



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет по електронна техника и технологии

Катедра „Силова Електроника“

маг. инж. Цвети Христов Хранов

**ПРОЕКТИРАНЕ НА РЕЗОНАНСНИ ПОСТОЯННОТОКОВИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ГАРАНТИРАНИ ПОКАЗАТЕЛИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Електронни преобразуватели

Научни ръководители:

доц. д-р инж. Николай Любославов Хинов

доц. д-р Евгений Иванов Попов

СОФИЯ, 2021 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Силова Електроника“ към Факултет по електронна техника и технологии на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 23.11.2020 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 29.03.2021 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-125 / 22.12.2020 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д.т.н. инж. Михаил Христов Анчев – председател
2. доц. д-р инж. Николай Любославов Хинов – научен секретар
3. доц. д-р инж. Анастасия Петрова Кръстева
4. проф. д.т.н. инж. Чавдар Иванов Дамянов
5. проф. д-р инж. Никола Вичев Колев, дн.

Рецензенти:

1. проф. д.т.н. инж. Михаил Христов Анчев
2. проф. д.т.н. инж. Чавдар Иванов Дамянов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по електронна техника и технологии на ТУ-София, блок № 1, кабинет № 1232.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Силова Електроника“ на Факултет по електронна техника и технологии. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: ас. маг. инж. Цвети Христов Хранов

Заглавие: „Проектиране на резонансни постояннотокови преобразуватели с гарантирани показатели“

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Анализът на съвременните методи за реализация на електронни устройства с гарантирани показатели показва, че намирането на оптимални схемни решения на резонансните постояннотокови преобразуватели има висока степен на актуалност, както в научно така и в научно-приложно отношение. В многобройните научни публикации, свързани с изследване на постояннотоковите преобразуватели за индустриални и битови приложения, е отразена тенденцията за използване на цифрово управление, регулиране и защита на захранващите постояннотокови преобразуватели при изграждането на различни енергийни преобразуватели и приложението им в конкретни електротехнологии.

Освен това моделирането с приложение на различни програмни продукти е насочено към подобряване на енергийните и регулировъчни характеристики. Съвместяването на силовата схема със схемата на управление и защита с цел повишаване на гарантирани показатели е важен етап в развитието на тези устройства.

Резултатите от изследванията за създаване на такива преобразуватели позволяват да се предложат структури на преобразуватели с гарантирани показатели. Известно е, че резонансните преобразуватели са чувствителни към управляващата честота при аварийни режими и се налага прецизно следене и пресмятане на работните режими, както и настройка и преконфигуриране на устройствата като се въведе цифрово управление.

В дисертационната разработка е представено интересно направление на проектирането на преобразуватели за осигуряване на захранващи устройства за технически устройства и системи, като изтъкнатите предимства са лесната възможност за настройка, преконфигуриране и изпитване на различни нови подходи за управление, снемане на данни и съпоставка на ефективността между различните алгоритми.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е на базата на използването на съвременни средства на компютърното моделиране, информационни и комуникационни технологии, да се предложи нов подход за проектиране на резонансни постояннотокови преобразуватели, при които се гарантират техните показатели.

За постигането на тази цел, трябва да се решат следните задачи:

- Преглед и обобщение на математически модели за адаптиране за целите на моделно-базираното проектиране, като се автоматизира

процеса на събиране и обобщение на резултатите с цел анализ и извличане на нови знания.

- Развитие на съществуващите методики за проектиране на резонансни постояннотокови преобразуватели, тъй като повечето от тях са базирани на анализ на работата в установен режим.
- Реализиране на автоматизирана система за моделно-базирано проектиране, събиране и анализ на получените данни.
- Създаване на лабораторен стенд, включващ силово електронно устройство, цифрово управление и придружаващия софтуер за събиране и анализ на бази от експериментални данни.
- Реализиране на толерансен анализ с цел отчитане на влиянието на схемните елементи върху работните режими на резонансния постояннотоков преобразувател.
- Гарантиране на показателите с използването на моделно-базирана оптимизация.

Научна новост

Направен е анализ на причините за нестабилност на преобразувателните схеми при постояннотоковите преобразуватели и възможностите за гарантиране на показателите на постояннотоковите резонансни LLC преобразуватели. Предложена е концепция и единен подход за проектиране на резонансни LLC преобразуватели.

Изследванията са построени така, че да се постигнат необходимите решения на заложените в дисертацията задачи. Прилагането и усъвършенстването на методики за анализ на влияние на елементите на преобразувателите върху стабилността им обогатяват знанията и опита за проектиране на преобразувателите и представляват образователен принос.

Практическа приложимост

Част от резултатите са получени благодарение на подкрепата на Научно-изследователския сектор към Технически университет – София и Фонд “Научни изследвания”. През сесия 2017 г. е разработен и приет за изпълнение проект в подкрепа на докторанти, с договор № 172ПД0029-03 с ръководител доц. д-р Николай Хинов и докторант маг. инж. Цвети Хранов. Целта на проекта е създаване на лабораторен стенд, включващ: силово електронно устройство, цифрово управление и придружаващия софтуер за събиране и анализ на бази от експериментални данни, който ще се използва в учебния процес и научноизследователските лаборатории. Резултатите са представени на три международни научни конференции, както и пред катедрения съвет на катедра „Силова електроника“ и факултетния съвет на ФЕТТ на ТУ - София. Изследванията са проведени и в рамките на договор ДН07/6 от 15.12.2016 г. на тема „Моделно базирано проектиране на силови електронни устройства с

гарантирани показатели“ към финансираща организация Фонд “Научни изследвания“, като представянето и разпространението на резултатите е в издания реферирани в базите данни SCOPUS и/или Web of Science, списания с импакт фактор (IF) и/или импакт ранг и в конференции с импакт ранг (SJR). Част от статиите са отпечатани в издания с SJR.

Апробация

Резултати от дисертационния труд са разглеждани и обсъждани на:

1. XIII-та Национална конференция с международно участие “ЕЛЕКТРОНИКА 2016“, 12-13 май, 2016, София, България
2. Национална конференция с международно участие “ТЕЛЕКОМ 2016“, 27-28 октомври, 2016, София, България
3. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) 2017, 10-14 May 2017, Sofia, Bulgaria
4. 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018, 3-6 June 2018, Bourgas, Bulgaria
5. XV-та Национална конференция с международно участие “ЕЛЕКТРОНИКА 2018“, 17-18 май, 2018, София, България
6. MDPI Electronics (Switzerland) Open Access, Volume 8, Issue 7, July 2019

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 7 научни статии, от които 1 е самостоятелна, в български и международни реферирани и индексирани издания.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 186 страници, като включва увод, 5 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 149 литературни източници, като 130 са на латиница и 16 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 84 фигури и 10 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ НА СЪСТОЯНИЕТО НА ПРОБЛЕМА. ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Силовата електроника е мултидисциплинарна област, която намира все по-голямо приложение в индустрията и бита. Индустрията и обществото изпитват все по-големи нужди от специалисти в този образователен сегмент поради трансформацията на икономиката от ресурсоемка към зелена с нулеви емисии и щадяща максимално околната среда.

Съвременните електронни преобразуватели се характеризират с висок коефициент на полезно действие (КПД) над 95%. Основен фактор, който определя КПД на цялото устройство са загубите в градивните елементи. От технологична гледна точка тези загуби определят максимално възможната работна честота на преобразувателя, а освен това изискват използването на ефективни системи за охлаждане.

Гарантирането на показателите на изхода на силовото електронно устройство е от изключителна важност за постигането на желаното качество на процеса на енерго-преобразуване. Съвременните методи за реализация на електронни устройства с гарантирани показатели, изискват използването на системен подход в процеса на реализация на устройствата – от етапа на формулиране на задание до получаването на крайния продукт. Описанието на градивните елементи, структурите и схемите на преобразувателните устройства е необходимо да се извърши със съвременни математични и информационни модели, моделно базирано проектиране и прототипиране. Основната цел е в процеса на проектиране да се реализира разработването на силов електронно устройство с гарантирани показатели за максимален жизнен цикъл на изделието.

1.2. Гарантиране на показателите

За да отговорят на най-разнообразните области на приложения, резонансните постоянноточкови преобразуватели трябва да притежават следните основни качества и характеристики: сигурна и надеждна работа при различни товари – включително и режими близки до късо съединение, висок коефициент на полезно действие в целия диапазон на изменение на товара. Трябва да се осигури възможност за реализация на различни алгоритми и режими на работа, включително и аварийни, което изисква регулиране на изходната мощност в много широки граници. Желателна е ниска себестойност на електронния преобразувател, използването на меки комутации на полупроводниковите прибори, което позволява повишаване на работните честоти, намаляване на масогабаритните показатели и себестойността на преобразувателите. Също така осигуряване на работа в широк честотен диапазон и възможност за честотно регулиране на

мощността; намалени размери, които позволяват гъвкавост и мобилност при употребата на преобразувателя. Изключително важно е устройството да работи, съобразно индустриалните стандарти по отношение на фактора на мощността, шумовете и смущенията на захранващата мрежа. Изискванията по отношение на охлаждането на силовите полупроводникови прибори трябва да са изпълними; да има възможност за дистанционно управление и мониторинг на преобразувателя по всяко време на денонощието.

Въз основа на направения литературен преглед и анализ, целта на дисертационния труд е: на базата на използването на съвременни средства на компютърното моделиране, информационни и комуникационни технологии да се предложи нов подход за проектиране на резонансни постояннотокови преобразуватели, при които се гарантират техните показатели. За постигането на тази цел, трябва да се решат следните задачи:

- Преглед и обобщение на математически модели за адаптиране за целите на моделно-базираното проектиране, като се автоматизира процеса на събиране и обобщение на резултатите с цел анализ и извличане на нови знания.
- Развитие на съществуващите методики за проектиране на резонансни постояннотокови преобразуватели, тъй като повечето от тях са базирани на анализ на работата в установен режим.
- Реализиране на автоматизирана система за събиране и анализ на данни от числени експерименти за нуждите на моделно-базирано проектиране.
- Създаване на лабораторен стенд, включващ силово електронно устройство, цифрово управление и придружаващия софтуер за събиране и анализ на бази от експериментални данни.
- Реализиране на толерансен анализ с цел отчитане на влиянието на схемните елементи върху работните режими на резонансния преобразувател на постоянно в постоянно напрежение.
- Гарантиране на показателите с използването на толерансен анализ и моделно-базирана оптимизация.

ГЛАВА 2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ НА ЗАДАЧИТЕ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА РЕЗОНАНСНИ ПОСТОЯННОТОКОВИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Задачата за проектиране на преобразувателя се свежда до удовлетворяването на следните общи положения: дадено е устройство, за което се цели да се определят изходни параметри по отношение на дадени входни въздействия, които могат да бъдат постоянни или променливи. Върху това устройство действат определени смущения – някои известни (предвидими) а други – не. За да се гарантира поддържането на изходните

параметри, се подава управление (регулиране) на част от параметрите (свойствата) на преобразувателя.

2.1 Ограничения и област на решенията

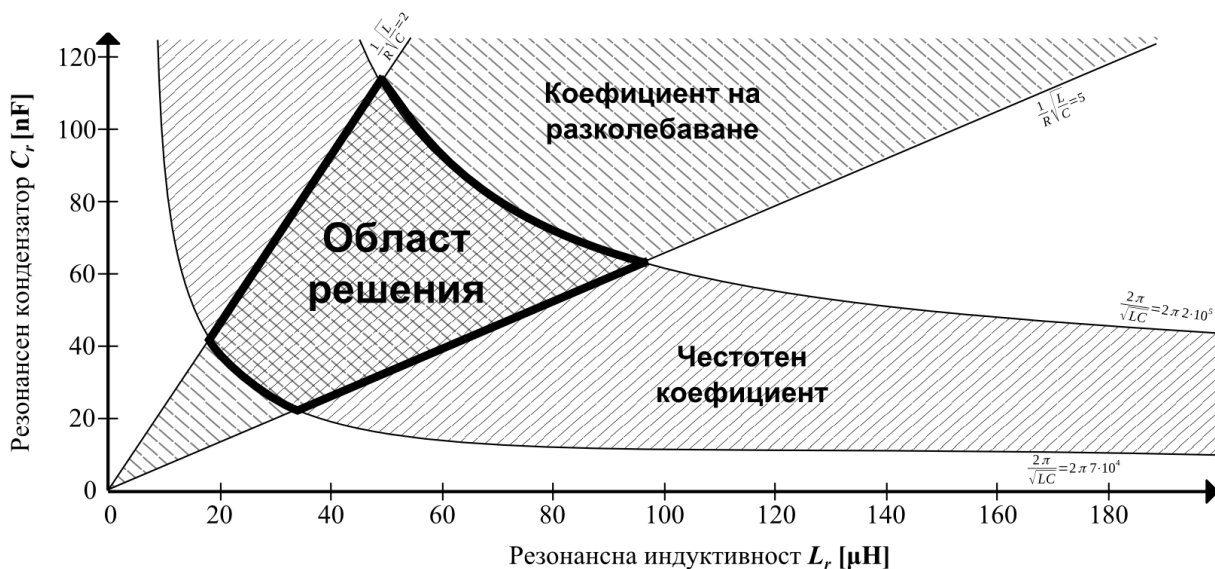
Търсенето на решение на задачата с проектиране на резонансния постояннотоков преобразувател може да стане чрез налагане на ограничения и получаване на област (множество) от решения (устройства). Нека е разгледан следният примерен случай. Нека резонансната честота е ограничена от 70 до 200 kHz:

$$\omega_{\min} < \omega_0 < \omega_{\max} \rightarrow 2\pi \cdot 7 \cdot 10^4 < 1/\sqrt{LC} < 2\pi \cdot 2 \cdot 10^5 \quad (2.75)$$

Нека стойността на Q-факторът бъде ограничена от 2 до 5 (за примера се допуска, че номиналният товар е $R = 1\Omega$):

$$2 < Q < 5 \rightarrow 2 < \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} < 5 \quad (2.75)$$

Графика при двата параметъра е показана на фигура 2.11.



Фигура 2.11: Област на решения чрез ограничения за проектиране на РПТП без трансформатор

От нея може да се види, че стойностите на L_r са в границите между 18 μH и 95 μH ; и за C_r са между 21 nF и 115 nF .

На така поставените задачи е възможно да отговаря многообразие от устройства. За да се сведе проектирането до конкретно устройство се налагат допълнителни ограничения. Тези ограничения може да са от всякакъв тип, като например ограничения за входното напрежение, изходното напрежение, изходната мощност, работната честота и други.

Възможно е поставените ограничения до такава степен да свият областта на въпросното многообразие от устройства, така че да не е възможно физически да се произведе такова устройство. Изходът от такава ситуация е да се преразгледат и „отслабят“ (коригират) заложените стойности на

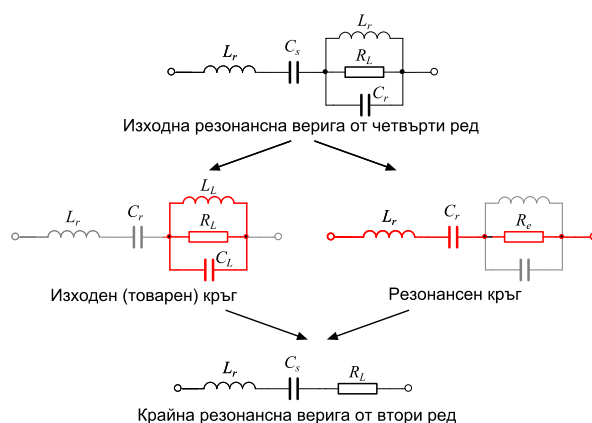
заданието, като се приемат компромисните последици – по-големи габарити, по-тясна област на регулиране, по-слаба шумоустойчивост и други.

2.2 Критерии за избор на типа резонансна верига

Въпросът за избора на резонансната верига далеч не е тривиален, както и еднозначен за решаване. Той е свързан с много съображения и ограничения, имайки също предвид разглежданията за дуалността на последователната и паралелната верига [6, 8, 10, 15, 61, 89, 101], начина на свързването на товара, както и реда на резонансната верига.

2.2.1. Обобщение, опростяване и свеждане на сложната верига до последователна или паралелна – алгоритъм на работа

Примерна изходна инверторна верига от четвърти ред е показана на фигура 2.2. Показани са също така и откроените изходен (товарен) кръг и инверторен кръг, и крайната редуцирана инверторна верига от втори ред. Това привеждане е възможно благодарение на това, че честотните зависимости на изходния (товарния) кръг могат да се отделят от зависимостите, които описват структурните съотношения между двата кръга – изходния и инверторния [47, 48].



Фигура 2.2: Алгоритъм за преобразуване на резонансна верига от по-висок в по-нисък ред

Получаваните резултати от привеждането на цялата верига от 4-ти ред в такава от 2-ри ред са значително по-точни, ако резонансните честоти на двата кръга (изходен и инверторен) не се различават съществено и се работи при честота на управление близка до тези резонансни честоти, или с други думи разстройките на двата кръга не са големи.

2.2.3 Обобщен анализ на резонансен постоянен ток преобразувател при работа под и над резонанс

С използваната методика се извършва единен анализ на DC-DC преобразувател с последователен резонансен транзисторен инвертор при работа с честота, по-висока или по-ниска от резонансната, и се получават регулировъчните му характеристики, имащи отношение към показателите на преобразуването на електрическата енергия, които да служат при проектирането. Основните зависимости са:

Максимална стойност на напрежението на кондензатора:

$$U_{C_{MAX}} = \frac{(1-q)(1-\cos x)}{q+\cos x} \quad (2.49)$$

Максимална стойност на инверторния ток:

$$I_{MAX} = \frac{1-q^2}{q+\cos x} \quad (2.50)$$

Средната стойност на тока, консумиран от захранващия източник:

$$I_d = \frac{2q(1-q)(1-\cos x)}{\chi(q+\cos x)} \quad (2.51)$$

Средна стойност на изправения ток:

$$I_o = \frac{2(1-q)(1-\cos x)}{\chi(q+\cos x)} \quad (2.52)$$

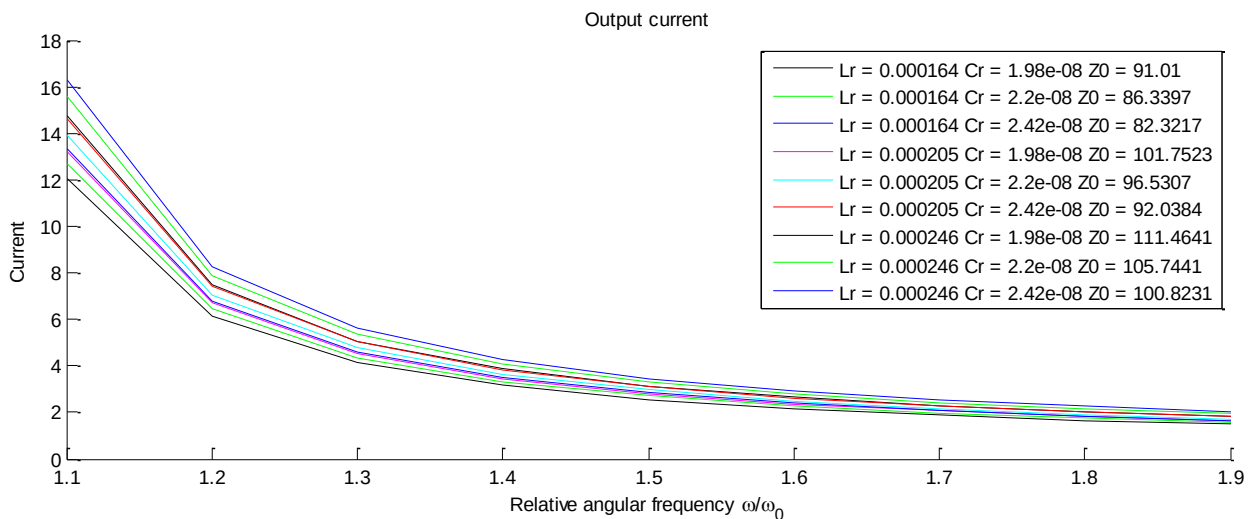
Ефективна стойност на инверторния ток:

$$I_{RMS} = \left(\frac{1}{\chi} \left[I_{O0}^2 \left(\frac{y}{2} + \frac{\sin 2y}{4} \right) + (1+q+U_{C0})^2 \left(\frac{y}{2} + \frac{\sin 2y}{4} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. + I_{O0}(1-q+U_{C0}) \sin^2 y + (1-q+U_{C1})^2 \left(\frac{x}{2} - \frac{\sin 2x}{4} \right) \right] \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.53)$$

където I_{O0} е началният инверторен ток.

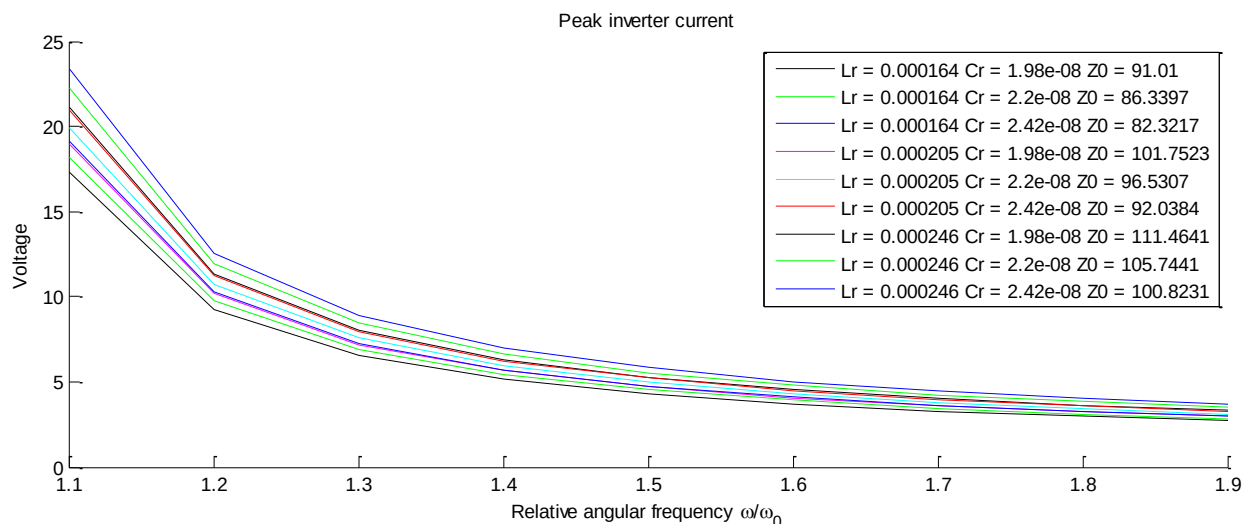
2.2.3.1 Толерансен анализ на работните режими

Нека е проектиран полумостов резонансен преобразувател със следните параметри: входно напрежение $U_d = 385V$, изходно напрежение $U_o = 204V$, резонансна индуктивност $L_r = 285 \mu H$ и резонансен кондензатор $C_r = 24 nF$. Нека също толеранса на схемните елементи е $\pm 20\%$ от номиналната стойност за L_r и $\pm 10\%$ от номиналната стойност за C_r . На фигура 2.6 е направен толерансен анализ за 9 комбинации от стойности на резонансните елементи и тяхното влияние върху средната стойност на изходния ток.



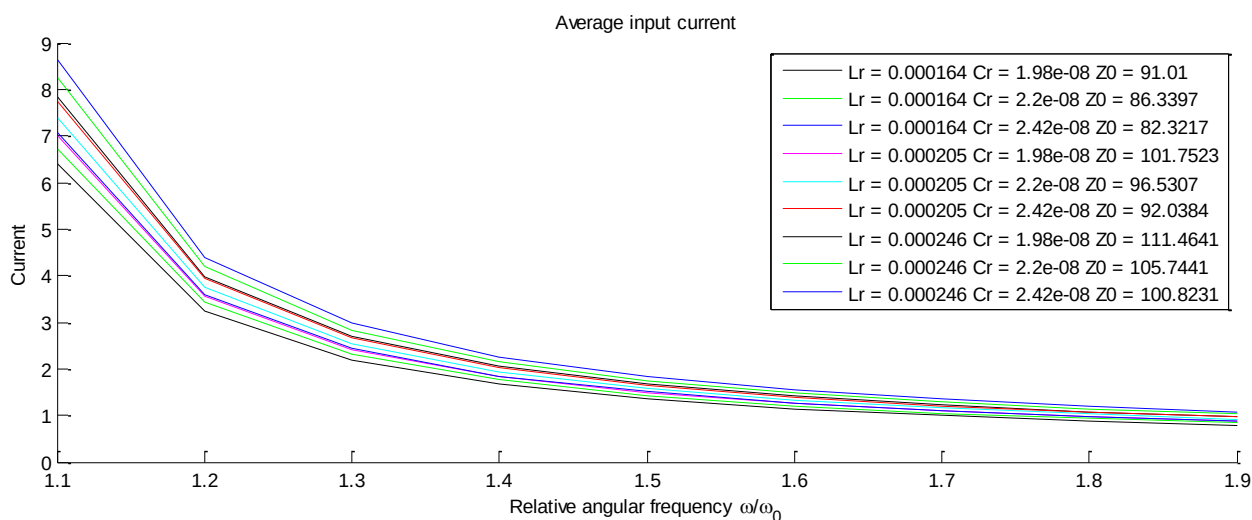
Фигура 2.6: Толерансен анализ на средната стойност на изправения ток

От резултатите се констатира, че толерансите на резонансните елементи оказват по-съществено влияние при режим на работа близък до резонанс, като в конкретния пример промяната е в рамките на 12,075 А до 16,3 А. На фигура 2.7 е даден толерансния анализ на схемните елементи с влиянието им върху пиковия ток:



Фигура 2.7: Толерансен анализ на максималната стойност на инверторния ток

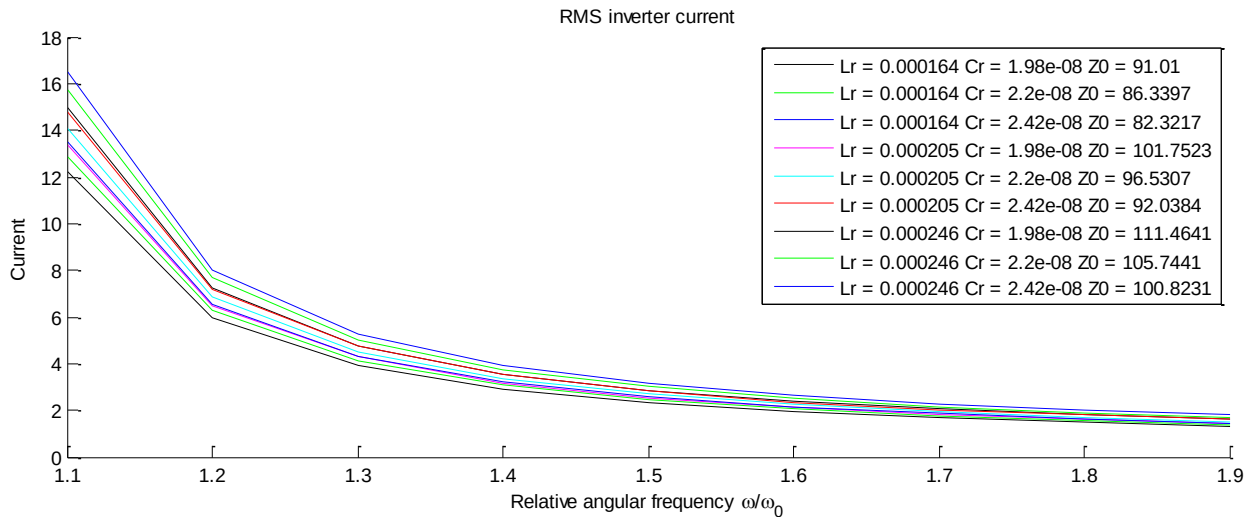
В този случай толерансите на резонансните елементи оказват максимална промяна в границите от 17,57 А до 23,72 А. На фигура 2.8 е влиянието на толерансите върху средния ток.



Фигура 2.8: Толерансен анализ на средната стойност на тока от захранващия източник

При средния ток толерансите на резонансните елементи оказват максимална промяна в границите от 6,391 А до 8,683 А, но с повишаването на честотата на управление влиянието започва да става незначително.

На фигура 2.9 е дадено влиянието на толерансите върху ефективната стойност на тока. Максималната промяна е от 12,41 А до 16,74 А.

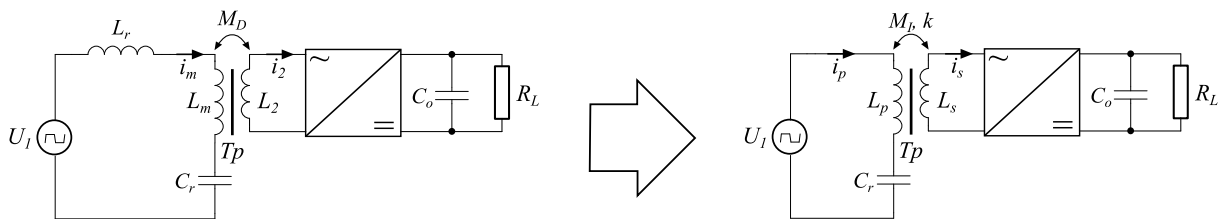


Фигура 2.9: Толерансен анализ на ефективната стойност на инверторния ток

В обобщение на резултатите, използваната процедура е подходящо да се използва за предварителна оценка на очакваната промяна в работните режими на резонансните постояннотокови преобразуватели при различните честоти, но като основен недостатък може да се изтъкне неприложимостта за целите на определяне на вида и формата на преходния процес.

2.2.4 Обединени и отделени магнитни компоненти

Магнитните компоненти на резонансния постояннотоков преобразувател с галванично разделяне са резонансната индуктивност и изходния трансформатор. Те могат да се обединят в един магнитен елемент, с което може да се спечели физическо пространство върху печатната платка, когато преобразувателят се реализира физически.



Фигура 2.10: Премаване от схема с отделени магнитни елементи към схема с обединени

Анализът започва с определянето на основните величини, които участват в законите на Кирхоф за баланса на напреженията. Получената система уравнения дава възможност да се определят матриците на тока, съпротивленията, напреженията и индуктивностите.

$$\begin{cases} \hat{L}_{11}^{\hat{D}} = \hat{L}_{11}^{\hat{I}} \\ \hat{L}_{12}^{\hat{D}} = \hat{L}_{12}^{\hat{I}}, \hat{L}_{21}^{\hat{D}} = \hat{L}_{21}^{\hat{I}} \\ \hat{L}_{22}^{\hat{D}} = \hat{L}_{22}^{\hat{I}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} L_p = (L_n + 1) \cdot L_r \\ \frac{L_n \cdot L_r}{K_r} = k \cdot \frac{L_p}{K_{Tp}} \\ \frac{L_n \cdot L_r}{K_r^2} = \frac{L_p}{K_{Tp}^2} \end{cases} \quad (2.67)$$

От матрицата на индуктивностите се получават три уравнения с три неизвестни – стойността на първичната намотка L_1 , коефициента на магнитна връзка k и коефициента на трансформация K_{Tp} при отчетеното въздействие на загубите от индуктивността на разсейване. След тяхното определяне са известни всички параметри на трансформатора. Уравнението за първичната индуктивност е следното:

$$L_p = (L_n + 1) \cdot L_r \quad (2.68)$$

Замествайки с първото във второто и третото уравнение се получава за коефициента на куплиране k :

$$k = \sqrt{\frac{L_n}{L_n + 1}} \quad (2.71)$$

За коефициента на трансформация се получава:

$$K_r = k \cdot K_{Tp} \quad (2.68)$$

Изведените съотношения могат да бъдат използвани за набор от приложения: косвено определяне на параметрите на трансформатора, преминаване от едната в другата схема, за целите на математическото моделиране, за намаляване на масогабаритните показатели на физическото устройство, за съпоставяне на двете топологии и сравнение на енергийните им показатели при еднакви други елементи и условия.

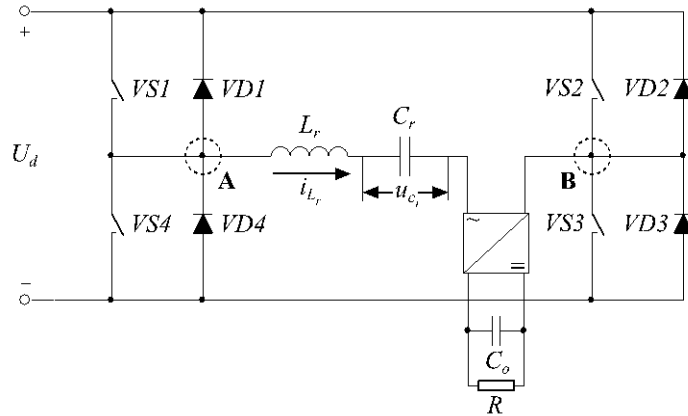
ГЛАВА 3. АНАЛИЗИ И СИМУЛАЦИОННИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

В настоящата глава се анализират резонансните постояннотокови преобразуватели с помощта на компютърното математическо моделиране. Моделирането е инструмент за възпроизвеждане на процесите, които протичат в едно физическо устройство. Моделът е обект, който се използва за изучаването на друг обект (оригинал).

Параметрите на моделираната система могат да бъдат изследвани при широк диапазон на изменение на влияещите ѝ фактори, включително и такива, които не могат да бъдат реализирани и контролирани в реални условия. При изследване на модела е възможно многократно по-бързо протичане на процесите в модела, отколкото в реалните системи; могат да се изследват много бързи процеси и да се прави анализ и мащабиране по време.

Случайни елементи, свързани с изследваната система, могат да бъдат включени в модела, като така се повиши достоверността му, и да се направят заключения за системата в определен вероятностен смисъл.

Схемата на мостов резонансен постояннотоков преобразувател (РПТП) е дадена на фигура 3.1.



Фигура 3.1: Мостов резонансен преобразувател на постоянно в постоянно напрежение с последователно включване на товара

Обобщената система диференциални уравнения при провеждане на свързани в диагоналите прибори е:

$$\begin{aligned} L_r \frac{di_{L_r}}{dt} &= F(\omega t) \cdot U_d - u_{C_r} - (R \cdot i_{L_r} + \text{sign}(i_{L_r}) \cdot u_{C_o}) \\ C_r \frac{du_{C_r}}{dt} &= i_{L_r} \\ C_o \frac{du_{C_o}}{dt} &= |i_{L_r}| - u_{C_o}/R \end{aligned} \quad (3.7)$$

Където $F(\omega t) \in [-1; 1]$ е превключващата функция [43].

В резонансната верига на постояннотоков преобразувател може да се включи трансформатор Tr с преводно отношение $w_1:w_2$, към чиято вторична намотка са свързани токоизправителят, изглаждащият филтър и товарът. В последователния РПТП трансформаторът се включва последователно с резонансните елементи, както е показано на схемата на фигура 3.8.

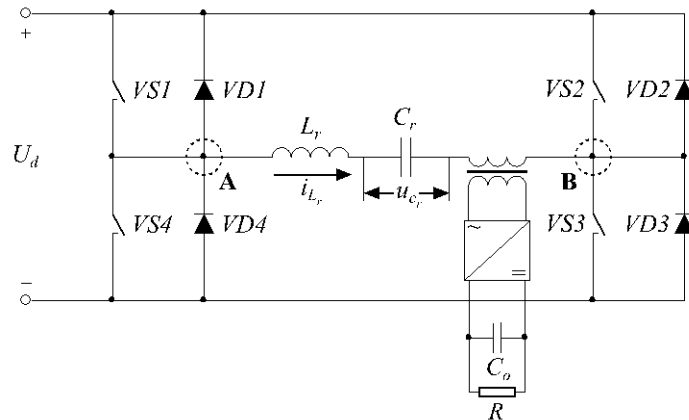
Системата уравнения, описваща последователния резонансен преобразувател с трансформатор има вида: е:

$$\begin{aligned} L_r \frac{di_{L_r}}{dt} &= F(\omega t) \cdot U_d - u_{C_r} \\ C_r \frac{du_{C_r}}{dt} &= i_r - i_p \\ L_p \frac{di_p}{dt} - M \frac{di_s}{dt} &= u_{C_r} + i_p R_p \\ M \frac{di_p}{dt} - (L_s + L_r) \frac{di_s}{dt} &= i_s (R_s + R) - \text{sign}(i_s) \cdot u_{C_o} \\ C_o \frac{du_{C_o}}{dt} &= |i_s| - \frac{u_{C_o}}{R} \end{aligned} \quad (3.23)$$

3.1 Модел, включващ полупроводниковите прибори

За по-точното описание и възможност за частична оценка на загубите в комутационните елементи на преобразувателя – полупроводниковите ключове и вентили, тяхната волт-амперна характеристика може да бъде

моделирана. В литературните източници [6, 11, 15] са дадени типични волт-амперни характеристики на полупроводников диод с различна степен на сложност и точност.



Фигура 3.8: Мостов резонансен преобразувател на постоянно в постоянно напрежение с последователно включване на трансформатор

Математическото представяне става с израза [6]:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (3.13)$$

Напрежението дрейн-сорс на полупроводников MOSFET транзистор зависи от протичащия през него ток [6]:

$$\Delta u_{sc} = U_{DS}^{interp}(I_D) \quad (3.14)$$

В модела на последователния резонансен постояннотоков преобразувател този пад на напрежение участва в уравнението за тока през резонансната индуктивност:

$$U_d = L_r \frac{di_{L_r}}{dt} + u_{Cr} + (R \cdot i_{L_r} + \text{sign}(i_{L_r}) \cdot u_{Co}) + \Delta u_{sc} \quad (3.15)$$

Степента на точност зависи от броя точки, зададени в масива на интерполация, но това добавя и сложност от математическа гледна точка.

3.2 Модели, включващи нелинейните свойства на схемните елементи

За описанието на нелинейността на индуктивността, кондензатора, трансформатора и полупроводниковите елементи се подхожда по аналогичен начин, като се записват уравненията според характеристиките, отразяващи нелинейните свойства.

Например за нелинейния дросел това е вебер-амперовата характеристика [140]. Това е зависимостта на магнитния поток от тока:

$$\begin{aligned} \Phi_B &= f_L(i); \quad i = f_L^{-1}(\Phi_B) \\ \Phi_B &= L i \end{aligned} \quad (3.24)$$

За описанието на нелинейността на трансформатор се прилагат уравненията на Кирхоф за баланса на напреженията в двете намотки, формулирани върху законите за електромагнитната индукция, уравненията за намагнитване на магнитопровода и закона за пълния ток.

$$\begin{aligned}
U_p &= w_p S \frac{dB_\mu}{dt} + i_p r_p \\
U_s &= w_s S \frac{dB_\mu}{dt} + i_s r_s \\
\frac{B_\mu \cdot l}{\mu} &= i_p w_p - i_s w_s
\end{aligned}
\tag{3.31}$$

Нелинейностите се вмъкват в променливите μ и B_μ , зависещи една от друга.

По същия начин се отчитат и нелинейните свойства на полупроводниковите елементи чрез сплайнови апроксимации на волт-амперните характеристики в избран участък и брой точки от паспортните данни на дадените изследвани елементи. С този подход не се добавят допълнителни уравнения към математическите модели, а се извършват корекции на моментните стойности след итерациите на стъпката на изчисление. При пресмятане на полупериодите моментните стойности трябва да бъдат апроксимирани според нелинейните характеристики на изследвания схемен елемент.

При практическата реализация, дадена в дисертационния труд, са използвани подходящи модели.

ГЛАВА 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

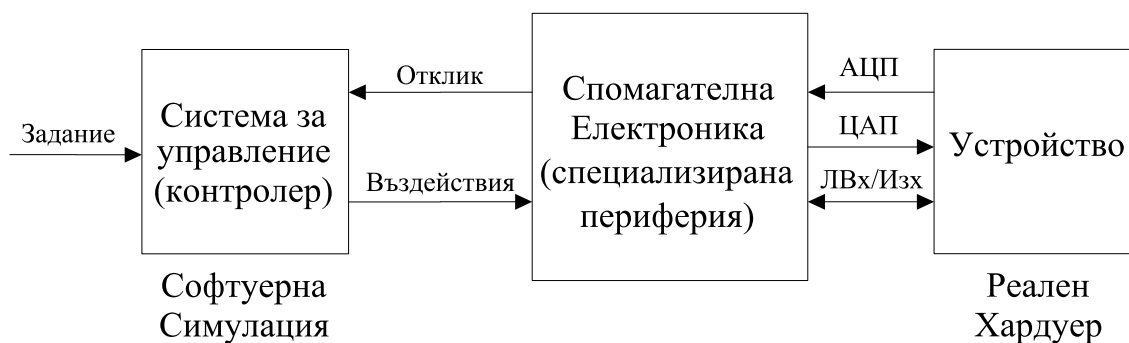
В настоящата глава се описват експериментални изследвания с електронни макети на резонансните постояннотокови преобразуватели. Целта е да се снимат работните режими и да се правят сравнения с поведението на моделите по начин, по който да се гарантира, че разработените модели с достатъчна точност описват реалното устройство.

4.1. Видове експериментални изследвания

За експериментално изследване на устройства за преобразуване на енергия могат да се използват два иновативни метода. Това са изследването на преобразуватели със симулиран контролер или изследването на регулатори със симулирани преобразуватели. В литературата са възприети термините „Hardware-in-The-Loop” (хардуер във веригата) и „Rapid-Controller-Prototyping” (бързо прототипиране на контролери) съответно. За изпълнението на този тип изследване е необходимо наличието на интерфейсно устройство, което да „превежда“ (преобразува) сигналите от симулираното към реалното устройство и обратно.

Изпитанието със симулирано управление се нарича „Hardware-in-The-Loop”. Типичното свързване на интерфейското с тестваното устройство е показано на фигура 4.1.

Системата за управление е софтуерна програма, която обменя данни с интерфейското устройство по комуникационната шина. Устройството приема задания през цифровите изходи и цифрово-аналоговите преобразуватели, а неговите реакции се наблюдават чрез цифровите входове и аналогово-цифровите преобразуватели.



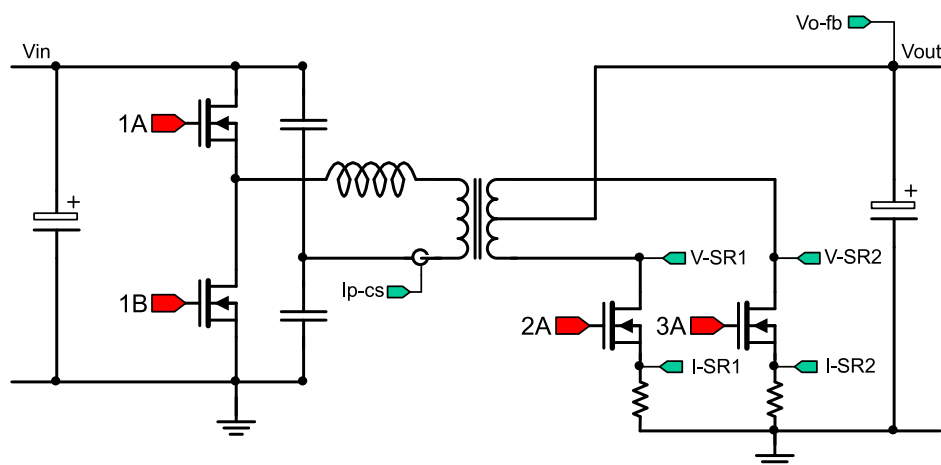
Фигура 4.1: Хардуер във веригата – Hardware in the loop

С помощта на голямата гъвкавост на интерфейсното устройство може да се създаде модел, който да симулира работата на реалното устройство и да предава своите реакции, спрямо подадените въздействия от вече проектиран електронен регулатор.

4.2 Изследване на резонансни преобразуватели

Изследванията на последователните резонансни постояннотокови преобразуватели са направени с два макета с цифрово управление на работните режими.

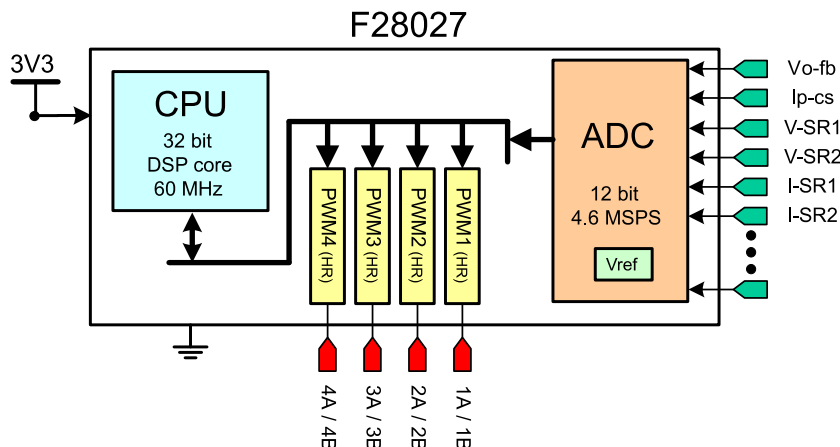
Единият е на фирмата Texas Instruments, като моделът е TMDSHVRESLLCKIT, управляван от цифрово-сигнален микроконтролер от фамилията C2000, с разделени магнитни компоненти, максимална мощност 300W. Силовата схема е показана на фиг. 4.3.



Фигура 4.3: Силова част на развойната платка TMDSHVRESLLCKIT

Стойностите на елементите на силовата част са както следва: входен кондензатор $C_{IN} = 2 \times 15 \text{ nF}$; резонансна индуктивност $L_r = 55 \text{ }\mu\text{H}$; резонансен кондензатор $C_r = 2 \times 12 \text{ nF}$; изходен кондензатор $C_o = 4 \times 330 \text{ }\mu\text{F} + 2 \times 100 \text{ nF}$. Трансформаторът е със следните параметри: брой намотки: 4 (първична, две вторични, спомагателна); индуктивност на първичната намотка (отворена верига) $L_{p(oc)} = 280 \text{ }\mu\text{H} \pm 3\%$; индуктивност на първичната намотка (затворена верига) $L_{p(sc)} = 5 \text{ }\mu\text{H}$ (максимална стойност). Коефициенти на трансформация: първична към вторична – $K_T(N_p/N_s) = 17:1 \pm 2\%$; първична към спомагателна:

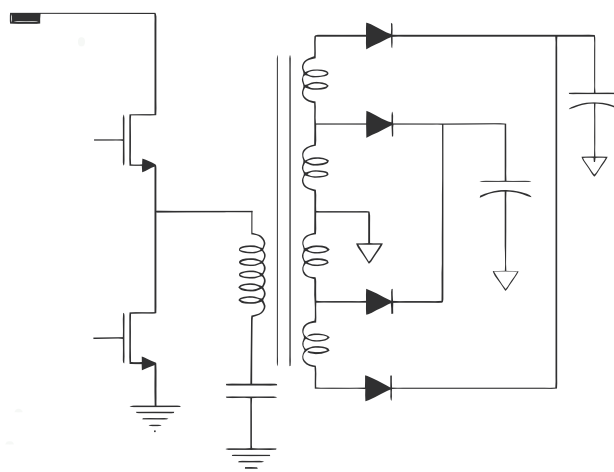
$K_T(N_p/N_{aux}) = 12,75:1 \pm 2\%$. Съпротивления на намотките (максимални стойности): първична: $R_p = 210 \text{ m}\Omega$, вторична $R_s = 3,5 \text{ m}\Omega$, спомагателна $R_{aux} = 155 \text{ m}\Omega$. Системата за управление на TMDSHVRESLLCKIT е базирана на микроконтролер TMS320F28027, част от серията цифрово-сигнални микроконтролери C2000. Тя е показана на фигура 4.4.



Фигура 4.4: Система за управление на TMDSHVRESLLCKIT

Сигналите, които се измерват от системата за управление, отбелязани в зелено постъпват за обработка към вградения аналогово-цифров преобразувател, докато сигналите, управляващи полупроводниковите прибори се извеждат от специализирания модул за генериране на ШИМ-сигнали. Пълната принципна схема е дадена в литературни източници [27, 40].

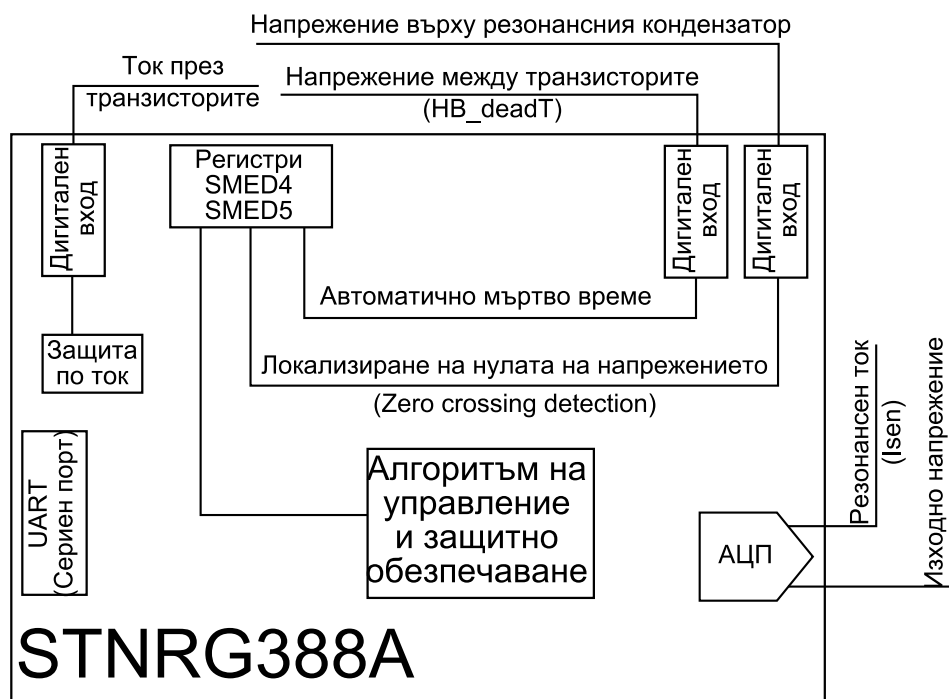
Другият модул е EVLSTNRG-170W, разработен от STMicroelectronics, и е с комбинирани магнитни компоненти и максимална мощност 170W. Схемата от EVLSTNRG-170W на последователен LLC преобразувател с комбинирани магнитни компоненти е показана на фигура 4.10.



Фигура 4.10: Силова блокова диаграма на резонансния постоянен ток преобразувател на развойната система EVLSTNRG-170W

Стойностите на елементите на силовата част са както следва: входен кондензатор $C_{IN} = 100 \text{ }\mu\text{F}$; резонансен кондензатор $C_r = 33 \text{ nF}$; изходен

кондензатор $C_o = 100 \mu\text{F} + 100 \text{ nF}$. Трансформаторът е със следните параметри: брой намотки: 6 (първична, четири вторични, спомагателна); индуктивност на първичната намотка (отворена верига) $L_{p(oc)} = 680 \mu\text{H} \pm 8\%$ при 1 kHz; индуктивност на първичната намотка (затворена верига) $L_{p(sc)} = 112 \mu\text{H}$ при 100 kHz. Коефициенти на трансформация: първична към вторична – $K_T(N_p/N_s) = 36:2 \pm 2\%$; първична към спомагателна: $K_T(N_p/N_{aux}) = 36:3$. Съпротивления на намотките (максимални стойности): първична: $R_p = 158 \text{ m}\Omega$, вторична $R_s = 4,4 \text{ m}\Omega$, спомагателна $R_{aux} = 94 \text{ m}\Omega$. Системата за управление на *EVLSTNRG-170W* е показана на фигура 4.11.



Фигура 4.11: Система за управление на *EVLSTNRG-170W*

Тя е базирана на микроконтролер *STNRG388A*, част от серията *Digital controller for power conversion applications*, разработени от *STMicroelectronics*. Микропроцесорното ядро е базирано върху архитектурата *STM8* [118]. Пълната принципна схема е дадена в литературни източници [28,118].

В дисертационния труд са представени подробни резултати на честотните характеристики под формата на графики и таблици с измерените стойности, осцилограми с работните режими и верификация на работните режими със симулационен софтуер.

ГЛАВА 5. ГАРАНТИРАНЕ НА ПОКАЗАТЕЛИТЕ НА РЕЗОНАНСНИТЕ ПОСТОЯННОТОКОВИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В настоящата глава се изследва поведението на моделите като цялостна система – резонансен постоянен ток преобразувател и контролер, при различни приложения и с различни изходни данни, които да илюстрират използването на моделното базирано проектиране, верифициране и оптимизация.

Известно е, че режимите на работа на резонансните постояннотокови преобразуватели са силно зависими от промяната на стойностите на елементите на инверторната верига [5, 9, 88]. От друга страна голяма част от методиките за инженерно проектиране на LLC DC-DC преобразувател са разработени при допусканията, че се работи в установен режим и токовете и напреженията са със синусоидална форма. При такава постановка за гарантирането на показателите се разчита основно на системите за автоматично регулиране. При излизане на параметрите на преобразувателя вследствие на редица смущаващи въздействия (производствени толеранси, нелинейни ефекти, стареене) извън областта зададена при проектиране не може да бъде гарантирано, че регулаторът би върнал преобразувателя в номинален режим.

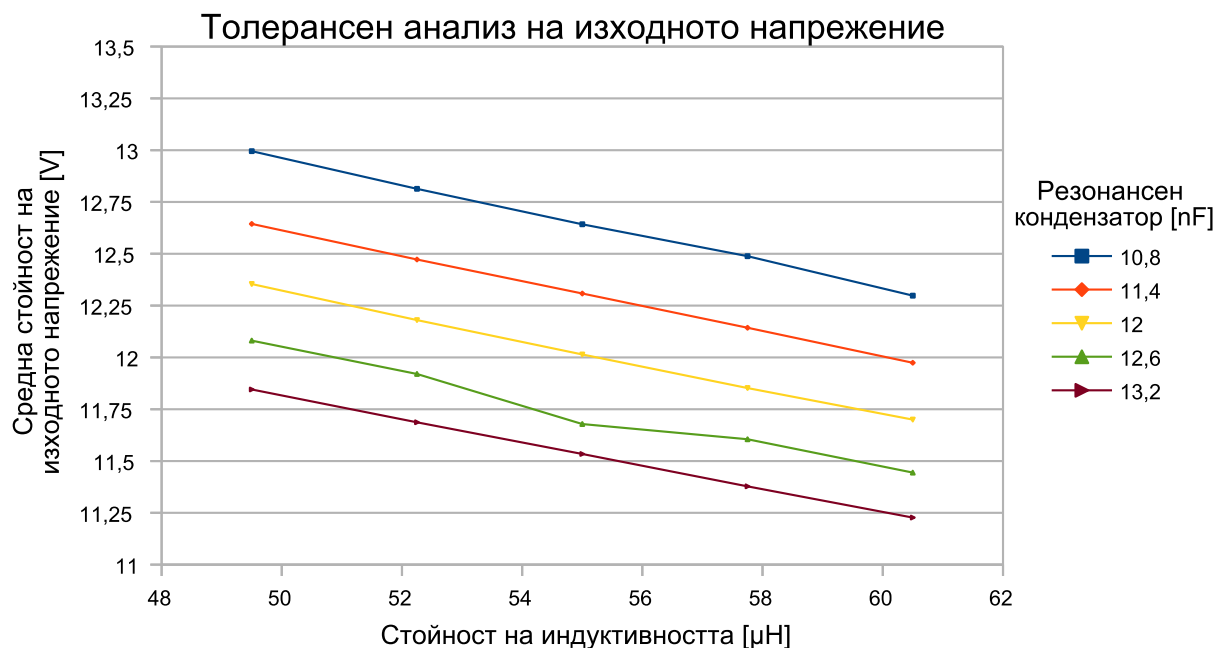
Един от възможните подходи за гарантиране на показателите на LLC DC-DC преобразувателя е използването на оптимизация, като със средствата на математическия апарат се извършат определени автоматизирани процедури, целящи намирането на подходящи (оптимални) стойности.

5.1. Гарантиране на показателите чрез толерансен анализ

Задачата за гарантиране на показателите може да се формулира по следния начин. При зададени области на изменение на характеристиките на схемните елементи да се получи област на изменение на параметрите и работните режими на устройството. Например при зададени толеранси на стойността на резонансната индуктивност в рамките на $\pm 20\%$ от номиналната стойност и изменение на стойността на резонансния капацитет $\pm 10\%$ да се изследва влиянието върху изходното напрежение, резонансния ток и напрежението върху резонансния кондензатор. По този начин се определя област на работните режими на резонансния преобразувател, тоест да се гарантира, че преобразувателят ще работи в някакви граници на изходните параметри.

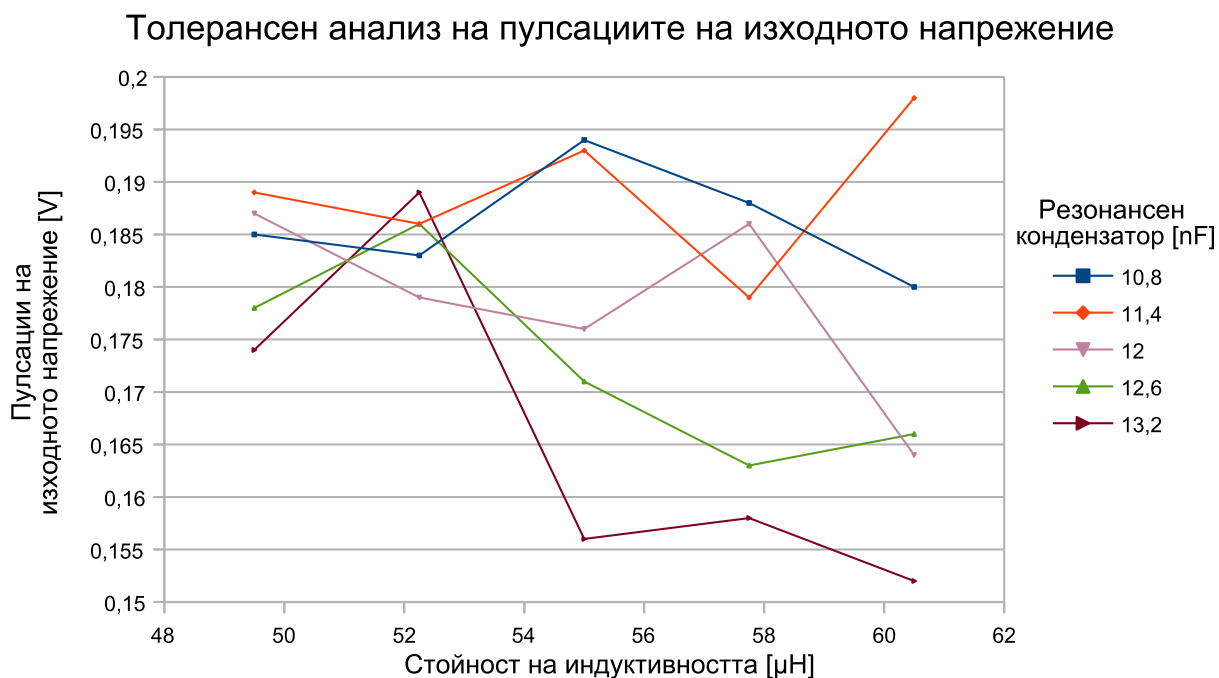
5.1.1 Влияние на толерансите в установен режим

На фигура 5.1 е даден пример за 9 комбинации от стойности на резонансните елементи и тяхното влияние върху средната стойност на изходното напрежение.



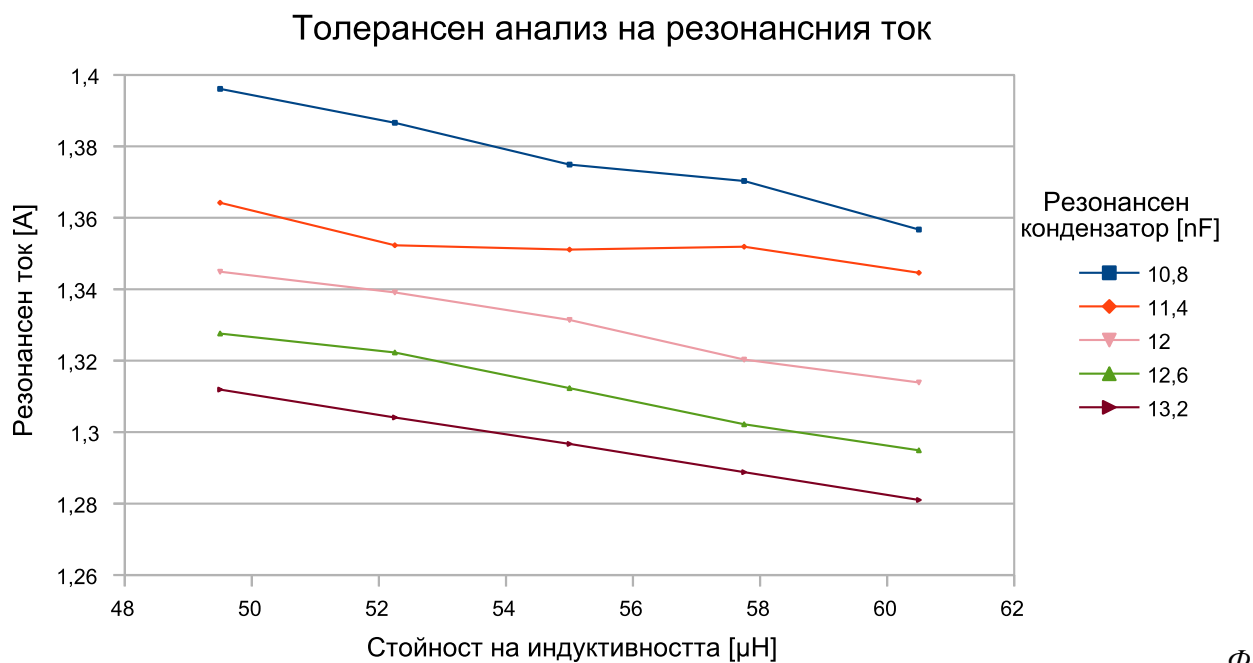
Фигура 5.1: Толерансен анализ по отношение на средната стойност на изходното напрежение

На фигура 5.2 пък е представена средната стойност на пулсациите на изходното напрежение при същите комбинации от стойности на резонансните схемни елементи.



Фигура 5.2: Толерансен анализ по отношение на пулсациите на изходното напрежение

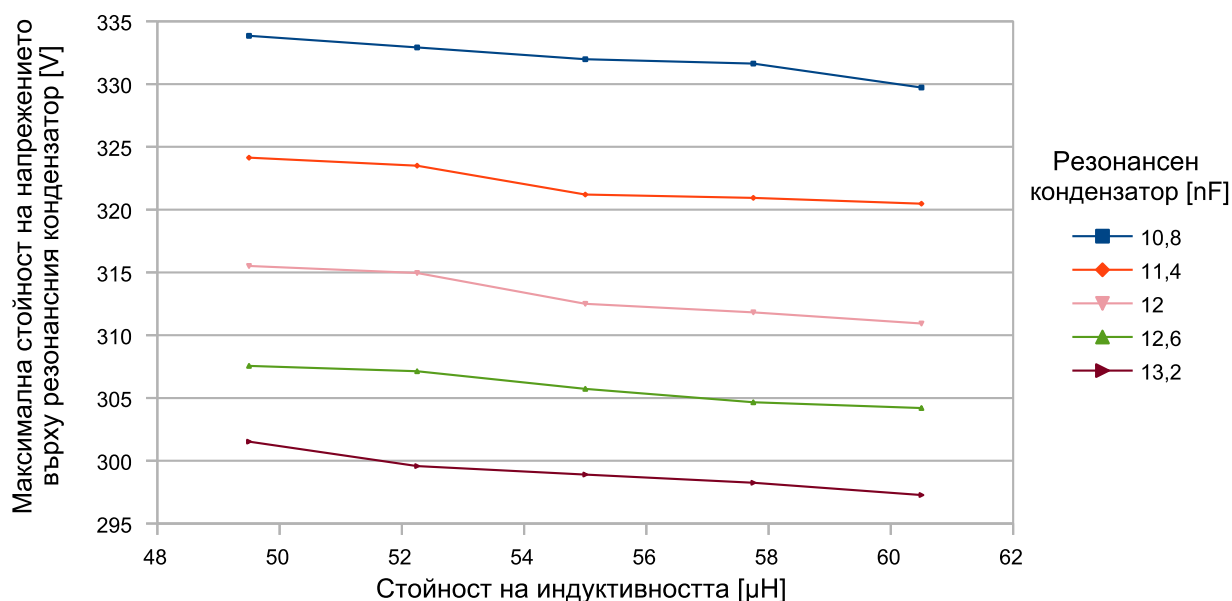
Варирането на резонансния ток в зависимост от толерансите е представено на фигура 5.3. Забелязва се, че при по-малките стойности на резонансния кондензатор, резонансният ток е по-голям, а при по-големите стойности на капацитета резонансният ток намалява.



игура 5.3: Толерансен анализ по отношение на резонансния ток

Напрежението на резонансния кондензатор също се влияе от толерансите на елементите. Толерансен анализ спрямо него е представен на фигура 5.4.

Толерансен анализ на напрежението върху резонансния кондензатор

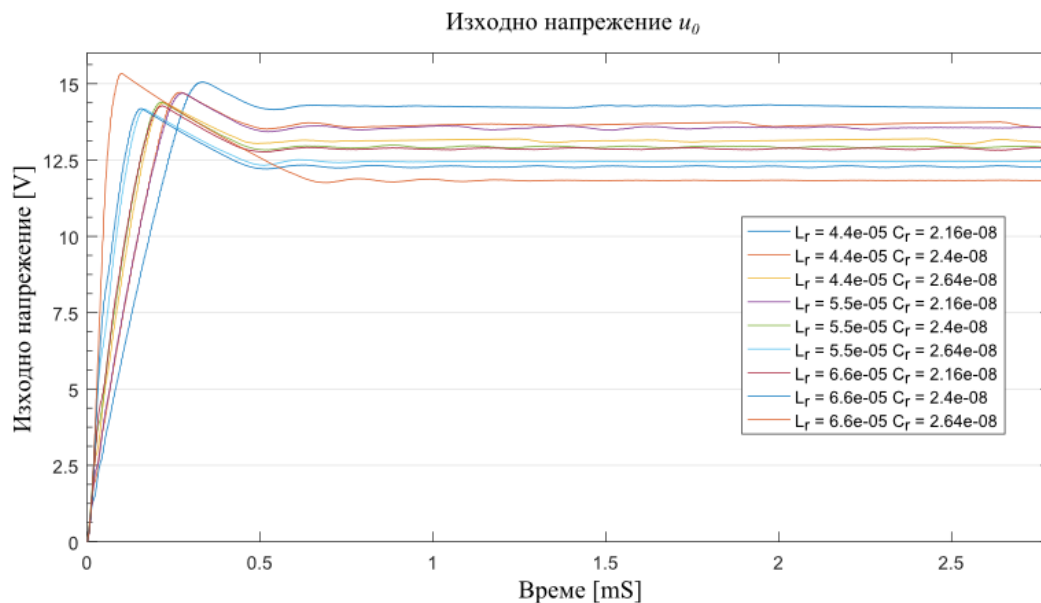


Фигура 5.4: Толерансен анализ по отношение на напрежението на резонансния кондензатор

От фигурата може да се забележи, че варирането на резонансната индуктивност не оказва съществено влияние върху максималната стойност на напрежението на резонансния кондензатор в сравнение с варирането на резонансния капацитет.

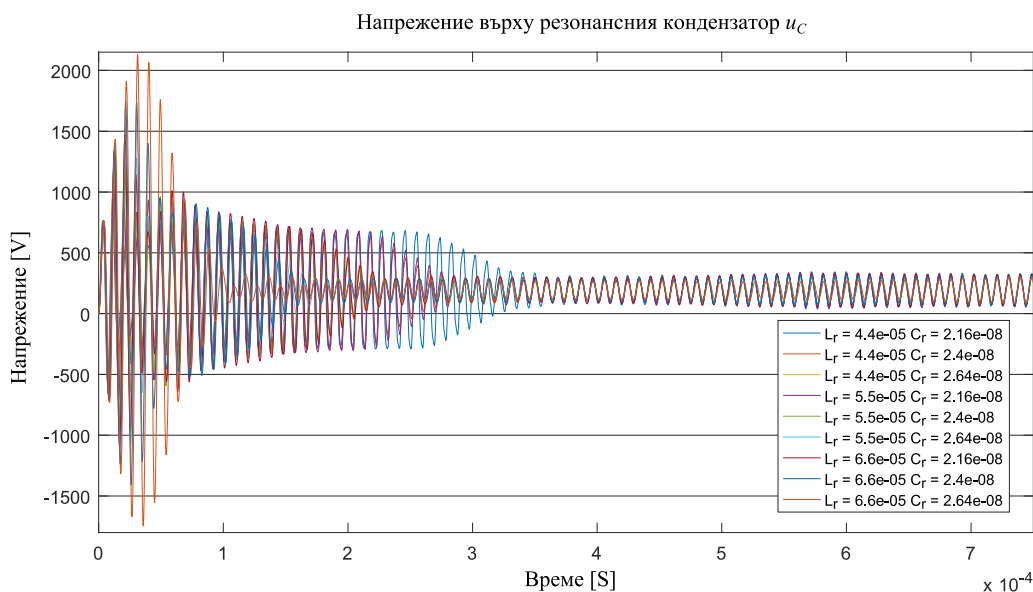
5.1.2. Влияние на толерансите върху преходните процеси

Освен влиянието на толерансите при установен режим, девиациите на стойностите на елементите влияят върху формата на преходните процеси в изхода. Това е илюстрирано на фигура 5.9.



Фигура 5.9: Толерансен анализ на преходните процеси по отношение на изходното напрежение

От анализа на резултатите се установява, че формата на изходното напрежение съществено се влияе от толерансите на резонансните елементи. Освен това толерансите на елементите в значителна степен влияят и на преходния процес в инверторната верига, както се наблюдава от фигура 5.10.



Фигура 5.10: Толерансен анализ на преходните процеси по отношение на напрежението на резонансния кондензатор

В някой случай стойността на напрежението върху резонансния кондензатор може да достигне до 195% от номиналната, което ще доведе до неговото аварирание. Освен това скоростта на преходните процеси се променя в пъти.

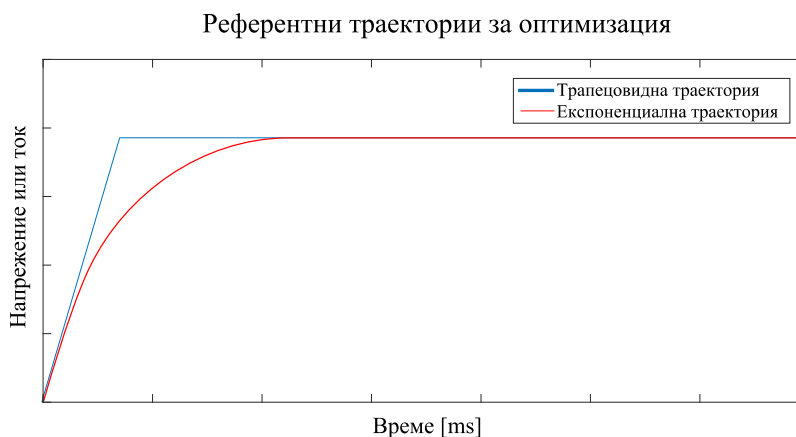
5.2. Гарантиране на показателите чрез оптимизационни процедури

Оптимизацията е целенасочена дейност за получаване на най-добър резултат в определен смисъл и при зададени ограничения. В електронните преобразуватели това най-често са: минимални загуби, критично-

апериодичен преходен процес, реализирането на определена динамика, зададен работен режим и така нататък. Понятието "оптимално" има смисъл на "най-доброто в някои отношения". За да се дефинира еднозначно този термин, трябва да се определи точно по какъв критерий ще се оценява една система. Критерий $I(x)$ е оценка на качеството на системата под формата на число, в зависимост от избора на някои променливи x .

5.2.1. Формулиране на оптимизационните задачи

Нека се формулира примерна оптимизационна задача за преходни процеси на резонансни постоянноточкови преобразуватели. Тя може да бъде много полезна от гледна точка на избягване на добавяне на допълнителна система за "мек пуск". Формулировката на оптимизационната задача е следната – ограничаване на пусковия ток в товара, чрез оптимизиране на избора на филтровият кондензатор C_0 и едновременно с това недопускане на големи пулсации на товарното напрежение в установен режим. За целта се избира подходяща еталонна траектория u_{C0ref} като например представените на фигура 5.11.



Фигура 5.11: Зададена траектория на изходното напрежение

Избраната траектория ще бъде използвана за търсенето на подходяща стойност на филтровия кондензатор, така че разликата между еталонната форма и формата на изходното напрежение при множество от различни стойности да е минимална. За целта се търси начин за ограничаването на напрежението на изходния кондензатор, тоест математически формулирано се минимизира оптимизационния функционал $I(C_0)$:

$$I(C_0) = \int_0^{t_{ref}} (u_{C_0} - u_{C0ref})^2 dt \rightarrow \min \quad (5.1)$$

В алгоритъма се зареждат основните диференциални уравнения, описващи работата на преобразувателя, както и ограниченията, които са необходими за намирането на оптимална стойност на желанния параметър, подлежащ на оптимизация. Формулираната задача систематизирано се свежда до намирането на такава стойност на изходния кондензатор C_0 , която удовлетворява критериите. Математически формулирано това е:

$$\begin{aligned} \min_{C_0} I(C_0) \text{ с ограничения:} \\ \left| \begin{aligned} G_n(C_0) &= 0, \text{ за } n=1,2,3,4 \\ G_n(C_0) &\leq 0, \text{ за } n=5,6 \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Този проблем може да се опрости, като се използва последователно квадратично програмиране [6, 15, 24, 117]. При последователно квадратично програмиране на всяка итерационна стъпка k , функцията $I(x = C_0)$ и ограниченията $G_n(x = C_0)$ се апроксимират съответно с квадратична и линейни функции. Тази задача от своя страна се свежда до задачата за безусловна оптимизация на:

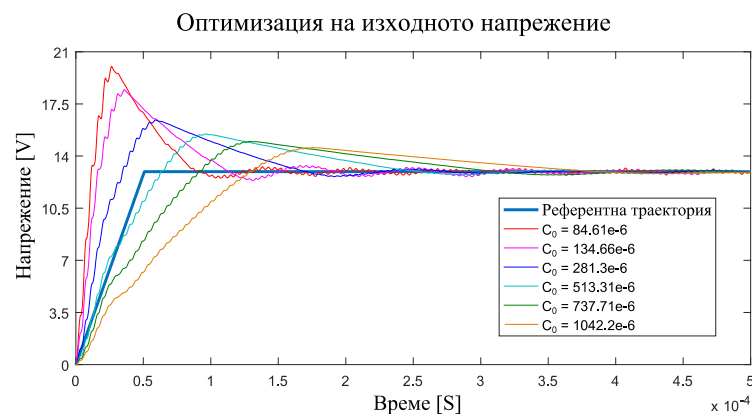
$$\min_{d \in R^2} \nabla I(x_k)^T Z_k d + \frac{1}{2} d^T Z_k^T \nabla^2 I(x_k) d = F_k(Z_k d) \quad (5.7)$$

където Z_k е проекционната матрица, за която $\nabla G_n(x_k) Z_k = 0$, при $n = 1, \dots, l$.

5.2.1. Оптимизация на изходните параметри

Оптимизацията на изходните параметри на резонансните електронни преобразуватели се състои в намирането на стойности на схемните елементи, така че да се получи добър баланс между стойност на изходните пулсации, скорост на преходния процес, размах на напрежението при установяване и др. В този смисъл следва да се подбере такава стойност на изходния филтров кондензатор, така че максимално да се удовлетворят посочените изисквания.

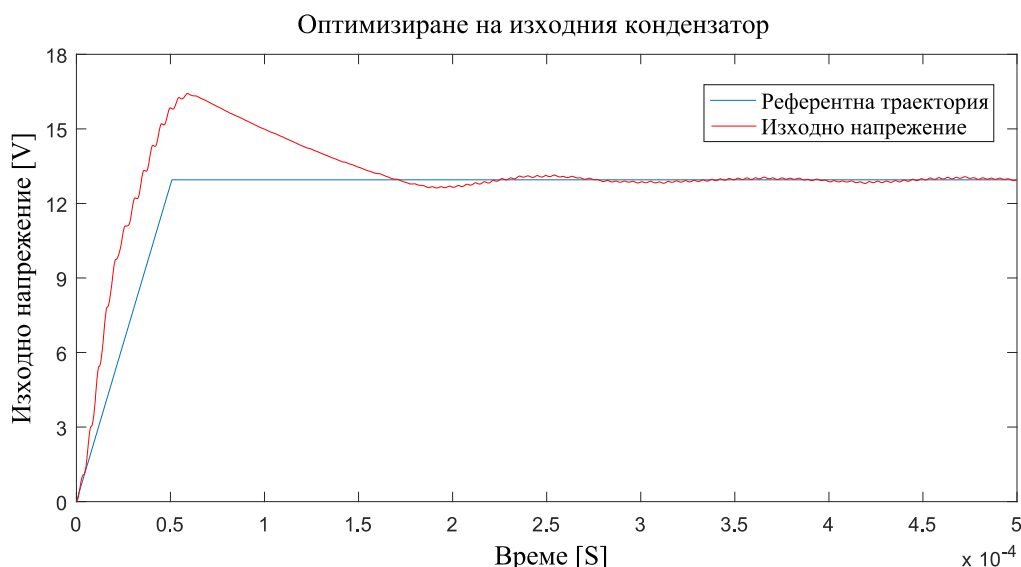
На фигура 5.12 е показан пример за търсене на оптимална стойност на изходния кондензатор, удовлетворяващ минимална разлика от зададената траектория.



Фигура 5.12: Времедиаграми при оптимизационни процедури за изходното напрежение

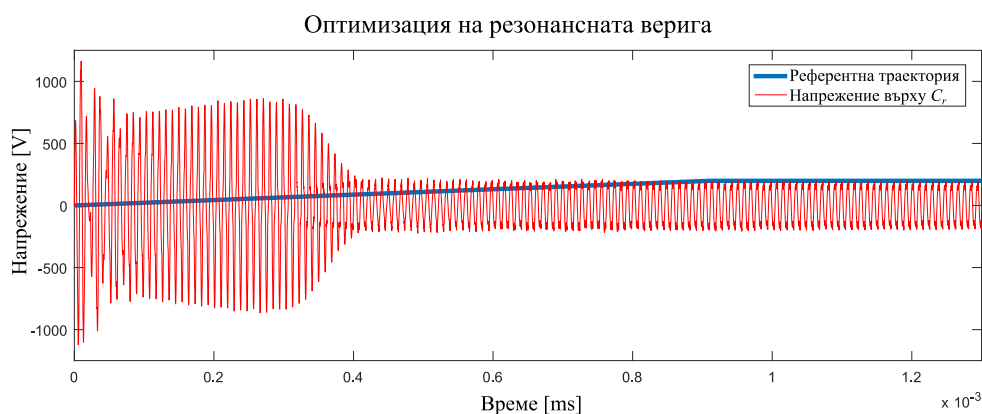
На фигура 5.13 е дадена получената оптимална траектория с определената стойност на изходния кондензатор, чрез използване на оптимизационната процедура. Получените резултати ще позволяват функционирането на схемата без специална система за мек пуск. От друга страна се наблюдава кратка продължителност на преходните процеси при кривите, които са по-близко до еталонната. Ако се използва по-малка стойност на изходния кондензатор, ще нарастват и изходните пулсации на напрежението. Задачата на проектанта е да подбере така диапазона за търсене на оптималната

стойност, че да удовлетвори изискванията както в преходния процес, така и в установен режим.



Фигура 5.13: Получена оптимална траектория с оптимална стойност на изходен кондензатор

На фигура 5.14 е даден резултатът от оптимизационната процедура за резонансния ток.



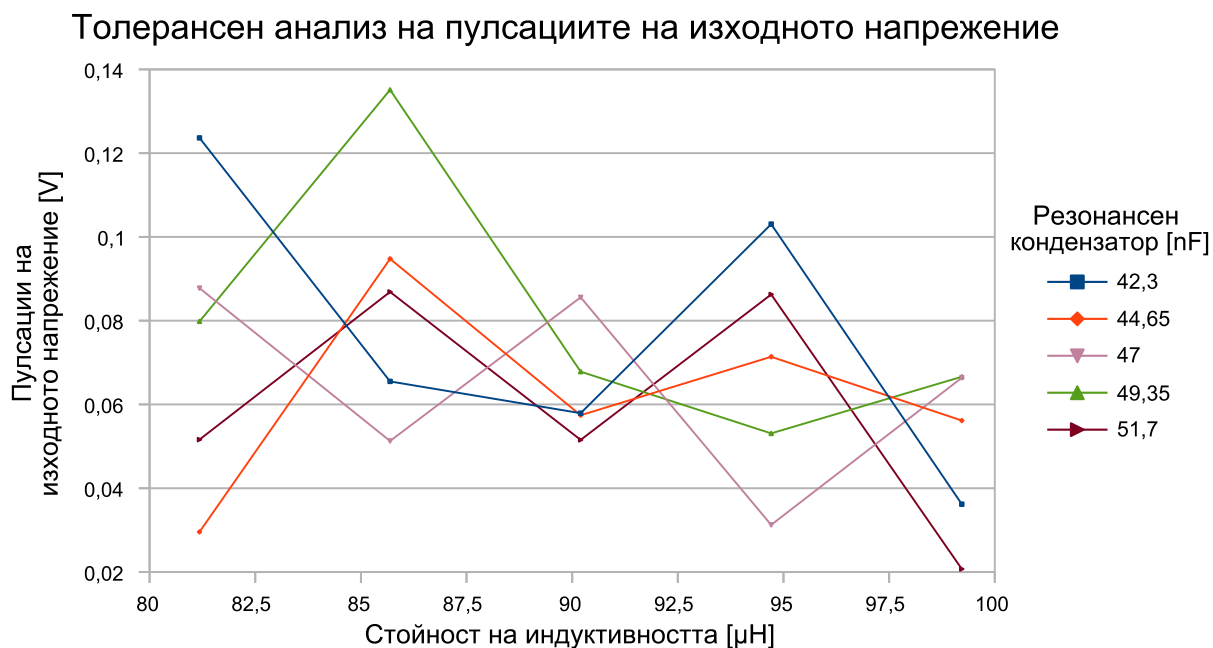
Фигура 5.14: Оптимизационна процедура за L_r и C_r

Търси се в граници от (минимална 25 μH ; начална 55 μH ; крайна 100 μH) оптимални стойности за резонансната индуктивност и в граници (минимална 12 pF; начална 24 pF; крайна 47 pF) за резонансния кондензатор, при зададена опорна траектория.

5.2.2. Толерансен анализ с използване на оптимизирани схемни елементи

Интерес представлява да се направи толерансен анализ с получените оптимални стойности на изходния кондензатор и резонансни елементи

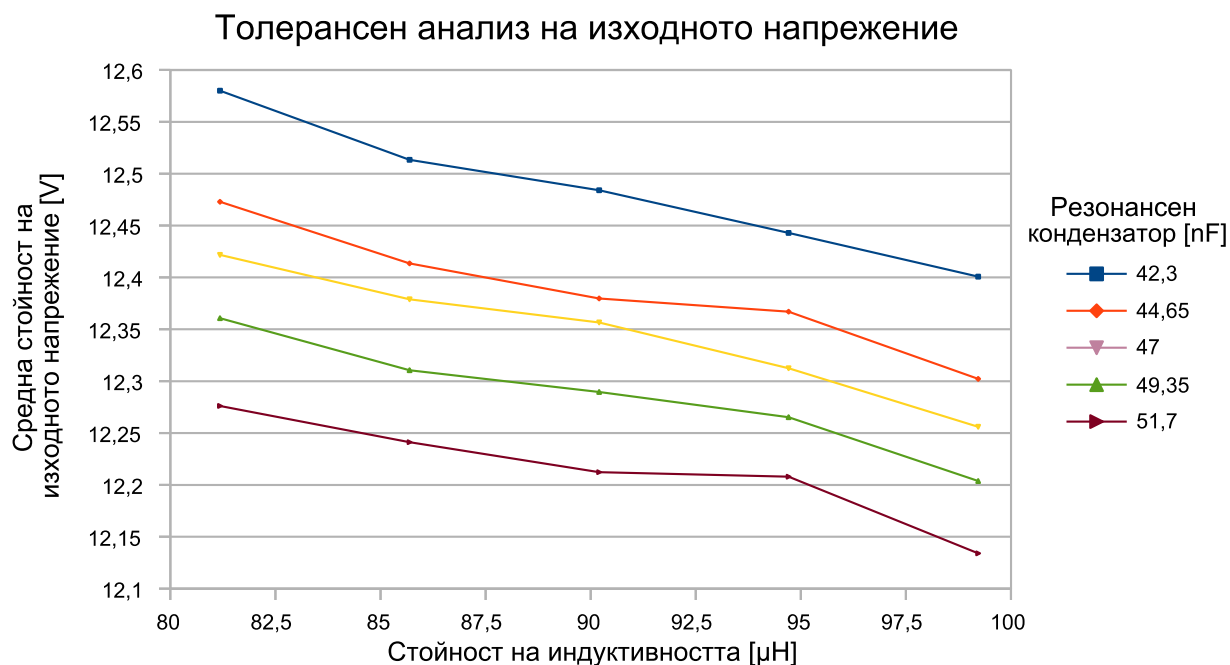
На фигура 5.16 е представен толерансен анализ на пулсациите на изходното напрежение със заложените стойности от оптимизационната процедура.



Фигура 5.16: Толерансен анализ на пулсациите на изходното напрежение с оптимални стойности на схемните елементи

Спрямо фигура 5.2, пулсациите са намалели с 40 mV, като средно се движат в диапазона от 60 до 80 mV, спрямо 165 до 190 mV при номиналните стойности.

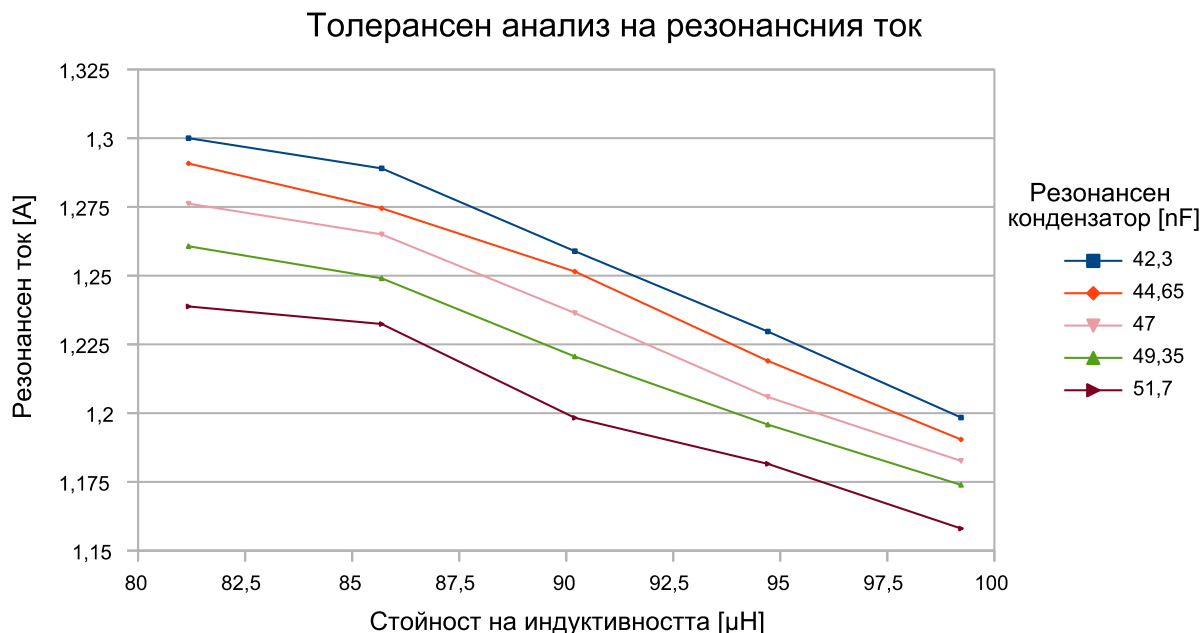
На фигура 5.17 е представен толерансен анализ на средната стойност на изходното напрежение с използване на оптималните стойности на резонансните елементи.



Фигура 5.17: Толерансен анализ на средната стойност на изходното напрежение с оптимални стойности на схемните елементи

От сравнения с фигура 5.1 се вижда, че изходното напрежение се движи в областта от 12,1 V до 12,6 V при оптимизирани стойности спрямо 11,25 V до 13 V при номиналните стойности на елементите.

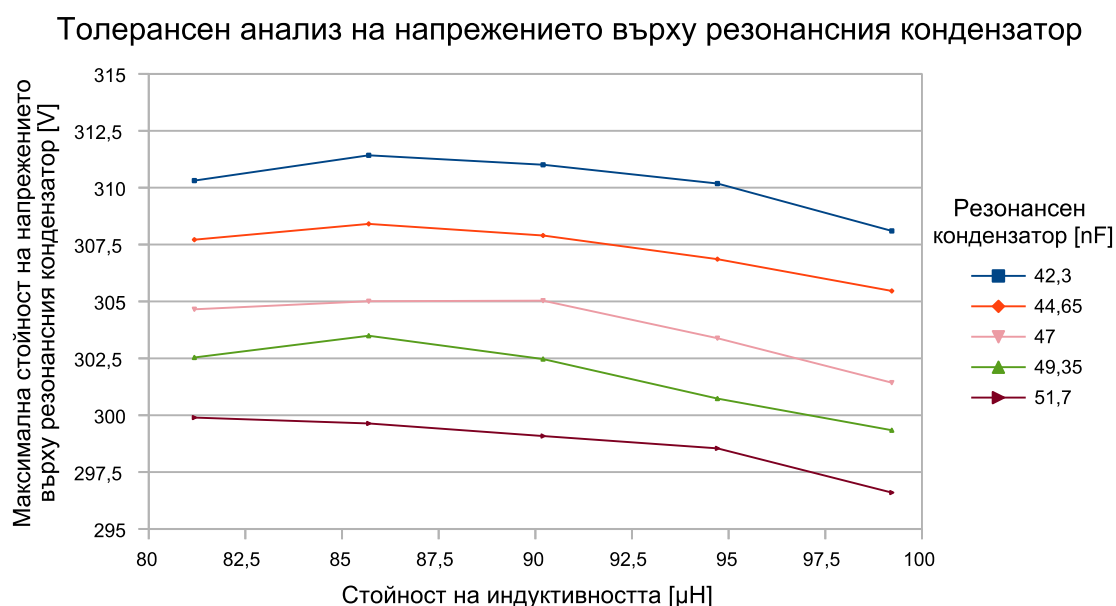
На фигура 5.18 е представен толерансен анализ на ефективната стойност на резонансния ток с определените оптимални стойности.



Фигура 5.18: Толерансен анализ на резонансния ток с оптимални стойности на схемните елементи

Спрямо резултатите от фигура 5.3 резонансният ток се движи в областта от 1,3 A до 1,16 A при оптимизирани стойности спрямо 1,4 A до 1,28 A при номиналните стойности на елементите.

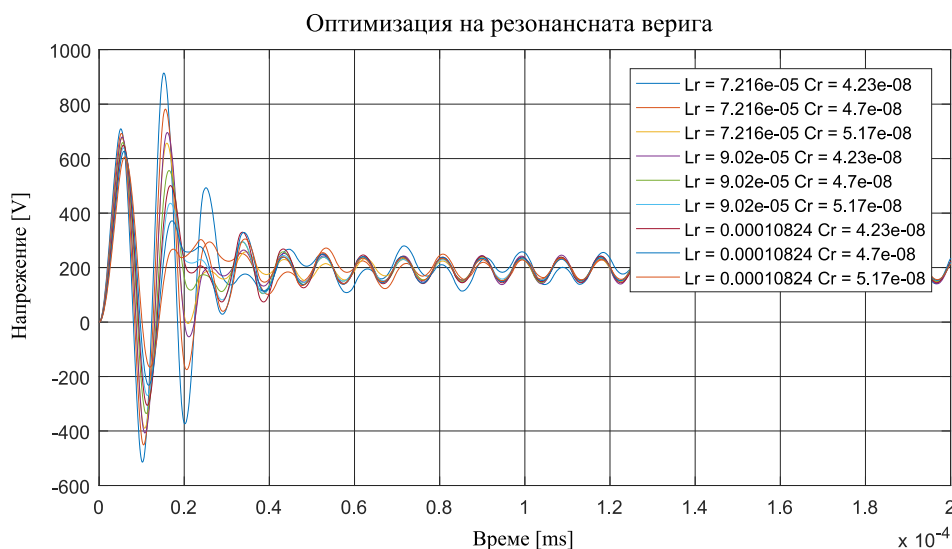
На фигура 5.19 е представен толерансен анализ на максималната стойност на напрежението върху резонансния кондензатор след оптимизацията.



Фигура 5.19: Толерансен анализ на напрежението върху резонансния кондензатор с оптимални стойности на схемните елементи

Спрямо резултатите от фигура 5.4 напрежението се движи в областта от 295 V до 315 V при оптимизирани стойности спрямо 295 V до 335 V при номиналните стойности на елементите.

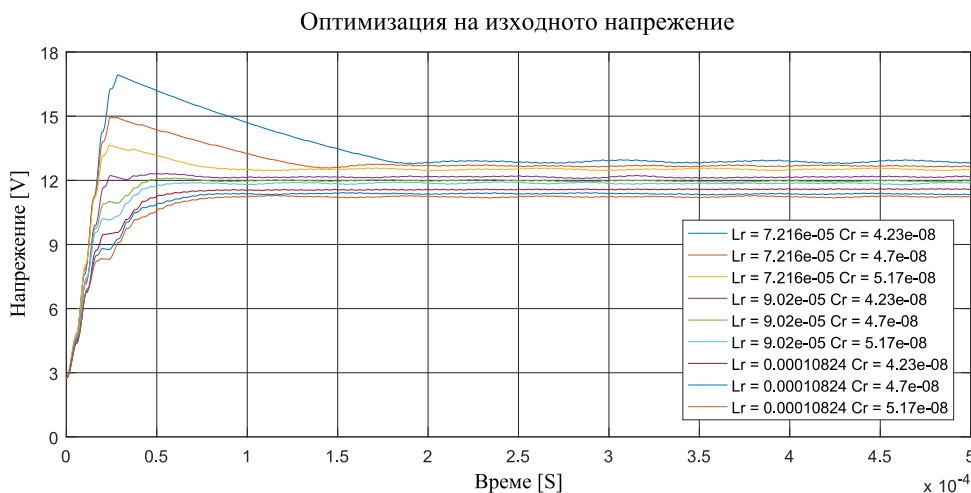
На фигура 5.20 е представено установяването на напрежението на резонансния кондензатор в инверторната верига, в зависимост от толерансите на резонансните елементи.



Фигура 5.20: Толерансен анализ на преходните процеси на напрежението на резонансния кондензатор с оптимизирани стойности

Сравнявайки с преходния процес от фигура 5.10 се забелязва, че преходният процес е сравнително кратък – максимум три периода; а дори при най-неблагоприятния режим пикът на напрежението не надхвърля 1 kV.

На фигура 5.21 е представено установяването на изходното напрежение, в зависимост от толерансите на резонансните елементи.



Фигура 5.21: Толерансен анализ на преходните процеси на изходното напрежение с оптимизирани стойности

Забелязва се, че при пет от девет комбинации преходният процес е апериодичен, докато при неоптимизирания толерансен анализ на фигура 5.9 няма нито един такъв.

5.3. Заключение

Толерансният анализ е добър подход изследователят или проектантът да добие представа при вече заложили от изчисленията стойности на схемните елементи какви изменения в работните режими може да се очаква при наличието на известни проценти толеранси във физическите елементи. От там нататък следва да се вземат мерки за търсенето на по-прецизни елементи или по-точно настройване на системата за автоматично регулиране.

Постигнатите резултати са важни от гледна точка на методи за проектиране на силовите електронни устройства, тъй като могат да се използват не само за установен режим, но и за оптимизация на преходните процеси. Използвайки моделно-базирана оптимизация се намират оптимални стойности на схемните елементи, като се гарантират изходните параметри, независимо от толеранса на схемните елементи.

Получените резултати показват, че при използване съвместно на подходите се получава доста по-устойчива на изменения и толеранси система, с подобрена динамика, по-бързи преходни режими, по-малък запас по отношение на стойностите на схемните елементи и по-лесна настройка на системите за защита и автоматично регулиране.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

При разработването на дисертационния труд са постигнати следните резултати, които съдържат следните определени научни и научно-приложни приноси:

- Предложен е общ подход за проектиране на резонансни LLC преобразуватели от постоянно в постоянно напрежение с използване на резонансна верига с обединени или разделени магнитни компоненти.
- Направено е систематизиране и адаптиране на математически модели на резонансни преобразуватели от постоянно в постоянно напрежение за целите на моделно-базираното проектиране.
- Разработена е специализирана софтуерна система за автоматизиране на процеса на събиране, анализ и обработка на бази данни от числени експерименти със съответните математически модели.
- Реализирано е гарантиране на показателите на резонансни LLC преобразуватели от постоянно в постоянно напрежение чрез използване на толерансен анализ и моделно-базирана оптимизация. Като резултат е постигнато значително намаляване на влиянието на толерансите на резонансните елементи върху работния режим.
- Чрез оптимизацията се наблюдава значително подобрене на динамиката, като разработените алгоритми са приложими и за други силови електронни преобразуватели.
- Предложената концепция е приложима при виртуално и физическо проектиране, прототипиране, верификация на работни режими,

обучение, създаване и изследване на сложни или скъпоструващи устройства и системи.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Е. Попов, Н. Хинов, **Цв. Хранов**, “Процедура за преобразуване на инверторна верига от висок ред до основна от втори ред при резонансни инвертори”. Сборник трудове от XIII-та Национална конференция с международно участие “ЕЛЕКТРОНИКА 2016”, 12-13 май, 2016, София, България, стр. 144-148, ISSN 1313-3985
2. Е. Попов, Н. Хинов, **Цв. Хранов**, “Примери за преобразуване на инверторна верига от висок ред при резонансни инвертори”. Сборник трудове от XIII-та Национална конференция с международно участие “ЕЛЕКТРОНИКА 2016”, 12-13 май, 2016, София, България, стр. 149-152, ISSN 1313-3985
3. Nikolay Hinov, **Tsveti Hranov**, Dimitar Arnaudov, “Implementation of ICT in Teaching of Power Supply Devices”. Conference proceedings TELECOM 2016, vol.24, 27-28 October 2016, Sofia, Bulgaria, ISSN 1314-2690
4. Nikolay Hinov, **Tsveti Hranov**, “Modelling parallel-loaded resonant converter”, ISSE 2017, 10-14 May 2017, Sofia, Bulgaria, vol. 40, ISSN 2161-2536, ISBN 978-153860582-0, IEEE Catalog Number CFP17509-ART, DOI: 10.1109/ISSE.2017.8001005
5. **Цвети Хранов**, “ Трансформация на магнитните елементи в LLC резонансни постояннотокови преобразуватели”. XV-та Национална конференция с международно участие “ЕЛЕКТРОНИКА 2018”, 17-18 май, 2018, София, България, ISSN 1313-3985, стр. 22-28,
6. Nikolay Hinov, **Tsveti Hranov**, “Evaluation and verification of LLC operating regimes””, 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018, vol. XX, 3-6 June 2018, Bourgas, Bulgaria, ISBN 978-153863419-6, IEEE Catalog Number CFP1828Z-ART, DOI: 10.1109/SIELA.2018.8447094
7. Nikolay Hinov, Bogdan Gilev and **Tsveti Hranov**, “Model-based optimization of an LLC-resonant DC-DC converter”, MDPI Electronics (Switzerland) Open Access, Volume 8, Issue 7, July 2019, Article number 799, ISSN 20799292, DOI: 10.3390/electronics8070799

ANNOTATION

Dissertation title: **DESIGN OF RESONANT DC/DC CONVERTERS WITH GUARANTEED PARAMETERS**

Author: eng. **Tsveti Hristov Hranov**, MSc

Resonant DC/DC converters are characterized by high energy conversion efficiency, low level of emitted electromagnetic noise, reliable operation of its constituent electronic elements due to their operation in "soft switching" mode, simple driving only by switching frequency. The listed qualities contribute to their successful growing market share into everyday life and technology such as energy converters, lighting power supply, devices for charging energy storage elements, devices for electro-technologies – arc welding, soldering, power supplies for information technology among others.

The control design of this type of converters is specific and can be done in a variety of ways – from a classic circuit-implemented current mode or voltage mode controlled frequency generators and operational amplifiers feedback compensators, to modern flexible solutions with digital signal processors using precise mathematical algorithms. The use of such control designs is justified for at least one the following reasons:

- Resonant converters are highly sensitive to changes in the control frequency, especially when operating in transient and emergency modes;
- To ensure stable operation and robustness in large ranges of parameter variation, it is necessary to accurately monitor and calculate the regimes using detailed mathematical models;
- Easy ability to set up, reconfigure and test different or new control approaches, as well as capture data and compare performance between different algorithms.

The stated advantages determine the use of digital signal control as particularly suitable for conducting experimental and scientific work with resonant DC energy converters.