

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ факултет Електронна техника и технологии катедра Силова електроника

маг. инж. Красимир Йорданов Кишкин

Електронни преобразуватели за обмен на енергия между системи за съхранение на енергия

# ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен

# "доктор"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика Научна специалност: Индустриална електроника

Научен ръководител: доц. д-р. инж. Димитър Арнаудов

СОФИЯ, 2025г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра "Силова електроника" към Факултет Електронна техника и технологии на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 24.03.2025 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 14.07.2025 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-32 / 24.03.2025 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р инж. Цветана Григорова Григорова-Щърбева – председател

2. доц. д-р инж. Димитър Дамянов Арнаудов – научен секретар

3. проф. д-р инж. Николай Димитров Маджаров

4. доц. д-р инж. Христо Тодоров Ибришимов

5. проф. д-р инж. Никола Вичев Колев, дссн

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Цветана Григорова Григорова-Щърбева

2. доц. д-р инж. Христо Тодоров Ибришимов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет Електронна техника и технологии на ТУ-София, блок №1, кабинет № 1355.

Дисертантът е зачислен редовен и трансформиран в задочен докторант към катедра "Силова електроника" на факултет Електронна техника и технологии. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Красимир Кишкин Заглавие: Електронни преобразуватели за обмен на енергия между системи за съхранение на енергия Тираж: 30 броя Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

## І. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### Актуалност на проблема

Развитието на науката, и в частност електрониката, предлага все повече съвременни решения в областта на компютърните технологии, комуникациите, транспорта и т.н. Въпросът за опазването на околната среда също стои на дневен ред. Това засилва интереса към намаляване на въглеродните емисии. Стремежсът е да се намери източник на енергия, който да е възможсно най-екологично чист, т.е. с минимален или в най-добрия случай, нулев въглероден отпечатък. Крачка в тази посока е нарастващото използване на енергия, добита от възобновяеми енергийни източници.

Двигателите с вътрешно горене, са сочени като едни от основните източници на въглеродни емисии, оказващи негативно влияние върху околната среда. Вече се редлагат не малко модерни решения, които използват **електрическата енергия** като алтернатива на **двигателя с вътрешно горене**. Пример за това са преносимите двуколесни транспортни средства, използвани предимно за бързо градско придвижване на къси разстояния.

Индустрията и технологиите отправят поглед и към автомобилите. Те са се превърнали в неделима част от ежседневието на почти всеки и тяхното премахване, с цел опазване на околната среда, се оказва не лека задача. Търси се оптимален вариант, който да замени традиционния им източник на енергия с алтернативен такъв. Към момента, най-подходяща алтернатива се оказва електродвигателят( постояннотоков или променливотоков).

Като цяло, тенденцията е към нарастване на пазарния дял на електромобилите и може би, в не далечно бъдеще, изместване на традиционните двигатели с вътрешно горене. Това прави актуален въпроса за начина на съхранение и отдаване на електрическата енергия, необходима за задвижване на електродвигателя.

Лидери в съвременните системи за съхранение и отдаване на електрическа енергия са йонно-базираните клетки и суперкондензаторите. Тъй като и двата вида енергийни източници имат взаимно допълващи се параметри, популярност набира и възможността за съвместна работа на две системи за съхранение на енергия, едната от които е базирана на йонни клетки, а другата на суперкондензатори.

От една страна, ефективният обмен на енергия между такива системи поставя въпроса за използването на специализирани **DC/DC** преобразуватели с висок **КПД**. От друга страна, въпросът с разпределението на **енергията** в между елементите в самата батерия, също има водеща роля. Постоянно се работи към усъвършенстване на **DC/DC** преобразувателите, които да осигуряват **минимални загуби** при преноса и преобразуването на енергията. Непрекъснати изследвания има и в областта на батериите, като стремежът е подобряване на енергийните им показатели, свързани с възможсността им да съхраняват и отдават по-големи количества енергия.

## Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи на изследване

Основна цел: Разработване и изследване на алгоритми за изравняване на напреженията между елементи в система за съхранение на електрическа енергия. Изследване на електронен преобразувател за изравняване на напрежения, в система за съхранение на енергия. За постигане на поставената цел, в настоящия дисертационен труд е необходимо да бъдат изпълнени следните основни задачи:

- Да се анализират основни параметри и изисквания на съвременни електрохимични елементи за съхранение и отдаване на електрическа енергия, необходими за тяхната експлоатация.
- Да се направи сравнителен анализ на различни схемни варианти на електронни преобразуватели, подходящи за обмен на енергия между елементи за съхранение на енергия.
- Да се извърши анализ на електромагнитните процеси в силовата схема на преобразувателя.
- Да се извърши изследване и сравнителен анализ на алгоритми, позволяващи изравняване на напреженията между отделните елементи в рамките на система за съхранение на електрическа енергия в процеса на нейното зареждане.
- Да се изследват възможностите, и свързаните с това изисквания, за бързо зареждане на батерия, съставена от последователно свързани суперкондензаторни и/или йоннобазирани клетки.
- Да се създаде експериментален макет, чрез който да се провери достоверността на получените аналитични резултати.

При разработването на труда са използвани следните методи на изследване:

- симулационни компютърна симулация на разработени за целите на дисертацията алгоритми за изравняване на напреженията между елементи за съхранение на енергия. Компютърна симулация на избран за изследване електронен преобразувател, за работа в система за съхранение на енергия.
- експериментални практичекса реализация на резонансен DC/DC преобразувател.
- аналитични анализ и сравнение на симулационните и експериментални резултати.

## Научна новост

Предложени са алгоритми за изравняване на напреженията в **ССЕЕ**. Създадени са симулационни модели с среда на **LTspice**, позволяващи изследване на алгоритмите. Предложена е методика за инженерно изчисление на токовете и времената на зареждане в системата.

## Апробация

Резултати от дисертационния труд са разглеждани и обсъждани на:

- 1. 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2019
- 2. IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2019
- 3. X National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2019

- 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2019
- 5. Technical Univercity of Gabrovo, International Scientific Conference UniTech'19 SELECTED PAPERS (2019)
- 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Demanovska Valley, Slovakia, 2020
- 7. 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2020
- 8. XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Xplore, 2020
- 9. AIP Conference Proceedings 2333 (2021), 03

## Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в **10** научни статии, в български и международни реферирани и индексирани издания. От статиите, **1** самостоятелна, а **2** са в поредица сборници с научно рецензиране.

## Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **202** страници, като включва въведение, **4** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература.

Цитирани са общо 203 литературни източници, като 195 са на латиница и 6 на кирилица, а останалите са интернет адреси.

Работата включва общо **100** фигури и **3** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

## II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

## ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Разглеждат се актуалните, най-широко приложими и използвани, съвременни елементи за съхранение на електрическа енергия – йонно-базирани енергийни източници и суперкондензатори.

Разглеждат се съвременните системи за съхранение на електрическа енергия и се дефинират нуждата и основните изисквания при изравняване на напреженията – активно и пасивно балансиране. Разглеждат се съвременните решения в областта на DC/DC преобразувателите, позволяващи реализиране, контрол и управление на процесите на обмен на енергия в система за съхранение на електрическа енергия, по метода на активното балансиране. Разглеждат се различните архитектури на BMS.

Накрая са формулирани основните цели и задачи на дисертационния труд.

### 1.1 Литиевойонни батерии

В този раздел е направена класификация на електрическите батерии. Разгледани са различните видовете литиевойонни батерии, както според електрохимичната им структура, така и според геометричните им размери. Изяснени са термините относно видовете литиевойонни батерии. В табличен вид са представени: най-често срещаните в практиката цилиндрични литиевойонни клетки, като са дадени и техни основни параметри; сравнение между основните видове литиевойонни клетки; техните предимства и недостатъци.

Разгледана е структурата на литиевойонна клетка тип 18650, както и концепцията за безопасност. Разгледан е принципът на действие и протичащите електрохимични реакции в процес на зареждане и разреждане на литиевойонни батерии.

Разгледани са основните компоненти – анод, катод, електролит и сепаратор. Дефинирани са основните параметри на литиевойонните батерии и са дадени основни математически изрази за определяне на част от тях. Разгледани са зарядно-разрядните характеристики, методите и изискванията при зареждане и разреждане на литиевойонни батерии. Разгледани са методите за определяне на вътрешното им съпротивление.

Накратко са разгледани и последните тенденции в развитието на йонно-базираните електрохимични източници на енергия.

На база извършеното проучване, са дефинирани ограниченията и изискванията за правилна и надеждна експлоатация на йонно-базирани енергийни източници, като ключови моменти са свързани с това, че литиевойонните батерии не са подходящи за зареждане или разреждане с големи токове и не понасят дълбоко разреждане или презареждане.

#### 1.2 Суперкондензатори

Дефинирано понятието суперкондензатор. Във вид на диаграма е направено е сравнение между суперкондензаторите и другите източници на енергия. Разгледани са видовете суперкондензатори, като са обобщени във вид на блокова диаграма. Разгледана е структурата и принципът на действие на суперкондензаторите. Дефинирани са основните параметри на суперкондензаторите и са дадени някои базови математически изрази, свързани с тях. Разгледани са особеностите в начина им на свързване, методите за определяне на капацитета и на еквивалентното им последователно съпротивление. Представени са основни математически изрази и диаграми. Обобщени са предимства и недостатъци на суперкондензаторите.

#### 1.3 Системи за съхранение на енергия

Под система за съхранение на енергия (CCE) е термин, описващ възможността на дадена система да съхранява и в последствие, когато е необходимо, да отдава енергия.

Система за съхранение на електрическа енергия (ССЕЕ) е съвкупност от свързани по подходящ начин елементи за съхранение на електрическа енергия (ЕСЕЕ), устройства за обме на електрическа енергия (УОЕЕ) и BMS.

Видовете ЕСЕЕ и ССЕ са класифицирани във вид на блокови схеми.

Разгледани са: начините на свързване на елементите от една система за съхранение на електрическа енергия; необходимостта и свързаните с нея изисквания за изравняване на напреженията. Във вид на блокова диаграма е представена класификация на методите за изравняване на напреженията. Разгледани са видовете балансиране - активно и пасивно.

На фигура 1.31, във вид на блокова схема, е представена класификация на методите за пасивно балансиране.



Фигура 1.31 Класификация на методите за активно балансиране

На фигура 1.33, във вид на блокова схема, е представена класификация на методите за активно балансиране.



Фигура 1.33 Класификация на методите за активно балансиране

И за двата метода са представени базови схемни решения. От представеното разглеждане става ясно, че стремежът е реализиране на балансиране чрез метода на активен контрол, чийто смисъл се разбира като пренос и разпределение на енергията, по възможност с минимални загуби и също така, чрез възможно най-елементарно схемно решение, използващо минимален брой елементи и опростен и надежден алгоритъм.

### 1.4 Архитектури за активно балансиране

Разгледани са методите за реализиране на активно балансиране – пренос на енергия от клетка към клетка; пренос на енергия от клетка към цялата система; пренос на енергия от цялата система към единична клетка; пренос на енергия от клетка към цялата система към клетка. Във вид на блокова схема, е обобщено активното балансиране на база пренос на енергия чрез капацитивни елементи. Представени са основни схеми решения.

Разгледан е метода за активно балансиране, на база пренос на енергия чрез индуктивни елементи, като са представени и основни схемни решения.

Разгледан е метода за активно балансиране на база пренос на енергия чрез DC/DC преобразуватели. Във вид на блокова диаграма, е направена класификация на видовете DC/DC преобразуватели – еднопосочни и двупосочни; с галванично разделяне и без галванично разделяне; с режим на мека комутация; с режим на твърда комутация; повишаващи, понижаващи, комбинирани; едноключови и многоключови. Представени са основни схемни решения. Накрая са формулирани изводи.



Фигура 1.48 Двупосочни преобразуватели за активно балансиране с галванично разделяне

На фигура 1.48 е показана разновидност на **двупосочни преобразуватели с галванично разделяне**, с приложение за активно балансиране на система от последователно свързани клетки.

На фигура 1.50 са представени принципни схеми на двупосочни **DC/DC преобразуватели**, принципът на действие, базиран на резонансни процеси.

Фигура 1.50(а) представя принципна схема на активно балансиране, реализирано с **квази**резонансен преобразувател.



Фигура 1.50 Резонансно базирани DC-DC преобразуватели

### 1.5 Система за управление на батерия (BMS). Структура и основни функции

BMS представлява електронна система, осигуряваща безопасна и надеждна експлоатация на ССЕЕ. Основните функционалности са обобщени във вид на блокова схема.

Във вид на блокова схема, е направена класификация на основните BMS топологии, които са разгледани накратко поотделно. BMS използва различни схемни решения за реализиране на ефективен контрол на енергийните потоци в една ССЕЕ.

### 1.6 Основни цели и задачи на дисертационния труд

В този раздел, на база литературния обзор, направеният анализ и общи изводи, е дефинирана същността на проблема. На тази база са формирани общите цели и задачи на дисертационния труд.

# ГЛАВА 2. Разработване и изследване на алгоритми за изравняване на напреженията

В тази глава се описват, разработените за целите на дисертацията, алгоритми за изравняване на напрежения. Представя се подробно описание на изведените математически зависимости, описващи търсените величини.

### 2.1 Същност на алгоритмите

Разглеждат се **N** на брой последователно свързани клетки, образуващи ССЕЕ (батерия). На фигура 2.1 е показана блоковата схема на **БССЕЕ**. Целта е да се осъществи зареждане на батерията чрез съвместната работа на няколко източника на ток. Един основен заряден източник (Main Charging Source, MCS), осигуряващ заряден ток за цялата батерия и допълнителни зарядни източници (Additional Charging Source, ACS), свързани паралелно на всяка клетка, осигуряващи балансирано зареждане.



Фигура 2.1 Блокова схема на ССЕЕ

Въвеждат се следните основни ограничения:

- 1) Максимално допустим заряден ток през клетка  $\mathbf{I_{ch(max)}}$
- 2) Максимално допустимо работно напрежение на клетка  $U_{cell(max)}$
- 3) Минимално допустимо работно напрежение на клетка  $\mathbf{U}_{\mathbf{cell(min)}}$

### 2.2 Описание на алгоритмите

Извеждането на основните математически зависимости за описание на алгоритмите, е извършено на база известната от електротехниката формула за кондензатор, описваща натрупването на енергия във вид на електрически заряд:

$$\mathbf{I} \cdot \mathbf{t} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{U} \tag{2.1}$$

### 2.2.1 Описание на Алгоритъм 1

Приема се, че преди да стартира процесът на зареждане и изравняване, напрежението на отделните клетки е еднакво, като не се разглежда въпроса, по какъв начин, напреженията на отделните клетки са изравнени. Не се разглежда въпросът по какъв начин е определен капацитетът на всяка една клетка.

Същността на алгоритъма е да се определи какъв е необходимият за всяка една клетка заряден ток така, че независимо от капацитета на отделните клетки, напрежението върху тях да се изменя с една и съща скорост.

Токът през една клетка, във всеки момент от времето, се определя от уравнение 2.2:

$$\mathbf{i_{cell}}(\mathbf{t}) = \mathbf{C_{cell}} \cdot \frac{\mathbf{dU_{cell}}(\mathbf{t})}{\mathbf{dt}}, [\mathbf{A}]$$
(2.2)

Тъй като зареждането на клетките се осъществява с постоянен ток, уравнение 2.2 може да се запише във вида:

$$\mathbf{I}_{\text{cell}} = \mathbf{C}_{\text{cell}} \cdot \frac{\Delta \mathbf{U}_{\text{cell}}}{\Delta \mathbf{t}}, [\mathbf{A}]$$
(2.3)

Алгоритмите са изведени за работа на преобразувателите в режим на източник на ток и имат две основни задачи:

1) Постигане на минимално време за зареждане на батерията.

2) Изравняване на напреженията между отделните клетки в батерията.

Изравняване на напреженията на отделните клетки ce контролира с помощта на допълнителните зарядни източници (ДЗИ). Te осигуряват допълнителен TOK към всяка клетка, който заедно с тока от основния заряден източник (ОЗИ) образува необходимия заряден ток за всяка клетка, а от там, и контролиране на скоростта на изменение на напрежението върху клетките.

където  $\Delta U_{cell} = U_{cell(max)} - U_{cell(initial)}, [V]$  е изменението на напрежението върху клетката в процеса на зареждане, от началото напрежение  $U_{cell(initial)}$  до максимално допустимото  $U_{cell(max)}$ ; C, [F] е капацитетът на клетката;  $I_{cell}, [A]$  е зарядният ток през клетката;  $\Delta t, [s]$  е интервала от време, за който клетката се зарежда.

От уравнение 2.2, може да се изрази минималният интервал от време  $\Delta t_{ch(min)}$ , за който, клетката с максимален капацитет  $C_{cell(max)}$  ще се зареди:

$$\Delta \mathbf{t}_{\mathbf{ch}(\mathbf{min})} = \mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})} \cdot \frac{\Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})}}}{\mathbf{I}_{\mathbf{ch}(\mathbf{max})}}, [\mathbf{s}]$$
(2.4)

Токът през всяка клетка  $I_{cell(n)}$  представлява сума от тока от основния заряден източник  $I_{MCS}$  плюс тока от допълнителния заряд източник  $I_{ACS(n)}$ , свързан паралелно към съответната **n-та** клетка.

$$\mathbf{I}_{\mathbf{cell}(\mathbf{n})} = \mathbf{I}_{\mathbf{MCS}} + \mathbf{I}_{\mathbf{ACS}(\mathbf{n})} \le \mathbf{I}_{\mathbf{ch}(\mathbf{max})}$$
(2.5)

Токът от **ОЗИ** се определя по отношение на клетката с минимален капацитет. Изхождайки от уравнение 2.3 следва:

$$\mathbf{I}_{\mathbf{MCS}} = \mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{min})} \cdot \frac{\Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{min})}}}{\Delta \mathbf{t}_{\mathbf{ch}(\mathbf{min})}}, [\mathbf{A}]$$
(2.6)

където  $\Delta U_{C_{cell(min)}}, [V]$  е изменението на напрежението на клетката с минимален капацитет от начална до максимална стойност;  $C_{cell(min)}, [F]$  е клетката с минимален капацитет

Токът от допълнителния заряден източник  $I_{ACS(n)}$  за **п-тата** клетка, при различни начални условия се определя от израза:

$$\mathbf{I}_{ACS(n)} = \frac{\mathbf{I}_{ch(max)}}{\mathbf{C}_{cell(max)} \cdot \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(max)}}} \cdot \left(\mathbf{C}_{cell(n)} \cdot \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(n)}} - \mathbf{C}_{cell(min)} \cdot \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(min)}}\right)$$
(2.11)

Токът от основния заряден източник при еднакви начални условия се определя от израза:

$$\mathbf{I}_{\mathbf{MCS}} = \frac{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{min})}}{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})}} \cdot \mathbf{I}_{\mathbf{ch}(\mathbf{max})}$$
(2.12)

Токът от допълнителния заряден източник за **п-тата** клетка, при еднакви начални условия, се определя от израза:

$$\mathbf{I}_{ACS(n)} = \left(\frac{\mathbf{C}_{cell(n)} - \mathbf{C}_{cell(min)}}{\mathbf{C}_{cell(max)}}\right) \cdot \mathbf{I}_{ch(max)}$$
(2.13)

Токът през всяка клетка, при еднакви начални условия, се определя от израза:

$$\mathbf{I}_{cell(n)} = \frac{\mathbf{C}_{cell(n)}}{\mathbf{C}_{cell(max)}} \cdot \mathbf{I}_{ch(max)}$$
(2.14)

С уравнения 2.12, 2.13 и 2.14 се определят необходимите зарядни токове, когато се очаква, че началните условия за всички кондензатори са еднакви. Ако началните условия за всички клетки се очаква да се различават, голям толеранс в номиналния капацитет ще доведе до голяма разлика между минимален и максимален капацитет. Ако в съчетание с това се случи и голяма разлика в началните условия на две клетки, възможно е да се появят отрицателни токове от някои ДЗИ.

За да се запази работоспособността на описания алгоритъм, уравнение 2.4 е необходимо да се допълни по следния начин:

$$\Delta \mathbf{t}_{ch(min)} = \frac{\mathbf{C}_{cell(max)}}{\mathbf{I}_{ch(max)}} \cdot \frac{\left(\Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(max)}} + \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(min)}}\right)}{2}, [s]$$
(2.15)

### Последователност на прилагане на алгоритъма

### 1. При еднакви начални условия

Когато началните условия са еднакви за всички клетки, определянето на необходимите токове се извършва чрез уравнения 2.12, 2.13 и 2.14.

### 2. При различни начални условия

Когато началните условия не са еднакви за всички клетки, токът от ОЗИ може да се определи по няколко начина:

- времето за зареждане, чрез уравнение 2.15 и токът от ОЗИ, чрез уравнение 2.6;
- времето за зареждане, чрез уравнение 2.4 и токът от ОЗИ, чрез уравнение 2.6;

Необходимите токове от ДЗИ се определят от уравнение 2.11.

### 2.2.2 Описание на Алгоритъм 2

Процесът на зареждане стартира с максимален заряден ток за всички клетки. Това означава, че токът от всички допълнителни източници е еднакъв;

Токът от всеки допълнителен източник се намалява или прекратява при достигане на предварително зададена потенциална разлика, еднаква за всички клетки. Тази разлика се задава по отношение на клетката с максимален капацитет, чието напрежение се приема за еталонно. Напрежението на останалите клетки се следи да не надвишава еталонното напрежение с повече от предварително зададената потенциална разлика. Търси се момента от време  $t_x$ , в който напрежението между **n-тата** клетка  $C_{cell(n)}$  и клетката с максимален капацитет  $C_{cell(max)}$  ще достигне зададената потенциална разлика, която ще се означава като  $\Delta U_{set}$ . Началното условие за всички клетки е еднакво;

На фигура 2.2(б) е представена времедиаграма, на която са изобразени само напреженията на клетката с максимален и минимален капацитет, в процес на зареждане.



различна скорост, като за клетката с минимален капацитет цвят), напрежението нараства най-бързо, a клетката на максимален капацитет

цвят),

най-бавно.

на

за

В даден момент, означен като  $\mathbf{t}_{\mathbf{x}}$ , напрежението на клетката с минимален капацитет  $C_{cell(min)}$ ще

напрежението

Дадени са основните означения

на

че

използвани

основните

заради

(зелен

(червен

нараства

с

C

уравнения,

нараства

величините,

извеждане

описващи алгоритъма.

ce,

различния капацитет на клетките,

ИМ

математически

Вижда

напрежението

Фигура 2.2 СС режим на зареждане на четири последователно свързани клетки

бъде по-голямо от напрежението на клетката с максимален капацитет точно със стойност  $\Delta U_{set}$ . За този момент са ни известни следните величини:

1) Заряден ток, еднакъв и за двете клетки и равен на максималния ток  $I_{\max}$ .

2) Капацитет на всяка от клетките.

Най-малкото възможно време, за което може да се зареди батерията се дава чрез израза:

$$\mathbf{t}_{ch(min)} = \frac{\mathbf{C}_{cell(max)} \cdot \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(max)}}}{\mathbf{I}_{ch(max)}}$$
(2.26)

Уравнението за определяне на тока от основния заряден източник  $I_{MCS}$  има вида:

$$\mathbf{I}_{\mathbf{MCS}} = \mathbf{I}_{\mathbf{ch}(\mathbf{max})} \cdot \frac{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{min})} \cdot \left( \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})}} - \frac{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})}}{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})} - \mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{min})}} \cdot \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{set}} \right)}{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})} \cdot \left( \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})}} - \frac{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{min})}}{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})} - \mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{min})}} \cdot \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{set}} \right)}$$
(2.33)

Уравнението за определяне на големината на тока от допълнителните зарядни източници, при стартиране на процеса на зареждане, има вида:

$$\mathbf{I}_{ACS} = \mathbf{I}_{ch(max)} \cdot \left( 1 - \frac{\mathbf{C}_{cell(min)} \cdot \left( \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(max)}} - \frac{\mathbf{C}_{cell(max)}}{\mathbf{C}_{cell(max)} - \mathbf{C}_{cell(min)}} \cdot \Delta \mathbf{U}_{set} \right)}{\mathbf{C}_{cell(max)} \cdot \left( \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(max)}} - \frac{\mathbf{C}_{cell(min)}}{\mathbf{C}_{cell(min)}} \cdot \Delta \mathbf{U}_{set} \right)} \right)$$
(2.36)

За всички случаи, за които  $C_{cell(min)} < C_{cell(m)} < C_{cell(max)}$ , токът от допълнителния заряден източник, след момента  $t_x$ , се определя от израза:

$$\begin{split} \mathbf{I}_{ACS(\mathbf{C}_{cell(\mathbf{n},\mathbf{t}_{\mathbf{x}})})} = & \frac{\mathbf{I}_{ch(\max)}}{\mathbf{C}_{cell(\max)}} \cdot \left( \mathbf{C}_{cell(\mathbf{n})} \cdot \frac{\left( \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(\max)}} - \frac{\mathbf{C}_{cell(\max)}}{\mathbf{C}_{cell(\max)} - \mathbf{C}_{cell(\mathbf{n})}} \cdot \Delta \mathbf{U}_{set} \right)}{\left( \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(\max)}} - \frac{\mathbf{C}_{cell(\mathbf{n})}}{\mathbf{C}_{cell(\max)} - \mathbf{C}_{cell(\mathbf{n})}} \cdot \Delta \mathbf{U}_{set} \right)} \right. \\ & - \mathbf{C}_{cell(\min)} \cdot \frac{\left( \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(\max)}} - \frac{\mathbf{C}_{cell(\max)}}{\mathbf{C}_{cell(\max)} - \mathbf{C}_{cell(\min)}} \cdot \Delta \mathbf{U}_{set} \right)}{\left( \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{cell(\max)}} - \frac{\mathbf{C}_{cell(\min)}}{\mathbf{C}_{cell(\min)}} \cdot \Delta \mathbf{U}_{set} \right)} \right)} \end{split}$$
(2.38)

Времето, за което ще се дозареди **n-тата** клетка  $C_{cell(n)}$ , може да се определи чрез израза:

$$\mathbf{t}_{\mathbf{ch}_{\mathbf{cell}(\mathbf{n})}} = \frac{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})}}{\mathbf{I}_{\mathbf{max}}} \cdot \left( \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})}} - \frac{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{n})}}{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})} - \mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{n})}} \cdot \Delta \mathbf{U}_{\mathbf{set}} \right)$$
(2.39)

Трябва да се има предвид, че стойността на  $\Delta U_{set}$  трябва да бъде значително по-малка от  $\Delta U_{C_{cell(max)}}$ . Необходимо е да бъде изпълнено следното условие:

$$\Delta U_{set} \le \frac{\Delta U_{C_{cell(max)}}}{5}$$
(2.40)

Когато се работи с литиевойонни клетки, уравнение 2.40 трябва да бъде стриктно спазено. При работа със суперкондензатори,  $\Delta U_{set}$  е допустимо да има и по-голяма стойност, тъй като, в този случай, кондензаторите позволяват разреждане до 0V, с което стойността на  $\Delta U_{C_{cell(max)}}$  ще бъде голяма и презареждането на някоя клетка е малко вероятно.

#### 2.2.3 Описание на Алгоритъм 3

При този алгоритъм, аналогично на Алгоритъм 2, зареждането стартира, като всички клетки започват да се зареждат с един и същи ток, равен на максималния  $\mathbf{I_{ch(max)}}$ . ДЗИ осигуряват един и същи ток **I<sub>ACS</sub>** към всяка клетка. Този ток, заедно с тока от основния заряден източник  $\mathbf{I}_{MCS}$ , формират зарядния ток за всяка клетка  $\mathbf{I}_{cell}$ :

$$\mathbf{I_{cell}} = \mathbf{I_{MCS}} + \mathbf{I_{ACS}} \tag{2.41}$$

Целта на алгоритъма е да се определи момент  $\mathbf{t}_{\mathbf{x}}$ , в който, ДЗИ към дадена клетка да се изключи напълно и след този момент, зареждането на съответната клетка да продължи само с ток от основния заряден източник. Отделните ДЗИ ще се изключват в различен момент от времето, тъй като, всяка клетка е с различен капацитет.

Зареждането на всички клетки започва от момент, който ще бъде означен с  $\mathrm{t_s}~(\mathrm{start}$ charging time) и завършва в момент, който ще бъде означен с  $t_f$  (finish charging time). Този интервал е времето, за което зарядният процес трябва да се осъществи. Тъй като се изисква бърз заряд, това ще бъде времето, за което се осъществява бързият заряд, тоест  $t_f - t_s = t_{fch}$ .

Специфичният за всяка **t**<sub>х</sub> принадлежи клетка MOMEHT на интервала  $\mathbf{t_{x(cell_n)}} \in [(\mathbf{t_s} = \mathbf{0}) \div \mathbf{t_{fch}}].$  За произволна клетка  $\mathbf{cell}(\mathbf{n})$ , с капацитет по-малък от максималния ( $C_{cell(n)} < C_{cell(max)}$ ), този интервал може да се раздели на две части.

Първата част включва интервала от момента  $\mathbf{t_s}$  до момента  $\mathbf{t_x}$ . В този интервал работи ДЗИ и разглежданата клетка ще се зарежда с максимално допустимия ток и изменението на напрежението ѝ ще бъде означено с  $\Delta U_1$ .

Втората част включва интервала от момента  $\mathbf{t}_{\mathbf{x}}$ , до момента  $\mathbf{t}_{\mathbf{f}}$ . В този интервал, ДЗИ не работи и разглежданата клетка се дозарежда само чрез ОЗИ. За този интервал, изменението на напрежението на клетката ще бъде означено с  $\Delta U_2$ .

Общото изменение на напрежението на клетката, за целия интервал на зареждане, ще бъде  $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2$ . За клетката с максимален капацитет и така описаният процес на зареждане за произволна клетка cell(n), може да се запише следната система от уравнения:

$$C_{cell(n)} \cdot \Delta U_{1} = (I_{MCS} + I_{ACS}) \cdot t_{x}$$

$$C_{cell(n)} \cdot \Delta U_{2} = (t_{fch} - t_{x}) \cdot I_{MCS}$$

$$\Delta U \cdot C_{cell(max)} = (I_{MCS} + I_{ACS}) \cdot t_{fch}$$
(2.42)

След прилагане на необходимите математически преобразувания, описани подробно в дисертационния труд, се получава уравнението, описващо търсения момент  $\mathbf{t_x}$ :

$$\mathbf{t}_{\mathbf{x}(\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{n})})} = \mathbf{t}_{\mathbf{fch}} \cdot \left[ \frac{\mathbf{I}_{\mathbf{MCS}}}{\mathbf{I}_{\mathbf{ACS}}} \cdot \left( \frac{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{n})}}{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})}} - 1 \right) + \frac{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{n})}}{\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{max})}} \right]$$
(2.47)

Ако се въведат коефициентите  $P = \frac{C_{cell(n)}}{C_{cell(max)}}$  и  $K = \frac{I_{MCS}}{I_{ACS}}$ , уравнение 2.47 добива следния

"компактен" вид:

$$\mathbf{t}_{\mathbf{x}(\mathbf{C}_{\mathbf{cell}(\mathbf{n})})} = \mathbf{t}_{\mathbf{fch}} \cdot [\mathbf{K} \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{1}) + \mathbf{P}]$$
(2.48)

В този алгоритъм (както и в предходните), е необходимо да се зададе големината на максималния заряден ток I<sub>ch(max)</sub>. Големината на токовете от ОЗИ и ДЗИ може и да не се изчислява, а да се зададе произволно, като е необходимо да бъдат спазени следните условия:

$$|\mathbf{I}_{\mathbf{MCS}} + \mathbf{I}_{\mathbf{ACS}} \le \mathbf{I}_{\mathbf{ch}(\mathbf{max})} \tag{2.49}$$

(2.50)

(2.51)

#### Последователност на прилагане на алгоритъма

- 1. Задава се максимален заряден ток **I**<sub>ch(max)</sub>;
- 2. Задава се начално условие  $U_{IC}$  за клетките;
- 3. От израз 2.26 се определя времето за бърз заряд  $\mathbf{t_{ch(min)}};$

Тъй като  $\mathbf{t_{ch(min)}} = \mathbf{f}(\mathbf{I_{ch(max)}})$  то следва, че ако в израз 2.49 се изпълни неравенство, времето за зареждане няма да бъде оптимално, т.е.  $\mathbf{t_{charge}} < \mathbf{t_{ch(min)}};$ 

- 4. Задава се големината на тока **I**<sub>MCS</sub> от основния заряден източник. Ако не може да се зададе произволно, може да се определи от израз 2.12;
- 5. Задава се необходимата големина на тока  $I_{ACS}$  от всички допълнителни зарядни източници, при стартиране на процеса на зареждане. Определянето на този ток става от израз 2.49, в който величините  $I_{MCS}$  и  $I_{ch(max)}$  са определени по точка 4) и точка 1) от настоящата последователност.

## Глава 3. Избор на преобразувател за прехвърляне на енергия

Глава 3 съдържа 1 основна точка, която е разделена на 5 отделни подточки. В тази глава, въз основа на извършения литературен преглед, се описва избраният за изследване DC/DC преобразувател. Дисертационният труд се фокусира върху използването на еднотранзисторен резонансен DC/DC преобразувател.

### 3.1.1 ПРИНЦИПНА СХЕМА

Принципната схема на избрания преобразувател е представена на фигура 3.1.



Фигура 3.1 Едноключов резонансен преобразувател

Схемата представлява едноключов (еднотранзисторен) резонансен **DC/DC** преобразувател, състоящ се от две основни части:

- едноключов резонансен инвертор (ЕРИ)

- синхронен токоизправител с умножаване на напрежението (СТИУН).

Едноключовият резонансен инвертор се състои от следните елементи:

 $\bullet$  Входен филтров кондензатор  $\mathbf{C}_{\mathbf{d}},$  който освен за потискане на пулсациите, осигурява и затваряне на веригата, за протичане на резонансните процеси.

- Резонансна индуктивност  $\mathbf{L}_{\mathbf{r}}$
- $\bullet$  Резонансен кондензатор  $\mathbf{C}_{\mathbf{r}}$

• Мощен високочестотен транзистор  $\mathbf{Q}_1$ 

• Високочестотен трансформатор  $\mathbf{HFT}$ 

Синхронният токоизправител е съставен от следните елементи:

• Токоизправителни високочестотни транзистори  $\mathbf{Q_2}$  и  $\mathbf{Q_3}$ . Управлението им се осъществява посредством система за управление, отбелязана като  $\mathbf{CY}$ . За тази цел, в настоящия дисертационен труд, се разглежда възможността за работа на преобразувателя с допълнителна вторична намотка.

Нейната цел е, с помощта на еднополупериоден токоизправител, да осигури захранване за полумостов драйвер, който да управлява токоизправителните транзистори.

• Високочестотни филтрови кондензатори  $C_{f1}$  и  $C_{f2}$ 

• Филтрова индуктивност  $L_f$ 

В изхода на токоизправителя е включена батерийна клетка **BC** (battery Cell). Тя може да бъде част от батерия, съставена от последователно свързани клетки.

Основните съображения, направени при избора на схемата са представени в точка 3.1.3 от дисертацията.

### 3.1.4 Принцип на действие на инверторната част на преобразувателяа

Действието на преобразувателя се пояснява от четирите времедиаграми, представени на фигура 3.2.

В последователност от горе надолу, времедиаграмите представят следните величини, както следва:

-V(g1) са управляващите импулси, подавани към транзистора T1 от резонансната верига. - Id(T1) е токът през транзистора T1.



– с означение **I(D1)** е представен токът през вътрешноструктурния паразитен диод на транзистора **T1**.

- с означение V(d) е представено напрежението върху транзистора T1(което представлява напрежението върху резонансния кондензатор Cr).

 с означение V(M,D) е представено напрежението върху резонансната индуктивност Lr.

 с означение I(Lr) е представен токът през резонансната индуктивност Lr. Това е и токът през първичната намотка на ВЧТ.

Действието на инвертора може да се опише чрез три характерни интервала, означени на фигура 3.2 като **t1**, **t2** и **t3**.

В интервала от време **t1** (отгоре на долу, втората времедиаграма), транзисторът **T1** провежда. В началото на този интервал се подава управляващ импулс с определена продължителност

Фигура 3.2 Принцип на действие на инвертора

ton при което, транзисторът се отпушва при условия ZVS и ZCS.

В края на интервала t1, към транзистора се подава запушващ импулс, който започва в началото на интервала t2. От времедиаграмите се вижда, че запушването на транзистора се осъществява при условия на нулево напрежение и не нулев ток, тоест, транзисторът се изключва при условие ZVS.

# 3.1.5 Математически анализ при работа на преобразувателя с допълнителна вторична намотка

Анализът на преобразувателя се прави на база следните допускания:

- трансформаторът е заместен с еквивалентен модел

- входното напрежение е постоянно, в смисъла на неизменно във времето.

– полупроводниковите елементи (диоди и транзистори) се приемат за идеални.

– напрежението върху всеки филтров кондензатор от основната вторична намотка се приема да бъде половината от напрежението на клетката, във всеки един момент.

– напрежението на допълнителната вторична намотка се приема неизменно във времето.

Съобразно направените допускания, на фигура 3.3 е представен резонансният преобразувател с еквивалентна схема на трансформатора.



Фигура 3.3 Резонансен преобразувател - еквивалентен модел

до тази, показана на фигура 3.4(б).

Означенията са както следва:

 – L<sub>12</sub> - взаимна индуктивност между първичната и основната вторична намотка

 – L<sub>13</sub> – взаимна индуктивност между първичната и допълнителната вторична намотка;

– L<sub>23</sub> – взаимна индуктивност между основната вторична и допълнителната вторична намотка;

- **L**<sub>11</sub> – индуктивността на първичната намотка на трансформатора;

 - R<sub>L</sub> – еквивалентно товарно съпротивление на допълнителната вторична намотка;

Еквивалентната схема за интервала от време, в който транзисторът се изключва и ток протича през диода  $D_2$  е представена на фигура 3.4(a).

За опростяване на математическия анализ, влиянието на допълнителната вторична намотка може да се пренебрегне. В този случай, единствено взаимната магнитна връзка между първичната и вторичната намотка се взима под внимание. По този начин, схемата се опростява

Индуктивността на първичната намотка може да се представя като сума от две индуктивности, тоест  $\mathbf{L_{11}} = \mathbf{L_a} + \mathbf{L_b}$ , където  $\mathbf{L_a} = L_{11} \cdot (1 - k_{12}^2)$  и  $\mathbf{L_b} = \mathbf{L_{11}} \cdot \mathbf{K_{12}^2}$  са съответно взаимната и паразитна индуктивности.  $\mathbf{k_{12}}$  е коефициентът на взаимна магнитна връзка между първичната и основната вторична намотка.



Фигура 3.4 Еквивалентна схема при изключен транзистор

Напрежението върху резонансния кондензатор може да се опише чрез следното диференциално уравнение:

$$\frac{\mathbf{d}^2 \mathbf{U_c}}{\mathbf{d} \mathbf{t}^2} + \omega^2 \cdot \mathbf{U_c} = \omega^2 \cdot \left( \mathbf{U_{in}} - \frac{\mathbf{U_o}}{\mathbf{N_e}} \right)$$
(3.2)

където:

 $\omega^2 = \frac{1}{\sqrt{C_r \cdot (L_a + L_b)}}$ е честотата  $N_e = \frac{1}{K_{12}} \cdot \sqrt{\frac{L_{22}}{L_{11}}}$ е ефективното преводно отношение

След решаване, диференциалното уравнение има вида:

$$\mathbf{U}_{\mathbf{C}_{\mathbf{r}}}(\mathbf{t}) = \frac{U_o}{N_e} + \left(U_{C_o} - \frac{U_o}{N_e}\right) \cdot \cos(\omega t) + \rho \cdot I_{L_O} \cdot \sin(\omega t)$$
(3.3)

Токът през индуктивността  $\mathbf{L}_{\mathbf{a}}$  ще бъде:

$$\mathbf{I}_{\mathbf{L}_{\mathbf{a}}}(\mathbf{t}) = I_{L_{O}} \cdot \cos(\omega t) - \frac{\left(U_{C_{O}} - \frac{U_{O}}{N_{e}}\right)}{\rho} \cdot \sin(\omega t)$$
(3.4)

В уравнения 3.3 и 3.4  $\rho = \sqrt{\frac{\mathbf{L_r} + \mathbf{La}}{\mathbf{Cr}}}$  е характеристичният импеданс.

Токът през индуктивността  $\mathbf{L}_{\mathbf{b}}$  е:

$$\mathbf{I}_{\mathbf{L}_{\mathbf{b}}}\left(\mathbf{t}\right) = I_{L_{O}} - \frac{U_{o}}{L_{b} \cdot N_{e}} \cdot t \tag{3.5}$$

Интервалът приключва, когато токът  $I_{L_a}(t_2) = 0$ . Тук,  $t_2$  е моментът в който изходният ток преминава от диода  $D_2$  към диода  $D_1$  (фигура 3.3).

## Глава 4. Моделиране и Експериментални Изследвания

Глава 4 съдържа 3 основни точки, като всяка точка е разделена на отделни подточки. В първата точка, въз основа на изведените в Глава 2 математически уравнения, се извършва симулационно моделиране и изследване на трите алгоритъма за изравняване на напреженията. Във втората точка се извършва симулационно моделиране на избрания в Глава 3 резонансен DC/DC преобразувател.

В третата точка се представят резултати от експериментални изследвания на Алгоритъм 1 и работата на резонансния преобразувател при зареждане на суперкондензатор.

Симулационните изследвания са проведени със софтуерен продукт LTspice. Въведените логически условия и параметри, както и стойностите на отделните величини, при които са проведени симулациите са представени в раздел Приложение от дисертацията.

### 4.1 Симулационно моделиране и изследване на алгоритмите

Симулационният модел разглежда ССЕЕ, съставена от четири последователно свързани клетки. Отделните клетки представляват суперкондензатори с номинален капацитет от 400F и толеранс от +20% до -40%. Симулациите са проведени, като е прието, че клетките са с различен капацитет съответно със стойности cell1 = 240F, cell2 = 320F, cell3 = 440F и cell4 = 480F.

### 4.1.1 Моделиране и изследване на Алгоритъм 1

Симулационният модел на Алгоритъм 1 е представен на фигура 4.1. Означенията на фигурата са следните:

ACS (additional charging source) са допълнителните зарядни източници (ДЗИ), свързани паралелно към всяка клетка.

MCS (main charging source) е основният заряден източник (ОЗИ), свързан паралелно към цялата ССЕЕ.

ACS и MCS представляват DC/DC преобразуватели, работещи в режим на източник на ток, тоест зареждането на клетките се осъществява в режим постоянен ток.



Фигура 4.1 Алгоритъм 1-симулационен модел

Отделните клетки са отбелязани от **cell1** до **cell4** 

За всяка клетка е зададено начално напрежение (initial condition), от което започва зареждането.

Това е направено чрез параметрите от ic=Uic C1 до ic=Uic C4.

За целите на симулацията е зададена максимална заряден ток за клетките с големина  $I_{max} = 5A.$ 

Максималното работно напрежение, до което е допустимо да се зареди всяка една клетка е зададено да бъде  $U_{max} = 2.8V$ .

Големината на тока от всеки заряден източник се определя въз основа на представените в Глава 2 уравнения.

На фигура 4.2 е показан процеса на зареждане на отделните клетки и свързаните с тях токове и напрежения при еднакви начални условия от 1V за всички клетки.

На фигура 4.2(а) е показан процесът, описващ зареждането на отделните клетки. Четирите криви се припокриват, тъй като, всички кондензатори се зареждат с една и съща скорост. На фигура 4.2(б) са представени токовете през

отделните клетки. За клетката с максимален капацитет, зарядният ток е максимално допустимия.



Фигура 4.2 Напрежение върху и ток през клетките при еднакви начални условия

На фигура 4.5 са показани симулационни резултати при зареждане на клетките, започващо с различни начални условия.



Фигура 4.5 Токове през и напрежения върху клетките в процес на зареждане при различни начални условия

Между всеки две съседни клетки е зададена разлика от **200 mV**, което по принцип е твърде висока стойност, но е с цел демонстриране на работоспособността на алгоритъма.

Фигура 4.5(a) илюстрира как се изменя напрежението върху всяка една клетка, а фигура 4.5(б) представя големината на токовете през всяка една от клетките.

### 4.1.2 Моделиране и изследване на Алгоритъм 2

Симулационният модел на Алгоритъм 2 е представен на фигура 4.8.



Фигура 4.8 Алгоритъм 2-симулационен модел

Суперкондензаторите са подредени отгоре надолу в низходящ ред. С4 е кондензаторът с максимален капацитет, СЗ е кондензаторът с междинна (средна) стойност на капацитета, Сп е кондензаторът с номинален капацитет, С1 е кондензаторът с минимален капацитет.

Процесът на зареждане започва от начално напрежение, еднакво за всички клетки. В случая, зададената стойност е 1 V. Зададена е потенциалната разлика DUset=0.25V. Токът през всички клетки се осигурява да бъде еднакъв и равен на максимално допустимия, т.е. зареждането за всички клетки започва с максимален ток. Това се постига чрез съвместната работа на основния заряден източник и допълнителните зарядни източници. Напрежението на всяка една клетка се сравнява с напрежението на клетката с максимален капацитет. Когато напрежението на дадена клетка достигне зададената стойност DUset, токът, осигуряван от съответния за клетката допълнителен заряден източник се намалява или нулира и зареждането на клетката, до края на процеса, продължава с ток, по-нисък от максималния. Промяната на тока от даден допълнителен заряден източник настъпва в

характерен за дадената клетка момент  $\mathbf{t}_{\mathbf{x}}$ .

На фигура 4.9 са показани токовете и напреженията за съответните клетки.



Фигура 4.5 Напрежение върху и ток през клетките

На фигура 4.9(а) е показано как се изменя напрежението върху отделните клетки в процеса на зареждане. Фигура 4.9(б) илюстрира как се изменя големината на тока през отделните клетки.

### 4.1.3 МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА АЛГОРИТЪМ 3

Симулационният модел на Алгоритъм 3 е представен на фигура 4.12.



При този вариант на алгоритъма, процесът на зареждане започва с максимално допустимия ток за клетките, тоест скоростта на нарастване на напрежението за всяка една клетка ще бъде различно.

Началното напрежение, от което стартира процесът на зареждане, е еднакво за всички клетки.

За целта се използва съвместната работа на допълнителните зарядни източници ДЗИ (ACS) и основният заряден източник ОЗИ (MCS).

ОЗИ работи за целия интервал на зареждане на батерията.

Всеки един **ДЗИ** работи за определен интервал от време, след което напълно спира. След този момент, зареждането на клетките продължава само за сметка на тока от **ДЗИ**.

За всяка една клетка е характерен точно определен момент  $\mathbf{t}_{\mathbf{x}}$ , в който прилежащият и ДЗИ спира работа. След този момент, процесът на дозареждане на клетката е изцяло за сметка на тока от основния заряден източник ОЗИ (MCS).

Фигура 4.12 Алгоритъм 3-симулационен модел

На фигура 4.13 са показани токовете и напреженията за съответните клетки. На фигура 4.13(a) е представено как се изменя напрежението на всяка една от клетките.



Фигура 4.5 Напрежение върху и ток през клетките На фигура 4.13(б) са представени токовете през отделните клетки.

# 4.2 Симулационен модел и изследване на едноключов резонансен DC/DC преобразувател

Симулационният модел на избрания за изследване **DC**/**DC** преобразувател е представен на фигура Б.1, а на фигура В.5 е представен симулационният модел на преобразувателя с допълнителна вторична намотка.



Фигура Б.1 Едноключов резонансен преобразувател с активен товар



Фигура Б.5 Симулационен модел с допълнителна намотка

Проведени са следните симулационни анализи:

# 4.2.1 Симулационно изследване, анализ и резултати при работа на преобразувателя с активен товар

Изследването има следните основни цели:

– да се установи дали промяната на товарното съпротивление, оказва влияние върху режима на мека комутация (ZVS) на силовия транзистор.

– да се установи дали стойността на капацитета на филтровите кондензатори оказва влияние на режима на работа на преобразувателя.

Симулационното изследване е проведено за две стойности на товарното съпротивление, които са съответно  $3m\Omega$  и  $800m\Omega$ . Работната честота на преобразувателя е избрана да бъде 40 kHz.

Влиянието на товарното съпротивление се изследва за две стойности на капацитета на филтровите кондензатори, които са съответно  $1\mu F$  и  $100\mu F$ 

# 4.2.2 Симулационно изследване, анализ и резултати при работа на преобразувателя с противо ЕДН

Противо ЕДН-то се осигурява от суперкондензатор, включен в изхода на токоизправителя. Стойността на капацитета му е **1F**. Съображенията при избор на тази стойност са свързани единствено с цел по-бърза симулация.

Параметричният анализ се провежда при промяна капацитета на филтровите кондензатори, при неизменна стойност на капацитета на суперкондензатора.

### 4.2.3 Симулационно изследване при работа на две звена

Проведени са симулационни изследвания при едновременна работа на два преобразувателя за зареждане на две последователно свързани клетки.



Фигура 4.18 Зареждане на две последователно свързани клетки чрез съвместната работа на две звена

На фигура 4.18(а) са представени резултати от зареждането на две клетки, които имат разлика в капацитета си 50%. Използвани са стойности 1F и 0.5F.

На фигура 4.18(б) са представени резултати при вариант на зареждане, при който енергия се прехвърля от общия пакет клетки към единична клетка.

# 4.2.4 Симулационно изследване, анализ и резултати при работа на преобразувателя с допълнителна вторична намотка

Разгледаният **DC/DC** преобразувател използва токоизправител с умножаване на напрежението. Направените до тук изследвания, описват преобразувателя при работа с несинхронен токоизправител. Целта е единствено опростяване на симулациите и намаляване на времената за симулация.

Реализирането на синхронен токоизправител се осъществява с помощта на транзистори (MOSFET, GaN, SiC) и подходяща система за управление. За целта се предвижда, преобразувателят да има допълнителна вторична намотка, снабдена с еднополупериоден токоизправител, който да служи за захранване на системата за управление. На фигура Б.5 е представена симулационната схема на преобразувателя с допълнителна вторична намотка.

Симулационният модел, както и параметрите при които са проведени симулациите, е представен в приложение Б, точка Б.1.5 от дисертацията.

Проведени са следните симулационни изследвания:

### – параметричен анализ при промяна на индуктивността на допълнителната вторична намотка

На фигура 4.20 в дисертацията, са представени времедиаграми от параметричен анализ на едноключовия резонансен преобразувател за различни стойности на индуктивността на допълнителната вторична намотка

# – параметричен анализ при промяна на тока през допълнителната вторична намотка

На фигура 4.21 са представени времедиаграми от параметричен анализ на едноключовия резонансен преобразувател за различни стойности на тока през допълнителната вторична намотка.

### – Параметричен анализ при промяна тока през зареждаемата клетка

Целта на анализа е да установи, дали промяната в големината на зарядния ток, оказва въздействие върху изходното напрежение (след токоизправителя) на допълнителната вторична намотка



(а) ток през зарежданата клетка



(б) напрежение на допълнителната вторична намотка след ЕППТИ

Фигура 4.22 Параметричен анализ при промяна на тока през зарежданата клетка

Товарното съпротивление, както и индуктивността на допълнителната вторична намотката са с фиксирани стойности.

На фигура 4.22 са представени симулационните резултати. Анализът е проведен за 5 стойности на зарядния ток.

На фигура 4.22(a) е представен токът през суперкондензатора, а на фигура 4.22(б) са представени времедиаграми, илюстриращи как се променя напрежението в изхода на ЕППТИ, отбелязано като **Uasv**.

При ниски стойности на зарядния ток (висока работна честота), напрежението **Uasv** също е ниско. При големи стойности на зарядния ток (ниска работна честота), напрежението **Uasv** също нараства. При подходящо оразмеряване на допълнителната вторична намотка (необходим брой навивки), може да се постигне такава стойност така, че при минимален заряден ток, напрежението **Uasv** да не пада под определен минимум.

### 4.3 Експериментални изследвания

### 4.3.1 Изследване на Алгоритъм 1

На фигура 4.24 е представено сравнение между получените симулационни и експериментални резултати за работата на Алгоритъм 1, при изравняване на напреженията между две последователно свързани енергийни клетки, при еднакви начални условия.



Фигура 4.24 Сравнение между симулационни и експериментални резултати от Алгоритъм 1 при еднакви начални условия

На фигура 4.25 е представено сравнение между получените симулационни и експериментални резултати от изследване на работата на Алгоритъм 1,при изравняване на напреженията между две последователно свързани енергийни клетки, при различни начални условия.



Фидура 4.25 Симулационни и експериментални резултати от Алгоритъм 1 при различни начални условия

Кондензаторът с минимален капацитет е разреден до 0.4V, а кондензаторът смаксимален капацитет е разреден до 1V.

За представените симулационни времедиаграми, V(sc1) е изменението на напрежението върху кондензатора с минимален капацитет, а V(SC4, SC3) е изменението на напрежението върху кондензатора с максимален капацитет.

От представените резултати се вижда добро съвпадение между симулациите и опитно получените графики.

По-долу са дадени симулационните параметри, използвани за симулиране на Алгоритъм 1. Симулационните параметри за изследване на Алгоритъм 2 и Алгоритъм 3 са сходни и са представени в Приложение А на дисертационния труд.

### Симулационни параметри за Алгоритъм 1

Параметрите на симулацията:

- максимален ток Imax = 5 A, номинален капацитет Cn = 400 F, максимално напрежение, докоето е допустимо да се зареди една клетка Umax = 2.8 V

- C1 е кондензаторът с минимален капацитет (има 40% по-ниска стойност от номиналната). C4 е кондензаторът с максимален капацитет (има 20% по-висока стойност от номиналната). C3 е кондензатор с междинна стойност на капацитета (стойност на капацитета, по-голяма от тази на кондензатора с минимален капацитет и по-ниска от тази на кондензаторът с номинален капацитет.

```
.tran {if(t_ch < 500m, t_ch + 20m, t_ch + 2)}

.param Imax = 5 .param Uic_C4 = 1 .param C4 = 480

.param Cn = 400 .param Uic_C3 = 1 .param C3 = 440

.param Umax = 2.8 .param Uic_C2 = 1 .param C2 = 320

.param Uic_C1 = 1 .param C1 = 240
```

#### При еднакви начални условия

1. Определяне времето за зареждане на батерията - определя се от уравнение:

.param t\_ch = (deltaU\_C4 \* {C4}) / Imax

2. Определяне на потенциалната разлика, която трябва да се преодолее от отделните кондензатори за да се заредят напълно.

.param	deltaU_C4	=	Umax	-	Uic_C4
.param	deltaU_C3	=	Umax	-	Uic_C3
.param	deltaU_C2	=	Umax	-	Uic_C2
.param	deltaU_C1	=	Umax	-	Uic_C1

3. Определяне големината на тока от ОЗИ

 $.param I_MCS = (C1 / C4) * Imax$ 

4. Определяне големината на токовете от ДЗИ

.param	Iacs_C4	=	((C4	-	C1)	/	C4)	*	Imax
.param	Iacs_C3	=	((C3	-	C1)	/	C4)	*	Imax
.param	Iacs_C2	=	((C2	-	C1)	/	C4)	*	Imax
.param	Iacs_C1	=	((C1	-	C1)	/	C4)	*	Imax

5. Логически условия, управляващи източниците на ток (ДЗИ и ОЗИ).

i -	MCS	->	Ι	=	if(V(SC4,	SC3)	<	2.79,	Iacs_C4,	0)
i	ACS4	->	Ι	=	if(V(SC4,	SC3)	<	2.79,	Iacs_C4,	0)
i.	ACS3	->	Ι	=	if(V(SC3,	SC2)	<	2.79,	Iacs_C3,	0)
Í.	ACS2	->	Ι	=	if(V(SC2,	SC1)	<	2.79,	Iacs_C2,	0)
í	ACS1	->	Ι	=	if(V(SC1,	GND)	<	2.79,	Iacs_C1,	0)

В този случай, при еднаквиначални услови, параметъра **t\_ch** не е задължителен. Той се използва единствено в логическото условие на директивата **.tran**.

#### При различни начални условия:

Времето за зареждане се определя

.param t\_ch = (C4 / Imax) \* ((deltaU\_C4 + deltaU\_C1) / 2)

Токът от основния заряден източник

.param I\_MCS = (C1 \* deltaU\_C1) / t\_ch

Необходимият ток за всяка една клетка

.param	Icell_4	=	C4	*	(deltaU_C4	/	t_ch)
.param	Icell_3	=	CЗ	*	(deltaU_C3	/	t_ch)
.param	Icell_2	=	C2	*	(deltaU_C2	/	t_ch)
.param	Icell_1	=	C1	*	(deltaU_C1	/	t_ch)

Токовете от допълнителните зарядни източници

.param	Iacs_C4	=	(1	/	t_ch)	*	(C4	*	deltaU_C4	-	C1	*	deltaU_C1)
.param	Iacs_C3	=	(1	/	t_ch)	*	(C3	*	deltaU_C3	-	C1	*	deltaU_C1)
.param	Iacs_C2	=	(1	/	t_ch)	*	(C2	*	deltaU_C2	-	C1	*	deltaU_C1)
.param	Iacs_C1	=	(1	/	t_ch)	*	(C1	*	deltaU_C1	-	C1	*	deltaU_C1)

Въведените начанлни условия са следните:

	~~~~	Ilia CA	-	1 0
	.param	010_04	-	1.0
1	.param	Uic C3	=	0.8
	haram	Hic C2	=	0 6
1	. pur um		_	0.0
	.param	016_01	=	0.4

### 4.3.2 Изследване на работата на едно звено

За утвърждаване на симулационните резултати е разработен лабораторен стенд на разгледания резонансен DC/DC преобразувател. На фигура 4.28 е представена опитната постановка. Изследвана е самостоятелната работата на едно звено при зареждане на суперкондензатор с капацитет 100F, чието противо-е.д.н достига 2.5V. Модулът е захранен с постоянно напрежение 14.8V. Честотата на управление е  $f_{SW} = 25 \text{kHz}$ .



Фигура 4.28 Лабораторен макет

На фигура 4.29 е представено сравнение между симулационни и експериментални резултати, описващи режима на меки комутации на резонансния транзистор.



Фигура 4.29 Сравнение между симулационни и експериментални резултати от работата на ЕРИ

# научно-приложни и приложни приноси

- 1. Предложени са алгоритми, позволяващи изравняване на напреженията в система за съхранение на електрическа енергия, съставена от последователно свързани елементи.
- 2. Създаден е модел в среда на LTspice, чрез който е изследван разработеният алгоритъм.
- 3. Предложена е методика за инженерно изчисление на големината на токовете и времената за зареждане в системата.
- 4. Изследвани са три разновидности на разработения алгоритъм. Анализът е извършен за работа, както при различни, така и при еднакви начални напрежения на отделните клетки.
- 5. Изследван е едноключов резонансен инвертор при работа като източник на ток; като устройство за зареждане на единични клетки от дадена система за съхранение на електрическа енергия; като част от BMS; възможност за едновременна работа на няколко звена.
- 6. Установени са нови факти за ЕРИ, при реализирането му с допълнителна вторична намотка.
- 7. Създаден е лабораторен стенд на изследвания преобразувател, чрез работата на който се потвърждават резултатите от теоретичните и симулационни изследвания.

## СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

[1A] D. Arnaudov, D. Penev and **K. Kishkin**, "Management of Supercapacitor Battery Charging," 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Demanovska Valley, Slovakia, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/ISSE49702.2020.9121001. https://ieeexplore.ieee.org/document/9121001

[2A] D. ARNAUDOV and **K. KISHKIN**, "Modelling And Research Of Synchrounous Converter For Active Balansing System," 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA.2019.8771689. https://ieeexplore.ieee.org/document/8771689

[3A] D. Arnaudov, **K. Kishkin** and V. Dimitrov, "An Algorithm and Circuits for Active Balancing Systems," 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA49118.2020.9167066. https://ieeexplore.ieee.org/document/9167066

[4A] Dimitar Arnaudov, **Krasimir Kishkin**, Dimitar Penev; Modeling and optimization of the algorithm of operation of a battery management system. AIP Conf. Proc. 8 March 2021; 2333 (1): 090037. https://doi.org/10.1063/5.0041820

[5A] D. D. Arnaudov and K. Y. Kishkin, "Characteristics of Single Ended Resonant Converter with Voltage Doubler Synchronous Rectirier," 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ET.2019.8878615. https://ieeexplore.ieee.org/document/8878615

[6A] D. D. Arnaudov and K. Y. Kishkin, "Modelling and Research of Active Voltage Balansing System for Energy Storage System," 2019 X National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ELECTRON-ICA.2019.8825643. https://ieeexplore.ieee.org/document/8825643

[7A] D. D. Arnaudov, K. Y. Kishkin and K. Kroičs, "Single-ended Resonant Inverter for Active Balancing System," 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982356. https://ieeexplore.ieee.org/document/8982356

[8A] Kishkin, Krasimir. (2020). Comparison of Active Voltage Balancing Methods for Supercapacitors. 1-4. 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305166. https://www.researchgate.net/publication/348331788\_Comparison\_of\_Active\_ Voltage\_Balancing\_Methods\_for\_Supercapacitors

[9A] Kishkin, Krasimir ; Arnaudov, Dimitar ; Dimitrov, Vladimir ; Lachezar, Nikolov: Mutual Influences in the Operation of Converters in an Electrical Energy Storage System. In: Technical Univercity of Gabrovo, International Scientific Conference UniTech'19 SELECTED PAPERS (2019), 11. https://unitech-selectedpapers.tugab.bg/images/papers/2019/ Unitech\_2019\_SP.pdf

[10A] K. Kishkin, D. Arnaudov and D. Penev, "Algorithm for Charging a Supercapacitor Energy Storage System," 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Demanovska Valley, Slovakia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISSE49702.2020.9120958. https://ieeexplore.ieee.org/document/9120958

## ANNOTATION

## of PhD Thesis titled

### "Electronic converters for energy exchange between energy storage systems"

The dissertation presents results from simulation modeling and research of algorithms developed for the purposes of the dissertation, allowing voltage equalization in an electrical energy storage system composed of series-connected elements.

The work konsists of four chapters as follows:

### Chapter 1: Literature review

Chapter 1 is divided into 6 sections, each of which is divided into separate subsections.

Current, most widely applicable and used, modern electrical energy storage elements, ion-based energy sources and supercapacitors are reviewed.

Modern electrical energy storage systems are examined and the need and basic requirements for voltage equalization are defined - active and passive balancing.

Modern solutions in the field of DC/DC converters are examined, allowing the implementation, control and management of the charging-discharging processes in an electrical energy storage system, using the active balancing method.

The various BMS architectures are reviewed

Finally, the main goals and objectives of the dissertation are formulated.

Chapter 2: Developing and research of voltage equalization algorithms

Chapter 2 is divided into 2 sections, with the second section containing 4 separate subsections.

This chapter describes the voltage equalization algorithms developed for the purposes of the dissertation. A detailed description of the derived mathematical relationships describing the sought-after quantities is presented.

Chapter 3: Choosing a converter for energy transfer

Chapter 3 contains 1 main section, which is divided into 5 separate subsections.

This chapter, based on the literature review, describes the DC/DC converter selected for the study. The dissertation focuses on the use of a single transistor resonant DC/DC converter.

Chapter 4: Modeling and exparimental research

Chapter 4 contains 3 main sections, each section divided into separate subsections.

In the first section, based on the mathematical equations derived in Chapter 2, simulation modeling and research of the three voltage equalization algorithms are performed.

In the second section, simulation modeling of the resonant DC/DC converter selected in Chapter 3 is performed.

The third section presents results from experimental studies of Algorithm 1 and the operation of the resonant converter when charging a supercapacitor.

The simulation studies were conducted with the LTspice software product.