходните процеси и загубите в установен режим. Направено е сравнение на загубите в трите топологии за ограничаване на пусковите токове (NTC термистор, резистор и реле и MOSFET), след което е предложен обхват по ток и мощност за използването им в практиката. След симулационно изследване на възможните схемни решения е заключено, че:

- изследваните схемни решения не отговарят на поставеното задание;
- топологията използваща резистор и реле е най-подходяща за изпълнение на поставеното задание.

Съгласно това заключение е взето решение да се разработи иновативно схемно решение базирано на топологията с резистор и реле.

2.2. Синтезиране на иновативно схемно решение за ограничаване на пусковите токове

Новата схема е представена на Фигура 2.



Фигура 2: Пълна електрическа схема на предложеното иновативно схемно решение за ограничаване на пусковите токове

В тази секция е описан принципа на действие на предложеното схемно решение за ограничаване на пусковите токове и са дадени насоки при избора на електронните компоненти.

2.3. Загуби и ефективност на предложеното схемно решение за ограничаване на пусковите токове

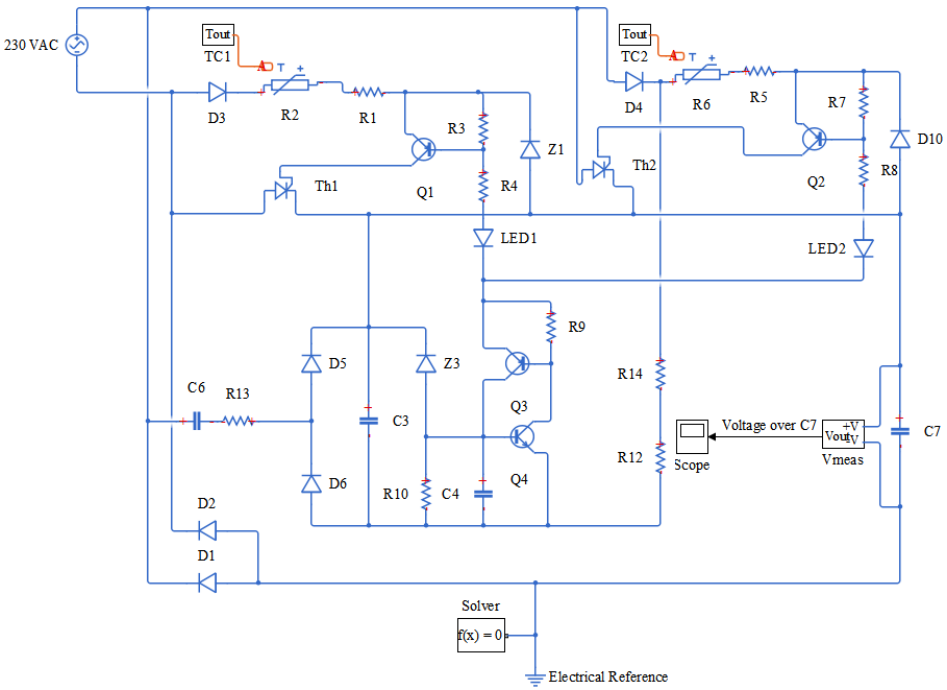
В тази секция са изчислени загубите на празен ход и при номинален товар за предложеното схемно решение. Предложено е сравнение с конкурентните схемни решения (резистор-реле и NTC термистор). Ефективността е изчислена, чрез сумиране на падовете на напрежение и оценяване на загубите в основните компоненти и допълнителното захранване. Получените резултати са обобщени в Таблица 2.

Таблица 2: Числен и качествен анализ на разглежданите схеми за ограничаване на пусковите токове

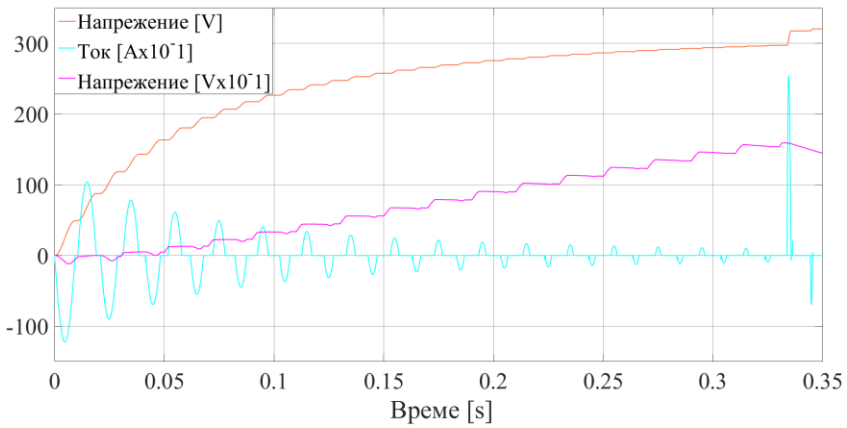
	NTC термистор	Реле	Предложена
Консумация на празен ход	0	2 W	30 mW
Загуби при номинален товар	10 – 30 W	“0”	≈ 1.4 W
Пускови токове	100 A… 66 A	10 A	10 A
Повторен старт	Проблем с охлаждане	Проблем с изключване	Добре
Устойчиво състояние	Да	Не	Да
η при 0.25 A, [%]	98.82	95.89	99.30
η при 0.50 A, [%]	98.24	97.60	99.30
η при 5 A, [%]	98.83	99.01	99.18
η при 10 A, [%]	98.75	99.08	99.08

2.4. Моделиране и верификация на схемата за ограничаване на пусковите токове чрез симулационен модел в MATLAB Simulink

В тази секция е предложен симулационен модел за онагледяване изяснения в точка 2.2 принцип на действие. Съвременните симулационни модели дават възможност за точно пресъздаване и наблюдение на сигнали, които трудно биха могли да бъдат измерени в практиката. От една страна симулационният модел дава възможност за верификация принципа на действие на ново схемно решение. От друга страна дава възможност за фина настройка на параметрите. Изготвеният подробен симулационен модел на схемата за ограничаване на пусковите токове е представен на Фигура 3. На Фигура 4 е представена графика онагледяваща принципа на действие на схемата.



Фигура 3: Подробен симулационен модел на схемата за ограничаване на пусковите токове изготвен в MATLAB Simulink, чрез библиотеката физически модели на електронни компоненти SimElectronics



Фигура 4: Процес по стартиране на схемата за ограничаване на пусковите токове. Напрежение върху изходния кондензатор в жълто, входен ток в синьо и напрежение върху времезадаващия кондензатор в лилаво

2.5. Методика за проектиране на схема за ограничаване на пусковите токове

Предложена е методика за проектиране на иновативното схемно решение. Методиката е ориентирана спрямо нуждите на потребителя. Оразмеряването започва с въвеждане на входните параметри. Следват седем стъпки за избор на основни компоненти.

2.5.1. Входни параметри

V_{in} [V] – напрежение на захранващата мрежа (входно напр. за схемата);
ΔV_{out} [V] – пулсации на изходното напрежение;
f [Hz] – честота на захранващото напрежение;
τ [s] – времезакъснение преди отпушване на тиристорите;
P_{out} [W] – изходна мощност;
η [%] – ефективност;
V_{ps} [V] – захранващо напрежение на управляващата схема.

2.5.2. Основни изчисления

На база на зададените входни параметри се изчисляват производни параметри за подбор на електронните компоненти както следва:

1) Избор на изправителните диоди D_3 и D_4;

Изправителните диоди могат да бъдат избрани по пикова стойност на входния ток. С помощта на уравнения (2.8 ÷ 2.11):

$$I_{D3} = I_{D4} = \frac{I_p}{2}, [A] \tag{2.1}$$

2) Избор на изходният кондензатор ($C_{out} = C_7$)

Стойността на изходния кондензатор може да бъде избрана според зададената стойност на пулсациите в изходното напрежение чрез следното уравнение:

$$C_{out} = \frac{I_{out}}{2f \times \Delta V_{out}}, [F] \tag{2.2}$$

3) Избор на PTC термисторите R_2 и R_6

PTC термисторите не трябва да се активират, когато през тях протича половината от зарядния ток на филтриращия кондензатор C_7.

$$I_{PTC} = \frac{I_{in}}{2}, [A] \tag{2.3}$$

4) Избор на баластните резистори R_1 и R_5

Баластните резистори могат да бъдат избрани по времеконстантата τ според уравнение 2.4:

$$R_1 = \frac{1}{2}\frac{\tau}{(3 \div 5)C_{\text{out}}}, [\Omega] \tag{2.4}$$

Баластните резистори трябва да се оразмерят и по мощност.

$$P_{\text{peak,R1}} = \frac{\left(\sqrt{2}V_{\text{in}}1.1\right)^2}{2}\frac{1}{R_1}, [W] \tag{2.5}$$

По-прецизен начин за намиране на разсейваната мощност от резистора R1 е дадена със следните уравнения 2.6 и 2.7:

$$I_{\text{R1}} = \sqrt{\frac{1}{R_1^2}\int_{a\sin\left(\frac{V_{\text{out}}}{V_p}\right)}^{\pi - a\sin\left(\frac{V_{\text{out}}}{V_p}\right)} \left(V_p \sin(\omega t) - V_{\text{out}}\right)^2 dt}, [A] \tag{2.6}$$

$$P_{\text{peak,R1}} = I_{\text{R1}}^2 \text{R1}, [W] \tag{2.7}$$

5) Оразмеряване на управляващата схема

Оразмеряването на управляващата схема става на база на избора на три входни параметъра.

$V_{\text{out,min}}$ – минимален праг на изходното напрежение;
I_{ps} – ток през захранващата схема
R_{10} – резистор ограничаващ тока през захранващата схема (препоръчва се използването на стандартен резистор със съпротивление 1 kΩ).

6) Избор на опорният кондензатор на захранването (C_6)

$$Q_{\text{C3}} = \frac{I_{ps}}{f}, [C] \tag{2.8}$$

$$C_6 = \frac{Q_{\text{C3}}}{\sqrt{2}V_{\text{in}}}, [F] \tag{2.9}$$

След избора на кондензатор от даден ред с номинални стойности за капацитета на кондензатори се препоръчва преизчисляване на тока осигурен от захранването с помощта на уравнения (2.24 и 2.25).

7) Избор на резисторите за разряд R_{12} и R_{14}

За тиристорната структура съставена от биполярните транзистори Q_3 и Q_4 се препоръчва избора на стандартни NPN и PNP транзистори като много често използваните в практиката BC547 и BC557 съответно. При този случай токът през R_{10} (I_{R10}) трябва да бъде 0.5 mA, за да се отпуши тиристорната структура. Това налага тока през D_6 да бъде поне с 0.5 mA по-голям от тока през R_{12} и R_{14}. Токът през D_6 е захранващият ток I_{supply}.

$$I_{R12} = I_{supply} - I_{R10}, [A] \tag{2.10}$$

$$V_{top} = \int_{-a\cos\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)}^{a\cos\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)} V_{in} - V_{out} dt, [V] \tag{2.11}$$

$$R_{13} = \frac{V_{top}}{\pi I_{R12}}, [\Omega] \tag{2.12}$$

Обобщения и изводи

1. Предложена е нова схема за ограничаване на пусковите токове (мек старт) в изправителни схеми, базирана на комбиниран модул от два тиристора и два диода, като част от универсално зарядно устройство. Предложената схема за мек старт позволява стартиране при ток с по-ниска стойност от номиналната. При проектиране на предложеното устройство е предвидена защита от стартиране при претоварен или свързан накъсо изход;

2. Реализирано е симулационно моделиране и изследване на схемата. Предложен е универсален модел на схемата за анализ и изследване на характеристиките ѝ. Моделът дава възможност за изследване поведението на схемата по зададена от потребителя информация;

3. Разработена и верифицирана е универсална методика за проектиране на предложената схема за мек старт. Методиката може да бъде използвана в широк обхват от мощности осигурени от еднофазната захранваща мрежа;

4. Направено е сравнение на функционалните параметри на предложената схема с подобни схеми и са доказани предимствата ѝ: предложената схема работи добре в аварийни режими, в случай на паралелно свързани зарядни устройства за електромобили, схемата позволява безопасно рестартиране на процеса на заряд и има по-малки загуби.

Глава 3: Изследване на силови електронни преобразуватели с подобрени параметри за коригиране фактора на мощността и осигуряване на галванично разделяне

В тази глава са анализирани и изследвани възможностите за повишаване на к.п.д. на обратния повишаващ и резонансния DC/DC преобразувател. Основните направления за повишаване на ефективността са понижаването на загубите в силовите електронни ключове и понижаването на загубите в магнитните компоненти на двата преобразувателя.

3.1. Аналитично представяне на загубите в силовите електронни ключове на PFC преобразувател

За да се изгради и верифицира симулационен модел е избрана група транзистори със сходни параметри и загубите в тях са изследвани аналитично [78], [79]. Избрани са пет MOSFET транзистора със силициев (Si) и силициево-карбиден (SiC) полупроводников материал от различни производители и параметрите им са обобщени в Таблица 3. Силициево карбидната технология е относително нова, но подобрените параметри на този тип транзистори значително повишават тяхното използване в практиката [80], [81], [82], [83].

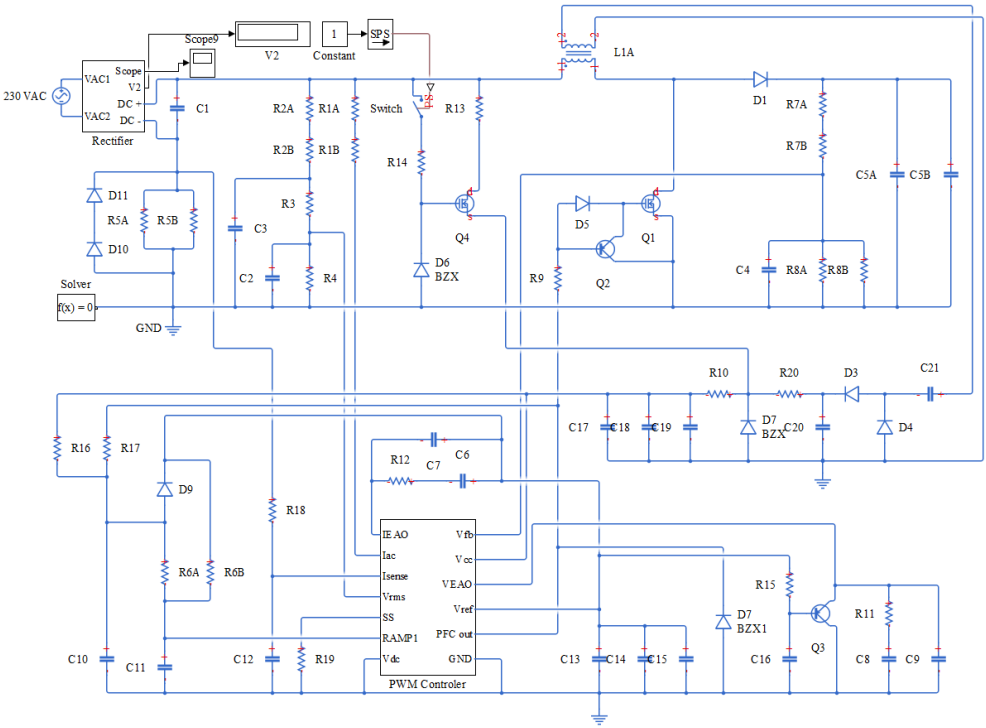
Таблица 3: Група от пет MOS транзистора със Si и SiC полупроводников материал от различни производители

Si и SiC MOSFET транзистори	R_{dson}	I_{ds}	V_{gs}	V_{th}	C_{iss}	C_{rss}	E_{oss}	Q_g
	Ω	**A**	**V**	**V**	**pF**	**pF**	**μJ**	**nC**
C2M0160120D	0.16	10.0	20	2.6	525	4	25	34
STF25NM60N	0.13	10.5	10	4.0	2400	15	36	80
FCA22N60N	0.14	11.0	10	3.0	1950	3	54	45
IPP60R165CP	0.15	12.0	10	3.0	2000	1	77	39
SIHG22N50D	0.16	11.0	10	3.0	2810	33	7.7	39

Загубите в транзисторите се представят чрез уравнения (3.1 ÷ 3.11) посредством методики представена в литературен източник [84].

3.2. Симулационен модел за оптимизиране процеса по избора на електронни ключове за PFC преобразуватели

Симулационният модел разработен в MATLAB Simulink представен на Фигура 5 е използван за определяне на най-добрият транзистор по критерии ефективност (най-ниски загуби). Симулационният модел отчита, че с повишаване на работната честота се повишават загубите от превключване. Моделът също така отчита, че с повишаване на температурата се повишават загубите от проводимост в силовия ключ.



Фигура 5: Модел за сравнение на петте транзистора в MATLAB Simulink

На база на математическите изчисления и на симулационните резултати са избрани двата транзистора с най-малки загуби, за да бъдат сравнени и експериментално в Четвърта глава на настоящият дисертационен труд. Това са силициево-карбидният MOSFET транзистор модел C2M0160120D [85], който има най-малки загуби (сума на загубите от проводимост и тези от превключване) и силициевия MOSFET транзистор модел STF25NM60N.

3.3. Оценка на загубите и възможностите за повишаване на ефективността в магнитните компоненти на PFC

Направена е и сравнителна оценка на загубите в магнитните компоненти в схемата. Сравнени са феритен материал N87 и нанокристален материал Vitroperm 500F. Магнитните компоненти са сравнени с помощта на петнадесет стъпкова методика, която е подходяща за практически изчисления и отчита загубите от вихрови токове в намотките. Използваната методика е представена в литературни източници [87] и [92]. Резултатът от сравнението показва, че за малък обем и ниско тегло, в малка серийност, т.е. без съществено значение на цената (като университетски прототип за доказване на концепция), нанокристалният материал (Vitroperm 500F) дава по-добри резултати.

3.4. Аналитично представяне на загубите в силовите електронни ключове на резонансен DC/DC преобразувател

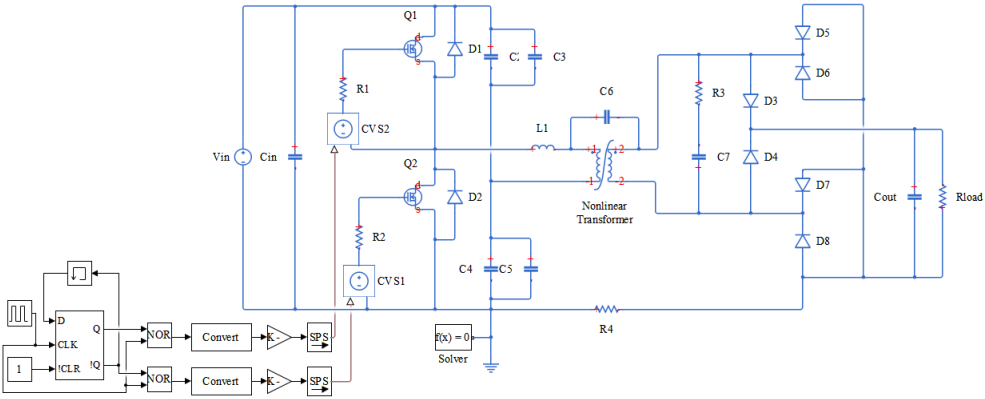
Същият подход е приложен и при резонансния DC/DC преобразувател. Верификацията на модела отново предвижда аналитична оценка на загубите в двата транзистора на резонансният преобразувател, изграждане на симулационен модел, сравнение на аналитичните и симулационните резултати и верификация на резултатите чрез практически експеримент в Четвърта глава. За целта е избрана група от пет транзистора на различни производители и подобни параметри подходящи за избраната топология са избрани и обобщени в Таблица 4. Включени са ключове на Si и SiC подложка.

Таблица 4: Група от пет силициево-карбидни (SiC) и силициеви (Si) MOSFET транзистори

№	Модел	Тип	$R_{DS(ON)}$	I_{DS}	V_{GS}	V_{TH}	C_{iss}	C_{rss}	C_{oss}
-	**-**	**-**	**Ω**	**A**	**V**	**V**	**pF**	**pF**	**pF**
1	IXFK64N50P	Si	0.085	32.0	10	4	8700	90	970
2	SCH2080KE	SiC	0.080	10.0	18	3	1850	20	175
3	STW45NM50FD	Si	0.070	22.5	10	4	3600	80	1260
4	IRFPS40N50LPBF	Si	0.087	28.0	10	4	8110	130	960
5	FDA50N50	Si	0.089	24.0	10	4	4979	50	161

Аналитичното сравнение на загубите в петте транзистора е направено посредством уравнения (3.12 ÷ 3.21).

3.5. Симулационен модел за оптимизиране процеса по избора на електронни ключове на резонансен DC/DC преобразувател



Фигура 6: Модел в MATLAB Simulink на резонансен DC/DC преобразувател.

Съставен е модел на резонансния DC/DC преобразувател представен на Фигура 6, чрез който се сравняват симулационно избраните силови ключове. След сравнения на резултатите от проведените симулации с всички транзистори са избрани двата с най-малки загуби. Това са силициевият MOSFET транзистор IXFK64N50P съдържащ в структурата си FREDFET диод.

3.6. Оценка на загубите и възможностите за повишаване на ефективността в магнитните компоненти на резонансен DC/DC преобразувател

Силовата част на резонансният DC/DC преобразувател осигуряващ галванично разделяне съдържа два магнитни компоненти. Това са индуктор и инпулсен трансформатор. Работната честота на този преобразувател също е 50 kHz. При наличие на два магнитни компонента в този преобразувател основна част от загубите са съсредоточени в тях. Това налага още по-високо внимание при проектирането им. При проектиране на силови електронни преобразуватели, добра практика е уеднаквяване на максимален брой компоненти с цел повишаване на количествата и намаляне цената на единична бройка. Магнитните компоненти не се различават в това отношение, затова при резонансният преобразувател са използвани същите материали (феритен N87 и нанокристален Vitroperm 500F). Магнитните компоненти са сравнени с помощта на същата петнадесет стъпкова методика [87] и [92]. Избрана е сърцевина на променливотоковият индуктор, еднаква с тази на постояннотоковия по съображенията за понижаване на единичната цена, представени по-горе.

Резултатът от сравнението отново показва, че за малък обем и ниско тегло, в малка серийност, т.е. без съществено значение на цената, нанокристалният материал (Vitroperm 500F) дава по-добри резултати. За тепърва доказваща се концепция като електромобилите, където водеща е цената, се препоръчва материал N87.

Обобщения и изводи

1. Анализирани и изследвани са възможностите за повишаване на к.п.д. на силовите преобразуватели в структурата на зарядно устройство, чрез сравнение на загубите в тях при използване на различни видове силови ключове. Получените резултати показват предимство на SiC пред конвенционалните Si ключове;

2. Предложени са два симулационни модела в MATLAB Simulink, които позволяват оптимизиране на процеса по избор на силови електронни ключове в преобразувател за подобряване на фактора на мощност (PFC) и DC-DC преобразувател;

3. Предложен е подобрен подход за проектиране и оценка на загубите в магнитните компоненти на PFC и DC-DC преобразуватели. Подходът позволява разработване на зарядно устройство с подобрени масогабаритни показатели.

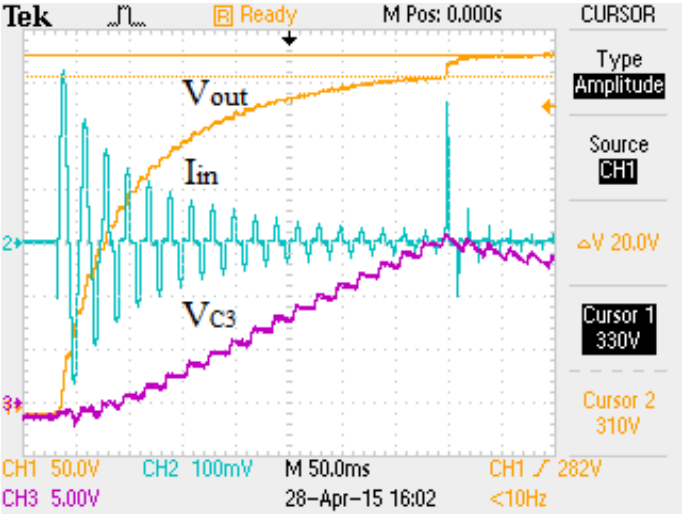
Глава 4: Експериментално изследване и анализ на предложените преобразуватели в структурата на зарядното устройство за акумулаторни батерии

В тази глава са представени резултати от експериментални изследвания и обоснована експериментална верификация на предложеното схемно решение за ограничаване на пусковите токове. Сравнени са получените симулационни и експериментални резултати, които показват голямо препокриване.

4.1. Експериментално изследване на схемата за ограничаване на пусковите токове

В тази секция е представен разработеният прототип на схемата за ограничаване на пусковите токове. Направени са препоръки при разработване на печатна платка за конкретно приложение в електрическите автомобили.

Представени са основни времедиаграми (осцилограми) потвърждаващи коректната работа на разработеното устройство. На Фигура 7 е представен експерименталният еквивалент на съвкупността от сигнали характеризиращи стартовия процес на схемата за ограничаване на пусковите токове, изследван симулационно в точка 2.4.2.

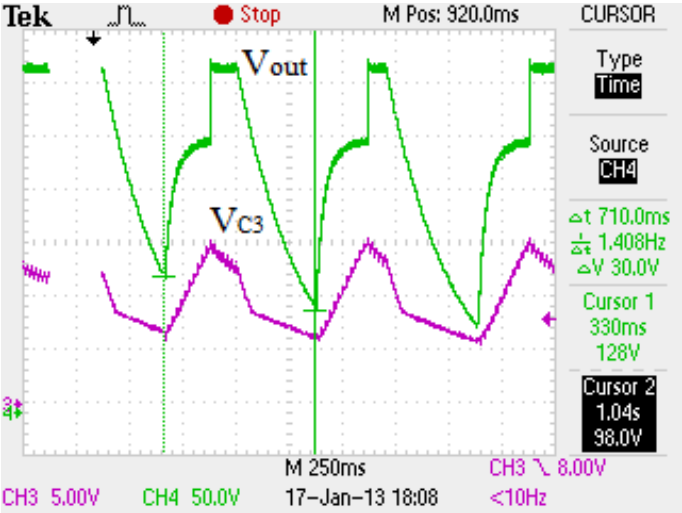


Фигура 7: Отпушване на тиристорите на полууправляемият мостов изправител. оранжево – изходно напрежение, синьо – входен ток, лилаво – напрежение в/у C_3

Проведени са експерименти изследващи стабилността на схемата за ограничаване на пусковите токове. Тези експерименти показват, че изходния филтров кондензатор се разрежда за 1590 ms, а времезадаващият кондензатор за 2320 ms. Представените в секцията експерименти допълват анализа дали тези интервали от време са достатъчно малки, за да се рестартира процеса по меко стартиране в случай на аварийни режими.

От направеният критичен прочит в Първа глава е формулиран извода, че известните схеми за ограничаване на пусковите токове не се справят ефективно със следните аварийни обстоятелства: отпадане на захранващото напрежение заради паднала мълния или изгорял предпазител, преобразувателите следващи схемата за меко стартиране не успеят да стартират, лош контакт в контактните гнезда или други.

Проведен е и реален експеримент, реализиращ тези аварийни режими чрез извършено ръчно включване и изключване на захранващото напрежение. Резултатът от експеримента е представен на Фигура 8 и показва, че процесът по меко стартиране се повтаря с всяко отпадане на захранващото напрежение. Този експеримент потвърждава по-доброто представяне на предложеното схемно решение в сравнение с другите схеми за ограничаване на пусковите токове.



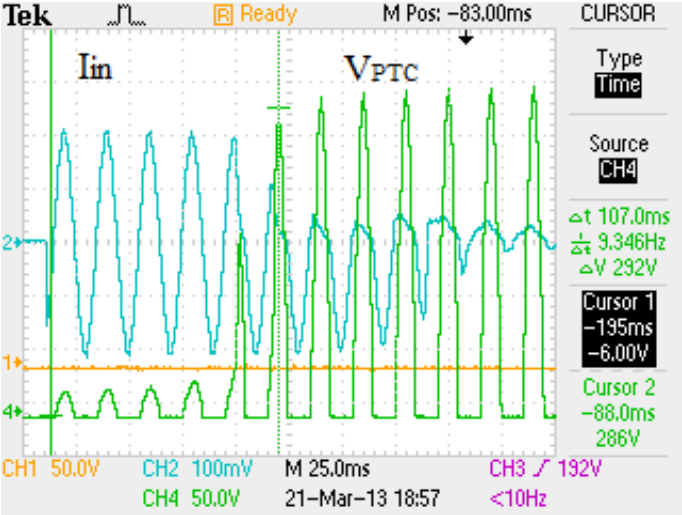
Фигура 8: Авариен режим на работа на схемата за меко стартиране. Захранващото напрежение се подава и преустановява четири пъти в рамките на три секунди. От фигурата се вижда, че кондензаторите се разреждат всеки път и процеса по меко стартиране се повтаря с всяко отпадане и последващо подаване на захранващо напрежение

зелено – изходно напрежение, лилаво – напрежение върху C_3

Недостатък на схемата за меко стартиране използваща реле е, че ако има лош контакт веригата осигуряваща ограничаване на пусковите токове ще бъде претоварена. В предложеното схемно решение се използват термистори с положителен температурен коефициент, които ще предпазят цялото устройство от подобен авариен режим.

След няколко опита с нискоомни товари е проведен експеримент на пълно късо съединение и резултатите са представени на Фигура 9. Този експеримент показва, че термисторите успешно ограничават тока на късо съединение. Изходното напрежение

в оранжево е права линия на 0 V, което означава пълно късо съединение и максимална стойност на пусковите токове представена със синьо на времедиаграмата.

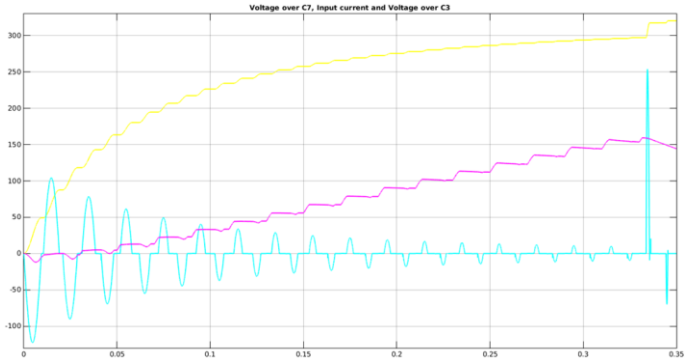


Фигура 9: Опит с накъсо съединен изход на схемата за ограничаване на пусковите токове. Съпротивлението на термистора започва да се покачва след 80 ms, а след 107 ms то достига максималната си стойност
оранжево – изх. напр., синьо – входен ток, зелено – напрежение в/у PTC

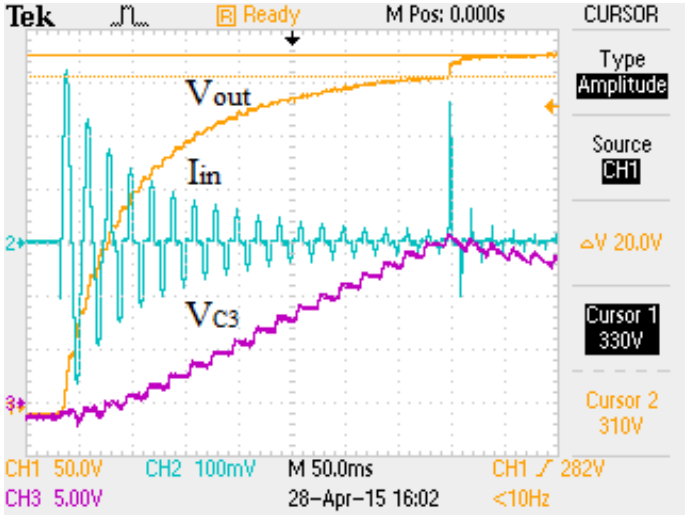
4.2. Сравнение между симулационните и експерименталните резултати на предложената схема за ограничаване на пусковите токове

След като е изследвана експериментално, схемата за ограничаване на пусковите токове при изправителни схеми, е направена верификация на резултатите получени от симулационният модел предложен в Глава 2. За целта са сравнени амплитудни и времеви стойности на основни сигнали.

При сравнение на симулационните и експерименталните резултати е налично съответствие между формата на входния ток, изходното напрежение и напрежението на времезадаващия кондензатор C_3 в двата случая. При отчитане на стойности от двете графики получените резултати също са много близки. Стойността на изходното напрежение в момента преди да се отпушат тиристорите е много близка до 300 V в симулационният модел, а при реалното изследване е оценена на 310 V (използвана е константа от 50 V/дел. за отчитане от осцилограмата). Времето необходимо за зареждане на филтровия кондензатор в симулационният модел е близо 350 ms, а при реалното измерване е оценено на 366 ms, което отново е много близка стойност 4.5%.



а)



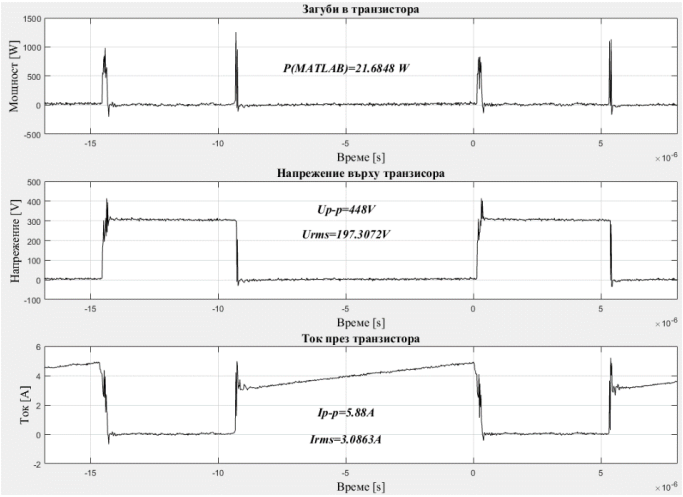
б)

Фигура 10: Сравнение на времедиаграмите от симулационния модел и практическият експеримент представящи процеса по отпушване на тиристорите на полууправляемият мостов изправител, а) симулационни, б) експериментални резултати, оранжево – изх. напрежение, синьо – вх. ток, лилаво – напрежение в/у C_3

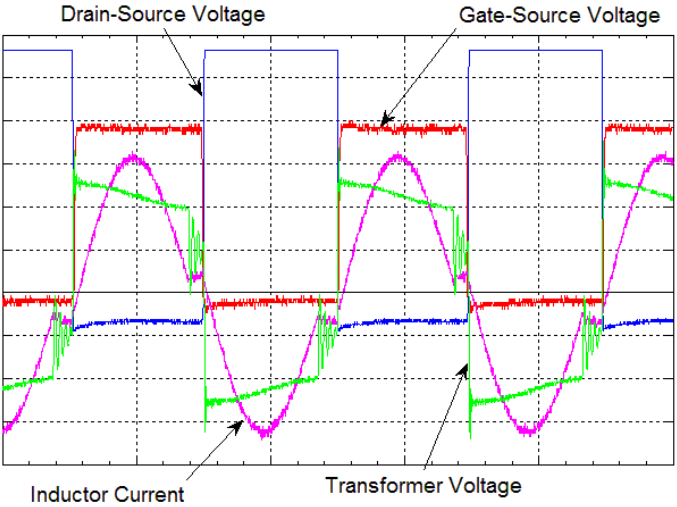
4.3. Експериментално изследване на PFC преобразовател с подобрени параметри

За да се потвърди окончателно предложения в Глава 3 подход, условията на работа на двата транзистора (Si, SiC) са сравнени експериментално в идентични експериментални реализации на 1500W PFC преобразувател. С осцилоскоп са измерени напрежението Дрейн-Сорс (V_{ds}) и дрейновия ток (I_d). След което получените стойности са умножени в MATLAB и по този начин е получена времедиаграмата представена на Фигура 11. Загубите, измерени в транзистор STF25NM60N са оценени на 21.6848 W, а тези в транзистор C2M0160120D са 14.1275 W, което съвпада с

предходните стойности. От времедиаграмите може да се види, че основната разлика е вследствие на загубите от превключване.



Фигура 11: Експериментални резултати: от долу нагоре: ток през силициевия (Si) MOSFET, напрежение върху ключа и загуби в него



Фигура 12: Работен цикъл на резонансен DC/DC преобразувател работещ при изходна мощност 1.5 kW
син – напрежение Дрейн – Сорс, (y = 50 V/дел., x = 10 μs/дел.),
червен – напрежение Гейт – Сорс, (y = 5 V/дел, x = 10 μs/дел.),
зелен – напрежение върху трансформатора, (y = 50 V/дел., x = 10 μs/дел.),
лилав – ток през индуктора, (y = 4 A/дел., x = 10 μs/дел.)

4.4. Експериментално изследване на полумостов резонансен DC/DC преобразовател с подобрени параметри

За да се потвърди окончателно предложения в Глава 3 подход за избор на ключове, двата типа транзистори са изследвани експериментално и в резонансни DC/DC преобразуватели с идентична структура и компоненти (Фигура 12). Единствената разлика е в използваните транзистори и съпротивленията последователно свързани на Гейта на всеки от тях. Експерименталните измервания на загубите са направени чрез калориметър [116]. Избран е метод за измерване на загубите в преобразувателя с постоянен въздушен поток. При сравнение на двата типа полеви транзистори е отчетено предимство на силициево-карбидният транзистор спрямо пълни загуби, високи честоти и температурно поведение и по-висока температура на прехода.

4.5. Изследване на съвместното действие на преобразувателите в разработеното зарядното устройство за акумулаторни батерии

Извършена е оценка на загубите в силовите компоненти на цялото зарядно устройство. Резултатите са представени във Таблица 5.

Таблица 5: Загуби в силови ключове и магнитни компоненти на зарядното устройство. Входен изправител, PFC и резонансен DC/DC преобразувател
P = 1500 W

Тип ключ	Изправител, ключове			PFC, ключ+диод				DC-DC, ключове			Зарядно устройство		
	тиристори	диоди	общо	превключване	проводи мост	диод	общо	превключване	проводи мост	общо	ключове	Магнитни компоненти	общи
-	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W
Si	5.2	3.6	**8.8**	7.6	1.4	6.8	**16**	2.7	37.8	**40**	65.2	15.5	**81**
SiC	5.2	3.6	**8.8**	3.0	1.3	6.8	**11**	2.7	16.7	**19**	39.2	15.5	**55**

Проведените измервания с калориметър (цялото зарядно устройство е поставено в обема на калориметъра) показва, че мощността консумирана от мрежата P_{in} = 1638 W P_{out} = 1540 W, което дава резултатна ефективност η = 94.017%.

Обобщения и изводи

1. Проведени са експериментални изследвания (чрез набор от измервания с осцилоскоп и/или калориметър) и анализ на реализираните силови преобразуватели в структурата на зарядно устройство;

2. Доказани са:
    - работоспособността на изследваните преобразуватели;
    - удовлетворяване на зададените им функционални параметри и прагове (времена на реакция, стойности на токове и напрежения);
3. Проведено е цялостно сравнение между експерименталните резултати и предложените симулационни модели в MATLAB Simulink и е установено принципно съвпадение, доказващо предложените методики и зададените критерии при проектиране и реализация на преобразувателите;

4. Направени са изводи за практическата конструкция, реализация и функциониране на системата с оглед на нейната високоефективна и безотказна работа;

5. Предложената схема е реализирана и изследвана експериментално, като са верифицирани основните ѝ предимства и предложената методика за проектиране;

6. Анализираните преобразуватели (PFC и DC-DC преобразувател) са реализирани и изследвани експериментално. Получените експериментални резултати потвърждават резултатите от симулациите и направените избори на най-подходящи ключове.

Основни изводи и предложения за практиката

Дисертационният труд включва критичен обзор и анализ на известните схемни решения за заряд на акумулаторни батерии с изходна мощност подходяща за свръхлеки електрически автомобили.

Основно иновативно решение в дисертацията е предложената нова схема за ограничаване на пусковите токове (мек старт) на изправителни схеми, базирана на комбиниран модул от два тиристора и два диода, като част от универсално зарядно устройство. Предложен е универсален модел на схемата и методика за електрическо проектиране на схемата.

В дисертацията са разработени универсални симулационни модели на силови преобразуватели в системата за заряд на АБ, (PFC и резонансен DC-DC преобразувател) в MATLAB Simulink, които позволяват оптимизиране на процеса на проектиране на схемите и избор на силови електронни ключове.

Анализираните преобразуватели (мек старт, PFC и DC-DC преобразувател) са реализирани и изследвани експериментално, като са верифицирани основните им предимства и предложените методики за проектиране.

Всички предложени симулационни модели са имплементирани в подходяща симулационна среда и верифицирани чрез подходящи лабораторни изследвания.

Основните резултати от изследванията и експериментите в дисертационният труд са публикувани в реферирани издания: доклади и статии в национални и международни конференции и списания.

Три от публикациите са реферирани в електронната база данни “Scopus”, а една от публикациите се очаква да излезе в списание с Impact Factor (IET, UK).

Приноси по дисертационния труд

1. Направен е критичен обзор и анализ на известните схемни решения за заряд на акумулаторни батерии с изходна мощност близка до тази на зарядно устройство, необходимо за свръх леки електрически автомобили и са дефинирани основни параметри, които да бъдат подобрени. Това са: повишаване на функционалността, понижаване на загуби и тегло.

2. Предложена и верифицирана е нова схема за ограничаване на пусковите токове (мек старт) при изправителни схеми. Доказани са работоспособността на схемата, повишената ѝ ефективност и функционалност.

3. Предложен и верифициран е универсален модел на схемата за ограничаване на пусковите токове, позволяващ настройка на параметрите и изследване на характеристиките на схемата.

4. Разработена и верифицирана е универсална методика за електрическо проектиране на предложената схема за мек старт. Методиката е приложима в целия обхват от мощности на зарядни устройства захранвани от еднофазната мрежа.

5. Разработени и верифицирани са универсални симулационни модели на преобразуватели в системата за заряд на АБ (PFC и резонансен DC-DC преобразувател). Чрез използване на моделите е доказано, че SiC ключове имат по-малки загуби от аналогичните Si ключове при реализация на изследваните преобразуватели.

6. Предложената система от три преобразувателя с подобрени параметри е цялостно реализирана, изследвана експериментално и са доказани нейните основни предимства: подобрени функционални и масогабаритни параметри.

Приноси 2 и 4 могат да бъдат определени, като научно-приложни, а останалите като приложни.

Публикации по дисертационния труд

[П.1] Van den Bossche, **R. S. Stoyanov**, V. C. Valchev, “Inrush current limiting circuit for a 1500 W battery charger using thyristors and PTC thermistors”, IET Research Journal, 2016, submitted. - реферирана в б. д. „Scopus“

[П.2] Van den Bossche, **R. S. Stoyanov**, N. Dukov, V. C. Valchev, A. S. Marinov, “Analytical simulation and experimental comparison of the losses in resonant DC/DC converter with Si and SiC switches, ” IEEE PEMC2016. - реферирана в б. д. „Scopus“

[П.3] V. C. Valchev, **R. S. Stoyanov**, “Loss analysis and improvements of battery charging system for light electrical car”, IEEE XXV International Scientific Conference Electronics 2016, Sozopol 12 - 14 September 2016. - реферирана в б. д. „Scopus“

[П.4] **Radko Stoyanov**, Orlin Stanchev, Vencislav Valchev and Angel Marinov, “Optimising selection of power switches in PFC boost converters by MATLAB Simulink pretesting”, 2016, 19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, IEEE SIELA, 29.05.2016-02.06.2016, Bourgas. - реферирана в б. д. „Scopus“

[П.5] **Stoyanov R.**, Valchev V., Stefanov D., “Power electronic converters used in electric vehicles”, - сборник по проект от ОП „РЧР“ BG051PO001-3.3.06.0005 към ТУ-Варна, Варна, България, 2014, ISBN 978-954-760-316-5, pages 59-66.

[П.6] **Стоянов Р.**, Николов Г., “Зарядно устройство с изходна мощност 1500 W за свръх леки електрически автомобили”, INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, 22 – 23 November 2013, GABROVO, ISBN: 978-86-6125-033-0, pages 806-808.

[П.7] Angel Stanimirov Marinov, Emil Ganchev Rosenov and **Radko Stoyanov Stoyanov**, “Modeling and Simulation of an Improved Microcontroller Based Desaturation Current Protection”, ANNUAL JOURNAL OF ELECTRONICS, 2014, ISSN 1314-0078, pages 230-234.

[П.8] **Radko Stoyanov Stoyanov**, Emil Ganchev Rosenov, Angel Stanimirov Marinov and Vencislav Cekov Valchev, “Modelling, simulations and design considerations for inrush current limiting topologies”, ANNUAL JOURNAL OF ELECTRONICS, 2014, ISSN 1314-0078, pages 227-230.

[П.9] **Radko Stoyanov**, Geori Nikolov, Orlin Stanchev, Vencislav Valchev, “Improving energy losses in a power factor correction unit for electric vehicles through utilization of SiC MOSFETs and diodes”, INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE “UNITECH 2014” 21 – 22 November 2014, GABROVO, ISSN 1313-230X, pages I-199 ÷ I-203.

[П.10] **Radko Stoyanov**, “ A MATLAB study of a battery – ultracapacitor hybrid energy source for ultralight electric vehicles”, INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE “UNITECH 2015” 20 – 21 November 2015, GABROVO, ISSN 1313-230X, pages I-323 ÷ I-327.

Abstract

PhD Thesis Title: Power electronic converters used in battery pack charging
Of the requirements for the Degree Doctor of Philosophy
By: Radko Stoyanov Stoyanov

The dissertation examines and analyzes battery charging converters used in ultralight electric vehicles. Those converters are used to adapt the parameters of the electrical energy to levels suitable for charging batteries and help meeting the EU legislations. The analysis in Chapter 1 focuses on defining the parameters of the charger and analyzing the state of the art converters in battery charging. In Chapter 2 a new full wave rectifier circuit with inrush current limiting capabilities and short circuit protection during startup is proposed. Furthermore, a methodology for designing the proposed scheme and a simulation model are created. In Chapter 3 two simulation models are created. The first one is PFC converter based on boost topology and the second one is a half-bridge resonant DC/DC converter. An improvement of the efficiency of those converters via new semiconductor switches is suggested. Chapter 4 focuses at verification of the suggested in Chapter 2 scheme, methodology and simulation of the inrush current limiting circuit and the suggested in Chapter 3 simulation models via practical experiments. A practical implementation and guidelines for future work are also highlighted at the end of the thesis.

Резюме по диссертации

Тема: Электронные преобразователи зарядки аккумуляторной батареи
Для присуждения образовательной и научной степени „доктор“
Аспирант: инж. Радко Стоянов Стоянов

В диссертации рассматриваются и анализируются преобразователи в структуре зарядного устройства сверхлёгких электрических машин. Эти устройства преобразуют параметры электроэнергии до уровней зарядки аккумулятора и помогают соответствовать стандартам, введенных ЕС. Анализ, проведенный в первой главе, основное внимание уделяет определению параметров зарядного устройства и изучения существующих решений схемы заряда. Во второй главе описывается инновационная схема мостового выпрямителя с возможностью ограничения пусковых токов и защитой от короткого замыкания при включении. В данной главе была предложена методика проектирования новой схемы и имитационной модели, чтобы проиллюстрировать основной принцип действия. В третьей главе разработаны две имитационные модели: преобразователь повышения коэффициента (повышающий преобразователь) и полумостовой резонансный DC/DC преобразователь. В главе предлагается способ повышения эффективности с использованием новых полупроводниковых переключателей. В четвёртой главе основное внимание уделяется проверке схемы предложенной в главе 2, методологии и имитационной модели, предложенной в главе 3 и моделированию на основании практических экспериментов.