

**РЕЗЮМЕТА НА НАУЧНИТЕ ТРУДОВЕ,**  
представени за участие в конкурс за заемане на АД „професор“  
в област на висше образование 5. Технически науки,  
професионална направление 5.2. Електротехника, електроника и автоматика,  
специалност: Електронни преобразуватели,  
обявен в ДВ брой 23/19.03.2024 г.  
на доц. д-р инж. Цветана Григорова Григорова–Щърбева

**I. ОПИСАНИЕ НА НАУЧНИТЕ ТРУДОВЕ**

За участие в конкурса са представени 47 публикации, 1 публикуван университетски учебник и 2 публикувани университетски учебни пособия, издадени след участието в конкурс за придобиване на академично звание „доцент“ през 2007 г. и извън научните трудове за регистрация на академична длъжност „доцент“ в регистъра за академични длъжности и дисертации към НАЦИД, разпределени по групи, както следва:

**1. Група В – 12 бр.**

1.1. Показател В4. Хабилизационен труд – равностойни научни публикации (не по-малко от 10) в издания, които са реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация.

**2. Група Г – 32 бр.**

2.1. Показател Г.7. Научни публикации в издания, които са реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация – 20бр.

2.2. Показател Г.8. Научни публикации в нереперирани списания с научно рецензиране или в редактирани колективни трудове – 12 бр.

**3. Група З – 3 бр.**

3.1. Показател З.31. Научни публикации в списания с импакт фактор (IF на Web of Science) и/или с импакт ранг (SJR на Scopus) – 3 бр.

**4. Група Е – 3 бр.**

4.1 Показател Е.23 – 1 публикуван университетски учебник;

4.2 Показател Е.24 – 2 публикувани университетски учебни пособия.

**II. РЕЗЮМЕТА НА НАУЧНИТЕ ТРУДОВЕ И ПРИНОСИ ПО ПОКАЗАТЕЛ В.4,  
ПРЕДСТАВЕНИ КАТО РАВНОСТОЙНИ НА МОНОГРАФИЧЕН ТРУД НА ТЕМА:**

**АНАЛИЗ, МОДЕЛИРАНЕ И ПРОЕКТИРАНЕ НА РЕЗОНАНСЕН DC/DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С ТРИ  
РЕАКТИВНИ ЕЛЕМЕНТА В ТРЕПТЯЩИЯ КРЪГ ОТ ТИП LLC**

Миниатюризацията на електронните преобразователни устройства, както и постоянното повишаване на изискванията за енергийна ефективност на електрозахранващите системи, определят засиления интерес на специалистите към резонансните преобразуватели на постоянно напрежение. Тези преобразуватели, притежаващи подобрени показатели за тегло и размери, висока ефективност, осигуряващи добри условия за електромагнитна съвместимост, все повече се въвеждат като източници на вторично захранване за различни електрически приложения.

Използването на различни топологии на резонансната верига, позволява да се придадат на преобразователя допълнителни свойства – увеличаване на изходното напрежение, стабилност на регулирането от празен ход до късо съединение, при запазване на условия за мека комутация на транзисторите в схемата, и др. Възможност за комбиниране на тези свойства дават резонансните вериги от по-висок ред. Напоследък все по-широко приложение намира резонансният DC/DC преобразовател с три реактивни елемента в трептящия кръг от тип LLC. Друго предимство на LLC топологиите пред другите видове резонансни преобразуватели е това, че при тях двете необходими индуктивности могат да се реализират практически в само

един компонент – съгласуващият трансформатор. Той се изработва по такъв начин, че в резонансната верига се включват и индуктивността на разсейване, и тази на намагнитване. В случаите на безконтактно предаване на енергия, поради наличието на въздушна междина в магнитопровода, тази конструкция се получава естествено.

Работата на резонансен преобразувател от по-висок ред при различно натоварване и работна честота е сложна. За да се проектира и използва ефективно резонансният преобразувател, е необходимо неговите характеристики, при различни режими на работа, да бъдат ясно установени. За целите на максималното опростяване на изчислителните изрази понякога при анализа на електромагнитните процеси в схемите е достатъчно ограничаването до отчитане само на основния хармоник на тока или е.д.н. на еквивалентните източници. Известно е, че по този начин токовете и напреженията в линейната част на еквивалентната схема на изследвания преобразувател се получават със синусоидална форма. При това могат да се приложат известните методи за анализ на синусоидални величини. Въпреки, че анализът по метода на първия хармоник е прост и удобен за практически цели, неговата точност не винаги е достатъчна.

При анализа на нелинейни вериги е удобно използването на графоаналитични методи, които се основават на използването на графиките на реалните зависимости между токовете, напреженията и другите величини на активните нелинейни елементи. От графоаналитичните методи за изследване на резонансните преобразуватели най-ефективен за анализ е методът на фазовата равнина, който дава възможност за изследване на преходни и установени режими. Методът улеснява качествено разбиране на комплексния характер на работата на преобразувателя, включително идентифициране на режимите на работа. Неговото предимство, при анализа на електромагнитните процеси в резонансният преобразувател, е в това, че се отчита реалната форма на тока и количеството на натрупаната енергия в резонансния кръг, както и моментите на комутация на ключовите елементи.

Последователно в публикационни материали, представени като равностойни на монографичен труд, са разгледани електромагнитните процеси и особеностите при различни работни режими на действието на резонансния LLC DC/DC преобразувател с капацитивен изходен филтър. Приложени са два подхода за математически анализ на процесите в схемната конфигурация – анализ по метода на първия хармоник и анализ по метода на фазовата равнина. Анализите са направени при приемането, че коефициентът на трансформация  $k=1$ , всички елементи в схемата са идеални, силовите прибори се превключват мигновено, а пулсациите на захранващото и изходното напрежения са пренебрежимо малки. Изведени са аналитични зависимости, които са обобщени и сведени до влиянието на следните основни величини – отношението между паралелната  $L_P$  и последователната  $L_S$  индуктивности  $a$  ( $a=L_P/L_S$ ) в трептящия кръг и честотния коефициент  $v$  (отношението между управляващата честота  $\omega_S$  и резонансната честота  $\omega_0$  на последователния кръг). Изследвано е въздействието на тези параметри върху работата на резонансния LLC преобразувател, като са препоръчани граници за избор на техните стойности. Илюстрирани са с времедиаграми и графики изходни, регулировъчни и товарни характеристики, получени по двата метода. Предложени са методики за проектиране на резонансния LLC DC/DC преобразувател, базирани на двата метода за анализ, които са проверени чрез компютърни симулации и експериментални резултати.

Изследванията и получените резултати в представените, като равностойни на монографичен труд, публикационни материали могат да се систематизират в следните направления:

II.1. Анализ, моделиране и проектиране на електромагнитните процеси в резонансен LLC DC/DC преобразувател с капацитивен изходен филтър, в установен режим, по метода на първия хармоник – публикации [B.4.1], [B.4.2], [B.4.3], [B.4.4].

II.2. Анализ, моделиране и проектиране на електромагнитните процеси в резонансен LLC DC/DC преобразувател с капацитивен изходен филтър по метода на фазовата равнина – публикации [B.4.5], [B.4.6], [B.4.7], [B.4.8], [B.4.9], [B.4.10], [B.4.11] и [B.4.12].

## II.1. АНАЛИЗ, МОДЕЛИРАНЕ И ПРОЕКТИРАНЕ НА РЕЗОНАНСЕН LLC DC/DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С КАПАЦИТИВЕН ИЗХОДЕН ФИЛТЪР, В УСТАНОВЕН РЕЖИМ, ПО МЕТОДА НА ПЪРВИЯ ХАРМОНИК

**B.4.1. Vuchev, A. S., T. Gr. Grigorova, I. P. Maradzhiev, "A Unified Analysis of LLC Resonant DC/DC Converter with Capacitive Output Filter", 10th National Conference with International Participation, ELECTRONICA 2019 - Proceedings, Sofia, Bulgaria, 2019, pp.1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA.2019.8825604, ISBN: 9781728136226 /Scopus, SJR=0.11 (за 2020)**

В настоящата публикация е разработен обобщен математически анализ на електромагнитните процеси в мостов резонансен LLC DC/DC преобразувател с капацитивен изходен филтър, по метода на първия хармоник, описващ целия диапазон на изменение на работната честота. В резултат на анализа са получени зависимости за основни величини, чрез които могат да се определят границите на работоспособност на преобразувателя при запазване на условията за мека комутация на транзисторите в схемата. Представените зависимости са сведени до въздействието на отношението между паралелната и последователната индуктивности  $a$  и честотния коефициент  $\nu$ .

Построени са нормализирани изходни характеристики, при силно променящи се товари, за различни стойности на честотния коефициент  $\nu$  при параметър отношението между индуктивностите в схемата на LLC преобразувателя. В процеса на проектиране тези характеристики подпомагат дефинирането на номиналната работна точка на LLC преобразувателя при съгласуването с конкретен реален товар.

Изведена е аналитична нормализирана зависимост за изходния ток, доказваща че е възможно при определена стойност  $\nu_{bound}$  на честотния коефициент  $\nu$ , преобразувателят да има поведение на източник на ток. Доказано е, че в този случай нормализираният изходен ток зависи единствено от отношението между индуктивностите. Въз основа на представените нормализирани изходни характеристики са обсъдени условията за работа на схемата като повишаващ или понижаващ преобразувател, както и възникващите комутационни механизми по отношение на транзисторите в схемата – комутация при нулево напрежение (ZVS) или комутация при нулев ток (ZCS).

Предложени са аналитични изрази за изходната мощност и фазовото отместване  $\phi$  между напрежението и тока в инверторната част на схемата. Чрез тях са построени нормализирани характеристики за различни стойности на честотния коефициент  $\nu$ , като функция на нормализирания изходен ток, при параметър отношението между индуктивностите. Анализирано е влиянието на честотния коефициент  $\nu$  върху тях. Получените зависимости на фазовото отместване  $\phi$  дават информация на проектанта за комутационните механизми в схемата и следователно за начина на управление на силовите транзистори и за избора на защитните ограничителни групи. Формулирани са препоръки, свързани с комутационните механизми в схемата на LLC преобразувателя.

**B.4.2. Grigorova, T. Gr., A. S. Vuchev, I. P. Maradzhiev, "Output and Control Characteristics of an LLC Resonant DC/DC Converter", 10th National Conference with International Participation, ELECTRONICA 2019 - Proceedings, Sofia, Bulgaria, 2019, pp.1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA.2019.8825607, ISBN: 9781728136226/Scopus, SJR=0.11 (за 2020)**

В настоящата статия, разработеният в [B.4.1] обобщен математически анализ, по метода на първия хармоник, на електромагнитните процеси в схемата на резонансен LLC DC/DC преобразувател с капацитивен изходен филтър, е допълнен както по отношение на изходните характеристики така и на регулировъчните характеристики. Целта на представените изследвания е да се оценят регулиращите свойства на разглеждания преобразувател.

Изследвано е влиянието на отношението между индуктивностите  $a$  върху изходните характеристики на схемата, като графично са илюстрирани нормализираните изходни характеристики на мостовия резонансен LLC DC/DC преобразувател за  $a=1$ ,  $a=3$  и  $a=10$  при

различни стойности на честотния коефициент  $\nu$ . Обсъдена е характеристиката, дефинираща границата на работата на схемата между двата комутационни механизма – работа при нулево напрежение и нулев ток ( $ZCS - ZVS$  областите).

Изведена е аналитична зависимост, чрез която са построени нормализирани регулировъчни характеристики на преобразувателя като функция на нормализираната стойност на товарния резистор при различни стойности на отношението между индуктивностите ( $a=1$ ,  $a=3$  и  $a=10$ ). Тази зависимост по-точно отразява физичната същност на развиващите се процеси в преобразувателя, тъй като съпротивлението на товара интуитивно се свързва с натоварването в схемата. Анализирано е влиянието на отношението между индуктивностите върху регулировъчните свойства на схемата и са обсъдени критерии за неговия избор. В публикацията са очертани основни свойства на схемата, свързани с управлението по честота.

Резултатите от теоретичния анализ са доказани чрез симулационно и експериментално изследване. Представените сравнителни данни от изчислени, симулирани и експериментално получени резултати, показват приемлива, за инженерни пресмятания, точност на получените аналитични зависимости.

**V.4.3. Vuchev, A. S., T. Gr. Grigorova, I. P. Maradzhiev, "Investigation of an LLC resonant DC/DC converter with a capacitive output filter, Part I - Load Characteristics", 28th International Scientific Conference Electronics, ET 2019 - Proceedings, Sozopol, Bulgaria, 2019, pp.1-4, doi: 10.1109/ET.2019.8878327, ISBN: 9781728125749/Scopus, SJR=0.11 (за 2020)**

Целта на представените изследвания е да се изведат аналитични зависимости за определянето на токовете през силовите прибори и елементите на резонансната верига на LLC DC/DC преобразувателя с капацитивен изходен филтър, на базата на разработения в [B.4.1] обобщен математически анализ по метода на първия хармоник.

Изведена е аналитична зависимост за ефективната стойност на тока през последователната индуктивност, в относителни единици, въз основа на която са построени семейство товарни характеристики като функция от изходния ток за различни стойности на честотния коефициент  $\nu$  при параметър отношението между индуктивностите. Зависимостите показват, че за диапазона на изменение на натоварването, в който е налице комутация при нулево напрежение, токът през индуктивността винаги има ненулева стойност. С помощта на тези товарни характеристики се обсъждат важни свойства на схемата.

Предложени са аналитични изрази за следните основни електрически величини, в относителни единици: средна стойност на тока през транзисторите; средна стойност на тока през антипаралелните диоди; средна стойност на тока, консумиран от хранящия източник; средна стойност на тока през диодите на изправителя и максималната стойност на напрежението върху последователния кондензатор. За режима на комутация при нулево напрежение ( $ZVS$ ), графично, са илюстрирани нормализирани зависимости на средните стойности на токовете през транзисторите и обратните диоди в инверторната част на схемата като функция от изходния ток при параметър отношението между индуктивностите за различни стойности на честотния коефициент  $\nu$ . Представените резултати потвърждават, че за изследвания режим, токовете през транзисторите имат ненулеви стойности. Освен това се забелязва, че токовете през елементите могат да имат значителни стойности, дори и при малки натоварвания, за честотни коефициенти, близки до гранична стойност  $\nu_{bound}$ , при която преобразувателят има характер на източник на ток, увеличавайки по такъв начин загубите в схемата. Анализът на представените товарни характеристики показва диапазона на натоварване, в който е възможна работа в режим на комутация с нулево напрежение.

**B.4.4. Grigorova, T. Gr., A. S. Vuchev, I. P. Maradzhiev, "Investigation of an LLC resonant DC/DC converter with a capacitive output filter, Part II-design considerations", 28th International Scientific Conference Electronics, ET 2019 - Proceedings, Sozopol, Bulgaria, 2019, pp.1-4, doi: 10.1109/ET.2019.8878657, ISBN: 9781728125749/Scopus, SJR=0.11 (за 2020)**

Целта на представените изследвания е разработването на методика за инженерно проектиране, на резонансен LLC DC/DC преобразувател с капацитивен изходен филтър, при регулиране на изходната мощност чрез промяна на работната честота, основана на аналитичните изрази, получени по метода на първия хармоник. Обсъждат се различни аспекти относно избора на отношението между индуктивностите в схемата като честотен диапазон на работа, стойности на тока при запущването на транзисторите и др. Анализирани са условията за получаване на комутация при нулево напрежение (ZVS), както и възможността за използване на ZVS драйвери, позволяващи работа с мека комутация в широк диапазон на промяна на товара. Методиката за проектиране се основава на зададени стойности за изходната мощност, изходното напрежение и работната честота. Спецификата на предложеното проектиране е, че в неговата основа е изборът на честотния коефициент и отношението между индуктивностите. Проектирането се извършва като се избира преобразувателят да работи в точката с максимална изходна мощност.

Въз основа на предложената методика са изведени аналитични изрази, чрез които се изчисляват стойностите на пасивните елементи в трептящия кръг с три реактивни елемента от тип LLC, както и всички токово-напрежителни изисквания към активните и пасивни елементи в схемата.

Въз основа на получените зависимости е проектиран, симулационно и експериментално тестван полумостов резонансен LLC DC/DC преобразувател. Проведените компютърни симулации и експериментални изследвания потвърждават, че представената инженерна методика за проектиране осигурява приемлива точност на получените резултати.

## **II.2. АНАЛИЗ, МОДЕЛИРАНЕ И ПРОЕКТИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИТЕ ПРОЦЕСИ В РЕЗОНАНСЕН LLC DC/DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С КАПАЦИТИВЕН ИЗХОДЕН ФИЛТЪР ПО МЕТОДА НА ФАЗОВАТА РАВНИНА**

**B.4.5. Vuchev, A. S., T. G. Grigorova, "A Study of the Boundary Modes of an LLC DC/DC Converter Operating above Resonant Frequency," 2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2020, pp.1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305102/ Scopus / WoS**

Приложението на метода на основния хармоник за анализ на електромагнитните процеси в резонансния LLC DC/DC преобразувател с капацитивен изходен филтър, се характеризира с удовлетворителна за практиката точност, обикновено в областта на големите натоварвания на преобразувателя. С намаляване на натоварването относителните грешки при прилагането на метода на първия хармоник могат да бъдат значителни.

Целта на настоящата работа е анализирането на работата на LLC DC/DC преобразувателя, работещ при честоти по-високи от резонансната, в граничните режими на празен ход и късо съединение, с помощта на метода на фазовата равнина. Методът нагледно описва измененията, едновременно, на тока в резонансната верига и следователно на тока през транзисторите и диодите, напрежението върху кондензатора и електрическата енергия, съхранявана в резонансната верига. Променливите на състоянието са нормализираните напрежение  $u'_{Cs}$  върху кондензатора  $C_S$  и ток  $i'_{Ls}$  през последователната индуктивност  $L_S$ . Работата на преобразувателя е илюстрирана още с траекторията на изобразяващата точка във фазовата равнина ( $x=U'_{Cs}, y=I'_{Ls}$ ).

Описани са електромагнитните процеси във всеки един работен интервал. Изведени са аналитични нормализирани зависимости, чрез които се определят големината на изходното напрежение при празен ход и големината на изходния ток при късо съединение. Представените

зависимости са сведени до въздействието на отношението между паралелната и последователната индуктивности и честотния коефициент  $\nu$ , аналогично на подхода при анализа по метода на първия хармоник. Представени са сравнителни данни от изчислени и симулационни резултати. Забелязва се много добро съвпадение между тях, като относителната грешка е в рамките на 1-6%.

**V.4.6. Vuchev, A. S., T. G. Grigorova, "State Plane Analysis of an LLC DC-DC Converter Operating above the Resonant Frequency," 2021 12th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513704. / Scopus**

Основен проблем при прилагането на метода на фазовата равнина за анализ на резонансни преобразуватели е определянето на началните условия на диференциалните уравнения, описващи процесите в резонансната верига. В някои случаи, решението се търси чрез изчисления, а в други аналитично. В настоящата статия е предложен математически анализ на електромагнитните процеси в резонансен LLC DC/DC преобразувател, работещ при честоти по-високи от резонансната, основан на метода на фазовата равнина. Изведени са изрази за определяне на началните условия на диференциалните уравнения, моделиращи процесите в натрупващата верига на резонансния LLC DC/DC преобразувател. Получените зависимости могат да се използват при изчисляването на токовете през силовите прибори и изходната верига. Тези резултати са от особена важност, както за изследването на поведението на преобразувателя, така и за неговото проектиране.

**V.4.7. Grigorova, T. G., A. S. Vuchev, "Output and Control Characteristics of an LLC DC-DC Converter Operating above Resonant Frequency based on State Plane Analysis," 2021 12th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513660. / Scopus**

В настоящата статия се извеждат аналитични зависимости, основани на анализа по метода на фазовата равнина, на основни величини, от които зависи изборът на елементите при проектирането на LLC DC/DC преобразувателя, изходната и регулировъчната характеристики. Разработеният математически анализ, описва работата на схемата при честоти по-високи от резонансната. Изведена е аналитичната зависимост за изходните характеристики на преобразувателя като функция на честотния коефициент  $\nu$  и отношението между индуктивностите  $a$ . В графичен вид са представени нормализираните изходни характеристики при параметър отношението между индуктивностите ( $a=1$ ,  $a=3$  и  $a=10$ ) за различни стойности на честотния коефициент  $\nu$ . На същите фигури с пунктирани линии са показани изходните характеристиките, получени чрез метода на първата хармонична, обсъден в [B.4.2]. Доказва се, че при малко натоварване относителните грешки при дефинирането на изходните характеристики, чрез метода на първата хармонична, са значителни. Представен е сравнителен анализ и на нормализираните характеристики на изходната мощност при различни стойности на честотния коефициент  $\nu$ , получени по метода на фазовата равнина и по метода на първата хармонична. И в този случай относителните грешки между характеристиките, получени по двата метода, са значителни при малко натоварване.

Същият подход е приложен и по отношение на регулировъчните характеристики. Графично са представени нормализираните регулировъчни характеристики, изведени чрез двата метода, при параметър отношението между индуктивностите. Доказва, че с увеличаване на стойността на товара разликата между характеристиките, получени по двата метода става значителна.

В статията се представят получените, при прилагането на метода на фазовата равнина, нормализирани аналитични зависимости за средната стойност на тока през транзисторите и през антипаралелните диоди. Въз основа на тях са построени нормализирани зависимости на тези величини като функция на изходния ток при стойности на отношението между

индуктивностите  $a=3$  и  $a=10$  за различни стойности на честотния коефициент. Представен е анализ на получените резултати.

**B.4.8. Grigorova, T., A. Vuchev and S. Vuchev, "A Design Methodology for an LLC DC-DC Converter Operating above the Resonant Frequency," 2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET52713.2021.9579695. / Scopus**

Целта на настоящата статия е разработването на методика за проектиране на резонансен LLC DC/DC преобразувател, базирана на прецизния анализ на електромагнитните процеси в схемата, използващ метода на фазовата равнина. Преобразувателят работи при честоти по-високи от основната резонансна честота, а регулирането на изходната мощност се осъществява чрез промяна на управляващата честота.

Разработваната инженерна методика за проектиране на LLC преобразувателя се основава на следните входни параметри: изходната мощност, изходното напрежение и работната честота. Изведени са аналитични нормализирани зависимости за максималната стойност на тока през транзисторите и максималната стойност на напрежението върху последователния кондензатор. Спецификата на предложеното проектиране е изборът на честотния коефициент и отношението между индуктивностите, като преобразувателят работи в точката с максимална изходна мощност, аналогично на подхода, използван при съставяне на методиката за проектиране, основана на анализа по метода на основния хармоник. Представени са аналитични изрази, чрез които се изчисляват стойностите на последователния кондензатор, последователната и паралелната индуктивности. Обсъден е алгоритъмът на проектирането.

Въз основа на регулировъчните характеристики на преобразувателя, за режим на работа при честоти по-високи от резонансната честота, се обсъжда влиянието на отношението между индуктивностите върху работа на схемата. При малки стойности, изходното напрежение е по-чувствително към изменението на честота. По-големите стойности на отношението между индуктивностите водят до увеличаване на индуктивността на намагнитване на трансформатора. Като следствие се създава по-малък ток на намагнитване в първичната намотка на трансформатора, което води до по-малки загуби от намагнитване. От друга страна, при големи стойности на индуктивността на намагнитване, може се наруши режимът на комутация при нулево напрежение при празен ход. Обикновено се препоръчва да се работи при отношението между индуктивностите  $a = 3 \div 10$ .

С изчислените елементи е проектиран мостов LLC DC/DC преобразувател и са проведени симулационни изследвания, посредством симулатора *OrCad PSpice*, които потвърждават с много висока точност направеното проектиране, като относителната грешка е в границите 1-2%. Разликите са основно от моделите на използваните полупроводникови елементи и наличието на защитни кондензатори в симулационната схема.

**B.4.9. Vuchev, A. S., T. Gr. Grigorova and S. A. Vuchev, "RMS Current Values in an LLC DC-DC Converter Operating above the Resonant Frequency," 2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET52713.2021.9579989. / Scopus**

В настоящата статия е представен алгоритъм, основан на метода на фазовата равнина, за извеждането на аналитични изрази за ефективните стойности на токовете през елементите във веригата на резонансния LLC DC/DC преобразувател при работа с надрезонансна честота. Това ще подпомогне в пълна степен проектирането, както и определянето на ефективността на тези преобразуватели. В графичен вид са представени нормализираните зависимости на ефективната стойност на тока през индуктивността в последователния клон на резонансната верига като функция на изходния ток, получени за една и съща работна честота, но за различни отношения между индуктивностите ( $a=1$ ,  $a=3$  и  $a=10$ ). Въз основа на тези характеристики се доказва, че ефективната стойност на тока нараства с намаляване на отношението между индуктивностите. Този ефект е най-силно изразен при празен ход. С увеличаване на

ефективната стойност на тока през последователната индуктивност, натоварването по-слабо зависи от отношението между индуктивностите.

Графично са представени и зависимостите за ефективната стойност на тока през индуктивността в паралелния клон. Те са получени при същите условия като тези за ефективната стойност на тока през последователната индуктивност. И в този случай се показва, че ефективната стойност на тока нараства с намаляване на отношението между индуктивностите. Най-големите разлики се наблюдават при празен ход.

Изследвано е и влиянието на работната честота върху ефективните стойности на тока през последователната и паралелната индуктивности, като са илюстрирани нормализираните характеристики при параметър отношението между индуктивностите. Забелязва се отчетлива разлика между характеристиките, не само за празен ход, но и при натоварване. Може да се обобщи, че ефективните стойности на токовете през двете индуктивности нарастват при намаляване на отношението между индуктивностите и работната честота. Този извод дава насоки за възможните варианти за намаляване на загубите в тези елементи.

Аналогично, в графичен вид, са представени зависимостите за ефективните стойности на токовете през двата клона на натрупващата верига и товара, но получени за една и съща работна честота, при две различни стойности на отношението между индуктивностите. На същите фигури са дадени резултатите от компютърни симулации. Въз основа на анализа на графиките се показва, че при празен ход, ефективната стойност на тока през товара не е нула особено, когато съотношението между индуктивностите е малко. Освен това токовете през последователния и паралелния клон не са равни помежду си. Това несъответствие е резултат от допускането, че токът на входа на изправителя е непрекъснат. Всъщност, близо до режима на празен ход това не е така поради действието на капацитивния изходен филтър. Представените теоретичните резултати много точно съвпадат с тези от компютърни симулации. Различията, които се наблюдават в близост до режима на празен ход, намаляват при намаляване на отношението между индуктивностите.

Представени са и зависимости на ефективните стойности на токовете през транзисторите и диодите в схемата на преобразувателя. Те са получени за една и съща работна честота, но за две различни отношения между индуктивностите. Получените резултати са сравнени с такива от компютърни симулации. Наблюдава се много добро съвпадение, което потвърждава точността на теоретичното изследване.

**B.4.10. Grigorova, T., A. Vuchev and S. Vuchev, "Loss Power Investigation in an LLC DC-DC Converter Operating Above the Resonant Frequency," 2021 29th National Conference with International Participation (TELECOM), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 141-144, doi: 10.1109/TELECOM53156.2021.9659714. / Scopus/ WoS**

Известно е, че при работа на честоти по-високи от резонансната транзисторите в инверторната част на схемата на резонансния LLC DC/DC преобразувател работят в режим на мека комутация при нулево напрежение – ZVS, а елементите във вторичния токоизправител превключват при нулев ток – ZCS. Това обстоятелство осигурява много ниски загуби при превключване на ключовите елементи. В резултат на това, основните загуби в ключовите елементи се явяват загубите при провеждане.

Целта на представените изследвания е анализ на загубите при провеждане в ключовите елементи в схемата на мостов LLC DC/DC преобразувател. Математическият анализ се базира на метода на фазовата равнина, като се разглежда работа при честоти по-високи от резонансната. Изследването е направено при различни работни честоти и промяна на товара от празен ход до късо съединение. Тъй като схемата работи при честоти по-високи от резонансната и се осъществява комутация при нулево напрежение, загубите в транзистора, които се взимат под внимание са загубите при провеждане и загубите при изключване. В графичен вид са показани нормализираните зависимости на загубите при провеждане в транзистор, антипаралелен диод и в диод от изправителя във вторичната страна на схемата, при едно и също отношение между индуктивностите, но различни работни честоти ( $v=1,15,$



$v=1,3$  и  $v=1,5$ ). Обсъдено е влиянието им върху общите загуби в схемата, без да се отчитат загубите в управляващата верига на транзистора.

В съответствие с изследванията, представени в [B.4.8] е проектирана схема на мостов LLC преобразувател при номинална работна точка, която съответства на максимума на зависимостта на изходната мощност от изходния ток. По така получените проектни данни, в средата на *OrCAD Pspice* е създаден модел. С негова помощ са проведени изследвания за определяне на загубите на мощност в отделните ключови елементи и на к.п.д. на схемата при различни стойности на натоварването на преобразувателя, различни стойности на отношението между индуктивностите и на честотното отношение  $v$ . Представени са, в графичен вид, сравнителни резултати от направените аналитични изчисления и резултатите, получени от компютърните симулации на нормализираните зависимости на загубите при провеждане на: транзистор; антипаралелен диод; диод от изправителя при отношение между индуктивностите  $a=3$  за различни работни честоти ( $v=1,15$ ,  $v=1,3$  и  $v=1,5$ ). От анализа на графиките следва, че влиянието на загубите при провеждане в диодите в изправителя е съществено. Тези загуби са преобладаващи спрямо загубите в транзисторите и антипаралелните диоди, независимо от работните честоти. Направени са препоръки за подобряване на ефективността на LLC топологията. Изчислена е ефективността на проектирания LLC DC/DC преобразувател. Илюстрирано е изменението на к.п.д. на схемата в зависимост от натоварването на преобразувателя. Представените сравнителни резултати между теоретичните изчисления и тези от симулационните изследвания показват много добро съвпадение на резултатите от двете проучвания. За номинален режим к.п.д. е сравнително висок – над 93% (при използваната елементна база).

**B.4.11.** Vuchev, A., T. Grigorova and S. Vuchev, "Analysis of Continuous Current Mode of an LLC Resonant DC-DC Converter at ZVS," 2022 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA55578.2022.9874422 / Scopus

В публикацията е извършен теоретичен анализ на резонансен LLC DC/DC преобразувател, работещ в режим на непрекъснат ток с превключване при нулево напрежение (ZVS). На базата на моделиране на процесите в натрупващата верига, чрез диференциални уравнения, са получени изрази за основните величини, както за понижаващ, така и за повишаващ режим. Изведени са аналитични зависимости, чрез които се определят условията за преминаване към режим на прекъснат ток. Дефинирана е границата на областта на работа, осигуряваща комутация при нулево напрежение (ZVS). Построени са графично изходни характеристики на преобразувателя при различни стойности на параметрите на веригата и управлението.

Използвайки представените зависимости, са изчислени стойности за графичното изобразяване на изходните характеристики на преобразувателя при режим на непрекъснат ток (CCM) за различни стойности на отношението между индуктивностите ( $a = 1$  и  $a = 3$ ). Показани са зависимостите, получени за работа при честоти по-високи и по-ниски от резонансната честота. Дадена е ZVS-ZCS границата. Тя е налична само за работа под резонансната честота. Представена е и границата между режим на непрекъснат ток (CCM) и режим на прекъснат ток (DCM).

Анализът на представените графични резултати показва, че за някакъв диапазон на изменение на изходния ток, границата между режим на непрекъснат ток и режим на прекъснат ток съвпада с тази, определяща работата под и над резонансната честота. При работа над резонансната честота нормализираното изходно напрежение винаги е по-ниско от захранващото. Обратно, когато работната честота е по-ниска от резонансната, изходното напрежение е по-високо от входното. С нарастване на отношението между индуктивностите, областта на режима на прекъснат ток (DCM) при работа над резонансната честота намалява. При това за едно и също отношение между честотите изходното напрежение се увеличава. За работа под резонансната честота и увеличаване на отношението между индуктивностите намаляват областите и на режима на прекъснат ток (DCM) и особено на режим на непрекъснат

ток (CCM). Това се дължи главно на изместването на ZVS-ZCS границата към ординатната ос (към по-ниските стойности на изходния ток). Може да се очаква, че при достатъчно голямо съотношение между индуктивностите областта на режим на непрекъснат ток е пренебрежимо малка. Получените резултати могат да послужат и за други изследвания, отнасящи се до LLC преобразуватели.

#### **B.4.12. Grigorova, T., A. Vuchev, "LLC Resonant Converter as a Current Source Using Simple Trajectory Control". Energies 2023, 16 (12), 4629. <https://doi.org/10.3390/en16124629> Scopus / WoS - Q1/ IF=3.2**

Голяма част от свойствата и характеристиките на резонансните LLC DC/DC преобразуватели се определят от използвания метод за управлението им. Методът на оптимално управление на траекторията, основан на метода на фазовата равнина, може да осигури много бърза динамична реакция за последователно-резонансните DC/DC преобразуватели. В схемата на LLC преобразувателя, поради увеличения брой променливи на състоянието и режими на работа, това управление е по-сложно за реализиране. Управлението по оптимална траектория има редица предимства в сравнение с другите методи за управление: намаляване на пренапреженията на реактивните и ключовите елементи в схемата и бърза динамична реакция в случаи на големи промени в работните условия на преобразувателя, без въздействие върху стабилността на цялата система. Като недостатък на метода, може да се посочи и необходимостта от изчисляването в реално време на една нелинейна функция, определяща цялата енергия, натрупана в резонансната верига.

В настоящата статия се предлага и изследва опростено управление на резонансен LLC DC/DC преобразувател, който има поведение, подобно на този с оптимално управление на работната траектория. Значителното опростяване на управлението се дължи главно на линеаризацията на управляващата функция, основана на линейна комбинация от напрежението върху кондензатора и тока през индуктивността в последователната резонансна верига. Освен това силовите транзистори се превключват при нулево напрежение. Извършеният теоретичен анализ показва, че управлението на преобразувателя осигурява линейни регулиращи характеристики и има характеристика на източник на ток, стабилен при късо съединение. При късо съединение преобразувателят остава работоспособен, а стойността на изходния ток не зависи от отношението между индуктивностите, тъй като паралелната индуктивност не може да окаже влияние. По този начин се потвърждава поведението на LLC резонансния преобразувател, подобно на управлението по оптимална траектория, но с използване на по-проста реализация.

Изведени са нормализирани изходни, регулировъчни и товарни характеристики при управление чрез опростения метод и работа с честоти по-високи от последователната резонансна честота. Получените товарни характеристики показват основните изисквания към елементите на преобразувателя, необходими за тяхното проектиране. Дефинирани са границите, до които е валиден разглежданият метод за управление по траектория. Границата на устойчивост на изходните характеристики очертава теоретична възможност, при която нормализираното изходно напрежение достига относително висока стойност ( $\approx 0.8$ ) при значителна промяна на управляващия параметър  $Ref$ . Освен това напрежението се увеличава незначително, когато отношението между индуктивностите намалява. Площта на режима на прекъснат ток се увеличава при намаляване на стойността на отношението между индуктивностите.

Регулировъчните характеристики за зависимостта на нормализирания изходен ток като функция на управляващия параметър  $Ref$  ( $I'_0(Ref)$ ) са близки до линейните за стойности на управляващия параметър  $Ref \geq 1$ . Въз основа на табличните резултати за стойностите на динамичното усилване  $\Delta I'_0/\Delta Ref$  може да се заключи, че при ниски стойности на нормализираното изходно напрежение ( $V'_0=0.1\div 0.3$ ) регулировъчните характеристики практически съвпадат, независимо от големината на отношението между индуктивностите. При високи стойности на нормализираното изходно напрежение ( $V'_0=0.6\div 0.7$ ) разликите

между регулировъчните характеристики при съотношения на индуктивност  $a = 3$  и  $a = \infty$  (последователен резонансен DC/DC преобразувател) са незначителни (0.01–0.02), докато тези, получени при съотношение на индуктивностите  $a = 1$ , се отклоняват значително (0.04 – 0.08).

Що се отнася до нормализираните зависимости на средната стойност на входния ток от изходния ток, то (показанието е взето от границата на устойчивост) при промяна на параметъра  $Ref$  от 3.5 на 5.0 изходната мощност в относителни единици се увеличава приблизително 1.49 пъти за  $a = 1$ . Съответно за  $a = 3$  това увеличение е 1.41 пъти, а за  $a = \infty$  (последователен DC/DC преобразувател) приблизително 1.39 пъти. Следователно дори при ниски стойности на отношението между индуктивностите разглежданата схема има много близки свойства до тези на последователен резонансен преобразувател.

Представен е функционален модел на LLC DC/DC преобразувателя, управляван по разглеждания метод, реализиран чрез принципа на аналоговото моделиране на поведението (Analog Behavioral Modeling), заложен в симулатора *PSpice for TI*. Предложеният функционален модел на системата за управление на преобразувателя съдържа минимален брой елементи и се настройва лесно. Проведено е симулационно изследване на действието на преобразувателя, както в установен режим, така и при значима промяна на регулиращия параметър. Реализираните, чрез модела, изследвания потвърждават, че предлаганата управляваща техника осигурява бърза динамична реакция и устойчиво действие на преобразувателя дори при значително изменение на управляващия параметър.

Сравнението между теоретичните и симулационните резултати на изходните характеристики показва относителна грешка в рамките на 2 %. По-значителни разлики (около 3 %) се наблюдават за малки стойности на управляващия параметър  $Ref$ . По отношение на сравнението между теоретичните и симулационните резултати на регулировъчните характеристики  $\Gamma_0(Ref)$  може да се посочи, че отклоненията между тях не надвишават 2 %. И тук по-значителни разлики се наблюдават при малки стойности на управляващия параметър  $Ref$ . Наблюдава се тенденция на нарастване на относителната грешка с приближаването към нулата.

Също така, изчисляването на стойността на напрежението, приложено към кондензатора на последователната резонансна верига, би било много удобно при прилагането на разглеждания метод за управление към някои полумостови вериги. Освен това използването само на едно измерване е предпоставка за повишаване на надеждността на предложеното решение. Извършените изследвания с помощта на модела потвърждават, че опростената техника за управление осигурява бърза динамична реакция и стабилна работа при промяна на управляващия параметър. Следователно, преобразувателят може успешно да се използва като устройство за зареждане на батерии.

### **III. РЕЗЮМЕТА НА НАУЧНИ ТРУДОВЕ, ИЗВЪН ВКЛЮЧЕНИТЕ В РАВНОСТОЙНИ НА МОНОГРАФИЧНИЯ ТРУД**

**Представените, в конкурса, публикации се отнасят до показатели:**

- Група Г.7. Научни публикации в издания, които са реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация;
- Група Г.8. Научни публикации в нереферирани списания с научно рецензиране или в редактирани колективни трудове;
- Група З.31. Научни публикации в списания с импакт фактор (IF на Web of Science) и/или с импакт ранг (SJR на Scopus).

Изследванията в публикациите, извън включените в равностойни на монографичния труд, са насочени в следните тематични направления:

1. Анализ, изследване и моделиране на резонансен LLC DC/DC преобразувател при фазов метод на регулиране – публикации [Г.7.1], [Г.7.2], [Г.7.3], [Г.7.4] и [Г.7.5].

2. Изследване на алгоритми за управление на реверсируем преобразувател, захранващ превключваем реактивен двигател в двигателен и генераторен режим на работа с отчитане на факторите загуби на мощност и ефективност, пулсации на въртящ момент – публикации [Г.7.7], [Г.7.8], [Г.7.9], [Г.7.10], [3.31.2], [Г.7.11], [Г.7.12] и [Г.7.13].
3. Обогаляване (доразвитие) на съществуващите знания за различни видове преобразуватели на електрическа енергия – публикации [Г.7.19], [Г.7.6], [Г.8.1], [Г.8.2], [Г.8.3], [Г.8.4], [Г.7.14], [Г.7.16], [Г.7.17] и [3.31.3].
4. Анализ и изследване на видове модуляции в преобразувател за управление на безчетков двигател (BLDC) – публикации [Г.8.9], [Г.8.10] и [Г.8.11].
5. Изследване и въвеждане на нови методи и развойни средства за обучение в областта на силовата електроника – публикации [Г.7.15], [Г.7.18], [Г.8.5], [Г.8.6], [Г.8.7] и [Г.8.8].
6. Създаване на математически методики и алгоритми за изследване и проектиране на оптични комуникационни системи с открита преносна среда – публикации [Г.7.20] и [Г.8.12].
7. Създаване на нов уред за акустично и визуално демонстриране на корпускулярната природа на светлината – публикация [3.31.1].

### **III.1. АНАЛИЗ, ИЗСЛЕДВАНЕ И МОДЕЛИРАНЕ НА РЕЗОНАНСЕН LLC DC/DC ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ ПРИ ФАЗОВ МЕТОД НА РЕГУЛИРАНЕ**

**Г.7.1. Grigorova, T., A. Vuchev, "A Study of a Phase-Shifted Full-Bridge LLC Resonant Converter Operating in Continuous Conduction Mode with ZVS," 2022 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ELECTRONICA55578.2022.9874435./ Scopus**

Един от методите за регулиране на изходното напрежение, приложим в схемите на резонансни преобразуватели, е методът на фазово регулиране на изходната мощност. При този метод, с изменение на натоварването, се налага промяна на механизмите на естествена комутация на силовите ключове на преобразувателя. Целта на настоящата статия е да се изследват и анализират комутационните механизми, които възникват при регулиране на изходното напрежение в резонансен LLC DC/DC преобразувател при прилагане на метода на фазово управление (подходящо дефазирание на управляващите импулси на силовите транзистори). Използвана е съпоставка с комутационните механизми при фазово управление на последователен DC/DC преобразувател. За режима на работа при честоти по-високи от резонансната честота, се дефинират следните режими по отношение на тока на входа на изправителя: режим на непрекъснат ток (условно означени с MODE I и MODE II) и режим на прекъснат ток (условно означен с MODE III). Изследването и анализирането на работата на преобразувателя в режим на непрекъснат ток MODE I показва, че всички транзистори в инверторната част на схемата се комутират при нулево напрежение (ZVS).

Показано е, че във втория режим на непрекъснат ток, MODE II, е възможно условията за комутация при нулево напрежение при включване на транзисторите да се запазят и за четирите транзистора в схемата. Това зависи от различни параметри като: отношението между индуктивностите, ъгъла на дефазирание  $\alpha$  между работните интервали на двойките транзистори от двете рамена на моста, стойността на товара (или качествения фактор) и честотния коефициент  $v$ . Представени са резултати от симулационно изследване, които потвърждават направените теоретични разглеждания. Като бъдеща задача се поставя определянето на условията, при които схемата може да работи в изследваните режими.

**Г.7.2. Vuchev, A., T. Grigorova,** "A Study of a Phase-Shifted Full-Bridge LLC Resonant Converter Operating at ZVS/ZCS," 2022 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ELECTRONICA55578.2022.9874367. /Scopus

Целта на настоящата статия е изследването на комутационните механизми, които възникват при фазово управление на LLC DC/DC преобразувател, вследствие от промените в товара, в режимите с комутация при нулеви напрежение и ток (ZVS/ZCS). Разглежда се работата на преобразувателя при честоти по-високи от резонансната честота.

В зависимост от стойността на параметрите отношение между индуктивностите, ъгъл на дефазирание  $\alpha$  между работните интервали на двойките транзистори от двете рамена на моста, стойността на товара (или качественият фактор) и честотен коефициент, във втория режим на непрекъснат ток, MODE II, условията за комутация при нулево напрежение при включване на транзисторите се получават само за транзисторите от „изпреварващото рамо“, докато за транзисторите от „изоставащото рамо“ се получава комутация при нулев ток (ZCS). Обсъден е и третият режим на работа, MODE III, дефиниран като режим на прекъснат ток по отношение на изправителя и са разгледани възникващите комутационните механизми. Показано е, че при определени условия комутацията при нулево напрежение за четирите транзистора е възможна. Трябва да се отбележи, че при по-големи ъгли на регулиране  $\alpha$  и по-малко натоварване (за дадено отношение между индуктивностите и честотен коефициент), условията за комутация при нулево напрежение за транзисторите от двете рамена на моста за MODE III може да бъдат нарушени. Получава се комутационен механизъм като в класическия последователен DC/DC преобразувател. Теоретичните резултати са подкрепени от симулационни изследвания.

**Г.7.3. Grigorova, T., A. Vuchev and S. Vuchev,** "Basic Dependencies of a Phase-Shift Controlled LLC DC-DC Converter at Continuous Current Mode," 2022 XXXI International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET55967.2022.9920305. / Scopus

Целта на настоящата статия е да се извърши аналитично изследване на електромагнитните процеси в LLC DC/DC преобразувател при фазов метод на регулиране и работа в режим на непрекъснат ток. Изведени са аналитични нормализирани зависимости за основни величини, описващи състоянието на трептящия кръг. Представени са изрази, дефиниращи граничните условия за преминаване между работните режими MODE I и MODE II, както и преминаването между режим на непрекъснат ток и режим на прекъснат ток. С помощта на така получените зависимости могат да се представят графично изходните характеристики на преобразувателя, както и да се определят токовете на комутация на транзисторите и диодите в отделните етапи от работата на схемата. За проверка на работа на преобразувателя в режим на непрекъснат ток, MODE II, и съответните комутационни механизми, е реализиран симулационен модел в средата на *PSpice*. Показаните симулационни резултати потвърждават извода от теоретичния анализ, че за режим MODE II при ниски стойности на управляващия ъгъл и четирите транзистора на инверторния мост превключват при нулево напрежение. При увеличаване на ъгъла на дефазирание, обаче, транзисторите от „изоставащото рамо“ се превключват при нулев ток.

Получените резултати ще бъдат полезни, както за продължаване на изследването на свойствата на LLC преобразувателите, управлявани чрез метода на фазовото регулиране, така и за тяхното цялостно проектиране.

**Г.7.4. Vuchev, A. S., T. G. Grigorova and S. Vuchev,** "Output Characteristics for Continuous Current Mode of a Phase-Shift Controlled LLC DC-DC Converter," 2022 XXXI International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET55967.2022.9920282. / Scopus

Целта на представените изследвания е да се изследва работата на резонансен LLC DC/DC преобразувател при фазов метод на регулиране на базата на изходните характеристики на схемата. Разгледан е основно режимът на непрекъснат ток на входа на токоизправителя. Изследването е проведено при различни отношения между индуктивностите в паралелния и последователния клон на натрупващата верига. Получените резултати могат да се обобщят по следния начин: качествата на изследваната схема са много близки до тези на последователен резонансен DC/DC преобразувател при фазов метод на регулиране. Следователно те се определят основно от прилагания метод за управление. При намаляване на отношението между индуктивностите се намалява зоната на комутация при нулев ток (ZCS). Така, в диапазона на малките стойности на ъгъла на управление, всички транзистори на инвертора превключват при нулево напрежение. Това обаче води до увеличаване на областта на режима на работа при прекъснат ток на входа на токоизправителя.

Получените резултати са основа за бъдещи изследвания, както и за целите на проектирането на фазово управлявани LLC DC/DC преобразуватели.

**Г.7.5. Grigorova, T. G. and A. S. Vuchev, "Modeling and Simulation of a Phase-Shift Controlled LLC Resonant Converter," 2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET59121.2023.10278726./ Scopus / WoS**

Цел на симулационното моделиране е изследването на работните режими в резонансен LLC DC/DC преобразувател при фазов метод на регулиране, работещ при честоти по-високи от резонансната. Анализирана е работата на схемата при различни ъгли на регулиране, различни натоварвания и отношения между паралелната и последователната индуктивности. Обсъждат се изходните характеристики, получени в резултат от симулациите и тяхната съпоставка с теоретичните резултати за стойности  $a = 3$  и  $a = 5$ . Анализира се влиянието на еквивалентните капацитети (изходен капацитет на MOS-транзистор и външен защитен кондензатор) на транзисторите върху комутационните механизми в инверторната част от схемата.

Изследвано е влиянието на различни параметри върху условията за регулирането на изходната мощност при запазване на условията за комутация при нулево напрежение (ZVS) на транзисторите в „изоставащото рамо“. Посредством симулатора *OrCad PSpice* са реализирани симулации за режим на непрекъснат ток. Наблюдава се добро съвпадение между теоретичните и симулационни резултати.

## **III.2. ИЗСЛЕДВАНЕ НА АЛГОРИТМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА РЕВЕРСИРУЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ, ЗАХРАНВАЩ ПРЕВКЛЮЧВАЕМ РЕАКТИВЕН ДВИГАТЕЛ В ДВИГАТЕЛЕН И ГЕНЕРАТОРЕН РЕЖИМ НА РАБОТА С ОТЧИТАНЕ НА ФАКТОРИТЕ ЗАГУБИ НА МОЩНОСТ И ЕФЕКТИВНОСТ, ПУЛСАЦИИ НА ВЪРТЯЩ МОМЕНТ**

**Г.7.7. Yankov, D. K., T. Gr. Grigorova and E. I. Dinkov, "Modeling of a Tree-Phase 12/8 Pole Switched Reluctance Motor in MATLAB", 28th International Scientific Conference Electronics, ET 2019 - Proceedings, art. no. 8878654, doi: 10.1109/ET.2019.8878654, ISBN: 9781728125749 /Scopus / WoS**

В последните години вниманието на специалистите в индустриалната автоматизация е насочено към използването на електрозадвижвания с превключваем реактивен двигател (Switched reluctance motor (SRM)). Моделирането на превключваемия реактивен двигател (ПРД) е не лека задача, поради нелинейния характер на процесите в него. Основният мощен инструмент за симулиране на този вид двигател е средата MATLAB/Simulink. Вградените, в средата MATLAB/Simulink, модели на двигатели, са за тип 6/4, 8/6 и 10/8.

Целта на представените изследвания в настоящата статия е да се синтезира линеен модел на трифазен, 12/8 ПРД (H55BMBJL) в средата MATLAB. Използват се уравнения, които определят динамичното поведение на линеен индуктивен профил на ПРД. Описан е алгоритъмът и са дадени зависимостите за синтезирането на модела на трифазния, 12/8 ПРД в средата MATLAB. С помощта на разгледания модел е симулирана схема на асиметричен

преобразувател при едноимпулсна комутация за напреженов алгоритъм и двуполярна модулация за хистерезисно-токов алгоритъм на работа. Въз основа на разгледаната методика за синтезиране на линеен модел на ПРД, потребителят може да състави свой собствен специфичен модел, въз основа на каталожни данни за двигателя. Точността на модела е доказана с резултатите от симулацията.

**Г.7.8.** Yankov, D., **T. Grigorova** and E. Dinkov, "A Power Loss Analysis of a Three-Phase 12/8 Switched Reluctance Motor Fed from Asymmetric Power Converter in MATLAB/SIMULINK," 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA49118.2020.9167113/ **Scopus / WoS**

В настоящата статия се анализират загубите на мощност в силовата схема на асиметричния мостов преобразувател, захранващ трифазен 12/8 превключваем реактивен двигател (ПРД). Като силови транзистори са избрани IGBT. При отчитането на загубите в преобразувателя се взимат под внимание основно загубите при провеждане на транзисторите и диодите, и динамичните загуби при комутацията на ключовите елементи. Изследването е направено при прилагане на еднополярна и двуполярна модулация за управление на транзисторите.

Превключваемият реактивен двигател представлява сложна система за анализ. Изчисляването на динамичните загуби в полупроводниковите ключови елементи, изграждащи асиметричния преобразувател се осъществява чрез средата MATLAB/Simulink, като зависимостите за изчисляване на загубите на енергия при включване на IGBT и загубите на енергия при изключване са имплементирани като подсхема. Същият подход е приложен и за изчисляването на загубите в диодите. Анализирани са загубите на мощност в силовите ключове, последователно, при двуполярна и еднополярна модулация. Параметрите, чието влияние се изследва при тези модуляции са скоростта на ротора, ъгълът на включване и ъгълът на изключване.

При двуполярна модулация са представени, в графичен вид, аналитичните и симулационни резултати на загубите при провеждане на транзистор (в едното рамо на преобразувателя) в зависимост от промяната на: скоростта на ротора и ъглите на включване и изключване на двигателя. При еднополярна модулация са представени графичните зависимости на загубите при: провеждане, включване и изключване и общите загуби на модулирания транзистор (в едното рамо на преобразувателя) в зависимост от промяната на: скоростта на ротора; ъгъла на включване, честотата на комутация и коефициента на запълване, получени в резултат от симулационното изследване. Извършен е анализ на получените резултати.

**Г.7.9.** Yankov, D. K., **T. G. Grigorova**, "Analysis and Investigation of an Asymmetric Bridge Converter for a Three-Phase 12/8 SRM in Generating Mode," 2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305153 / **Scopus / WoS**

Асиметричната схема, използвана за задвижване на превключваем реактивен двигател (ПРД), притежава редица предимства, които обхващат аспекти като фазова независимост, позволяваща максимална гъвкавост по отношение на управлението, време на превключване, брой на захранващите устройства, разходи, загуби, производителност и др. По отношение на пулсациите на момента, те са по-ниски в сравнение със схемата с  $(m+1)$ -ключа и по-високи от тези при C-dump схемата. Настоящата статия е посветена на анализирането и изследването на асиметричен преобразувател, захранващ трифазен 12/8 ПРД в генераторен режим. В генераторен режим се прави една абстракция, при която асиметричният преобразувател се разглежда като повишаващ трансформатор с коефициент на предаване  $G$  - първичната страна на трансформатора е захранвана от е.д.н-то на машината, а изходното напрежение на вторичната страна е функция на коефициента на запълване на транзисторите, изграждащи асиметричния преобразувател. Изведена е аналитична зависимост, представяща коефициента на предаване  $G$ . Направените изследвания са свързани с изясняване на условията, при които

се постига максимално връщане на енергия за зареждане на акумулаторната батерия. Получените аналитични резултати са потвърдени симулационно с помощта на средата MATLAB/Simulink.

**Г.7.10.** Yankov, D., **T. Grigorova**, Al. Pavlova, "A study of energy recovery in an asymmetric bridge converter for a three-phase 12/8 SRM in generating mode", 10th International Scientific Conference "TECHSYS 2021" - Engineering, Technologies and Systems, Plovdiv, Bulgaria, AIP Conference Proceedings 1 September 2022; 2449 (1): 030003., <https://doi.org/10.1063/5.0090678/> **Scopus /WoS, SJR=0.164**

В настоящата работа, представеният в [Г.7.9] анализ е допълнен. Аналитичните и симулационни изследвания, представени в тази статия са резултат от изследване на асиметричен мостов преобразувател, използван за управление на трифазен превключваем реактивен двигател от тип 12/8 при работата в генераторен режим. Взети са предвид силно нелинейните характеристики на използвания вид двигател. Извършените аналитични изчисления са свързани с определяне на най-подходящите параметри като ъгли на включване и изключване, коефициент на запълване на ШИМ модулацията и еквивалентно фазово съпротивление, за постигане на максимално връщане на енергия към хранящия източник (акумулаторна батерия). Изведена е аналитична зависимост, чрез която е дефиниран коефициентът на запълване, при който се постига максимален коефициент на преобразуване. Ефективността на предложения метод и получените аналитични резултати са верифицирани посредством средата MATLAB/Simulink.

**3.31.2.** D. K. Yankov and **T. G. Grigorova**, A nonlinear model for a three-phase 12/8 switched reluctance machine, International Journal of Power Electronics and Drive Systems, Open Access, Volume 13, Issue 3, Pages 1576 – 1587, September 2022/ **Q3, SJR=0.350, Scopus**

В статията е представена методология за изграждане на нелинеен модел на трифазен превключваем реактивен двигател (ПРД) тип 12/8. За изграждането на модела се използват двумерни таблици (Look-up Tables), получени посредством метода за анализ на крайните елементи FEM и програмния симулатор Infolytica Motorsolve. Математическият модел на ПРД е разделен на електрическа и механична част, като всяка част е описана със съответните зависимости. В структурата на представения нелинеен модел са включени и два допълнителни блока, чрез които се измерват и визуализират големината и формата на фазовата индуктивност и на противо-е.д.н. Чрез нелинейния модел е изследвана работата на двигателя при едноимпулсна модуляция в двигателен (I квадрант) и генераторен (II квадрант) режими. Получените симулационни резултати са представени под формата на осцилограми. Чрез проведен експеримент и реализирана едноимпулсна модуляция. Направено е сравнение между получените симулационни и експериментални резултати при работа на двигателя в I и II квадранти. Наблюдава се много добро съпадение между симулационните резултати на нелинейния модел и експеримента (относителната грешка е в диапазона 5-10%).

**Г.7.11.** Yankov, D., **T. Grigorova** and I. Maradzhiev, "Analytical and Simulation Study of the Power Losses of a Switched Reluctance Motor," 2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA58392.2023.10202259, Electronic ISBN:979-8-3503-1127-3 / **Scopus / WoS**

Статията представя аналитично и симулационно изследване на загубите на мощност в трифазен превключваем реактивен двигател (ПРД) тип 12/8. Извършен е подробен анализ на различни видове загуби в превключваемите реактивни двигатели и причините за тяхното възникване. Представени са уравненията за тяхното пресмятане и необходимите параметри. Структуриран е нелинеен модел на трифазен 12/8 SRM за средата MATLAB/Simulink, в който чрез допълнителни блокове се изчисляват и визуализират загуби в стоманата на двигателя, механични загуби на мощност от триене, електрически загуби в намотките на статора, общи



загуби в двигателя и др. Създаден е допълнителен потребителски интерфейс за задаване на необходимите входни параметри като: външен диаметър на статора, ширина на зъбите на статора, височина на магнитопровода на статора, височина на зъбите на статора, максимална индукция в зъбите на статора и др. Извършени са поредица от аналитични и симулационни изследвания на загубите в изследвания двигател. Предложеният подход за усъвършенстване на нелинейния модел на трифазен тип 12/8 ПРД модел (H55PWVKM-1844) се характеризира с редица предимства като: значително по-малък брой блокове, необходими за пресмятане на загубите на мощност, възможност за определяне на к.п.д. на машината и наличието на визуализация на всеки един вид загуби, както и ефективността на ПРД, даваща възможност на потребителя да следи във всеки един момент от време стойността им. Относителната грешка между получените аналитични и симулационни резултати е приемлива за инженерни пресмятания.

**Г.7.12.** Yankov, D., **T. Grigorova** and I. Maradzhiev, "Simulation and Experimental Study of Static Torque Characteristics of a 12/8 Three-Phase SRM," 2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA58392.2023.10202339, Electronic ISBN:979-8-3503-1127-3 / **Scopus / WoS**

Публикацията описва симулационно и експериментално изследване на статичните характеристики на въртящия момент на трифазен превключваем реактивен двигател (ПРД) от тип 12/8, захранван от асиметричен мостов преобразувател. Експериментално получените резултати за статичния въртящ момент са сравнени със симулационните изследвания по метода за анализ на крайните елементи (FEM) чрез програмния симулатор Infolytica MotorSolve. За провеждането на експеримента е използван макет, състоящ се от: трифазен ПРД от тип 12/8, енкодер за ъглово положение, тензотрични сензори и Arduino модул, базиран на микропроцесор ATmega2560.

За получаване на характеристиките на статичния момент се предлага техника с притегляне на силата на натиск посредством греди. Представеният метод за експериментално определяне на статичните характеристики на въртящия момент се характеризира със следните предимства: проста и надеждна конструкция, точност на измерването, възможност за визуализация на въртящия момент в графичен и числен вид и ниска цена. Относителната грешка между резултатите от симулацията, получени чрез метода на крайните елементи и експерименталните резултати е в рамките на 5 %. При провеждането на експеримента се забелязва появата на акустичен шум и вибрации при намагнитване на фазовата намотка на SRM в интервала от  $-17,5^\circ$  до  $-2,5^\circ$  и съответно от  $2,5^\circ$  до  $17,5^\circ$  механични градуса, които до голяма степен повлияха на точността на измерването.

**Г.7.13.** Yankov, D. K., **T. G. Grigorova** and I. P. Maradzhiev, "Comparative Analysis of Control Algorithms for a Power converter - Switched Reluctance Motor System in Motoring Mode," 2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET59121.2023.10279380. / **Scopus / WoS**

В настоящата работа са представени симулационно изследване и сравнителен анализ на алгоритми за управление при прилагане на еднополярна модулация в системата захранващ източник – преобразувател – превключваем реактивен двигател (ПРД) при работа в двигателен режим. Анализът е извършен на база загуби на мощност в преобразувателя и двигателя (трифазен 12/8 ПРД), ефективност и пулсации на въртящ момент, като двигателят е захранван от асиметричен мостов преобразувател. За всеки един от избраните алгоритми, при промяна на различни входни параметри, са изследвани загубите на мощност в преобразувателя и двигателя, ефективността и пулсациите на въртящия момент в средата MATLAB/Simulink.

Изследвано е въздействието на: скоростта на двигателя, ъгъла на включване, ъгъла на изключване, честотата на превключване на модулираните транзистори и коефициента на запълване. Получените резултати от изследването в MATLAB/Simulink са представени в

графична и таблична форма. Въз основа на представените резултати се препоръчва за двигателен режим, прилагането на управление, чрез регулиране по ток с независими регулатори и еднополярна модулация, но при висока честота на комутация на горните транзистори във всяко рамо на асиметричния преобразувател.

### **III.3. ОБОГАТЯВАНЕ (ДОРАЗВИТИЕ) НА СЪЩЕСТВУВАЩИТЕ ЗНАНИЯ В ОБЛАСТТА НА РАЗЛИЧНИ ВИДОВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ**

#### **III.3.1 Изследване на методи за регулиране на изходната мощност в резонансни преобразуватели на електрическа енергия**

**Г.7.19. Grigorova, T. Gr., B. K. Pacedjjeva, "An automatic control system behavioral modeling and parametrized Spice model of a full-bridge resonant inverter operating above resonant frequency", 11th International Scientific Conference "TECHSYS 2022" - Engineering, Technologies and Systems, Plovdiv, Bulgaria, AIP Conf. Proc. 2980, pp. 030006-1-030006-7 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0184394> / Scopus/ WoS, SJR=0.164**

Резонансните инвертори се използват като захранващи източници в различни електротехнологични приложения. Резонансните преобразуватели с мека комутация изискват специфични методи за регулиране на изходната мощност. Освен това обмена на енергия между входа и изхода става с посредничеството на резонансния кръг, а самият той е елемент за натрупване на енергия. Необходимо е отлично познаване на електромагнитните процеси в преобразувателя, както и характера и поведението на товара. В този аспект усилията на специалистите през последните години са насочени към изследване на различни методи за регулиране на мощността с цел създаване на широкодиапазионни резонансни преобразуватели с подобрени регулировъчни, енергийни и икономически показатели.

Симулаторът *PSpice* може да бъде използван не само за проверка на характеристиките на проектираните схеми, но и като средство за самото проектиране. Възможността за задаване на функционални зависимости между стойности на схемни елементи, с помощта на параметри, позволява да се въведат в описанието на схемата зависимости за проектиране. В настоящата статия се разглежда параметризиран *PSpice* модел за симулатора *PSpice for TI* на мостов резонансен инвертор, работещ на честоти, по-високи от резонансната и система за управление с автоматично регулиране на ефективната стойност на изходния ток, реализирана чрез принципа на аналоговото моделиране на поведението (Analog Behavioral Modeling), заложен в симулатора.

Системата за управление е със самовъзбуждане и дава възможност за регулиране на изходната мощност на инвертора чрез промяна на времето за провеждане на транзисторите. Представени са аналитични зависимости, въз основа на които са построени съответните товарни характеристики, при силно променящи се товари. Дефинирани са функционалните зависимости за проектиране на резонансния инвертор, работещ на честоти по-високи от резонансната и е реализирано параметризираното му описание. Показани са резултати от симулационните изследвания, които потвърждават извършеното теоретично изследване.

#### **III.3. 2. Създаване, анализ и проектиране на схеми на силови електронни устройства**

**Г.7.6. Vuchev, A. S., T. G. Grigorova and S. A. Vuchev, "Theoretical Analysis of an LLC Resonant DC-DC Converter at Boost Mode," 2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET59121.2023.10279287. / Scopus / WoS**

Независимо от използвания метод за анализ на резонансните LLC DC/DC преобразуватели, повечето изследователи определят, че при понижаващ режим токът на входа на изправителя не е прекъснат, а при повишаващ е прекъснат. Проучването, представено във [B.4.11], показва, че при понижаващ режим токът на входа на изправителя е прекъснат за много голямо съпротивление на товара. Обратно при повишаващ режим този ток е непрекъснат за ниски

стойности на товарния резистор, близо до границата на работа на преобразувателя при комутация при нулево напрежение. Цел на настоящото изследване е анализиране на електромагнитните процеси в LLC резонансен DC/DC преобразувател при повишаващ режим и получаване на уравнения, които моделират действието му при различните условия на работа.

Дефинирано е условието, на което трябва да отговаря управляващата честота  $\omega_s$  и характеристичното съпротивление за работа в повишаващ режим. При изпълнение на това условие, с изменение на съпротивлението на товарния резистор от една минимална стойност до безкрайност, се променят условията, при които работи LLC преобразувателят, осигурявайки комутация с нулево напрежение (ZVS). Най-общо се наблюдават режим на непрекъснат и режим на прекъснат ток.

Условия за работа в непрекъснатия режим бяха обсъдени в [B.4.11]. Също така бяха дефинирани условия за границата на действие при ZVS и преминаването към режим на прекъснат ток. При изследването на работата на преобразувателя в режим на прекъснат ток, представено в настоящата статия, се идентифицират два подрежима - *подрежим А* и *подрежим В*. Съставени са системи уравнения, които описват електромагнитните процеси в схемата за отделни работни интервали. Електромагнитните процеси за *подрежим А* се описват аналогично, както за режим на непрекъснат ток. Това предполага възможност за намиране на аналитични изрази за основните величини на преобразувателя, докато за електромагнитните процеси в *подрежим В* това не е възможно и трябва да се използва изчислителни методи. Определените граници на *подрежим В* дефинират областта на търсене на решенията.

Получените резултати могат да бъдат използвани за следващи теоретични проучвания на резонансните LLC преобразуватели.

**Г.8.1. Lechkov, A. N., T. Gr. Grigorova** "Hybrid transistor-thyristor PWM converter with improving reversible time", Annual Journal of Electronics, Sofia, Bulgaria, 2011, vol.5, No.1, pp.192-195, ISSN 1313-1842 ([НАЦИД ID № 1277](#))

В статията е анализирана, проектирана и симулационно тествана схема на хибриден транзисторно-тиристорен преобразувател с постоянен коефициент на запълване и възможност за рекуперация, ориентирана към приложение в галванотехниката като източник за електроимпулсно въздействие при така наречения Periodic Pulse Reverse метод (PPR).

Разработен е алгоритъм за синтезиране на изходното напрежение в схемата. Предложен е симулационен модел на системата за управление, реализираща режимите на работа на преобразувателя, като е използван принципът на аналогово моделиране на поведението (Analog Behavioral Modeling), заложен в симулатора *PSpice A/D*. Постигнато е съчетаване на голяма изчислителна ефективност с адекватно моделиране на схемните компоненти. Представено е сравнение на резултатите от симулацията и тези от аналитичното пресмятане. Получените данни дават възможност да се направи оценка на точността на съставената методика за проектиране. Отчетената относителна грешка е в границите на 3%, при различните зависимости, което е приемливо за инженерни пресмятания. Това се дължи на факта, че в хода на анализа беше направено допускане, че всички елементи в схемата са идеални, както беше пренебрегнато и влиянието на изравняващите вериги. При компютърното моделиране силовите елементи участват със своите моделни параметри, което се отразява на получените симулационни резултати.

**Г.8.2 Божилов, Р. Цв. Григорова**, "Изследване на променливотоков усилвател с обратна връзка BOOTSTRAP", XXIV Национален научен симпозиум с международно участие "Метрология и метрологично осигуряване", стр. 200-205, Созопол, 2014 г., ISSN 1313-9126 ([НАЦИД ID № 3036](#))

Класическата схема на променливотоков усилвател с операционен усилвател не може да отговори на повишени метрологически изисквания като свръх-висок входен импеданс и ниско ниво на собствени шумове, когато се усилва сигнал от високоомен променливотоков източник.

За преодоляване на посочените недостатъци се използва променливотоков усилвател с обратна връзка от тип "bootstrap". В статията е предложено изследване на входния импеданс на усилвателя, като експерименталните и симулационните резултати показват силна зависимост на входния импеданс от определящите го елементи. Показано е, че при определена честота на входния сигнал, стойностите на елементите, изграждащи усилвателя могат да се оптимизират така, че да се получи еквивалентен входен импеданс от порядъка на десетки гигаоми, използвайки стойности на схемните резистори не надвишаващи 10MΩ. Резултатите от анализа са потвърдени чрез компютърна симулация на усилвателя. Получено е добро съвпадение между експерименталните резултати и тези от компютърната симулация.

**Г.8.4. Бонев, Г. Б., Цв. Гр. Григорова, А. Н. Лечков, "Анализ на резонансен преобразувател за индукционно нагряване клас-Е с разширен честотен диапазон", Научни трудове на Съюза на учените в България – Пловдив, Серия В. Техника и технологии, том. XII, Пловдив 2015г. стр. 116-120, ISSN 1311-9419 ([НАЦИД ID № 2494](#))**

В настоящата работа е представен анализ на резонансен преобразувател за индукционно нагряване (ПИН) клас „Е”, при който товара се явява паралелен резонансен кръг, включващ индуктора. С цел по-добро съгласуване на товара в по-широк честотен диапазон се прилага последователен резонансен кръг с нисък качествен фактор. Предложеният модел позволява улеснено проектиране в симулационна среда на MICRO-CAP. Целта на настоящата работа е да се анализира и представи схема на резонансен преобразувател за индукционно нагряване (ПИН) клас „Е” с разширен честотен диапазон и с ограничено влияние на комплексния товар при запазване на висок КПД не по-малък от 95%.

Симулационният анализ е извършен чрез симулатора MICRO-CAP 9, като стойностите на елементите са зададени със символни променливи, описани със съответните аналитични формули. Изведени са изводи, относно възможностите за разширяване на честотния обхват на резонансния ПИН клас „Е“, условията за отдаване на максимална мощност и постигането на висока ефективност.

**Г.7.14. Grigорова, T. Gr. "Steady-State Analysis and Modified Control Technique of a Capacitor Voltage Clamped Dual Half-Bridge Series Resonant Inverter", 19th International-Federation-of-Automatic-Control (IFAC) Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS), Vol. 52 Issue 25 pp. 456-461, 2019, Sozopol, Bulgaria, DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.582/ **Scopus / WoS, SJR=0.354****

По време на технологичните процеси вследствие на промени, които настъпват в товара или в резултат на други смущения, се променят напреженията върху активните и пасивните елементи в автономните инвертори. Подобни ефекти довеждат до възникване на недопустими режими на работа в силовите схеми. Този проблем съсредоточава усилията на специалистите в реализиране на схемни варианти на инвертори с подобрени товарни характеристики. Основният подход на работа е концентриран върху възможностите, които предлагат силовите схеми за добавяне на допълнителни елементи (ограничителни диоди или група от индуктивност и диоди), чрез които се постига ефект на ограничаване на схемните напрежения. По този начин се осигурява стабилност в работата на силовата схема, консумираната мощност е постоянна и не зависи от промените на товара.

В настоящата статия се разширява изследването на електромагнитните процеси в установен режим на автономен инвертор от типа с капацитивно ограничаване на напреженията (capacitor voltage clamped dual half-bridge series-resonant inverter), захранващ два различни товара. Предлага се нов подход за анализ, в установен режим, на работата на схемата. В основата на анализа е въвеждането на коефициента на разколебаване  $k$ , използван в класическите резонансни инвертори. По този начин се прилага единен подход в анализ на процесите, в установен режим, при резонансните инвертори с електротехнологично приложение. Изведени са аналитични зависимости, чрез които са получени основни характеристики за проектиране

на преобразувателя. Обсъжда се модифициран метод за управление на товарите с различна честота и мощност за избягване на допълнителното токово натоварване на част от транзисторите в схемата. Резултатите от анализа са потвърдени чрез симулация с *OrCad Pspice*. Забелязва се много добро съвпадение между изчислените резултати и тези от компютърната симулация, като относителната грешка е в рамките на 5-6%. Разликите се дължат на реалните параметри на елементите, с които е проведена симулацията.

**Г.7.16 D. Ivanov, D., I. Maradzhiev and T. Grigorova, "FPGA Implementation of Microstepping Control of Stepper Motor with Advanced Mixed Current Decay," 2021 12th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513691. / Scopus**

В настоящия доклад е описана експерименталната реализацията на микростъпково управление на стъпков двигател (PM42S-048-ННС8) с имплементиране на режим на спиране от вида „advanced current decay mode“. Предложеното решение е на базата на програмируемо логическо устройство тип FPGA (FPGA Spartan 3A XC3S50A – 4VQG100C) и непрекъснато измерване и филтриране на тока през намотките на използвания двигател с галванично разделен АЦП (АМС1306М25DWVR). Намотките на двигателя се захранват със силов драйвер тип DRV8844. Направено е сравнение на максимално достижимата честота на управляващите импулси, подавани към намотките на двигателя, между реализирания режим на спиране с прилагане на „advanced current decay mode“ и режим на микростъпка без неговото прилагането. От направените експериментални изследвания се вижда, че с прилагане на този режим се увеличава работната честота на двигателя, като това е свързано с по-малко вибрации, шум и точност на позиционирането на ротора.

**Г.7.17. Grigorova, T., I. Maradzhiev, "Behavioural modelling of an average current-mode control of a boost DC/DC converter", 10th International Scientific Conference "TECHSYS 2021" - Engineering, Technologies and Systems, Plovdiv, Bulgaria, AIP Conference Proceedings 1 September 2022; 2449 (1): pp. 030004-1-030004-8, <https://doi.org/10.1063/5.0090676/> Scopus, SJR=0.164**

Едно от основните предизвикателства в реализацията на ключовите стабилизатори е осигуряването на постоянна стойност на изходното напрежение. Това се постига чрез усилвателя на грешката, който се стреми да минимизира разликата между изходното напрежение и зададеното опорно напрежение. В настоящата публикация е илюстрирано аналогово моделиране на поведението на повишаващия DC/DC преобразувател (Boost DC/DC converter) в честотна област, чрез управление по средната стойност на тока през индуктивността (average current mode control). Използвани се възможността на симулатора *PSpice for TI* за задаване на параметри чрез функционални зависимости между стойностите на елементите на схемата. Въведени са уравненията за проектиране при описанието на елементите на схемата. Моделирани и изследвани са предавателни функции на отделните контури, изграждащи веригата за обратна връзка, както и на системата като цяло. Относителната грешка между теоретичните и симулационните резултати е в границите на 5-6%. Въз основа на изчислените стойности на елементите на усилвателя на грешката е извършено изследване на устойчивостта на системата.

Резултатите, получени в настоящото изследване, показват приложимостта на симулационните инструменти в процеса на поетапно (step-by-step) усвояване на теоретичния аспект на динамиката на управлението в схемите на ключовите стабилизатори на постоянно напрежение. Те са особено подходящи за използване в обучението на студентите в магистърския курс по „Електроника“, като се очаква постигането на устойчиви знания и умения.

**3.31.3. Hinov, N., T. Grigorova, "Design Considerations of Multi-Phase Buck DC-DC Converter". Applied Sciences. 2023; 13(19):11064, <https://doi.org/10.3390/app131911064> Open Access, Scopus/WoS, Q2/ IF=2.7**

Многофазните DC/DC преобразуватели използват множество превключващи фази, за да улеснят преобразуването на мощността, като предлагат различни предимства и недостатъци в сравнение с конвенционалните еднофазни DC/DC преобразуватели. Настоящата работа има за цел да представи рационална методология за определяне на оптималния брой фази, от който да бъде изграден един многофазен понижаващ DC/DC преобразувател в зависимост от конкретни приложения. Увеличаването на необходимостта от бързо и точно предсказване на броя на звената при проектирането на многофазни понижаващи преобразуватели, използвани за минимизиране на пулсациите на токовете и постигане на висока ефективност, е от особено значение за дизайнерите на захранващи устройства.

В настоящата статия са дискутирани основните видове загуби в схемата на многофазен синхронен понижаващ преобразувател (multi-phase synchronous buck converter) и са представени аналитични зависимости за тяхното изчисляване. Анализирани са, аналитично и графично, пулсациите на изходния и входния ток в многофазния преобразувател. Чрез контролни примери (входно напрежение  $U_{in}=12V$ , изходно напрежение  $U_{out}=1.6V/3.3V/5V$ , управляваща честота  $f_{sw}=75kHz\div 300kHz$ , изходен ток  $I_0=5\div 200A$ , мъртво време  $t_d=100ns$ ) са извършени аналитични и графични (3D диаграми) анализи на пулсациите на изходния и входния ток в многофазния преобразувател, както и на загубите в преобразователната верига. Въз основа на аналитичните резултати беше показано, че за разглежданите примери за управление, когато стойностите на изходния ток  $I_0$  са по-малки от  $20A$  ( $I_0 < 20A$ ), многофазният синхронен понижаващ преобразувател с брой звена  $N=2$  показва най-висока ефективност (90.8%). Междувременно, за стойности на изходния ток в диапазона  $20A < I_0 < 35A$ , най-висока ефективност ( $\eta=90.77\%$ ) се постига с конфигурация, съставена от  $N=4$  звена. В обхвата на изменение на изходния ток от  $35A < I_0 < 45A$ , най-високата ефективност ( $\eta=90.792\%$ ) се постига с конфигурация с  $N=6$  звена. В същото време, при стойност на изходния ток  $I_0=40A$ , ефективността на фазовата верига при  $N=4$  е с 0.21% по-ниска от тази на фазовата верига при  $N=6$ . Когато изходният ток е  $I_0=100A$ , ефективността на фазовата конфигурация при  $N=12$  е с 0.14% по-висока от тази на фазовата конфигурация при  $N=8$ , докато при  $I_0=200A$  ефективността на фазовата верига при  $N=12$  е 0.62% по-висока от тази на фазовата верига  $N=8$ .

В статията са изследвани загубите на мощност в резултат на промени в различни параметри като коефициент на запълване ( $D=0.1\div 0.9$ ) и работна честота ( $75kHz\div 300kHz$ ). Показано е, че загубите на мощност се увеличават с увеличаване на честотата, като значителни загуби се наблюдават при малки стойности на коефициента на запълване. Представени са и резултати от симулация на загуби на мощност в многофазен синхронен понижаващ преобразувател с  $N=8$ . Относителната грешка между аналитични и симулационни резултати не надвишава 4%. При избора на оптималния брой фази трябва да се подхожда изчерпателно, за да се оценят предимствата от увеличаването на броя на фазите в многофазната конфигурация. Предложеният подход, за бързо и точно изчисляване на загубите на мощност и общата ефективност, намалява предварителните изчислителни процедури и оптимизира решенията. Следователно, разглежданата методика за проектиране може да намери приложение както в инженерната практика, така и в обучението на студенти по силова електроника.

### **III.3. 3. Усъвършенстване на макромоделите на силови полупроводникови елементи**

**Г.8.3. Grigorova, T. Gr., K. K. Asparuhova, "Unified Method for Behavioral Modeling of IGBT", Annual Journal of Electronics, Sofia, Bulgaria, vol.8, pp.96-100, 2014, ISSN 1314-0078 ([НАЦИД ID № 469](#))**

В настоящата статия е реализиран динамичен модел на функционално-параметричен IGBT транзистор за симулатора *PSpice* чрез моделиране на входния капацитет на транзистора като

нелинеен кондензатор с полином от втори ред и вградената, в симулатора, математическа функция "arctan". Използван е инструментариумът на аналоговото описание на поведението. Схемата за реализация на нелинейния кондензатор е изпълнена като подсхема. Описана е методиката за екстракция на зависимостта на входния капацитет на транзистора като функция на напрежението колектор-емитер. Моделът е параметризиран и вграден в симулатора *OrCad PSpice*.

За верификация на модела, в статичен и динамичен режим, е избран IGBT транзистор тип FGA90N33AT. Показани са изходните статични характеристики, получени от симулатора *PSpice* въз основа на предложения модел, както и предавателната характеристика на транзистора. Резултатите от сравнението между каталожните данни и тези, получени в резултат от симулациите са обобщени и представени таблично, като разликата между тях е в границите на 2%. По-голяма относителна грешка, около 5%, се забелязва при напрежение гейт-емитер  $V_{GE} = 6V$ . Динамичният модел на елемента е проверен, симулационно, чрез тестова схема. Представени са сравнителни резултати между каталожните данни и резултатите от симулацията на: времето за включване, времето за нарастване на тока, времето за изключване и времето за спадане на тока.

Представени са осцилограми от експериментално изследване на работата на функционално-параметричния модел на IGBT транзистора при работа с активно-индуктивен товар. Доказана е точността на симулационните резултати, получени при използването на предлагания модел.

#### III.4. АНАЛИЗ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВИДОВЕ МОДУЛАЦИИ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА БЕЗЧЕТКОВ ДВИГАТЕЛ

**Г.8.9.** Мараджиев, И. П., Е. И. Динков, **Цв. Гр. Григорова**, "Изследване влиянието на LC филтър върху работата на системата инвертор–безчетков двигател за постоянен ток", Научни трудове на Съюза на учените в България – Пловдив, Серия В. Техника и технологии, том. XII, Пловдив 2015г. Стр. 140-143, ISSN 1311-9419. ([НАЦИД ID № 2494](#))

Безчетковите двигатели за постоянен ток намират широко приложение в различни индустриални приложения. Това налага необходимостта от осигуряване на малки пулсации на въртящия момент на безчетковия двигател и гарантиране на необходимата електромагнитна съвместимост според изискванията на работната среда. В настоящия доклад се изследва влиянието на нискочестотен LC филтър, включен между инвертор на напрежение и безчетков двигател за постоянен ток, с цел намаляване на пулсациите на въртящия момент и подобряване на хармоничния състав на тока през двигателя. LC филтърът е включен в схема „звезда“. Системата е моделирана и симулирана посредством програмен симулатор PSIM. Представените резултати са получени чрез компютърно симулиране на електрозадвижване с безчеткова машина и опитно потвърдени посредством реална електрозадвижваща система.

От направените изследвания се установява, че при поставяне на LC филтър между инвертора на напрежение и безчетковия двигател за постоянен ток, се филтрират високочестотните съставящи от хармоничния състав на тока, протичащ през двигателя. Също така значително се намалява амплитудната стойност на високочестотните съставящи от хармоничния състав на линейното напрежение, прилагано върху двигателя. При наличие на LC филтър, когато управлението на инвертора се изключи и машината започне да спира по инерция, протича ток през долните транзистори от инвертора, LC филтъра и безчетковата машина. Този ток води до получаването на малък отрицателен въртящ момент, който се стреми да спре двигателя. При липса на LC филтър и при спиране на двигателя по инерция този процес не се наблюдава.

**Г.8.10.** Maradzhiev, I. P., **T. Gr. Grigorova** and E. Dinkov, "Simulation and Experimental Investigation of Modulation Techniques for BLDC Motor Control", *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 7(1): 28-45, 2020. DOI: 10.13189/ujeee.2020.070103, ISSN: 2332-3280 (Print); ISSN: 2332-3299 (Online)

В настоящата статия се изследват и анализират електромагнитните процеси в електрическа задвижваща система, състояща се от източник на енергия, инвертор и безчетков постоянноток двигател (BLDC), като се използват известни методи за широчинно-импулсна модулация (ШИМ). Изследваните методи за модулация са: еднополярна модулация на горните транзистори (PWM-TOP) и долните транзистори (PWM-BOT), симетрична PWM-PWM, модулация тип PWM-ON и ON-PWM и биполярна PWM-ON модулация, обозначена с PWM-ON-BIP. Източникът на напрежение се разглежда като DC/DC понижаващ преобразувател на енергия, когато BLDC работи в двигателен режим. Въз основа на обобщените еквивалентни схеми са получени аналитични изрази, описващи електромагнитните процеси в системата при прилагане на различните видове модуляции. Експериментално е изследвана и сравнена ефективността на системата батерия – инвертор – машина за всяка от разгледаните модуляции. Тези резултати се сравняват и с ефективността на BLDC, задвижван с векторно управление. Предложен е модел на MATLAB/Simulink за прилагане на тези модуляции и за анализ на получените резултати. На базата на този модел се изследва хармоничният състав на фазовите токове за всяка модулация. В резултат от този анализ се доказва, че режим без модулация води до най-малък коефициент на хармонични изкривявания (THD), а от изследваните модуляции с най-малък коефициент на хармонични изкривявания е модулацията PWM-ON-BIP. Тези резултати показват, че PWM-ON-BIP е добър избор за приложение в батерийно захранвани устройства и превозни средства.

**Г.8.11.** Maradzhiev, I. P., T. Gr. Grigorova and E. Dinkov, "Investigation of Power Losses by Various Brushless Motor Modulation Methods in Motor Mode", *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 7(2): 88-93, 2020. DOI: 10.13189/ujeee.2020.070203, ISSN: 2332-3280 (Print); ISSN: 2332-3299 (Online)

В статията е представен сравнителен анализ на различни видове модулационни стратегии за управление на безчетков постоянноток двигател (BLDC) по отношение на няколко вида загуби в системата инвертор – безчетков постоянноток двигател в двигателен режим. Експериментално изследваните типове модуляции са: еднополярна модулация на горните (PWM-TOP или UT) транзистори, биполярна модулация PWM-ON (PWM-ON-BIP), симетрична модулация (PWM-PWM), векторно управление и режим без модулация. Използва се опростена еквивалентна схема за BLDC двигателя, за да се изчислят различните видове загуби и ефективността на системата. Въз основа на еквивалентната заместваща схема за различните видове модуляции се обсъждат опростени процедури за проектиране за определяне на загубите от вихрови токове и вискозно триене в товара, загубите в медта, загубите от хистерезис и механичното триене, активните загуби, загубите в транзисторите и диодите. Представени са експериментални данни за разпределението на загубите за безчетковия двигател DT4260 при работа с различни модуляции и моменти на натоварване. Въз основа на получените стойности за ефективността на изследваните модуляции са направени препоръки за използване в устройства, захранвани от батерии, като електромобили, електрически скутери и др.

### **III.5. ИЗСЛЕДВАНЕ И ВЪВЕЖДАНЕ НА НОВИ МЕТОДИ И РАЗВОЙНИ СРЕДСТВА ЗА ОБУЧЕНИЕ В ОБЛАСТТА НА СИЛОВАТА ЕЛЕКТРОНИКА**

Все по-широко е използването на системи за управление на електрозадвижвания с цифрово управление. Тази тенденция се налага от необходимостта непрекъснато да се разширяват функционалните възможности на различните електрозадвижвания, което от своя страна е свързано с повишен обем на обработваната информация.

От студентите в областта на силовата електроника се очаква да притежават добра подготовка, както по хардуерното осигуряване, така и в софтуерното обезпечаване на системите с цифрово управление на електрозадвижванията. За да отговори на високите изисквания и компетенции, които се изискват от студентите, в магистърската степен по



„Електроника“ е предложен избирам курс „Електронни преобразуватели за управление на електрически двигатели“, в който с помощта на различни развойни системи студентите придобиват практически умения и знания, свързани със съвременните методи за цифрово управление на електрически двигатели.

Този вид системи, позволяват на студентите да изучават вградените в развойната среда проекти, както и да създават собствени проекти в процеса на обучение. По този начин могат да усвоят по-пълноценно начините за софтуерна реализация на различни методи за цифрово управление на двигатели.

Резултатите, от прилагането на различни развойни системи в лабораторните упражнения по дисциплината, са представени в публикации [Г.8.5], [Г.8.6], [Г.8.7], [Г.8.8] и [Г.7.15].

**Г.8.5.** Yordanov, G., **T. Gr. Grigorova**, "Trends in the education in modern power electronics and motor control", L International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2015, 24 - 26 June 2015, Sofia, Bulgaria, pp.313-316, ISBN: 978-619-167-182-3 ([НАЦИД ID № 1717](#))

В настоящата статията са представени резултати от разработена дипломна работа в магистърския курс по „Електроника“, свързани с надграждане на вградения алгоритъм на работа на развойната система DRV8412 – C2 (the Medium Voltage Digital Motor Control (DMC) kit, DRV8412-C2/Texas Instruments) за управление на четков постояннотоков двигател (Brushed DC motor). Тази система позволява управлението на електродвигане в две оси на движение, чрез едновременното задвижване на два четкови постояннотокови двигатели (BDD3864 серия (6-24V, 0.92A)) или един по-мощен, както и един двуполярен стъпков двигател. Системата се състои от контролна карта, която е базирана на сигналния процесор TMS320F28035 от серията C2000 на Texas Instruments, който е специализиран за управление на двигатели. В развойната система също така е включен и драйверът DRV8412, предназначен за управлението на два постояннотокови двигателя или един стъпков двигател. Той съдържа в себе си два инвертора на напрежение, изградени по мостова конфигурация.

С вградения в развойната система програмен код се генерира една импулсна поредица, която се извежда на два изхода (PWM-A или PWM-B) на контролера. С така получените сигнали може да се осъществи еднополярна или двуполярна широчинно-импулсна модулация за управлението на двигателите, като видът на модулацията се определя от режима на работа на драйвера. Недостатък на този начин на работа е, че за да се използва единият или другият метод на широчинно-импулсно регулиране трябва да се извършат хардуерни превключвания.

В процеса на провеждане на лабораторните упражнения е удобно да се осигури възможност за анализ и изследване работата на двигателите при двата вида модуляции без необходимост от прекъсване на работата и хардуерни превключвания в развойната система. В настоящата статия е описано предложеното програмно осигуряване, което обезпечава тези изисквания за регулиране на единия двигател по метода на двуполярна, а на другия по метода на еднополярна широчинно-импулсна модулация при един и същ режим на работа на драйвера DRV8412. По този начин се изследва функционалността на развойната система при нови условия на управление, както и степента на свобода на предоставения код. Представени са експериментални резултати, доказващи реализираните алгоритми.

**Г.8.6.** Maradzhiev, I. P., **T. Gr. Grigorova**, S. Ts. Ivanov, "Teaching Stepper Motors and Brushed DC Motors Using the Medium Voltage Digital Motor Control Platform, Part I - Stepper Motors Control", Annual Journal of Electronics, Sofia, Bulgaria, 2015, vol. 9, pp. 72-75 ISSN 1314-0078 ([НАЦИД ID № 469](#))

В статията е представена методологията на обучението, прилагана в дисциплина „Електронни преобразуватели за управление на електрически двигатели“, базирана на развойната платформа DRV8412 – C2 (the Medium Voltage Digital Motor Control (DMC) kit, DRV8412-C2/Texas Instruments) за изучаване на методи за цифрово управление на двуполярен

стъпков двигател (4.2 А/фаза в паралел, 1.8° на стъпка). Представена е организацията на проектите, чрез които се изследват съответните работни режими на стъпковия двигател. Платформата позволява промяна и настройка на различни параметри в реално време. Може да се задава режим от 1 стъпка до 128 микростъпки/стъпка.

Показани са различни резултати, като генерирани синусоидални напрежения и сигнал от обратна връзка по ток, получени чрез графичната среда Code Composer Studio 6.0 (CCS) и от експеримент.

**Г.8.7. Grigorova, T. Gr.**, "Teaching Stepper Motors and Brushed DC Motors Using the Medium Voltage Digital Motor Control Platform, Part II - Brushed DC Motors Control", Annual Journal of Electronics, Sofia, Bulgaria, 2015, vol. 9, pp. 76-79, ISSN 1314-0078 ([НАЦИД ID № 469](#))

Публикацията описва методологията на обучението, прилагана в дисциплина „Електронни преобразуватели за управление на електрически двигатели“, за изучаване на методи за цифрово управление на четкови постояннотокови двигатели (DC motors), като се използва платформата на развойната система DRV8412 – C2 (the Medium Voltage Digital Motor Control (DMC) kit, DRV8412-C2/Texas Instruments).

В настоящия доклад се разглеждат основните моменти от процеса на преподаване по време на лабораторните упражнения. Софтуерът, наличен в комплекта, е с напълно отворен код, което позволява на студентите да създават свои собствени проекти и по този да придобият устойчиви знания. След теоретичното запознаване с принципите на широчинно-импулсна модулация за управление на четкови постояннотокови двигатели (DC motors) се пристъпва към реализирането и изследването на вградените, в макета, проекти за управление. Представени са резултатите от проведените експерименти. Дискутират се предимствата и недостатъците на разгледаните методи.

**Г.8.8. Григорова, Цв., Д. К. Янков, Б. К. Пачеджиева**, "Изследване на работата на система за цифрово управление на постояннотоков двигател, базирана на развоен модул DRV8837EVM", Научни трудове на Съюза на учените в България – Пловдив, Серия В. Техника и технологии, том. XIII, стр. 153 – 156, 2016г., ISSN 1311-9419. ([НАЦИД ID № 2494](#))

Публикацията описва изследване на работата на система за цифрово управление на постояннотоков двигател, базирана на развоен модул DRV8837EVM. Развойният модул DRV8837EVM демонстрира възможностите и ефективността на драйвер DRV8837 за управление на маломощни постояннотокови двигатели на Texas Instruments. Потребителят може да управлява DRV8837 с вградения микроконтролер MS430 или с външен микроконтролер. Студентите са изучавали микроконтролер MS430 по други дисциплини от учебния план, което е предпоставка за бързото усвояване на новите знания. Блокът, съставен от драйвера DRV8837 съдържа в себе си мостов инвертор на напрежение. Двете рамена на моста се управляват от съответни драйверни схеми. Системата позволява софтуерно реализиране и изучаване на различни методи за импулсно управление на скоростта на постояннотоков двигател. Вграденият проект, в развойната среда, илюстрира синтезирането на еднополярна широчинно-импулсна модулация за управление на скоростта на постояннотокови двигатели.

Представени са експериментални резултати, получени при реализацията на разгледаната еднополярна широчинно-импулсна модулация с DRV8837EVM. Илюстрирани са времедиаграми на напрежението и на тока в котвената верига за двигателен режим, посока „напред“ и посока „назад“, при различни коефициенти на запълване.

**Г.7.15 Grigorova, T. Gr.**, B. K. Pacedjjeva, "Computer simulation and experimental investigation of used digital development environments for PWM DC motor control in engineering teaching", 28th International Scientific Conference Electronics, ET 2019, Sozopol, Bulgaria, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET.2019.8878596, ISBN: 9781728125749 /Scopus

Публикацията описва методологията на обучението, прилагана в дисциплина „Електронни преобразуватели за управление на електрически двигатели“, за изучаване на методи за цифрово управление на четкови постояннотокови двигатели (DC motors), като се използват развойните модули DRV8837 и DRV8850. Драйверите осигуряват различни защитни схеми като вътрешни функции за изключване за защита от претоварване по ток, защита от късо съединение, блокировка от понижено напрежение и прегряване.

За по-пълно усвояване на учебния материал по време на лабораторните упражнения се използват предимствата на компютърните симулации със софтуера TINA Design Suite (Texas Instruments). Безплатната версия позволява симулационно тестване на използваните развойни модули.

Лабораторните упражнения, свързани с разглежданата тема, се провеждат в две последователни сесии поради необходимостта от аналитични изчисления, компютърни симулации и експериментални изследвания. Освен това в лабораторното упражнение се разглежда и алгоритъмът, който се реализира софтуерно чрез вградените проекти в развойните платки. В статията се представени резултати от симулационно и експериментално изследване.

В резултат на обучението студентите придобиват разнообразни знания в областта на индустриалната електроника. С помощта на използваните цифрови развойни модули за ниско напрежение, от една страна, се извършва аналитично пресмятане на електромагнитните процеси в силовата верига на системата, а от друга, се придобиват умения за компютърно моделиране и разработване на софтуер за различни методи за ШИМ управление на скоростта на постояннотоков двигател. Постигането на устойчиви резултати от обучението е възможно чрез овладяване на знанията стъпка по стъпка, като се използва подходът "учене чрез правене".

**Г.7.18.** Yakimov, P. I., K. K. Asparuhova, **T. G. Grigorova** and D. A. Shehova, "Industry 4.0 and the Challenges Faced by STEM Education," 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET50336.2020.9238223. / **Scopus**

В статията се разглеждат основните фактори, които подпомагат прилагането на парадигмата Индустрия 4.0. Разгледани са техните основни характеристики, които представляват предизвикателства пред STEM (science, technology, engineering, mathematics) образованието. Целта на настоящата статия е да се анализират тенденциите в съвременната производствена индустрия и да се посочат конкретни учебни предмети и подходи, които биха могли да подобрят знанията и уменията на завързващите инженери. Взети са предвид някои задачи, пред които са изправени инженерите по индустриална автоматизация. Посочва се възможното съответствие между необходимите умения и преподаваните предмети. Подходът "учене чрез правене" е полезен за образование, основано на компетентности. Той привлича студентите и им дава устойчиви практически умения.

### **III.6. СЪЗДАВАНЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКИ МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ И ПРОЕКТИРАНЕ НА ОПТИЧНИ КОМУНИКАЦИОННИ СИСТЕМИ С ОТКРИТА ПРЕНΟΣНА СРЕДА**

**Г.8.12.** Пачеджиева, Б. К., **Цв. Гр. Григорова**, "Влияние на атмосферната турбулентност при проектиране на оптични комуникационни системи с открита преносна среда", Научни трудове на Съюза на учените в България – Пловдив, Серия В. Техника и технологии, том. XIII, стр. 149-152, 2016г., ISSN 1311-9419. ([НАЦИД ID № 2494](#))

Оптичните комуникационни системи с открита преносна среда се налагат като важна част от съвременните информационни технологии. Развитието на Free-Space Optics (FSO), обаче, е свързано с редица проблеми. Те произтичат от многофакторната физична обусловеност на пространствената структура на лазерния сноп, от флукуациите на атмосферната прозрачност, от флукуациите на посоката на разпространение на снопа, свързани с различните по произход механични вибрации на антените и с атмосферната турбулентност. Решаването на тези проблеми е необходимо както при изследването, така и при проектирането на FSO. Целта на настоящото изследване е да се модифицира авторска методика и да се предложи алгоритъм за

решаване на обратната задача при изследването и инженерното проектиране на FSO от типа „земя-земя и да се анализира влиянието на атмосферната турбулентност върху това решение.

Графичните зависимости, получени в резултат от приложения модифициран алгоритъм, показват относително силното влияние на началния радиус на лазерния сноп върху дефиниционната област на обратната задача при FSO при различна степен на турбулизиция на атмосферата. При малки стойности на структурната константа на коефициента на пречупване на тропосферата е възможно използването на лазерни източници с по-голям начален радиус на лазерния сноп за удовлетворяване на енергийните съотношения при проектирането на FSO. При по-силно турбулизирана атмосфера е необходимо използването на лазерен сноп с по-малък начален радиус, така че да се гарантира необходимия оптичен поток попадащ на върху приемната антена дори и при по-силно отклонение на лазерното петно от оста на приемната апертура.

**Г.7.20.** Pacedjieva, B. K., **T. Gr. Grigorova**, "Investigation of the influence of the inertia of the photon counting system on the acceptance accuracy in photon counting mode", 11th International Scientific Conference "TECHSYS 2022" - Engineering, Technologies and Systems, Plovdiv, Bulgaria, AIP Conf. Proc. 2980, 030004 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0184108>, **Scopus / WoS, SJR=0.164**

Лазерните космични комуникационни системи от типа „Земя- космос” или “космос-Земя”, се характеризират с големи разстояния между кореспондиращите пунктове, респ. с голямо дифракционно разсейване на оптичната енергия, както и с енергийни загуби от екстинкцията на лъчението в атмосферния участък на преносната среда. Тези обстоятелства обуславят необходимостта от регистриране на много слаби оптични сигнали в приемните части на системите. В тази връзка се използват названията “приемане в режим на броене на фотони” (РБФ) и “система за броене на фотони” (СБФ). Извънредно важна е и ролята на инерционността на реалната СБФ – от I род (с неудължаващо се възстановително време) и от II род (с удължаващо се възстановително време). Предложена е методика за определяне на минимално разстояние, гарантиращо връзка с пренебрежимо влияние на инерционността на системата за броене на фотони. Разработен е алгоритъм за нейното прилагане. Направена е числена оценка на дискутираното минимално разстояние за двата вида инерционност на системата за броене на фотони като са използвани типични за космичните оптични комуникационни системи данни. Получени са графични решения за определяне на минималното разстояние за случаите на инерционност от I и от II род.

### **III.7. СЪЗДАВАНЕ НА НОВ УРЕД ЗА АКУСТИЧНО И ВИЗУАЛНО ДЕМОНСТРИРАНЕ НА КОРПУСКУЛЯРНАТА ПРИРОДА НА СВЕТЛИНАТА**

**3.31.1** Dimitrova, T. A. Lechkov, **Ts. Grigorova** and A. Weis. (2011), "Acoustic and visual display of photons:a handheld demonstration device", Special Issue of Physica Scripta – T149, (2012) 014010 (4pp), Print ISSN 0031-8949, Online ISSN: 1402-4896, **IF=2.9 (IF=1.032 (2012))/SJR=0.441 /Q2, Scopus/WoS**

В тази публикация е представен нов уред за акустично и визуално демонстриране на корпускулярната природа на светлината. Уредът работи на принципа на фотоелектричния ефект. Електрическите импулси, възникващи при регистрирането на фотони с помощта на фотоумножител, могат да бъдат видени с помощта на осцилоскоп или чути посредством високоговорител. Пред фотоумножителя е поставен колиматор със сменяеми селективни филтри, позволяващи регистриране на светлина от определен спектрален диапазон. Високото напрежение и нивото на дискриминация на фотоумножителя се регулират с помощта на потенциометри, намиращи се на лицевия панел. В уреда има вграден високоговорител и изход за включване на външен високоговорител. Той може да работи в непрекъснат или ръчен режим.

Пропорционалната зависимост между интензитета на светлината и честотата на регистриране на фотоните (брой регистрирани фотони за единица време) може да бъде показана чрез насочване на колиматора към повърхности с различна осветеност. При голяма осветеност, когато честотата на регистриране стане по-голяма от реципрочната стойност на ширината на импулса, отделните импулси се наслаgват и формират флукутиращ непрекъснат сигнал. Това може да бъде използвано за дискутиране на електронния шум (Shot noise), а също и за количествени измервания.

Предимство на уреда са малките размери и тегло, удобството за манипулиране и подчертаните дидактически особености. Апаратурата е проектирана и конструирана от авторите в рамките на проекта Scopes grant IZ73Z0\_127942/1 "Modern Optics and Spectroscopy – from research to education" (Swiss National Science Foundation). Демонстрации с тази експериментална постановка са показани за първи път на III International School and Conference on Photonics PHOTONICA 2011 August 29 - September 2, 2011, Belgrade, Serbia. Уредът се използва за демонстрации в специализирани курсове на катедра „Оптика и атомна физика“ на Пловдивския университет „Паисий Хилендарски“, както и за публични представления.

## **Е.23. ПУБЛИКУВАН УНИВЕРСИТЕТСКИ УЧЕБНИК**

**Е.23.1. Григорова, Цв.,** "Анализ, моделиране и проектиране на преобразователни устройства", ТУ-София, София, 2012, ISBN 978-954-438-999-4

Учебникът е предназначен за студенти бакалавърска степен от специалност „Електроника“ на Факултета по електроника и автоматика на Техническия университет – София, Филиал – Пловдив, изучаващи учебната дисциплина "Анализ, моделиране и проектиране на преобразователни устройства". В него са разгледани различни въпроси, свързани с анализа, моделирането и автоматизираното проектиране на силови електронни устройства за преобразуване на електрическа енергия. С оглед на промишлените приложения и свързаните с тях технически изисквания на отделните видове схеми се разглеждат различни алгоритми за управление на силовите прибори и формиране на изходното напрежение в инвертори на напрежение. Отделено е внимание и на преобразователи с резонансен обмен на енергия между входния захранващ източник и товара (последователен DC/DC преобразовател, паралелен DC/DC преобразовател и последователно-паралелен LCC DC/DC преобразовател).

Учебникът може да се използва и от студенти магистърска степен на същия факултет, изучаващи учебните дисциплини "Електронни енергийни преобразователи" и „Електронни преобразователи за управление на електрически двигатели“.

Включените в него въпроси го правят подходящ и за студенти и специалисти, работещи в близки до силовата електроника области.

## **Е.24. ПУБЛИКУВАНО УНИВЕРСИТЕТСКО УЧЕБНО ПОСОБИЕ**

**Е.24.1. Григорова, Цв., И. Мараджиев,** "Ръководство за лабораторни упражнения по Анализ, моделиране и проектиране на преобразователни устройства", ТУ-София, София, 2022, ISBN 978-619-167-465-7

Ръководството за лабораторни упражнения по „Анализ моделиране и проектиране на преобразователни устройства“ е предназначено за студенти от специалност „Електроника“, ОКС „бакалавър“, изучаващи едноименната дисциплина. Учебното помагало може да се използва и от студенти и специалисти с интереси в областта на автоматизираното проектиране на силови електронни преобразователи.

Съчетавайки теоретични познания, конкретни задачи за изпълнение и използвайки дългогодишния си опит и научни публикации в аналитичното моделиране и автоматизирано проектиране, авторите на учебното ръководство целят да подпомогнат студентите в

овладяването и прилагането на методологията за моделиране, симулиране и верифициране на инженерни задачи в областта на силовите електронни преобразуватели и алгоритмите за тяхното управление. За постигане на тази цел са представени нагледни примери, реализирани и симулирани посредством мощния симулатор на електронни системи *Pspice for TI*. В учебното ръководство са представени основни етапи от моделирането, анализа и автоматизираното проектиране на съвременни преобразувателни устройства. Сред представените теми са методи за реализиране на синусоидална широчинно-импулсна модулация на изходното напрежение в еднофазни и трифазни инвертори на напрежение, методи за селективно елиминиране на хармонични от кривата на изходното напрежение, режими на работа на резонансни преобразуватели на постоянно напрежение и др.

**Е.24.2. Григорова, Цв., "Ръководство за семинарни упражнения по Преобразувателна техника", Университетско издателство „Паисий Хилендарски“, Пловдив, 2023, ISBN 978-619-202-915-9**

Ръководството за семинарни упражнения по „Преобразувателна техника“ е предназначено за студенти от 4-ти курс, ОКС „Бакалавър“, специалност „Електроника“ на Технически университет София, Филиал Пловдив.

В учебното помагало се съдържа основната информация за принципа на действие на управляеми еднофазни и трифазни токоизправители и автономни инвертори. Всяка тема започва с теоретична част, в която се посочват необходимите формули, схеми, времедиаграми и характеристики. Представени са изчислителни съотношения и методики за проектиране, поясняващи принципа на действие на различните видове силови електронни устройства. Включени са изчислителни примери, илюстриращи отделни етапи от проектирането на тези преобразуватели, както и препоръки за избора на елементите в схемите. За по-голямата част от разглежданите примери са дадени и решения. Освен тях, за затвърждаване на получените знания, към всяка тема има примери за самоподготовка. Условието на примерите са подбирани така, че да са близки до съответните задания от практиката. Всички необходими данни за избора на схемните елементи, са отделени в края на ръководството, като приложение, и са оформени във вид на таблици.

Авторът се е стремил да обхване само типични примери, в съответствие с учебната програма по дисциплина „Преобразувателна техника“, без да има претенции да представи едно всеобхватно ръководство за проектиране на голямото разнообразие от силови електронни устройства.

Съставил:.....

10.05.2024 г.

/доц. д-р инж. Цветана Григорова/

## **ABSTRACTS OF THE RESEARCH PAPERS**

of Assoc. Prof. Eng. Tsvetana Grigorova Grigorova-Shtarbeva, Ph.D  
submitted for participation in a competition for the "professor" academic position awarding  
in the area of higher education 5. Technical sciences,  
professional field 5.2 Electrical Engineering, Electronics and Automation,  
scientific specialty "Electronic converters",  
announced in the Bulgaria State Gazette, issue 23 from 19.03.2024 г.

### **I. DESCRIPTION OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS**

A total of 47 publications, one published university book, and two published university textbooks were published after the participation in the competition for the academic title "Associate Professor" in 2007 and outside the scientific works for the registration of the academic title "Associate Professor" in the Register of Academic Positions and Dissertations at NACID, distributed in groups as follows, were submitted for participation in the competition:

**1. Group B – 12 pcs.**

1.1. Indicator B4. Habilitation - equivalent scientific publications (not less than 10) that are referenced and indexed in world-known databases of scientific information – 12 pcs.

**2. Group Г – 32 pcs.**

2.1. Indicator Г.7. Scientific publications that are referenced and indexed in world-known databases of scientific information – 20 pcs.

2.2. Indicator Г.8. Scientific publications in non-referenced journals with scientific reviewing or in edited collective papers – 12 pcs.

**3. Group 3 – 3 pcs.**

3.1. Indicator 3.31. Scientific publications in journals with impact factor (IF of Web of Science) and/or impact rank (SJR of Scopus) – 3 pcs.

**4. Group E – 3 pcs.**

4.1. Indicator E.23 – 1 published university book;

4.2. Indicator E.24 – 2 published university textbooks.

### **II. SUMMARIES OF THE SCIENTIFIC WORK REFERRED TO IN INDICATOR B.4, PRESENTED AS THE EQUIVALENT OF A MONOGRAPHIC WORK ON THE SUBJECT:**

#### **ANALYSIS, MODELING, AND DESIGN OF A RESONANT DC/DC CONVERTER WITH THREE REACTIVE ELEMENTS IN AN LLC-TYPE RESONANT CIRCUIT**

The miniaturization of electronic converter devices and the continuously increasing energy efficiency requirements of power supply systems determine the growing interest of specialists in resonant DC/DC converters. These converters, having improved weight and size characteristics, high efficiency, and good electromagnetic compatibility conditions, are increasingly introduced as secondary power sources for various electrical applications.

Different topologies of the resonant circuit allow the converter to give additional properties, such as an increase in output voltage and stability of regulation from no-load to short circuit mode while maintaining conditions for soft switching of transistors in the circuit, etc. Higher-order resonant circuits provide the ability to combine these properties. Recently, the resonant DC/DC converter with three reactive elements in the LLC-type oscillating circuit has found increasing application, demonstrating the practicality and versatility of these topologies. Another advantage of the LLC topologies over other resonant converters is that the two required inductances can be realized practically in only one component – the matching transformer. It is constructed to include the resonant circuit's dissipation and magnetization inductances. It is built so that both the magnetization and the

dissipation inductance are included in the resonant circuit. In contactless power transmission, this construction occurs naturally due to an air gap in the magnetic conductor.

The operation of a higher-order resonant converter at different loads and operating frequencies is complex. Its characteristics under various operating modes must be established to design and use a resonant converter effectively. For maximum simplification of the computational expressions, it is sometimes sufficient to restrict the consideration of only the fundamental harmonic current or back-e.m.f. of the equivalent sources. In this case, the voltages and currents in the linear part of the equivalent converter circuit are obtained in sinusoidal form, and the known methods for analyzing sinusoidal quantities can be used. Although the analysis by the first harmonic method is simple and convenient for practical purposes, its accuracy is not always sufficient.

Graphical methods, which are based on waveforms of the real dependencies between currents, voltages, and other quantities of active nonlinear elements, are convenient for analyzing nonlinear circuits. The state-plane method is the most effective graphical method for studying certain converter device classes. It allows for the study of both transient and steady-state modes. In the steady-state mode, the state plane method facilitates a better understanding of the converter's operation, including determining operating modes. Its advantage, in the analysis of electromagnetic processes in the resonant converter, is that the real waveform of the current in the resonant circuit is taken into account.

Consistently, the electromagnetic processes and the specific characteristics in different operating modes of the resonant LLC DC/DC converter are considered in the publications presented as equivalent to a habilitation thesis. Two approaches for mathematical analysis of processes in the circuit configuration are presented - analysis by the first harmonic approximation method and analysis by the state plane method. The analyses are performed assuming that the transformer turns ratio  $k=1$ , all elements in the circuit are ideal, the power devices are switched instantaneously and the ripples of the supply and output voltages are negligible. Analytical dependencies are derived, which are summarized and reduced to the influence of the following basic quantities - the ratio between the parallel  $L_P$  and series  $L_S$  inductances  $a$  ( $a=L_P/L_S$ ) in the oscillating circuit or „inductance ratio“ and the frequency ratio  $\nu$  (the ratio between the switching frequency  $\omega_S$  and the resonant frequency  $\omega_0$  of the series tank). The impact of these parameters on the performance of the resonant LLC converter is investigated by recommending limits for the choice of their values. Output, control, and load characteristics obtained by the two methods are illustrated with waveforms and graphs. Design methodologies for the resonant LLC DC/DC converter based on the two analysis methods are proposed and verified by computer simulations and experimental results.

The studies in the presented publication materials, presented as equivalent to a habilitation thesis, can be referred to in the following areas:

II.1. Analysis, modeling, and design of a resonant LLC DC/DC converter with capacitive output filter in steady state by the first harmonic approximation method — publications [B.4.1], [B.4.2], [B.4.3], [B.4.4].

II.2. Analysis, modeling, and design of electromagnetic processes in a resonant LLC DC/DC converter with capacitive output filter by the state plane method — publications [B.4.5], [B.4.6], [B.4.7], [B.4.8], [B.4.9], [B.4.10], [B.4.11] and [B.4.12].

### **II.1. Analysis, modeling, and design of a resonant LLC DC/DC converter with capacitive output filter, in steady-state, by the first harmonic approximation method**

**B.4.1.** Vuchev, A. S., T. Gr. Grigorova, I. P. Maradzhiev, "A Unified Analysis of LLC Resonant DC/DC Converter with Capacitive Output Filter", 10th National Conference with International Participation, ELECTRONICA 2019 - Proceedings, Sofia, Bulgaria, 2019, pp.1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA.2019.8825604, ISBN: 9781728136226 /Scopus, SJR=0.11 (for 2020)

In this paper, a summarized mathematical analysis of the electromagnetic processes in a full-bridge resonant LLC DC/DC converter with a capacitive output filter, describing a full range of operating



frequency variation, is developed using the first harmonic approximation method. As a result of the analysis, dependencies for the basic quantities have been obtained, which can be used to determine the boundaries of the converter performance while maintaining the soft switching conditions of the transistors in the circuit. The presented analytical dependencies are reduced to the effect of the inductance ratio  $a$  between the parallel and series inductances and the frequency ratio  $v$ .

Normalized output characteristics under widely changing loads are built for different values of the frequency ratio  $v$  with the parameter of the inductance ratio. During the design process, these characteristics help define the nominal operating point of the LLC converter when matched to a specific real load.

An analytical normalized dependence for the output current is derived, proving that it is possible under a certain frequency ratio  $v_{\text{bound}}$  the converter to behave like an ideal current source. It is shown that, in this case, the normalized output current depends only on the inductance ratio. Based on the presented normalized output characteristics, the operating conditions of the circuit as a buck or a boost converter are discussed, as well as the commutation mechanisms occurring concerning the transistors in the circuit, either zero-voltage switching (ZVS) or zero-current switching (ZCS).

Analytical expressions for the output power and the phase difference  $\varphi$  between the voltage and current in the inverter part of the circuit are proposed. These expressions are used to build normalized characteristics for various values of the frequency ratio  $v$ , as a function of the normalized output current at the parameter of the inductance ratio. The influence of the frequency ratio on these characteristics is thoroughly analyzed. The resulting dependencies of phase differences  $\varphi$  provide the designer with crucial insights into the circuit's commutation mechanisms, thereby guiding the control of the power transistors and the selection of necessary snubbers. The paper concludes with recommendations on the switching mechanisms in the LLC converter circuit.

**B.4.2. Grigorova, T. Gr., A. S. Vuchev, I. P. Maradzhiev, "Output and Control Characteristics of an LLC Resonant DC/DC Converter", 10th National Conference with International Participation, ELECTRONICA 2019 - Proceedings, Sofia, Bulgaria, 2019, pp.1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA.2019.8825607, ISBN: 9781728136226/Scopus, SJR=0.11 (for 2020)**

In the present paper, the summarized mathematical analysis developed in [B.4.1] by the first harmonic approximation method of the electromagnetic processes in the circuit of a resonant LLC DC/DC converter with a capacitive output filter is extended in terms of output characteristics and control characteristics. The aim is to assess the control properties of the examined converter. Graphically normalized output characteristics are presented for different values of the inductance ratio in the circuit of the full-bridge resonant LLC DC/DC converter ( $a=1$ ,  $a=3$ , and  $a=10$ ) at different frequency ratios  $v$ . The influence of the inductance ratio on them is analyzed. The characteristic defining the boundary of the circuit operation between the two commutation mechanisms - operation at zero voltage and zero current (ZCS - ZVS regions) is discussed.

An analytical dependence is derived, by which the family of converter's normalized control characteristics is built as a function of the normalized value of the load resistor at different values of the inductance ratio ( $a=1$ ,  $a=3$ , and  $a=10$ ). This dependence more accurately shows the physical nature of the processes developing in the converter because the load resistance is intuitively linked to the load consumption in the circuit. The influence of the inductance ratio on the circuit's control properties is analyzed. The paper outlines the circuit's essential characteristics related to frequency control and discusses the criteria for choosing the ratio between the inductances.

The results of the theoretical analysis are verified by simulation and experimental study. Comparative data of calculated, simulated, and experimentally obtained results are presented, showing acceptable accuracy of the obtained analytical relations for engineering calculations.

**B.4.3. Vuchev, A. S., T. Gr. Grigorova, I. P. Maradzhiev, "Investigation of an LLC resonant DC/DC converter with a capacitive output filter, Part I - Load Characteristics", 28th International Scientific**

The presented studies aim to derive analytical expressions for determining the currents through the power devices and the resonant circuit elements of an LLC DC/DC converter with a capacitive output filter based on the unified analysis developed in [B.4.1] using the first harmonic approximation method (FHA).

An analytical dependence for the normalized root mean square value of the current through the series inductance is derived. Following this equation, normalized current dependencies through the series inductance as a function of the output current at ZVS mode, obtained for the different inductance ratios and different values of the frequency ratio  $\nu$ , are plotted. The relationships show that the current through the series inductance always has a non-zero value for the load variation range where the commutation occurs at zero voltage. These load characteristics are used to discuss essential circuit properties.

Furthermore, analytical relationships are derived for the basic electrical quantities in relative units: the average current through the transistors, the average current through the freewheeling diodes, the average input current, the average current through the rectifier diodes, and the maximum value of the voltage across the series capacitor. The normalized dependences of the average values of the currents through the transistors and the freewheeling diodes in the inverter part of the circuit as a function of the output current for different values of the frequency ratio  $\nu$  at ZVS mode and the inductance ratio as a parameter are plotted. The presented results confirm that the currents through the transistors have non-zero values. Furthermore, it is observed that the currents through the elements can have significant values, even at small loads, for frequency ratios close to  $\nu_{\text{bound}}$  at which the converter behaves like an ideal current source, thus increasing the losses in the circuit. The analysis of the presented load characteristics shows the load range at which zero-voltage switching operation (ZVS) is possible.

**B.4.4. Grigorova, T. Gr., A. S. Vuchev, I. P. Maradzhiev, "Investigation of an LLC resonant DC/DC converter with a capacitive output filter, Part II-design considerations", 28th International Scientific Conference Electronics, ET 2019 - Proceedings, Sozopol, Bulgaria, 2019, pp.1-4, doi: 10.1109/ET.2019.8878657, ISBN: 9781728125749/**Scopus, SJR=0.11 (for 2020)****

The presented research aims to develop an engineering design methodology for a resonant LLC DC/DC converter with a capacitive output filter when the output power is controlled by changing the operating frequency based on the analytical expressions obtained by the first harmonic approximation method. Various aspects regarding the choice of the inductance ratio, such as frequency range of operation, current values at the turn-off of the transistors, etc., are discussed. The conditions for obtaining zero-voltage switching (ZVS) and the possibility of using ZVS drivers allowing soft switching operation over a wide range of load variations are analyzed. The design methodology is based on specified values of output power, output voltage, and operating frequency. The specificity of the proposed design is that the choice of the frequency ratio and the inductance ratio is its base. The design is performed by selecting the converter to operate at the point of maximum output power.

Based on the proposed methodology, analytical expressions are derived to calculate the values of the passive elements in the oscillating circuit with three LLC-type reactive elements and all the current-voltage requirements of the active and passive components in the circuit.

Based on the obtained dependencies, a half-bridge resonant LLC DC/DC converter is designed, simulated, and experimentally tested. The computer simulations and experimental investigations confirm that the presented engineering design methodology provides acceptable accuracy of the obtained results.

## **II.2. Analysis, modeling, and design of electromagnetic processes in a resonant LLC DC/DC converter with capacitive output filter by the state plane method**

**B.4.5.** Vuchev, A. S., T. G. Grigorova, "A Study of the Boundary Modes of an LLC DC/DC Converter Operating above Resonant Frequency," 2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305102/ **Scopus / WoS**

The fundamental harmonic approximation method analyzes electromagnetic processes in a resonant LLC DC/DC converter with a capacitive output filter. It is characterized by satisfactory accuracy in practice, usually in regions with heavy loads, while the relative errors in applying the first harmonic method can be significant in light loads.

This study uses the state plane method to analyze the performance of the LLC DC/DC converter operating above resonant frequency, including no-load and short-circuit modes. The method clearly describes the change in the current in the resonance circuit and, therefore, the current through the transistors and diodes, the voltage through the capacitor, and the stored energy in the resonance circuit, both in steady-state and transient mode. The state variables are the normalized voltage  $u'_{Cs}$  across the capacitor  $C_S$  and the current  $i'_{Ls}$  across the series inductance  $L_S$ . The operation of the converter is further illustrated by the trajectory of the operating point in the state plane ( $x= U'_{Cs}$ ,  $y=i'_{Ls}$ ).

The electromagnetic processes in each operating interval are described. Analytical normalized dependencies are derived to determine the magnitude of the output voltage at no-load and the magnitude of the output current at a short circuit. The presented dependencies are reduced to the effect of the inductance ratio and the frequency ratio  $\nu$ , similar to the used approach in the unified analysis by the first harmonic approximation method. Comparative data from calculated and simulation results are presented. A very good agreement between them is observed, with a relative error within 1-6%.

**B.4.6.** Vuchev, A. S., T. G. Grigorova, "State Plane Analysis of an LLC DC-DC Converter Operating above the Resonant Frequency," 2021 12th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513704. / **Scopus**

A significant problem in applying the state plane method to the analysis of resonant converters is determining the initial conditions of the differential equations describing the processes in the resonant circuit. In some cases, the solution is found computationally; in others, it is found analytically. This paper proposes a mathematical analysis of the electromagnetic processes in a resonant LLC DC/DC converter operating above resonant frequencies based on the state plane method. Expressions for determining the initial conditions of the differential equations modeling the processes in the resonant tank of the LLC DC/DC converter are derived. The resulting dependencies can be used to find currents through the power devices and the output circuit. Therefore, the obtained results are essential for studying the converter's behavior and design.

**B.4.7.** Grigorova, T. G., A. S. Vuchev, "Output and Control Characteristics of an LLC DC-DC Converter Operating above Resonant Frequency based on State Plane Analysis," 2021 12th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513660. / **Scopus**

This paper, based on the analysis by the state plane method, derives analytical expressions of basic quantities on which the selection of elements in the design of the LLC DC/DC converter, the output, and the control characteristics depend.

The developed mathematical analysis describes the operation of the circuit above the resonant frequency. The analytical dependence for the converter output characteristics as a function of the frequency ratio  $v$  and the inductance ratio is derived. The normalized output characteristics at the inductance ratio ( $a=1$ ,  $a=3$ , and  $a=10$ ) at different frequency ratio values  $v$  are plotted. The output characteristics obtained by the first harmonic approximation method discussed in [B.4.2] are shown in the same figures with dashed lines. A comparison between the results obtained through the state plane analysis and those obtained using the first harmonic approximation (FHA) method is proposed. It is proved that the relative errors between the output power characteristics obtained with the state plane analysis and those obtained using the FHA method are significant at light loads (close to no-load).

Furthermore, a comparative analysis of the normalized output power characteristics at different frequency ratios obtained by the state plane method and the FHA is also presented. The relative errors between the characteristics obtained by the two methods are significant at light loads. The same approach is applied to the control characteristics. The normalized control characteristics obtained by the two methods are plotted at the inductance ratio as a parameter. There are no observed differences between the control characteristics received from both comparison methods at small values of the normalized load resistance. These results were expected, given the data obtained for the output characteristics. On the other hand, when normalized load resistance increases, the differences between the characteristics obtained using these two methods become significant.

Analytical normalized expressions for the average current through the transistors and freewheeling diodes are received. Based on them, the normalized dependencies of these quantities as a function of the normalized output current at  $a=3$  and  $a=10$  for the different values of frequency ratio  $v$  are built. The obtained results are analyzed.

**B.4.8. Grigороva, T., A. Vuchev and S. Vuchev, "A Design Methodology for an LLC DC-DC Converter Operating above the Resonant Frequency," 2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET52713.2021.9579695. / Scopus**

This paper aims to develop a methodology for designing a resonant LLC DC/DC converter based on the precise analysis of the electromagnetic processes in the circuit using the state plane method. The converter operates above the resonant frequency, and frequency control achieves output power control.

The engineering methodology developed for the design of the LLC converter is based on the following input parameters: output power, output voltage, and operating frequency. Analytical normalized equations are derived for the maximum current value through the transistors and the maximum voltage across the series capacitor. The specificity of the proposed design is the selection of the frequency ratio and the inductance ratio, with the converter operating at the point of maximum output power, similar to the approach in the design methodology based on the analysis using the fundamental harmonic approximation method. Analytical expressions are presented to calculate the values of the resonant circuit elements (series and parallel inductances, series capacitor), assuming that the LLC converter operates at the point of maximum output power for the selected frequency ratio. The design algorithm is discussed.

Based on the converter control characteristics for the operation mode above the resonant frequency, the influence of the inductance ratio on the circuit performance is discussed. For small values of the inductance ratio, the output voltage is more sensitive to the frequency change. Larger values of the ratio lead to an increase in the transformer magnetizing inductance. As a result, a smaller magnetizing current is created in the transformer's primary winding, resulting in smaller magnetizing losses. On the other hand, the zero-voltage switching mode at no-load can be violated for the large values of the magnetizing inductance. It is usually recommended to operate at the inductance ratio  $a=3\div 10$ .

Using the calculated elements, a full-bridge LLC DC/DC converter was designed, and simulation studies were carried out using the *OrCad PSpice* simulator. The results confirm that the conducted

design procedure is highly accurate, with a 1-2% relative error. The differences are mainly from the models of the semiconductor elements used and the presence of snubber capacitors in the simulation circuit.

**B.4.9. Vuchev, A. S., T. Gr. Grigorova and S. A. Vuchev, "RMS Current Values in an LLC DC-DC Converter Operating above the Resonant Frequency," 2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET52713.2021.9579989. / Scopus**

This paper presents an algorithm based on the state plane method for calculating root mean square (RMS) values of currents through the elements in the resonant LLC DC/DC converter circuit when operating above the resonant frequency. This will further facilitate the design and determination of these converters' efficiency. The normalized dependencies of the RMS current through the inductance in the series branch of the resonant circuit as a function of the normalized output current are plotted. They are obtained for the same operating frequency but different inductance ratios ( $a=1$ ,  $a=3$ , and  $a=10$ ). Based on these characteristics, it is proved that the RMS current value increases with decreasing inductance ratio. This effect is most noticeable at no-load. As the RMS current through the series inductance increases, the load is less dependent on the inductance ratio.

The relationships for the RMS value of the current through the inductance in the parallel branch are also plotted. They are obtained under the same conditions as those for the RMS current through the series inductance. Again, the RMS current increases with the decrease in the inductance ratio. The most significant differences are observed in no-load conditions. Furthermore, the dependencies of the RMS current through series and parallel inductances obtained for the same ratio between the inductances but for different operating frequencies are illustrated. A significant difference between the characteristics is observed, not only for no-load but also for load. It can be summarized that the RMS currents through the two inductances increase as the ratio between the inductances and the operating frequency decreases. This conclusion guides possible options for reducing losses in these elements.

Dependencies for the RMS currents through the two branches of the resonant tank and the load are presented and obtained for the same operating frequency but for two different ratios between the inductances. In the same figures, the results of computer simulations are given. Based on the analysis of the graphs, it is shown that at no-load, the RMS current through the load is non-zero, especially when the ratio between the inductances is small. Besides, the currents through the series and parallel branches are not equal. This mismatch results from the assumption that the input current of the rectifier is continuous. This is not the case near the no-load mode due to the action of the capacitive output filter. Furthermore, it should be noted that the theoretical results very closely match those from computer simulations. The differences observed near the no-load condition decrease as the ratio between the inductances decreases.

Additionally, the dependencies of the RMS currents through the converter's semiconductor elements are also presented. They are obtained for the same operating frequency but two different inductance ratios. The obtained results are compared with those from computer simulations. A very good agreement is observed, confirming the accuracy of the theoretical study.

**B.4.10. Grigorova, T., A. Vuchev and S. Vuchev, "Loss Power Investigation in an LLC DC-DC Converter Operating Above the Resonant Frequency," 2021 29th National Conference with International Participation (TELECOM), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 141-144, doi: 10.1109/TELECOM53156.2021.9659714. / Scopus/ WoS**

It is known that when operating at frequencies above the resonant one, the transistors in the inverter part of the resonant LLC DC/DC converter circuit operate in soft switching conditions at zero voltage (ZVS), and the power elements in the secondary rectifier switch at zero current (ZCS). This circumstance ensures very low switching losses for the power devices. As a result, the main losses in the switching elements are conduction losses.

The paper presents a study of the power losses in a full-bridge LLC DC-DC converter circuit operating above the resonant frequency based on the state plane Analysis. The investigation is made at different control frequencies and load variations from no-load to short-circuit. Since the circuit operates at frequencies higher than the resonant frequency and the switching mechanism is carried out at ZVS, the losses in the transistor are considered conduction losses and turn-off losses.

The graphical representation of the normalized expressions of the transistor's conduction losses, the freewheeling diode, and the rectifier diode in the secondary side of the circuit for the same ratio between the inductances but different operating frequencies ( $v=1.15$ ,  $v=1.3$  and  $v=1.5$ ) are illustrated. Their influence on the total losses in the circuit is discussed without considering the losses in the transistor's control circuit (driver losses).

Following the research in [B.4.8], a full-bridge LLC converter circuit is designed at a nominal operating point corresponding to the maximum output power. Based on the design data, a model was created in the *OrCAD PSpice* simulator. With its benefit, studies were carried out to determine the power losses in the individual switching elements and the efficiency of the circuit at different values of the converter load, different values of the inductance ratio, and the frequency ratio  $v$ . Comparative results of analytical calculations and results obtained from computer simulations of normalized dependences of conduction losses of the transistor, antiparallel diode, and rectifier diode at inductance ratio  $a=3$  at different operating frequencies ( $v=1,15$ ,  $v=1,3$  and  $v=1,5$ ) are presented in graphical form.

From the analysis of the plots, the significant influence of the conduction losses of the diodes in the rectifier is evident. These losses are substantial compared to the losses in transistors and freewheeling diodes, regardless of the operating frequencies. Recommendations are made to improve the efficiency of the LLC topology. The efficiency of the designed LLC DC-DC converter is calculated. The variation of the efficiency of the circuit with the converter load is illustrated. The presented comparative results between the theoretical calculations and those of the simulation studies show a very good agreement between the results of the two studies. The converter efficiency is relatively high for the nominal operating mode, above 93% (for the used semiconductor devices).

**B.4.11.** Vuchev, A., T. Grigorova and S. Vuchev, "Analysis of Continuous Current Mode of an LLC Resonant DC-DC Converter at ZVS," 2022 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA55578.2022.9874422 / Scopus

This publication performs a theoretical analysis of a resonant LLC DC-DC converter operating in continuous current mode with zero voltage switching (ZVS). Based on the modeling of the processes in the resonant tank by differential equations, expressions for the basic quantities are derived for both buck and boost modes. Analytical relationships are derived to determine the conditions for switching to the discontinuous current mode. The boundary of the operating region in zero voltage switching (ZVS) is defined. The output characteristics of the converter at different circuits and control parameter values are plotted graphically. Using the presented equations, values for the graphical representation of the converter output characteristics in the continuous current mode (CCM) are calculated for different values of the inductance ratio ( $a = 1$  and  $a = 3$ ). The dependencies obtained for operation at frequencies above and below the resonant frequency are shown. The ZVS-ZCS boundary is given. It is only available for operation below the resonant frequency. The boundary between continuous current mode (CCM) and discontinuous current mode (DCM) is also presented.

The analysis of the presented graphical results shows that for some range of output current variation, the boundary between continuous current mode and discontinuous current mode matches that defining the operation below and above the resonant frequency. The normalized output voltage is always lower than the supply voltage for operation above the resonant frequency. Conversely, when the operating frequency is lower than the resonant frequency, the output voltage is higher than the input voltage. As the inductance ratio increases, the discontinuous current mode (DCM) area decreases when operating above the resonant frequency. Moreover, for the same ratio between frequencies, the output voltage increases. For an operation below the resonant frequency and

increasing inductance ratio, the discontinuous current mode (DCM) and especially the continuous current mode (CCM) areas decrease. This is mainly due to the shift of the ZVS-ZCS boundary towards the ordinate axis (towards the lower output current values). With a sufficiently large ratio between the inductances, the continuous current mode (CCM) area is negligible. The obtained results can also be useful for other studies concerning LLC converters.

**B.4.12. Grigorova, T., A. Vuchev, "LLC Resonant Converter as a Current Source Using Simple Trajectory Control". Energies 2023, 16 (12), 4629. <https://doi.org/10.3390/en16124629> Scopus / WoS - Q1/ IF=3.2**

The control method determines many of the properties and characteristics of resonant LLC DC/DC converters. The optimal trajectory control method based on the state plane technique can provide a fast dynamic response for series resonant DC/DC converters. This control is more complicated to implement in the LLC converter circuit due to increased state variables and operating modes. Optimal trajectory control has several advantages over other control methods: reducing overvoltages of reactive and switching elements in the circuit and fast dynamic response to significant changes in converter operating conditions without affecting the overall system's stability. A disadvantage of this method is the need to calculate a non-linear function in real-time, defining all the energy accumulated in the resonant circuit.

This paper proposes and investigates a simplified control of a resonant LLC DC/DC converter, which has a behavior similar to that with optimal control of the operating trajectory. The significant simplification of the control is mainly due to the linearization of the control function based on a linear combination of the voltage across the capacitor and the current through the inductance in the series resonant circuit. Furthermore, the power transistors are switched at zero voltage. The performed theoretical analysis shows that the converter control provides linear regulation characteristics and has the characteristics of a short-circuit stable current source.

In the case of a short circuit, the converter remains operational, and the value of the output current does not depend on the ratio between the inductances since the parallel inductance cannot influence it. Thus, the behavior of the LLC resonant converter is confirmed to be similar to optimal trajectory control but using a more straightforward implementation.

The normalized output, control, and load characteristics are derived for the control using the simplified method and operation at frequencies above the series resonant frequency. The resulting load characteristics show the basic requirements for the converter elements necessary for their design.

The boundaries at which the simple trajectory control method is valid are defined. The stability border on the output characteristics outlines a theoretical possibility whereby the normalized output voltage achieves a relatively high value ( $\approx 0.8$ ) as the control parameter  $Ref$  varies considerably. Moreover, this voltage increases insignificantly when the inductance ratio decreases. The area of the discontinuous current mode increases when the value of the inductance ratio decreases.

The control characteristics  $I'_o(Ref)$  are near linear for values of the control parameter  $Ref \geq 1$ . On the basis of the tabular results for the values of the dynamic gain  $\Delta I'_o / \Delta Ref$ , it can be concluded that at low values of the normalized output voltage ( $V'_o = 0.1 \div 0.3$ ) the control characteristics practically coincide, regardless of the magnitude of the inductance ratio. For high values of the normalized output voltage ( $V'_o = 0.6 \div 0.7$ ), the differences between the control characteristics at inductance ratios  $a = 3$  and  $a = \infty$  (series resonant DC/DC converter) are insignificant (0.01 – 0.02), whereas those obtained at inductance ratio  $a = 1$  deviate significantly (0.04 – 0.08). Regarding the dependences of the average value of the input current  $I_d(I'_o)$ , it is observed (the reading taken of the stability border) that when parameter  $Ref$  is changed from 3.5 to 5.0, the output power in relative units increases by approximately 1.49 times for  $a = 1$ . Respectively, for  $a = 3$ , this increase is 1.41 times and for  $a = \infty$  (series resonant DC/DC converter), it is 1.39 times. Therefore, even for low values of the inductance ratio, the considered circuit has very similar properties to those of a series resonant converter.

The converter's control system is described using Analog Behavioral Modeling (ABM) embedded in the *PSpice for TI* simulator. Thus, on the one hand, sufficiently accurate results are achieved, and

on the other hand, the simulation process is simplified. The proposed functional model of the control system is composed of a minimum number of elements and is easy to set up. The properties and dynamic behavior of the converter are verified by computer simulations, both in steady-state and when the control parameter is changed significantly. A comparison between theoretical and simulation results of output characteristics  $V_o(I_o)$  shows a relative error within 2%. More significant differences (around 3%) are observed for small values of the control parameter  $Ref$ . Regarding the comparison between theoretical and simulation results of control characteristics  $I_o(Ref)$  could be pointed out that the deviations between theoretical and simulation results do not exceed 2%. More significant differences are observed for small values of the control parameter  $Ref$ . A growing tendency of the relative error is observed as zero is approached.

Furthermore, calculating the value of the voltage applied to the capacitor of the series resonant circuit would be very convenient when applying the considered control method to some half-bridge circuits. Moreover, using only one measurement is a prerequisite for increasing the reliability of the proposed solution. The performed studies using the model confirm that the simplified control technique provides a fast dynamic response and robust operation when the control parameter is changed. Therefore, the converter can be successfully used as a battery-charging device.

### III. PUBLICATIONS BEYOND THOSE INCLUDED IN THE EQUIVALENT OF A MONOGRAPHIC WORK

The publications submitted to the competition refer to indicators:

- Group  $\Gamma.7$ . Scientific publications in journals that are refereed and indexed in world-known databases of scientific information;
- Group  $\Gamma.8$ . Scientific publications in non-refereed peer-reviewed journals or in edited collective works;
- Group 3.31. Scientific publications in journals with impact factor (IF of Web of Science) and/or with impact rank (SJR of Scopus).

The studies in publications beyond those included in the equivalent of a monographic work are focused on the following thematic areas:

1. Analysis, study, and modeling of a phase-shift controlled resonant LLC DC/DC converter - publications [ $\Gamma.7.1$ ], [ $\Gamma.7.2$ ], [ $\Gamma.7.3$ ], [ $\Gamma.7.4$ ] and [ $\Gamma.7.5$ ].
2. Investigation of control algorithms for a reversible converter supplying a switched reluctance motor in motoring and generating modes of operation with consideration of power losses and efficiency, and torque ripples — publications [ $\Gamma.7.7$ ], [ $\Gamma.7.8$ ], [ $\Gamma.7.9$ ], [ $\Gamma.7.10$ ], [ $\Gamma.7.11$ ], [ $\Gamma.7.12$ ], [ $\Gamma.7.13$ ] and [3.31.2].
3. Increasing (a further development) of existing knowledge in the field of autonomous electrical energy converters — publications [ $\Gamma.7.6$ ], [ $\Gamma.7.19$ ], [ $\Gamma.8.1$ ], [ $\Gamma.8.2$ ], [ $\Gamma.8.3$ ], [ $\Gamma.8.4$ ], [ $\Gamma.7.14$ ], [ $\Gamma.7.16$ ], [ $\Gamma.7.17$ ] and [3.31.3].
4. Analysis and study of different modulation techniques in brushless motor control converter — publications [ $\Gamma.8.9$ ], [ $\Gamma.8.10$ ] and [ $\Gamma.8.11$ ].
5. A study and implementation of new methods and development tools for training in the field of power electronics — publications [ $\Gamma.7.15$ ], [ $\Gamma.7.18$ ], [ $\Gamma.8.5$ ], [ $\Gamma.8.6$ ], [ $\Gamma.8.7$ ] and [ $\Gamma.8.8$ ].
6. Creation of mathematical methodologies and algorithms for research and design of optical communication systems with open transmission medium — publications [ $\Gamma.7.20$ ] and [ $\Gamma.8.12$ ].
7. Creation of a new device for acoustic and visual demonstration of the corpuscular nature of light — publication [3.31.1].



### III.1. ANALYSIS, STUDY, AND MODELLING OF A PHASE-SHIFT CONTROLLED RESONANT LLC DC/DC CONVERTER

**Г.7.1. Grigorova, T., A. Vuchev,** "A Study of a Phase-Shifted Full-Bridge LLC Resonant Converter Operating in Continuous Conduction Mode with ZVS," 2022 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ELECTRONICA55578.2022.9874435./ **Scopus**

Phase-shift modulation is one method used in resonant converters to control the output voltage. In this case, with the change of the load, a change in the mechanisms of natural switching of the converter power devices is also required. The purpose of this paper is to discuss the commutation mechanisms of the power devices observed in continuous conduction mode and ZVS commutation in a full-bridge LLC resonant converter when controlling the output voltage while a phase-shift modulation is being applied (an appropriate phase-shift between power transistors control pulses). A comparison with the switching mechanisms in the phase-shift modulation of a series DC/DC converter is used.

For the phase-shift controlled LLC resonant converter operating above the resonant frequency, the following modes are defined with respect to the rectifier input current: a continuous current mode (denoted as MODE I and MODE II) and a discontinuous current mode (denoted as MODE III). The study and analysis of the operation of the converter in the MODE I continuous current mode shows that all transistors in the inverter part of the circuit are switched at zero voltage (ZVS). It is shown that in the second continuous-current mode, MODE II, it is possible to maintain the zero-voltage switching conditions for all four transistors in the circuit. This depends on various parameters such as: the ratio between the inductances, the phase shift angle  $\alpha$  between gate signals of transistors' pairs of the two arms of the bridge, the load value (or quality factor) and the frequency ratio  $\nu$ . The results of a simulation study, which confirm the theoretical examinations, are also presented. In future work, the authors aim to determine the conditions under which the circuit can operate in the studied modes.

**Г.7.2. Vuchev, A., T. Grigorova,** "A Study of a Phase-Shifted Full-Bridge LLC Resonant Converter Operating at ZVS/ZCS," 2022 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ELECTRONICA55578.2022.9874367. /**Scopus**

This paper studies the switching mechanisms that occur in a phase-shift control of an LLC DC/DC converter due to load changes operating at zero-voltage switching (ZVS)/zero-current switching (ZCS). The converter's operation is considered at frequencies higher than the resonant frequency.

Depending on the value of various parameters such as: the ratio of inductances, the phase shift angle  $\alpha$  between the operating intervals of the transistors' pairs of the two arms of the bridge, the load value (or quality factor) and the frequency ratio, in the second continuous current mode, MODE II, the switching conditions at zero voltage when the transistors are switched on are obtained only for the transistors of the "leading-leg", while the transistors of the "lagging-leg" are switched off with negative current, i.e. after the resonant circuit current has reversed its direction. This results in zero-current switching (ZCS). A third mode of operation, MODE III, defined as a discontinuous current mode with respect to the rectifier, is also considered. The switching mechanisms under it are discussed. It is shown that, under certain conditions, switching at zero voltage for all four transistors is possible. It should be noted that for larger control angles  $\alpha$  and less load (for a given ratio between inductances and frequency ratio), the ZVS conditions for the transistors on both legs of the MODE III bridge may be capable of being violated. The resulting switching mechanism is the same as in a series resonant DC/DC converter. The theoretical results are supported by simulation studies.

**Г.7.3. Grigorova, T., A. Vuchev and S. Vuchev,** "Basic Dependencies of a Phase-Shift Controlled LLC DC-DC Converter at Continuous Current Mode," 2022 XXXI International Scientific

Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET55967.2022.9920305./ **Scopus**

This paper aims to perform an analytical study of the electromagnetic processes in an LLC DC-DC converter under a phase-shift control method and continuous current operation. Analytical normalized dependencies for the basic quantities describing the state of the oscillating circuit are derived. The boundary conditions for the transition between the MODE I and MODE II operating modes and the transition between the continuous current mode and the discontinuous current mode are presented. Using the obtained expressions, the output characteristics of the converter can be plotted, and the switching currents of the transistors and diodes in the different stages of the circuit operation can be determined. A simulation model has been implemented in the *PSpice* simulator to verify the operation of the converter in MODE II and the corresponding switching mechanisms. The simulation results confirmed the theoretical analysis's conclusion that for MODE II, all four transistors of the inverter bridge can switch at zero voltage at low phase-shift angle values. However, when the phase-shift angle increases, the "lagging leg" transistors switch at zero current.

The obtained results will be useful for further investigating the properties of LLC DC-DC converters and for their overall design.

**Г.7.4. Vuchev, A. S., T. G. Grigorova** and S. Vuchev, "Output Characteristics for Continuous Current Mode of a Phase-Shift Controlled LLC DC-DC Converter," 2022 XXXI International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET55967.2022.9920282./ **Scopus**

The objective of the presented research is to investigate a phase-shift controlled resonant LLC DC-DC converter based on the output characteristics. The continuous current mode at the input of the rectifier is mainly considered. The study was conducted at different ratios between the inductances in the parallel and series branches of the buildup circuit. The results can be summarized as follows: the qualities of the investigated circuit are very close to those of a phase-shift controlled series resonant DC-DC converter. Therefore, they are mainly determined by the applied control method. When the ratio between the inductances in the parallel and series branches of the resonant tank is reduced, the zero-current switching area (ZCS) is reduced. Thus, in the range of small phase-shift angle values, all inverter transistors switch at zero voltage. However, this leads to an increase in the discontinuous current operating mode area at the rectifier input. The value of the short circuit current depends only on the magnitude of the control angle.

The findings of this research have significant practical implications. They provide valuable insights for future research and aid in the design of phase-shift controlled LLC DC-DC converters.

**Г.7.5. Grigorova, T. G.** and A. S. Vuchev, "Modeling and Simulation of a Phase-Shift Controlled LLC Resonant Converter," 2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET59121.2023.10278726./ **Scopus / WoS**

This paper conducts a simulation study of a phase-shift controlled resonant LLC DC-DC converter, analyzing its performance at different control angles, loads, and inductance ratios. The output characteristics obtained from the simulations are compared with theoretical results for different inductance ratios  $a = 3$  and  $a = 5$ . The influence of the equivalent capacitances of the transistors (MOSFET output capacitance and snubber capacitor) on the switching mechanisms is also discussed.

The influence of various parameters on the output power regulation conditions while maintaining the zero-voltage switching (ZVS) conditions of the transistors in the "lagging- leg" is analyzed. Simulations for continuous current mode have been implemented using the *OrCad PSpice* simulator. A good agreement between theoretical and simulation results is observed.

### **III.2. INVESTIGATION OF CONTROL ALGORITHMS FOR A REVERSIBLE CONVERTER SUPPLYING A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR IN MOTORING AND GENERATING MODES OF OPERATION WITH CONSIDERATION OF POWER LOSSES AND EFFICIENCY AND TORQUE RIPPLES**

**Г.7.7.** Yankov, D. K., **T. Gr. Grigorova** and E. I. Dinkov, "Modeling of a Three-Phase 12/8 Pole Switched Reluctance Motor in MATLAB", 28th International Scientific Conference Electronics, ET 2019 - Proceedings, art. no. 8878654, doi: 10.1109/ET.2019.8878654, ISBN: 9781728125749 /**Scopus / WoS**

In recent years, industrial automation specialists have focused on the use of switched reluctance motor (SRM) drives. Due to its nonlinear nature, modeling the switched reluctance motor (SRM) is challenging. The main powerful tool for simulating this type of motor is the MATLAB/SIMULINK environment. In the MATLAB/SIMULINK environment, the built-in motor models are for the 6/4, 8/6, and 10/8 types.

The objective of this paper is to synthesize a linear model of a three-phase, 12/8 SRM (H55BMBJL) in the MATLAB environment. Equations are used to determine the dynamic behavior of a linear inductive profile of the SRM. The algorithm is described, and the dependencies for synthesizing the three-phase, 12/8 SRM model in the MATLAB environment are given. With the help of the considered model, a circuit of an asymmetric bridge converter under bipolar modulation - voltage and hysteresis-current algorithm of operation is simulated. Based on the considered methodology, the user can synthesize his specific model based on motor catalog data. Simulation results prove the accuracy of the model.

**Г.7.8.** Yankov, D., **T. Grigorova** and E. Dinkov, "A Power Loss Analysis of a Three-Phase 12/8 Switched Reluctance Motor Fed from Asymmetric Power Converter in MATLAB/SIMULINK," 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA49118.2020.9167113/ **Scopus / WoS**

This paper analyses the power losses in the power circuit of the asymmetric bridge converter supplying a three-phase 12/8 switched reluctance motor (SRM). IGBTs are chosen as the power transistors. The main losses considered are the conduction losses of the transistors and diodes, and the dynamic switching losses of the switching elements. The study was performed under unipolar and bipolar modulation.

The switched reluctance motor is a complex system to analyze. The dynamic losses in the semiconductor switching elements that build the asymmetric converter are calculated using the MATLAB/SIMULINK environment, and the dependencies for calculating the IGBTs' turn-on and turn-off power losses are implemented as a subcircuit. The same approach is used to estimate the losses in the diodes. The power losses in the power switches are analyzed sequentially under bipolar and unipolar modulation. The parameters whose influence is studied in these modulations are the motor speed and the turn-on and turn-off switching angles of the SRM.

For bipolar modulation, the analytical and simulation results of the transistor conduction losses (in one arm of the converter) versus the variation of motor speed, turn-on, and turn-off SRM switching angles are presented in graphical form.

For unipolar modulation, the graphical dependencies of the simulation results of the conduction losses, turn-on and turn-off losses, and total losses of the modulated transistor (in one arm of the converter) versus the variation of rotor speed, SRM's turn-on angle, switching frequency, and duty cycle are presented. The obtained results are analyzed.

**Г.7.9.** Yankov, D. K., **T. G. Grigorova**, "Analysis and Investigation of an Asymmetric Bridge Converter for a Three-Phase 12/8 SRM in Generating Mode," 2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305153. / **Scopus / WoS**

The asymmetric bridge converter used to drive the SRM has several advantages, such as independent phase windings, maximum flexibility in control performance, switching time, cost, converter losses, efficiency, etc. However, the asymmetric converter has lower torque ripples than the  $(m+1)$ -switch converter and higher than the C-dump converter.

The paper presents an analytical and simulation study of an asymmetric bridge converter fed three-phase 12/8 SRM in generating mode. In generating mode, an abstraction is used in which the asymmetric converter is considered as a step-up transformer with a transformer turns ratio  $G$  - the primary side of the transformer is fed by the back-EMF of the machine, and the output voltage on the secondary side is a function of the SRM converter duty cycle. An analytical dependence representing the transformer turns ratio is derived. The main purpose of the study is to clarify the conditions for achieving maximum energy recovery. The amount of energy returned from the SRM to the battery depends mainly on the excitation and generation intervals, the PWM duty cycle, the matching of the internal battery resistance, and the position-dependent SRM equivalent resistance. The obtained analytical results are validated by simulation using MATLAB/Simulink environment.

**Г.7.10.** Yankov, D., **T. Grigorova**, Al. Pavlova, "A study of energy recovery in an asymmetric bridge converter for a three-phase 12/8 SRM in generating mode", 10th International Scientific Conference "TECHSYS 2021" - Engineering, Technologies and Systems, Plovdiv, Bulgaria, AIP Conference Proceedings 1 September 2022; 2449 (1): 030003., <https://doi.org/10.1063/5.0090678/> **Scopus /WoS, SJR=0.164**

The analysis presented in [Г.7.9] is extended in the present work. The analytical and simulation studies presented in this paper result from an investigation of an asymmetric bridge converter used to control a three-phase switched reluctance motor of type 12/8 in generating mode. The highly nonlinear characteristics of the used SRM are taken into account. The analytical calculations are related to determining the most appropriate parameters, such as turn-on and turn-off angles, PWM modulation duty cycle and equivalent phase resistance to achieve maximum energy return to the power source (battery). An original analytical relationship is derived to define the duty cycle, at which the maximum transformer turns ratio is achieved. The performance of the proposed method and the obtained analytical results are verified using the MATLAB/Simulink environment.

**3.31.2. D. K. Yankov and T. G. Grigorova, A nonlinear model for a three-phase 12/8 switched reluctance machine, International Journal of Power Electronics and Drive Systems, Open Access, Volume 13, Issue 3, Pages 1576 – 1587, September 2022/ Q3, SJR=0.350, Scopus**

The paper presents a methodology for synthesizing a nonlinear model for a three-phase 12/8 switched reluctance machine (SRM) in a MATLAB/Simulink environment. The required switched reluctance motor characteristics are derived using finite element analysis (FEA). Two-dimensional tables (look-up tables) were obtained using the finite element analysis method, and the Infolytica Motorsolve software simulator was used to build the model.

The mathematical model of the SRM is divided into electrical and mechanical parts, and each part is described with the corresponding dependencies. In the structure of the presented nonlinear model, two new additional blocks are included to measure and visualize the magnitude and shape of the phase inductance and the back-EMF. The performances of the SRM under single-pulse modulation in motoring (I quadrant) and generating (II quadrant) modes using the nonlinear model are investigated. Simulation and experimental results are derived to verify the accuracy of the built three-phase, 12/8 SRM (H55PWBKM-1844) nonlinear model. A very good agreement between simulation and experimental results is observed. The relative error between simulation and experimental results is within 5-10%.

**Г.7.11.** Yankov, D., **T. Grigorova** and I. Maradzhiev, "Analytical and Simulation Study of the Power Losses of a Switched Reluctance Motor," 2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and

Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA58392.2023.10202259, Electronic ISBN:979-8-3503-1127-3 / **Scopus / WoS**

This paper presents an analytical and simulation study of power losses in a three-phase switched reluctance motor, type 12/8. A detailed analysis of the different types of losses in switched reluctance motors and their causes is carried out. The equations for their calculation and the required parameters are presented. A non-linear model of a three-phase 12/8 SRM is built for the MATLAB/Simulink environment, where losses in the motor steel, mechanical power losses due to friction, electrical losses in the stator windings, total losses in the motor, etc., are calculated, and visualized using additional blocks. Moreover, a user interface has been created to set the required input parameters such as stator outer diameter, stator tooth width, height of stator yoke, stator tooth height, maximum induction in the stator teeth, etc. Analytical and simulation studies of losses in the studied motor have been performed. The proposed approach to improve the non-linear model of the three-phase type 12/8 SRM model (H55PWBKM-1844) is characterized by several advantages, such as a significantly smaller number of blocks required to calculate the power losses, the ability to determine the efficiency of the machine and the availability of visualization of each type of loss as well as the effectiveness of the SRM, allowing the user to monitor their value at any time. The relative error between the obtained analytical and simulation results is acceptable for engineering calculations.

**Г.7.12.** Yankov, D., **T. Grigorova** and I. Maradzhiev, "Simulation and Experimental Study of Static Torque Characteristics of a 12/8 Three-Phase SRM," 2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA58392.2023.10202339, Electronic ISBN:979-8-3503-1127-3 / **Scopus / WoS**

This study presents a simulation and experimental investigation of static torque characteristics of a three-phase 12/8 switched reluctance motor (SRM) fed from an asymmetric bridge converter. The experimental study was carried out by developing an experimental setup to measure the static torque of the machine for different magnitudes of phase current and rotor positions. The simulation results for the magnitude of the static torque are obtained using the finite element analysis method FEM and the software simulator (Infolytica MotorSolve).

The experimental bench for studying the static torque characteristics of the SRM consists of the following blocks: a 12/8 three-phase SRM (H55PWBKM-1844), a rotor locking and positioning device, a rotor position sensor (encoder), mechanical arms (beams), weight measurement sensors (strain gauge cells), HX711 analog-to-digital converter, microprocessor module based on ATmega2560, and DC voltage source. The experimental study of the static torque characteristics of an SRM is based on using strain gauge torque sensors.

The presented method for experimental determination of static torque characteristics is characterized by the following advantages: a simple and robust construction, accuracy in measurement, the possibility of visualization of torque in both graphical and numerical form, and low cost. The relative error between the simulation results obtained by the finite element analysis method and the experimental results is within 5%. It is mainly due to the emerging electromechanical processes that are ignored in the FEM analysis and the modeling of the nonlinear characteristics of the stator and rotor steels affected by the increase in the magnitude of the phase inductance and phase current. Moreover, while performing the experiment, the occurrence of acoustic noise and vibration during magnetization of the phase coil in the range of  $-17.5^\circ$  to  $-2.5^\circ$  and  $2.5^\circ$  to  $17.5^\circ$ , respectively, was noticed, which primarily affected the accuracy of the measurement.

**Г.7.13.** Yankov, D. K., **T. G. Grigorova** and I. P. Maradzhiev, "Comparative Analysis of Control Algorithms for a Power converter - Switched Reluctance Motor System in Motoring Mode," 2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ET59121.2023.10279380. / **Scopus / WoS**

This paper presents a simulation study and comparative analysis of control algorithms using a unipolar modulation of a converter-switched reluctance motor system in motoring mode. The analysis is performed based on power losses in the converter, motor efficiency, and torque ripples. An asymmetric bridge converter feeds the three-phase 12/8 SRM. The study examined the power losses in the converter and motor, efficiency, and torque ripples in the MATLAB/Simulink environment for each selected algorithm while varying different input parameters.

The effect of motor speed, turn-on angle, turn-off angle, switching frequency of the upper transistors, and duty cycle is investigated. The results obtained in MATLAB/Simulink are presented in graphical and tabular form. Based on the presented results and the comparative analysis carried out, it is concluded that the most suitable control algorithm for a converter-switched reluctance motor system in terms of torque ripples, motor and converter power losses, and motoring mode efficiency is current control with independent regulators and unipolar modulation but at high switching frequency of the upper transistors.

### **III.3. INCREASING (A FURTHER DEVELOPMENT) OF EXISTING KNOWLEDGE IN THE FIELD OF AUTONOMOUS ELECTRICAL ENERGY CONVERTERS**

#### **III.3.1 A STUDY OF METHODS FOR OUTPUT POWER CONTROL IN RESONANT POWER CONVERTERS**

**Г.7.19. Grigorova, T. Gr., B. K. Pacedjieva**, "An automatic control system behavioral modeling and parametrized Spice model of a full-bridge resonant inverter operating above resonant frequency", 11th International Scientific Conference "TECHSYS 2022" - Engineering, Technologies and Systems, Plovdiv, Bulgaria, AIP Conf. Proc. 2980, pp. 030006-1-030006-7 (2024) <https://doi.org/10.1063/5.0184394> / **Scopus/ WoS, SJR=0.164**

Resonant inverters are used as power sources in various electrotechnology applications. Soft-switching resonant converters require specific methods of output power control. In addition, the energy exchange between input and output is accomplished through the resonant circuit, which is an energy storage element. An excellent knowledge of the electromagnetic processes in the converter, as well as the nature and behavior of the load, is required. In this aspect, the efforts of specialists in recent years have focused on studying different methods of output power control to create wide-range resonant converters with improved regulation, energy, and economic performance.

The *PSpice* simulator can be used not only to verify the designed circuits' characteristics but also as a tool for the design itself. The ability to set functional dependencies between circuit element values using parameters allows design dependencies to be introduced into the circuit description. In this paper, we consider a parameterized *PSpice* model for the *PSpice for TI* simulator of a full-bridge resonant inverter operating above resonant frequencies and an analog behavioral model of a control system with automatic regulation of the root mean square (RMS) value of the output current. The control system is self-excited and allows the output power of the inverter to be adjusted by varying the conduction time of the transistors. Analytical dependencies are presented, based on which the corresponding load characteristics under strongly varying loads are constructed. The definition of functional dependencies for the design of a resonant inverter operating above resonant frequencies and the realization of its parameterized description are performed. Results of simulation studies are shown, which confirm the theoretical study carried out.

#### **III.3.2. CREATION, ANALYSIS AND CIRCUIT DESIGN OF POWER ELECTRONIC EQUIPMENT**

**Г.7.6. Vuchev, A. S., T. G. Grigorova and S. A. Vuchev**, "Theoretical Analysis of an LLC Resonant DC-DC Converter at Boost Mode," 2023 XXXII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET59121.2023.10279287. / **Scopus / WoS**

Regardless of the used method, most researchers determine that in step-down mode the rectifier input current is continuous and in step-up mode it is discontinuous. The study presented in [B.4.11] shows that this is not the case. In practice, in step-down mode, the rectifier input current is discontinuous for a very large load resistance. Conversely, this current is continuous in step-up mode for low-load resistor values near the converter's operating limit at ZVS. This study aims to provide a detailed analysis of an LLC resonant DC-DC converter in boost mode and the derivation of equations modeling its operation under various operating conditions.

The condition to be fulfilled by the control frequency  $\omega_s$  and the characteristic impedance for operation in boost mode is defined. When these conditions are satisfied by changing the load resistance from a minimum value to infinity, the conditions under which the LLC converter operates with ZVS change. Generally, a continuous current mode and a discontinuous current mode are observed. Conditions for operation in the continuous mode were discussed in [B.4.11]. Also, boundary conditions for ZVS operation and the transition to the discontinuous current mode were defined. The operation in the discontinuous current mode is relatively divided into two submodes - *submode A* and *submode B*. Systems of equations are developed to describe the electromagnetic processes in the circuit for separate operating intervals. The electromagnetic processes for *submode A* are described similarly to the continuous current mode. This implies the possibility of finding analytical expressions for the basic quantities of the converter. In the other case, however, this is impossible and computational methods must be used. The defined boundaries of *submode B* define the search area of the solutions.

**Г.8.1.** Lechkov, A. N., T. Gr. Grigorova "Hybrid transistor-thyristor PWM converter with improving reversible time", Annual Journal of Electronics, Sofia, Bulgaria, 2011, vol.5, No.1, pp.192-195, ISSN 1313-1842 ([НАЦИД ID № 1277](#))

In this paper, a circuit of a hybrid transistor-thyristor converter with constant duty cycle and recuperation capability is analyzed, designed, and simulation-tested. It is focused on application in galvanotechnics as a source for electro-pulse effects in the so-called Periodic Pulse Reverse method (PPR).

An algorithm for synthesizing the output voltage in a hybrid transistor-thyristor converter with a constant duty cycle and recuperation capability is developed. A simulation model of the control system implementing the converter operating modes is proposed using the Analog Behavioral Modeling (ABM) principle built into the *Pspice A/D* simulator. A combination of high computational efficiency with adequate modeling of the circuit components has been achieved. A comparison of simulation results and those from analytical evaluations is presented. The obtained data allow us to evaluate the accuracy of the composed design methodology. The reported relative error is within 3% for the different dependencies, which is acceptable for engineering calculations. This is because, in the analysis, an assumption was made that all elements in the circuit were ideal, and the influence of the equalizing circuits was also neglected. In computer modeling, the power elements are involved with their model parameters, which affects the obtained simulation results.

**Г.8.2** Bozhilov, R., T. Grigorova, "A study of an AC amplifier with BOOTSTRAP feedback", XXIV National scientific symposium with international participation "Metrology and Metrology Assurance", Sozopol, Bulgaria, 2014, pp. 200-205, ISSN 1313-9126 ([НАЦИД ID № 3036](#)) (in Bulgarian)

When amplifying a signal from a high-impedance AC source, the classical AC amplifier circuit with an operational amplifier cannot meet the increased metrological requirements, such as ultra-high input impedance and low self-noise level. A bootstrap-type AC feedback amplifier is used to overcome these drawbacks. This paper proposes a study of the amplifier's input impedance, and the experimental and simulation results show a strong dependence of the input impedance on its determining elements. It is shown that, at a given frequency of the input signal, the values of the elements building up the amplifier can be optimized to obtain an equivalent input impedance of the

order of tens of gigaohms, using values of the circuit resistors not exceeding  $10\text{M}\Omega$ . The results of the analysis are confirmed by computer simulation of the amplifier. A good agreement was obtained between the experimental results and those from the computer simulation.

**Г.8.4. Bonev, G., T. Grigorova, A. Lechkov, "Analysis for class-E induction heating resonant converter with extended frequency range", The scientific works of USB – Plovdiv - Series B – Technics and Technologies, vol. XII, Plovdiv 2015, pp. 116-120, ISSN 1311-9419 ([НАЦИД ID № 2494](#)) (in Bulgarian)**

This paper analyses a class "E" resonant induction heating converter, where the load is a parallel resonant circuit, including the inductor. A series resonant circuit with a low-quality factor is applied to better match the load over a wider frequency range. The proposed model allows a simplified design in a MICRO-CAP simulation environment. This work aims to analyze and present a circuit of a class "E" induction heating resonant converter with an extended frequency range and limited influence of the complex load while maintaining a high efficiency of not less than 95%.

The simulation analysis has been performed using the MICRO-CAP 9 simulator, with the values of the elements specified by symbolic variables described by the corresponding analytical equations. The study draws important conclusions concerning the practical implications of extending the frequency range of the resonant class-E induction heating resonant converter. It also outlines the conditions for delivering maximum power and the achievement of high efficiency.

**Г.7.14. Grigorova, T. Gr. "Steady-State Analysis and Modified Control Technique of a Capacitor Voltage Clamped Dual Half-Bridge Series Resonant Inverter", 19th International-Federation-of-Automatic-Control (IFAC) Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS), Vol. 52 Issue 25 pp. 456-461, 2019, Sozopol, Bulgaria, DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.582/ **Scopus / WoS, SJR=0.354****

During technological processes, the voltages on the active and passive elements in the autonomous inverters change due to changes in the load or other disturbances. Such effects lead to non-acceptable operating modes in the power circuits. This problem has concentrated the efforts of specialists in implementing circuit variants of inverters with improved load characteristics.

The main approach of the work has concentrated on the possibilities offered by power circuits to add additional elements (limiting diodes or a group of inductances and diodes) to limit the circuit voltages. This ensures stability in the operation of the power circuit, as the power consumed is constant and does not depend on load changes.

The present paper extends the investigation of the electromagnetic processes in the steady-state mode of a capacitor voltage-clamped dual half-bridge series-resonant inverter (CVCDHB-SRI) that supplies two different loads. A unified approach is introduced in the analysis of processes in steady-state mode, and expressions for the determination of the currents through the power devices and the resonant circuit components are obtained. The basis of the study is the introduction of the damping coefficient  $k$  used in classical resonant inverters. Novel analytical dependencies are derived and used to obtain basic characteristics for inverter design. A modified control technique for operating loads with different frequencies and power is also discussed. Thus, the additional current overload of some transistors in the circuit is avoided. The commutation mechanism of the transistors enables zero-voltage and zero-current switching conditions. These results increase the system's efficiency, improve power quality, and reduce the overall cost. The analysis results are confirmed by simulating with the *OrCad Pspice* simulator.

A very good agreement is observed between the calculated results and those from the computer simulation, with a 5-6% relative error. The differences are due to using real elements with their parameters during simulation.



**Г.7.16** D. Ivanov, D., I. Maradzhiev and **T. Grigorova**, "FPGA Implementation of Microstepping Control of Stepper Motor with Advanced Mixed Current Decay," 2021 12th National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELECTRONICA52725.2021.9513691. / **Scopus**

This paper describes the experimental implementation of microstepping control of a stepper motor (PM42S-048-HHC8) with the implementation of an advanced current decay mode.

The proposed development is based on a programmable field array (FPGA Spartan 3A XC3S50A - 4VQG100C) and a galvanically separated ADC (AMC1306M25DWVR), which allows for continuous measurement and filtering of current through the windings of the motor used. The motor windings are connected to quad 1/2-H-bridge DC motor driver DRV8844. It compares the maximum reached frequencies of the control pulses supplied to the motor windings for the proposed algorithm with advanced mixed current decay mode and microstepping control without current decay mode. From the experimental studies performed, it can be concluded that the application of this mode increases the operating frequency of the stepper motor. Also, the acoustic noise and vibration from machine operation are reduced.

**Г.7.17. Grigorova, T.**, I. Maradzhiev, "Behavioural modelling of an average current-mode control of a boost DC/DC converter", 10th International Scientific Conference "TECHSYS 2021" - Engineering, Technologies and Systems, Plovdiv, Bulgaria, AIP Conference Proceedings 1 September 2022; 2449 (1): pp. 030004-1-030004-8, <https://doi.org/10.1063/5.0090676/> **Scopus, SJR=0.164**

One of the main challenges in the implementation of switching mode power supplies is to ensure a constant value of the output voltage. This is achieved by the error amplifier, which aims to minimize the difference between the output voltage and the given reference voltage. This paper illustrates analog behavioral modeling of the boost DC/DC converter in the frequency domain by using average current mode control. The possibility of the *PSpice for TI* simulator to set parameters by functional dependencies between values of circuit elements is used. The design equations describing the current and voltage compensators network elements are introduced. The transfer functions of the individual loops building up the system's feedback loop are modeled and investigated.

The relative error between theoretical and simulation results is 5-6 %. Based on the calculated values of the error amplifier elements, a study of the system's stability has been performed. Furthermore, the results of the present study demonstrate the applicability of simulation tools in the step-by-step process of teaching the theoretical aspect of control dynamics by averaging the current through the inductance in the boost converter to the students in the MSc electronics course with the expectation of achieving sustainable knowledge and skills.

**3.31.3. Hinov, N., T. Grigorova**, "Design Considerations of Multi-Phase Buck DC-DC Converter". Applied Sciences. 2023; 13(19):11064., <https://doi.org/10.3390/app131911064> Open Access, **Scopus/WoS Q2/ IF=2.7**

Multi-phase DC-DC converters use multiple switching phases to facilitate power conversion, offering various advantages and disadvantages over conventional single-phase DC-DC converters. The main objective of this article is to propose a rational methodology for designing multi-phase step-down DC-DC converters, which can find applications both in engineering practice and in power electronics education. Increasing the need for rapid and accurate prediction of phase numbers in the design of multi-phase buck converters to minimize ripple currents and achieve high efficiency is of particular importance to power supply designers.

This study discusses the main types of losses in the multi-phase synchronous buck converter circuit (transistors' conduction losses, high-side MOSFET's switching losses, reverse recovery losses in the body diode, dead time losses, output capacitance losses in the MOSFETs, gate charge losses in

MOSFETs, conduction losses in the inductor, and losses in the input and output capacitors) and provides analytical dependencies for their calculation.

Using control examples (input voltage  $U_{in}=12V$ , output voltage  $U_{out}=1.6V/3.3V/5V$ , control frequency  $f_{sw}=75kHz\div 300kHz$ , output current  $I_0=5\div 200A$ , dead time  $t_d=100ns$ ), analytical and graphical (3D plots) analyses of the output and input current ripple in the multiphase converter, as well as of the losses in the converter circuit were performed. Based on the analytical results, it was demonstrated that for the considered control examples, when the output current values  $I_0$  are less than 20 A ( $I_0 < 20$  A), the multi-phase synchronous buck converter with  $N = 2$  exhibits the highest efficiency (90.8%). Meanwhile, for output current values in the range of  $20$  A  $< I_0 < 35$  A, a configuration with  $N = 4$  ( $\eta = 90.77\%$ ) achieves the highest efficiency. Other important results obtained show that for the output current range of  $35$  A  $< I_0 < 45$  A, the highest efficiency is achieved with a configuration using  $N = 6$  phases ( $\eta = 90.792\%$ ). At the same time, at an output current value of  $I_0 = 40$  A, the efficiency of the  $N = 4$  phase circuit is 0.21% lower than that of the  $N = 6$  phase circuit. When the output current is  $I_0 = 100$  A, the efficiency of the  $N = 12$  phase configuration is 0.14% higher than that of the  $N = 8$  phase configuration, whereas, at  $I_0 = 200$  A, the efficiency of the  $N = 12$  phase circuit is 0.62% higher than that of the  $N = 8$  phase circuit.

Furthermore, the article assesses power losses resulting from changes in various parameters such as duty cycle ( $D = 0.1 \div 0.9$ ) and operating frequency ( $75$  kHz  $\div 300$  kHz). It is shown that power losses increase with an increase in frequency, as significant losses are observed at low-duty cycles. The simulation results of power losses in the multi-phase synchronous buck converter with  $N = 8$  are also presented in the article. The relative error between analytical and simulation results does not exceed 4%. A discussion on the optimal phase numbers for common input and output voltages is included. The choice of the optimal number of phases should be approached comprehensively to evaluate the advantages of increasing the number of phases in a multi-phase buck configuration. The proposed approach for a fast and accurate calculation of power losses and overall efficiency reduces preliminary computational procedures and optimizes solutions. Therefore, the methodology discussed for design can find applications both in engineering practice and in the education of students in power electronics.

### III.3.3 IMPROVEMENT OF POWER SEMICONDUCTOR MACROMODELS

**Г.8.3. Grigorova, T. Gr., K. K. Asparuhova, "Unified Method for Behavioral Modeling of IGBT", Annual Journal of Electronics, Sofia, Bulgaria, vol.8, pp.96-100, 2014, ISSN 1314-0078 ([НАЦИД ID № 469](#))**

This paper presents a complete dynamic behavioral IGBT model for the PSpice simulator. A voltage-dependent capacitance is modeled using a second-order polynomial and the "arctan" function built into the simulator. The analog behavioral modeling approach was used. The methodology for extracting the transistor input capacitance dependence as a function of the collector-emitter voltage is described. The model is parameterized and implemented in the *OrCad PSpice* simulator.

An FGA90N33AT IGBT transistor is selected to verify the model in static and dynamic modes. The static output characteristics obtained from the *PSpice* simulator based on the proposed model are shown, as well as the transistor's transfer characteristic. The comparison between the manufacturer's data and the simulation results is summarized and tabulated, with the difference between them being within 2%. A larger relative error, about 5%, is seen at gate-emitter voltage  $V_{GE} = 6V$ .

The dynamic model verification is carried out using PSpice simulations and experimental measurements of the circuits with active and inductive clamped loads. Comparative results between the catalog data and the simulation results of turn-on delay time, rise time, fall time, and turn-off delay time are presented. The oscillograms of the experimental study of the performance of the IGBT-built parametrized model with active-inductive load are presented. The accuracy of the simulation results using the proposed model is proved.

### III.4. ANALYSIS AND STUDY OF DIFFERENT MODULATION TECHNIQUES IN BRUSHLESS MOTOR CONTROL CONVERTER

**Г.8.9.** Maradzhiev, I. P., E. Dinkov, **T. Gr. Grigorova**, "Investigation of the influence of LC filter on the performance of inverter brushless DC motor system", The scientific works of USB – Plovdiv - Series B – Technics and Technologies, vol. XII, Plovdiv 2015, pp. 140-143, ISSN 1311-9419 ([НАЦИД ID № 2494](#)) (in Bulgarian)

Brushless DC motors are widely used in various industrial applications. This requires providing a small torque ripple for the brushless motor and guaranteeing the necessary electromagnetic compatibility according to the operating environment's requirements. In this paper, the influence of a low-pass LC filter connected between a voltage source inverter and a brushless DC motor is investigated to reduce the torque ripple and improve the harmonic composition of the current through the motor. The LC filter is included in a "star" circuit.

The system has been modeled and simulated using a PSIM software simulator. The presented results were obtained by computer simulation of an electric brushless motor drive and experimentally validated using a real electric drive system. The investigations found that placing the LC filter between the voltage source inverter and the brushless DC motor filters out the high-frequency components from the harmonic order of the current flowing through the motor.

It also significantly reduces the amplitude of the high-frequency components of the harmonic order of the line voltage applied to the motor. In the existence of an LC filter, when the inverter control is turned off and the machine starts to stop, inertia current flows through the lower transistors of the inverter, the LC filter, and the brushless machine. This current results in a small negative torque, which tends to stop the motor. This process is not observed in the absence of the LC filter and when the motor is stopped by inertia.

**Г.8.10.** Maradzhiev, I. P., **T. Gr. Grigorova** and E. Dinkov, "Simulation and Experimental Investigation of Modulation Techniques for BLDC Motor Control", Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering, 7(1): 28-45, 2020. DOI: 10.13189/ujeee.2020.070103, ISSN: 2332-3280 (Print); ISSN: 2332-3299 (Online)

The following paper investigates and analyses the electromagnetic processes in an electrical drive system composed of a power source, a power inverter and a brushless DC (BLDC) motor using known pulse-width modulation (PWM) methods. Investigated modulation techniques are: unipolar modulation of the upper transistors (PWM-TOP) and bottom transistors (PWM-BOT), symmetrical PWM-PWM, modulation type PWM-ON and ON-PWM, and bipolar PWM-ON modulation indicated with PWM-ON-BIP. The voltage source inverter is considered as DC-DC buck power converter when BLDC is operated in motoring mode. On the basis of summarized equivalent circuits, the analytical expressions are received for the electromagnetic processes in the system by the different modulation techniques. The efficiency of the system battery-inverter-machine for each discussed modulation is experimentally investigated and compared. These results are also compared with the efficiency of the BLDC driven with vector control. A MATLAB/SIMULINK model is proposed to implement these modulations and to analyze the obtained results. From this model, the harmonic order of the phase currents for each modulation is investigated. As a result of this analysis, it is proven that the no-modulation mode results in the lowest THD, and of the studied modulations with the lowest THD is PWM-ON-BIP. These results indicate that PWM-ON-BIP modulation is a good choice for use in battery powered devices and vehicles.

**Г.8.11.** Maradzhiev, I. P., **T. Gr. Grigorova** and E. Dinkov, "Investigation of Power Losses by Various Brushless Motor Modulation Methods in Motor Mode", Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering, 7(2): 88-93, 2020. DOI: 10.13189/ujeee.2020.070203, ISSN: 2332-3280 (Print); ISSN: 2332-3299 (Online)

The paper presents a comparative analysis of different modulation techniques for BLDC motor control in terms of several types of losses in the system inverter – BLDC motor in motor mode. The experimentally investigated modulation strategies are unipolar modulation of upper (PWM-TOP or UT) transistors, a bipolar PWM-ON modulation (PWM-ON-BIP), a symmetrical modulation (PWM-PWM), vector control and non-modulation mode. A simple equivalent circuit for the BLDC motor is used to calculate different losses and the system efficiency. On the basis of the equivalent circuit for the different modulation techniques, simple design procedures are discussed for the determination of the eddy current and mechanical viscous loss, the copper loss, the hysteresis and mechanical friction loss, the voltage-drop loss of the inverter transistor and diode. Loss distribution experimental data for the brushless DT4260 motor when operating with different modulations and load torque are presented. On the basis of the obtained values for the efficiency of the studied modulations, references for use in battery-powered devices such as electric vehicles, electric scooters and more are made.

### **III.5. A STUDY AND IMPLEMENTATION OF NEW METHODS AND DEVELOPMENT TOOLS FOR TRAINING IN THE FIELD OF POWER ELECTRONICS**

Digitally controlled electric drive control systems are becoming more widely used. This trend is necessitated by continuously expanding the functional capabilities of various electric drives, which is associated with an increased volume of processed information.

Students in the field of power electronics are expected to have good knowledge of both hardware and software support of digitally controlled electric drive systems. To meet the high demands and competencies required of students, an elective course, "Electronic Converters for Electric Motor Control," is offered in the MSc in Electronics. In this course, students acquire practical skills and knowledge related to modern methods of digital control of electric motors with the help of various development systems.

This type of system allows students to study the projects embedded in the development environment and create their own projects during the learning process. This allows them to learn more thoroughly how to implement various digital motor control methods in software.

The results of the application of different development systems in the laboratory exercises of the subject are presented in publications [Г.8.5], [Г.8.6], [Г.8.7], [Г.8.8] and [Г.7.15]. The contributions in this publication are of an applied character.

**Г.8.5.** Yordanov, G., **T. Gr. Grigorova**, "Trends in the education in modern power electronics and motor control", L International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2015, 24 - 26 June 2015, Sofia, Bulgaria, pp.313-316, ISBN: 978-619-167-182-3 ([НАЦИД ID № 1717](#))

This paper presents the results of a master's thesis developed in the Master's course in Electronics related to the upgrade of the embedded algorithm of the DRV8412 - C2 development system (the Medium Voltage Digital Motor Control (DMC) kit, DRV8412-C2/Texas Instruments) for brushed DC motor control. This system allows the control of an electric drive in two axes of motion by simultaneously driving two brushed DC motors (BDD3864 series (6-24V, 0.92A)) or one more powerful, as well as one bi-polar stepper motor. The system consists of a control card based on the Texas Instruments TMS320F28035 C2000 series signal processor, which specializes in motor control. Also included in the development system is the DRV8412 driver, designed to control two DC motors or one stepper motor. It contains two voltage inverters built in a bridge configuration.

The F28035 is being used to generate the four PWM signals needed to drive the DRV8412. Two input currents of each motor are measured from the H-bridge and they are sent to the F28035 via four analog-to-digital converters (ADCs).

Using the included project in the kit, one PWM sequence is generated that appears on the output PWM-A or the output PWM-B, depending on the motor's rotation. With the resulting signals, unipolar and bipolar PWM techniques for motor control can be accomplished, which is determined

by the driver's operating mode. A disadvantage is that in order to use one or the other method of PWM, hardware switching has to be performed.

The Master's thesis results are reported in the paper, which consists of a new software realization for controlling DC motors with bipolar PWM and unipolar PWM in the same mode of the driver DRV8412 operation. This removes the need for hardware changes in the kit when training students in the various methods of modulation.

In the process of conducting laboratory exercises, it is convenient to provide the opportunity to analyze and study the performance of the motors under both types of modulation without the need for interruptions and hardware switches in the development system.

This paper describes the proposed software that provides these requirements for controlling one motor by the bipolar method and the other by the unipolar pulse-width modulation method under the same mode of operation of the DRV8412 driver. Thus, the functionality of the development system under new control conditions and the degree of freedom of the provided code are investigated. Experimental results proving the implemented algorithms are presented.

**Г.8.6. Maradzhiev, I. P., T. Gr. Grigorova, S. Ts. Ivanov, "Teaching Stepper Motors and Brushed DC Motors Using the Medium Voltage Digital Motor Control Platform, Part I - Stepper Motors Control", Annual Journal of Electronics, 2015, Sofia, Bulgaria, vol. 9, pp. 72-75 ISSN 1314-0078 ([НАЦИД ID № 469](#))**

This paper presents the teaching methodology applied in the subject "Electronic converters for electric motor control", based on the development platform DRV8412 - C2 (the Medium Voltage Digital Motor Control (DMC) kit, DRV8412-C2/Texas Instruments) for the study of digital control methods of a bipolar stepper motor (4.2 A/phase in parallel, 1.8° per step). The organization of the projects by which the respective operating modes of the stepper motor are studied is presented. The platform allows for changing and adjusting various parameters in real-time. The mode can be set from 1 step up to 128 microsteps/step.

Different results are presented, such as generated sinusoidal voltages and current feedback signal, obtained using the Code Composer Studio 6.0 (CCS) graphical environment and from the experiment.

**Г.8.7. Grigorova, T. Gr., "Teaching Stepper Motors and Brushed DC Motors Using the Medium Voltage Digital Motor Control Platform, Part II - Brushed DC Motors Control", Annual Journal of Electronics, Sofia, Bulgaria, 2015, vol. 9, pp. 76-79, ISSN 1314-0078 ([НАЦИД ID № 469](#))**

This paper describes the training methodology applied in the Electronic Converters for Electric Motor Control course to learn methods for digital control of brushless DC motors (DC motors) using the DRV8412 - C2 development system platform (the Medium Voltage Digital Motor Control (DMC) kit, DRV8412-C2/Texas Instruments).

This paper discusses the main points of the process of teaching students during laboratory exercises in the acquisition of digital control methods. The software available in the kit is entirely open source, allowing students to create their own projects and thus better understand the basics of DSP applications in power electronics and digital motor control. The laboratory exercises are organized as follows - theoretical introduction to the principles of pulse-width modulation for control of brushed DC motors. Then, proceed to implement the control designs embedded in the layout. The results of the experiments are presented. The advantages and disadvantages of the methods considered are discussed.

**Г.8.8. Grigorova, T. Gr., D. Yankov, B. K. Pacedjieva, "Investigation of the brushed dc motor digital control system with evaluation module DRV8837EVM", The scientific works of USB – Plovdiv - Series B – Technics and Technologies, vol. XIII, Plovdiv 2016, pp. 153-156, ISSN 1311-9419 ([НАЦИД ID № 2494](#)) (in Bulgarian)**

The paper describes a DC motor digital control system performance study based on the DRV8837EVM development module. The DRV8837EVM development module demonstrates the capabilities and performance of the DRV8837 driver for controlling low-power DC motors from Texas Instruments. The user can drive the DRV8837 with the built-in MS430 microcontroller or an external microcontroller. The students have studied the MS430 microcontroller in other courses of the curriculum, which is a prerequisite for the rapid acquisition of new knowledge.

The block composed of the DRV8837 driver contains a voltage bridge inverter. Corresponding driver circuits control the two arms of the bridge. The system allows software implementation and study of different methods for pulse speed control of a DC motor. In the development environment, the embedded design illustrates the synthesis of unipolar pulse-width modulation for DC motor speed control. Experimental results are presented while implementing the considered unipolar pulse-width modulation with the DRV8837EVM. The voltage and current waveforms in the armature circuit are illustrated for motoring mode, forward and reverse directions, at different duty cycles.

**Г.7.15 Grigorova, T. Gr., B. K. Pacedjieva,** "Computer simulation and experimental investigation of used digital development environments for PWM DC motor control in engineering teaching", 28th International Scientific Conference Electronics, ET 2019, Sozopol, Bulgaria, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET.2019.8878596, ISBN: 9781728125749 /**Scopus**

The publication describes the teaching methodology applied in the course "Electronic converters for the control of electric motors" to study methods for digital control of brushed DC motors (DC motors) using the development modules DRV8837 and DRV8850. The drivers provide various protection schemes, such as internal trip functions for over-current protection, short-circuit protection, under-voltage lockout and over-temperature protection.

The advantages of computer simulation are used to learn the study material more completely during laboratory exercises. The operation of the digital development modules is illustrated by simulation with TINA Design Suite software (Texas Instruments). The free version allows simulation testing of the development modules used.

The laboratory exercises related to the topic are conducted in two consecutive sessions due to the need for analytical calculations, computer simulations, and experimental studies. In addition, the laboratory exercise deals with the algorithm implemented in software through the embedded designs in the development boards. The results of the simulation and experimental studies are presented in the paper.

As a result of the training, students acquire a variety of knowledge in the field of industrial electronics. With the help of the used digital development modules for low voltage, on the one hand, the analytical calculation of the electromagnetic processes in the power circuit of the system is performed. On the other hand, the skills for computer modeling and software development for various methods of PWM control of the DC motor speed are acquired. Achieving sustainable learning outcomes is possible by mastering the knowledge step by step using a "learning by doing" approach.

**Г.7.18. Yakimov, P. I., K. K. Asparuhova, T. G. Grigorova and D. A. Shehova,** "Industry 4.0 and the Challenges Faced by STEM Education," 2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ET50336.2020.9238223. / **Scopus**

The paper surveys the main factors supporting the implementation of the paradigm Industry 4.0. Their basic characteristics representing challenges in STEM (science, technology, engineering, mathematics) education are considered. This paper aims to analyze trends in the modern manufacturing industry and to identify specific subjects and approaches that could improve the knowledge and skills of graduating engineers. Some tasks faced by industrial automation engineers are considered. A possible correspondence between the required skills and the taught subjects is presented. The "learning by doing" approach is helpful for competency-based education. It engages students and gives them sustainable, practical skills.

### III.6. CREATION OF MATHEMATICAL METHODOLOGIES AND ALGORITHMS FOR RESEARCH AND DESIGN OF FREE-SPACE OPTICS

**Г.8.12.** Pacedjieva, B. K., **T. Gr. Grigorova**, "Influence of the atmospheric turbulence on Free–Space Optics power design", The scientific works of USB – Plovdiv - Series B – Technics and Technologies, vol. XIII, Plovdiv 2016, pp. 149-152, 2016r., ISSN 1311-9419. ([НАЦИД ID № 2494](#)) (in Bulgarian)

Free-Space Optics (FSO) are becoming essential to modern information technology. However, the development of FSO is associated with several problems. They result from the multifactorial physical conditioning of the spatial structure of the laser beam, from fluctuations of atmospheric transparency, from fluctuations of the beam propagation direction associated with mechanical vibrations of the antennas of different origins and with atmospheric turbulence. Addressing these issues is necessary in both FSO research and design. The aim of this study is to modify an author's methodology and propose an algorithm to solve the inverse task in ground-to-ground FSO survey and engineering design, as well as to analyze the influence of atmospheric turbulence on this solution.

The graphical dependencies obtained as a result of the applied modified algorithm show the relatively strong influence of the initial radius of the laser beam on the definition region of the inverse task in FSO under different degrees of atmospheric turbulence. For small values of the structural constant of the tropospheric refractive index, it is possible to use laser sources with larger initial laser beam radius to satisfy the energy ratios in the FSO design. In a more turbulent atmosphere, it is necessary to use a laser beam with a smaller initial radius to ensure the required optical flux incident on the receiving antenna even when the laser spot deviates more from the axis of the receiving aperture.

**Г.7.20.** Pacedjieva, B. K., **T. Gr. Grigorova**, "Investigation of the influence of the inertia of the photon counting system on the acceptance accuracy in photon counting mode", 11th International Scientific Conference "TECHSYS 2022" - Engineering, Technologies and Systems, Plovdiv, Bulgaria, AIP Conf. Proc. 2980, 030004 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0184108>, **Scopus / WoS, SJR=0.164**

Space Laser communication systems of the type "Earth-to-space" or "space-to-Earth" are characterized by large distances between the corresponding points, respectively, with high diffraction scattering of the optical energy, as well as with energy losses from the extinction of the radiation in the atmospheric part of the transmission medium. The conditions described above necessitate the registration of feeble optical signals in the receiving parts of the systems. In this connection, the names "photon counting reception" (PCR) and "photon counting system" (PCS) are used. The role of the inertia of the real PCS of genus I (with non-prolonging recovery time) and of genus II (with non-prolonging recovery time) is extremely important. A methodology for determining the minimum distance, ensuring a connection with a negligible influence of the inertia of the photon counting system, is proposed. An algorithm for applying the methodology has been developed. A numerical estimate of the discussed minimum distance for the two types of inertia of the photon counting system was made using data typical for Space Laser Communication Systems. Numerical examples illustrated by graphic material have been shown. Graphical solutions are obtained to determine the minimum distance for the genus I and genus II inertia cases.

### III.7. CREATION OF A NEW DEVICE FOR ACOUSTIC AND VISUAL DEMONSTRATION OF THE CORPUSCULAR NATURE OF THE LIGHT

**3.31.1** Dimitrova, T. A. Lechkov, **Ts. Grigorova** and A. Weis. (2011), "Acoustic and visual display of photons:a handheld demonstration device", Special Issue of Physica Scripta – T149, (2012) 014010 (4pp), Print ISSN 0031-8949, Online ISSN: 1402-4896, **IF=2.9 (IF=1.032 (2012))/SJR=0.441 / Q2, Scopus/WoS**

The paper presents a simple handheld device that illustrates the discrete nature of the light. Electric pulses produced by individual photons in a photomultiplier (PM) are made audible by a small loudspeaker built into the housing or as oscilloscope traces.

Light enters the device through a narrow, solid-angle collimator. Two interference filters are inserted before and after the apertures to prevent the overloading of the PM. The apertures and filters are held in a removable collimator block mounted onto the PM using a Hamamatsu-type A10030 adapter block. The collimator, PM, and batteries are stored in handheld housing. Two potentiometers allow individual control of the PM's high voltage and the discriminator level. Electric pulses produced by individual photons in the PM are rendered acoustically by a small loudspeaker built into the housing.

Output connectors allow the pulse signals to be displayed by an external amplifier/loudspeaker system or an oscilloscope or to be further processed by pulse counting electronics. When pointing the device at a distant surface illuminated by an enlarged laser spot, one may demonstrate the proportionality relation between the brightness of the spot and the photon click rate. When increasing the incident radiation such that the average photon rate exceeds the inverse of their pulse widths, the individual pulses pile up to form a fluctuating continuous signal well suited for illustrating the concept of shot noise and making quantitative measurements thereof.

The advantages of the device are its small size and weight, ease of handling, and the highlighted didactic features. The authors designed and developed the equipment within the Scopes project grant IZ73Z0\_127942/1 "Modern Optics and Spectroscopy – from research to education" (Swiss National Science Foundation). Demonstrations with this experimental setup were shown for the first time at III International School and Conference on Photonics PHOTONICA 2011, August 29 - September 2, 2011, in Belgrade, Serbia. The device is used for demonstrations in specialized courses of the Department of Optics and Atomic Physics of Plovdiv University "Paisii Hilendarski" and for public presentations.

## **E.23. PUBLISHED UNIVERSITY BOOK**

**E.23.1. Grigorova, T.** Analysis, Modelling and Design of Power Converters", TU-Sofia, 2012, ISBN 978-954-438-999-4 (in Bulgarian)

The university book is intended for undergraduate students of the specialty "Electronics" of the Faculty of Electronics and Automation of the Technical University - Sofia, Plovdiv Branch, studying the subject "Analysis, Modelling and Design of Power Converters". It deals with various issues related to the analysis, modeling, and automated design of power electronic devices for electrical energy conversion. Taking into account industrial applications and the associated technical requirements of different types of circuits, various algorithms for controlling power devices and output voltage shaping in voltage source inverters are considered. Converters with resonant energy exchange between the input power source and the load (series DC/DC converters, parallel DC/DC converters, and series-parallel LCC DC/DC converters) are also considered.

The textbook can also be used by Masters's students of the same faculty studying "Electronic Power Converters" and "Electronic Converters for the Control of Electric Motors."

The questions contained in the book also make it suitable for students and professionals working in fields related to power electronics.

## **E.24. PUBLISHED UNIVERSITY TEXTBOOK**

**E.24.1. Grigorova, T., I., Maradzhiev.** Laboratory manual for Analysis, Modelling and Design of Power Converters", TU-Sofia, 2022, ISBN 978-619-167-465-7 (in Bulgarian)

The textbook "Analysis, Modelling and Design of Power Converters" is intended for undergraduate students of the specialty "Electronics" who are studying the subject of the same name.



It can also be used by students and professionals interested in the automated design of power electronic converters.

By combining theoretical knowledge, specific tasks to be performed, and their long experience and scientific publications in the field of analytical modeling and automated design, the authors of this textbook aim to help students learn and apply the methodology for modeling, simulation, and verification of engineering problems in the field of power electronic converters and their control algorithms. To achieve this goal, illustrative examples are presented that have been implemented and simulated using the powerful *Pspice for TI* electronic systems simulator. The tutorial presents the main steps of modeling, analysis, and automated design of advanced power converters. Topics include methods for implementing sinusoidal pulse-width modulation of the output voltage in single-phase and three-phase voltage source inverters, the Selective Harmonic Eliminated PWM (SHE PWM) technique, operating modes of resonant DC/DC converters, etc. It is also a valuable resource for professionals interested in this field.

**E.24.2. Grigorova, T.** Manual for the Power electronics seminar exercises, "Paisii Hilendarski" University Press, Plovdiv, 2023, ISBN 978-619-202-915-9 (in Bulgarian)

The manual for the "Power electronics" seminar exercises is intended for undergraduate students in the 4th year of the specialty "Electronics" of the Technical University of Sofia, Plovdiv Branch.

The textbook contains basic information about the working principle of controlled single-phase and three-phase rectifiers and autonomous inverters. Each chapter starts with a theoretical part containing the necessary dependencies, circuits, waveforms, and characteristics. Calculation relationships and design methods are presented to explain the operating principles of different types of power electronic devices. Calculation examples are included to illustrate certain steps in the design of these converters, as well as recommendations for the selection of elements in the circuits. Solutions are also presented for most of the examples discussed. In addition, self-study examples are provided for each topic to consolidate the knowledge gained. The conditions of the examples have been chosen to be close to the corresponding tasks in practice. All the data required for selecting the schematic elements are given in a separate appendix at the end of the manual in the form of tables.

The author has attempted to cover only typical examples, following the syllabus of the subject "Power electronics", without pretending to present a comprehensive guide to designing various power electronic converters.

10.05.2024 г.

Composed by:.....  
/ Assoc. Prof. Eng. Tsvetana Grigorova, Ph.D /