

RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC

ETAPA 4 – 2017

PROIECT PCCA NR. 60 / 2014

Dispozitiv inovativ de protecție a rețelei de energie electrică față de consumatorii electronici cu factor de putere redus

“Innovative power grid protection device against low power factor electronic loads”

- IEDPFC -

Director de proiect, CO – UTC-N

S.L. dr.ing. Petre Dorel TEODOSESCU

2017

Rezumat etapa IV, 2017

Activități desfășurate:

1. Realizarea și testarea a 3 modele funcționare de dispozitive electronice pentru iluminat cu LED
2. Implementarea unui convertor AC-DC pentru utilizare universală cu funcția de corectare a factorului de putere – Model Funcțional
3. Analiza unui convertor AC-AC pentru sisteme de iluminat cu LED
4. Simularea corectării active a factorului de putere la frecvență mică de comutație
5. Implementarea la nivel de model experimental al convertorului rezonant pentru utilizare în aplicații de corectare a factorului de putere

Rezultate obținute:

- 3 Modele funcționale de dispozitive de iluminat cu LED
- 1 Model funcțional de convertor AC-DC universal cu corectarea factorului de putere
- 1 Model experimental de convertor rezonant
- 1 capitol de carte publicat în OPTOELECTRONICS - ADVANCED DEVICE STRUCTURES , InTech: ” Analysis of a Resonant AC-AC LED Driver” . Disponibil la adresa:
<https://www.intechopen.com/books/optoelectronics-advanced-device-structures/analysis-of-a-resonant-ac-ac-led-driver>
- 1 Lucrare științifică publicată în jurnalul Acta Electrotehnica – “Practical implementation of a half-bridge SRM converter for low power applications”. Disponibil la adresa:
https://ie.utcluj.ro/files/acta/2016/Number3-4/paper23_Rusu.pdf
- 1 Lucrare științifică publicată în jurnalul Acta Electrotehnica – „Theoretical Analysis of the Commutation Frequency Range for a PWM AC-to-DC Converter with Current Hysteresis Modulation”. Disponibil la adresa:
https://ie.utcluj.ro/files/acta/2016/Number3-4/paper26_Teodosescu.pdf
- 1 Lucrare științifică publicată în jurnalul Electrotehnică, Electronică, Automatică (EEA): “High Performance Electrical Insulation Elements for Gas Installations”. Disponibil la adresa:
http://www.eea-journal.ro/ro/d/5/p/EEA65_3_1
- 2 Lucrări de disertație: “Studiul unui convertor C.A./C.A. cu aplicații în sistemele de iluminat cu LED-uri” și “Analiza funcționării unui convertor LLC rezonant”
- 1 Actualizare lucrare științifică publicată în jurnalul Electrotehnică, Electronică, Automatică (EEA): ”Study of the influence of some ordinary electric consumers on power quality”. Disponibil la adresa: http://www.eea-journal.ro/ro/d/5/p/EEA65_1_4
- 1 Actualizare lucrare științifică publicată în jurnalul Electrotehnică, Electronică, Automatică (EEA): ”Electric consumers influence on power quality - case analysis”
http://www.eea-journal.ro/ro/d/5/p/EEA64_4_9

Raport științific și tehnic în extenso

Etapa 4 – 2017

Realizare modele funcționale. Testare modele functionale finale

Rezultate preconizate pentru Etapa 4 -2017:

- 2-modele funcționale
- 1-lucrare științifică

Rezultate obținute pentru Etapa 4 -2017:

- 3 modele funcționale – Dispozitive de iluminat cu LED
- 1 model funcțional de convertor AC-DC universal cu corectarea factorului de putere
- 1 model experimental – convertor rezonant LLC
- 1 capitol de carte - editură internațională InTech- Open Access
- 3 lucrări științifice publicate în reviste BDI
- 2 lucrări de disertație
- 2 lucrări științifice publicate în reviste BDI – Actualizări an 2016

Activități Etapa 4 – 2017

1. Realizarea și testarea a 3 modele funcționare de dispozitive de iluminat cu LED

În cadrul acestei etape au fost realizate 3 modele funcționale de dispozitive de iluminat cu LED ce conțin o tehnologie dezvoltată în cadrul proiectului în concordanță cu obiectivele asumate, precum creșterea calității energiei electrice a dispozitivelor electronice cu un cost de implementare scăzut și randament ridicat. Astfel, modelul experimental dezvoltat în etapele anterioare de implementare a fost dezvoltat și optimizat, obținându-se 3 modele funcționale de dispozitive electronice pentru iluminat cu LED cu factor ridicat de putere. În Fig. 1 sunt prezentate cele 3 modele. Circuitul de intrare este similar pentru cele 3 modele, circuitul de ieșire pentru alimentarea LED-urilor este diferit. Astfel, sunt prezentate 3 configurații:

- Antiparalel fără filtrare capacitivă
- Antiparalel fără filtrare capacitivă
- Cu punte și filtrare capacitivă

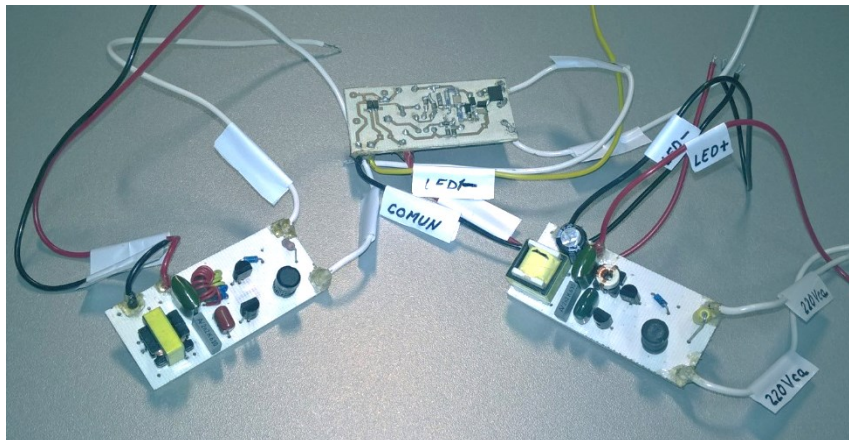


Fig. 1. Modele experimentale de dispozitive electronice pentru iluminat cu LED

Toate cele 3 modele, au un comportament asemănător în ceea ce privește comportamentul față de rețeaua de distribuție unde funcția de corectare a factorului de putere a circuitelor este activă cu performanța asemănătoare, precum se poate vizualiza în cadrul Fig.2 semnalele cu roșu (curent de intrare) și albastru (tensiune de intrare). În ceea ce privește, partea de alimentare a dispozitivelor LED, se poate observa un riplu mare de joasă frecvență a curentului pentru aplicațiile din Fig.2 a și Fig. 2b. Utilizarea acestor topologii este oportună pentru aplicații mai puțin sensibile în ceea ce privește calitatea

luminii generate. Pentru aplicațiile din Fig. 2c și Fig. 2d riplul de curent este semnificativ redus, astfel aceste topologii se poate utiliza în aplicații unde calitatea luminii generate este de maximă importanță.

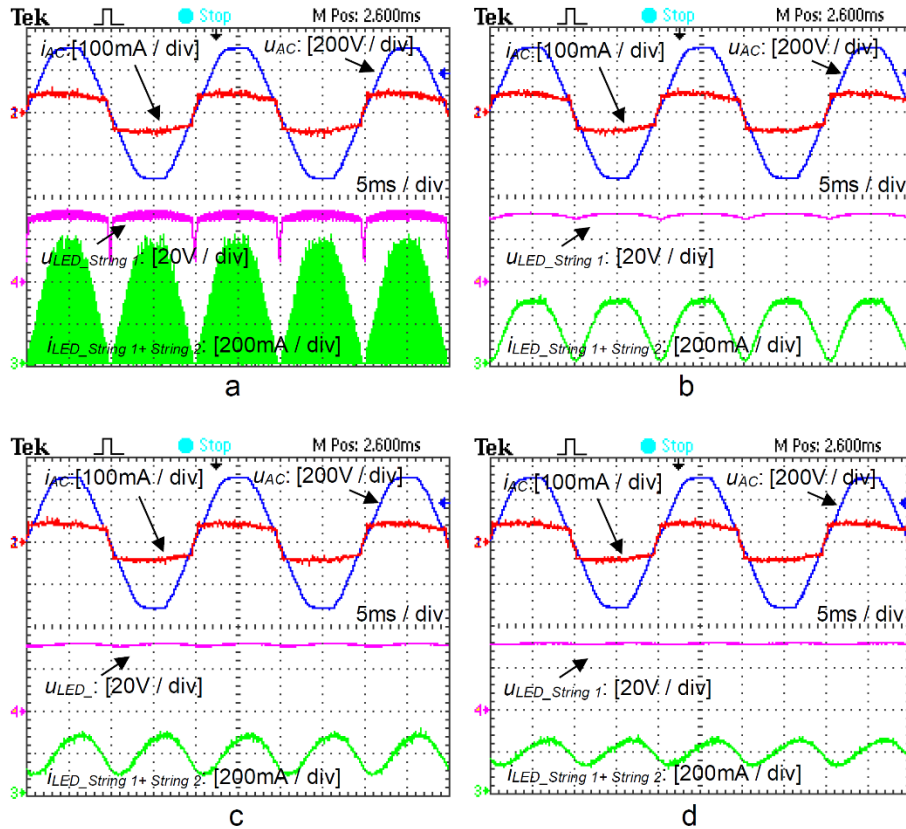


Fig. 2 Forme de undă specifice funcționării modelelor funcționale de convertoare pentru dispozitive de iluminat cu LED

2. Implementarea unui convertor AC-DC pentru utilizare universală cu funcția de corectare a factorului de putere – Model Funcțional

În cadrul acestei activități a fost dezvoltat un convertor universal AC-DC în 2 etaje de conversie. Primul etaj are funcția de corectare a factorului de putere în timp ce al doilea etaj este pentru conversia în tensiune continuă, topologia folosită fiind de convertor rezonant. În Fig.3 și Fig.4 sunt reprezentate modelul funcțional realizat și formele de undă specifice, iar în Fig. 5 este prezentat randamentul convertorului în funcție de puterea de ieșire.

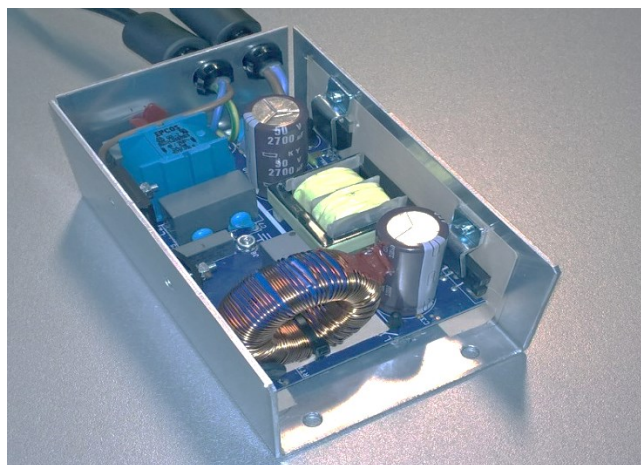


Fig. 3 Model funcțional de convertor AC-DC cu factor de putere ridicat

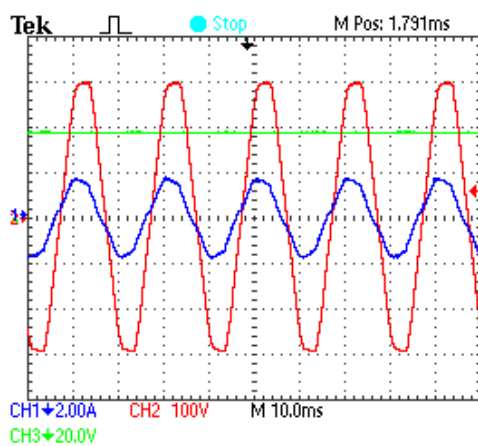


Fig. 4 Forme de undă specifice convertorului: roșu- Tensiune de intrare; albastru- curgentul de intrare; verde- tensiunea de ieșire

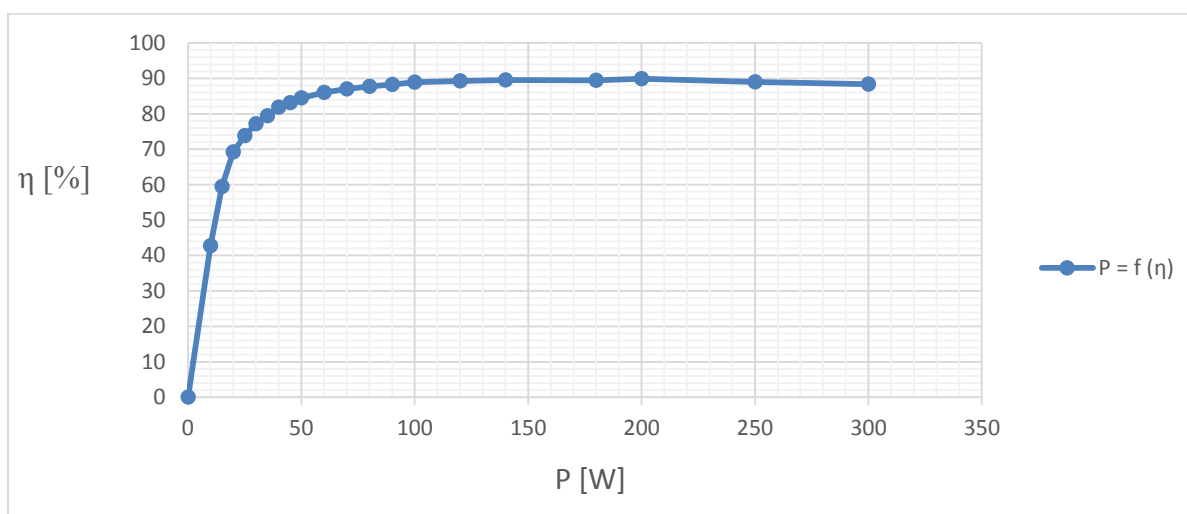


Fig. 5 Grafic de randament în funcție de putere

3. Analiza unui convertor AC-AC pentru sisteme de iluminat cu LED

Scopul acestei etape a fost analiza topologiei de convertor C.A./C.A. destinată alimentării LED-urilor de la rețeaua publică de C.A. Acest circuit vine ca rezultat al unei cereri de brevet. Topologia de circuit prezentată în Fig. 6 are la bază un convertor de C.A./C.A. în paralel cu grupul LC cvasi-rezonant utilizat pentru alimentarea LED-urilor. Fig. 6 ne prezintă flexibilitatea circuitului analizat de a utiliza în etajul de ieșire diferite modalități de conexiune a LED-urilor, dar trebuie menționat faptul că aceste exemple pot fi extinse și cu alte tipuri de conexiune.

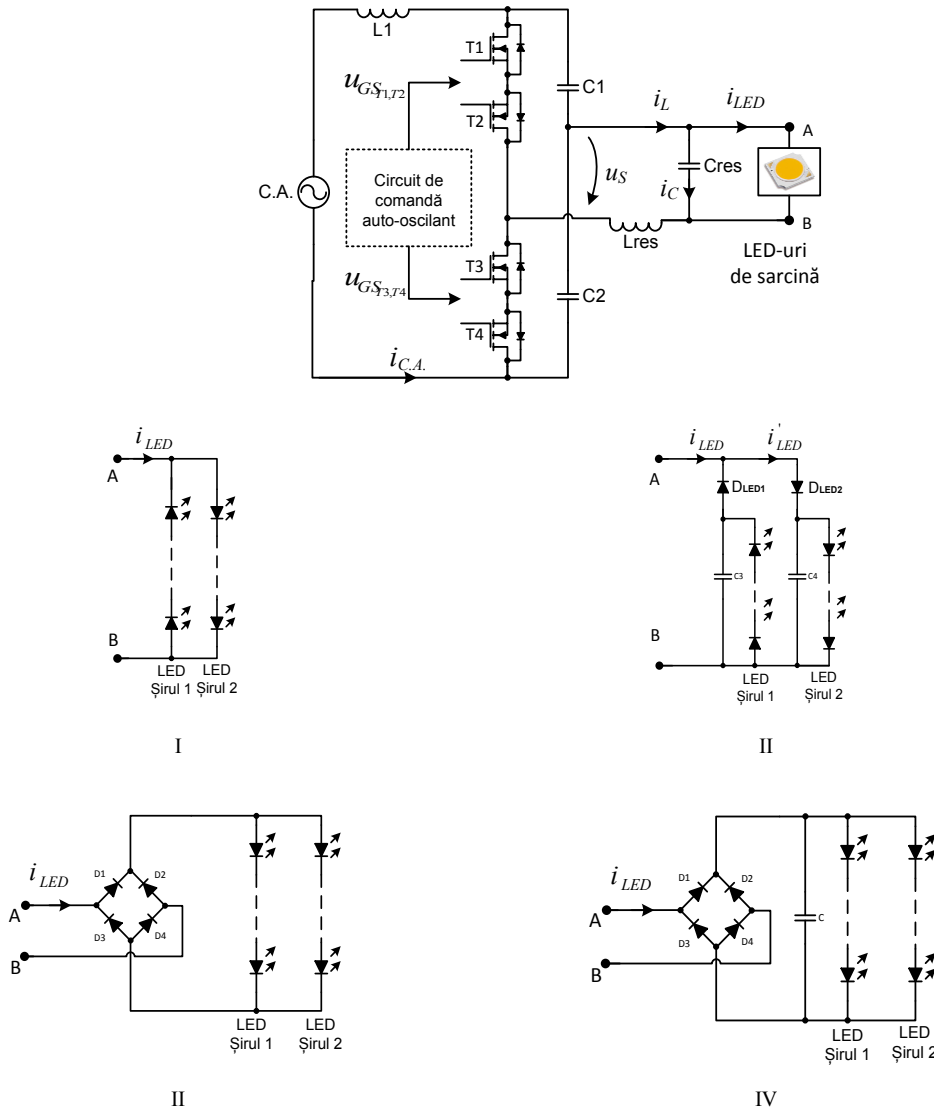


Fig.6 Diverse modalități de conexiune a LED-urilor la ieșirea convertorului: I – Șiruri antiparalele fără redresare și filtrare; II – Șiruri antiparalele cu redresare și filtrare; III – Șiruri paralele cu redresare fără filtrare; IV – Șiruri paralele cu redresare și filtrare

Circuitul din Fig. 7 este un convertor de C.A./C.A într-un singur etaj de conversie fără filtrare capacitivă și redresare cu diode.

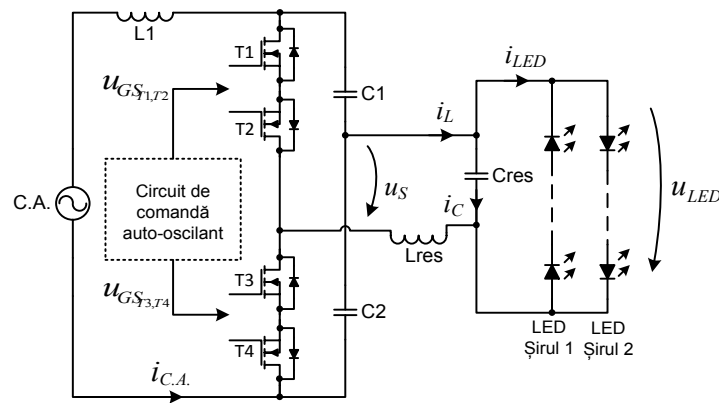


Fig.7 Schema electronică a convertorului de C.A./C.A. având conectate la ieșire LED-urile de sarcină aflate în configurație antiparalel fără redresare și filtrare

Pentru celelalte trei modalități de conexiune a LED-urilor (fig.6 II,III,IV) împreună cu topologia propusă, vor rezulta convertoare de C.A./C.C. cu două etaje de conversie a energiei electrice, astfel, primul etaj este reprezentat de convertorul cvasi-rezonant de C.A./C.A., iar celălalt etaj este reprezentat de diodele redresoare care realizează conversia din C.A./C.C.

După cum se poate observa în Fig. 7., convertorul C.A./C.A. este compus din două comutatoare bidirecționale, fiecare având două MOSFET-uri, care au sursele conectate împreună. În acest fel, semnalele de comandă ale tranzistoarelor pot fi obținute cu ușurință de la un circuit integrat (în acest caz a fost folosit circuitul integrat IR21531) sau un „driver” auto-oscilant discret. Semnalele de comandă ale tranzistoarelor sunt reprezentate de semnale a căror durată reprezintă 50% din ciclul de funcționare.

Circuitul a fost îmbunătățit, astfel reușind a se obține rezultate experimentale efectuate cu ajutorul modelului experimental de laborator prezentat în Fig. 8. O parte din rezultatele experimentale se pot observa în tabelul 1.

În toate cazurile investigate, cea mai bună eficiență electrică și implicit cel mai mic cost sunt atinse cu configurația convertorului, de C.A./C.A. destinat alimentării LED-urilor, în care nu se află nici o etapă de redresare (mai concret cazul I). Acest lucru este un rezultat așteptat, dar eficiența generală nu este cea mai mare, unul dintre motive fiind valoarea ridicată a fluctuației de joasă frecvență a curentului de alimentare a LED-urilor. Acest lucru poate fi observat în corelație directă cu flicker-ul procentual, unde valoarea de 100% a acestuia este atinsă în cazurile cu cea mai mică eficiență luminoasă.

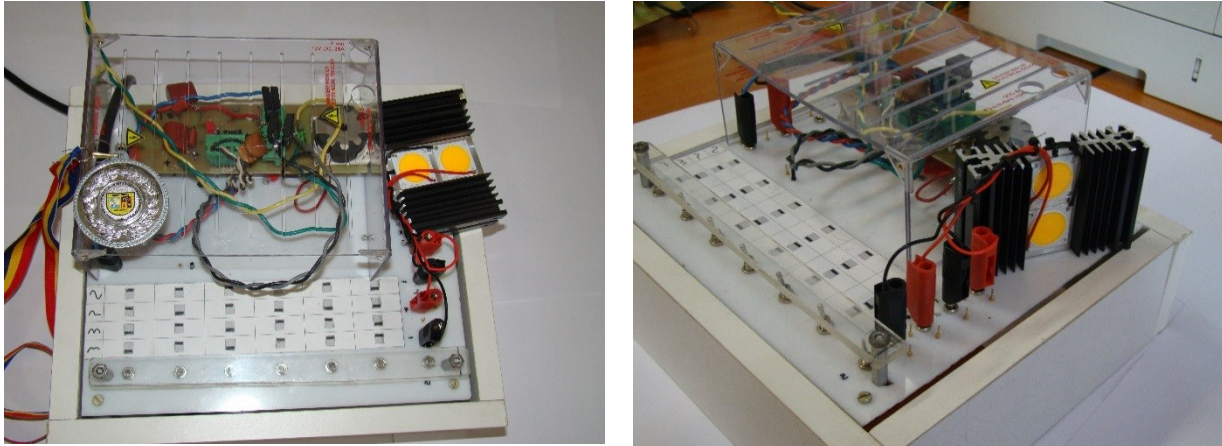


Fig.8 Convertorul de C.A./C.A. destinat alimentării LED-urilor aranjate în diverse configurații.

Tabelul 1

Măsurători Practice utilizând LED-urile CITIZEN							
Convertorul - aranjarea LED-urilor	Puterea de intrare [W]	Eficiența electrică [%]	Eficiența luminoasă a sistemului [lm/W]	Factorul de putere	Coef. THD [%]	Indicele flicker-ului	Flicker-ul procentual [%]
C.A./C.A.-I	7.9	0.910	134.36	0.95	29.8	0.3	100
C.A./C.A.-I _a	7.97	0.903	128.68	0.952	29.1	0.30	100
C.A./C.A.-II +10μF/șir	7.66	0.883	141.37	0.949	30.3	0.25	86.66
C.A./C.A.-II +110μF/șir	7.61	0.883	142.11	0.947	31.1	0.20	38.98
C.A./C.A.-II +220μF/șir	7.6	0.884	142.97	0.945	31.3	0.14	25.80
C.A./C.A.-III	7.7	0.891	139.24	0.95	29.8	0.33	100
C.A./C.A.-IV +20 μF	7.64	0.885	143.19	0.949	30.3	0.33	89.47
C.A./C.A.-IV +220 μF	7.61	0.884	143.5	0.946	30.9	0.26	42.85
C.A./C.A.-IV +440 μF	7.59	0.884	143.73	0.945	31.3	0.17	25

Mai multe informații cu privire la particularitățile și performanțele convertorului AC-AC se pot accesa în cadrul capitolului de carte :

Teodosescu Petre Dorel, Szekely Norbert Csaba, Sabau Madalina Sabina and Bojan Mircea, Chapter – “Analysis of a Resonant AC-AC LED Driver”, Book *Optoelectronics - Advanced Device Structures*, Intech, 2017.

4. Simularea corectării active a factorului de putere la frecvență mică de comutație

O parte din acest studiu a fost prezentat în cadrul raportului aferent etapei 3 din anul 2016. Luând în considerare analiza efectuată în vederea alegerii configurației optime a circuitului investigat, putem preciza faptul că s-a optat pentru configurația care folosește tiristoare de putere uzuale, rapide, care prezintă avantajul blocării automate la anularea curentului anodic, asociat cu fiabilitate și robustețe superioare.

Informații suplimentare nu se pot furniza deoarece există posibilitatea de brevetare a structurii propuse în cadrul acestui studiu.

Practic, circuitul are marele avantaj că dispozitivele semiconductoare de putere ies din funcțiune în mod natural, exact la momentele impuse de strategia de funcționare și nu sunt necesare impulsuri speciale de blocare. Evident, nu este necesară nici o comandă pe durată precisă de conducție ca și în cazul folosirii tranzistoarelor de putere.

Chiar și în varianta injectării de 8 pulsuri pe alternanță, tiristoarele care controlează procesele rezonante operează doar pe frecvența de 400 Hz., cu stingere naturală. Pierderi de comutație apar doar la comutația directă. Deci, la finalizarea cercetării, în ansamblu, ne putem aștepta la randamente superioare.

Analiza circuitului redresor necomandat.

Fig. 9 indică curentul de intrare în convertor. Fig. 10 se referă la analiza Fourier grafică a aceluiași curent.

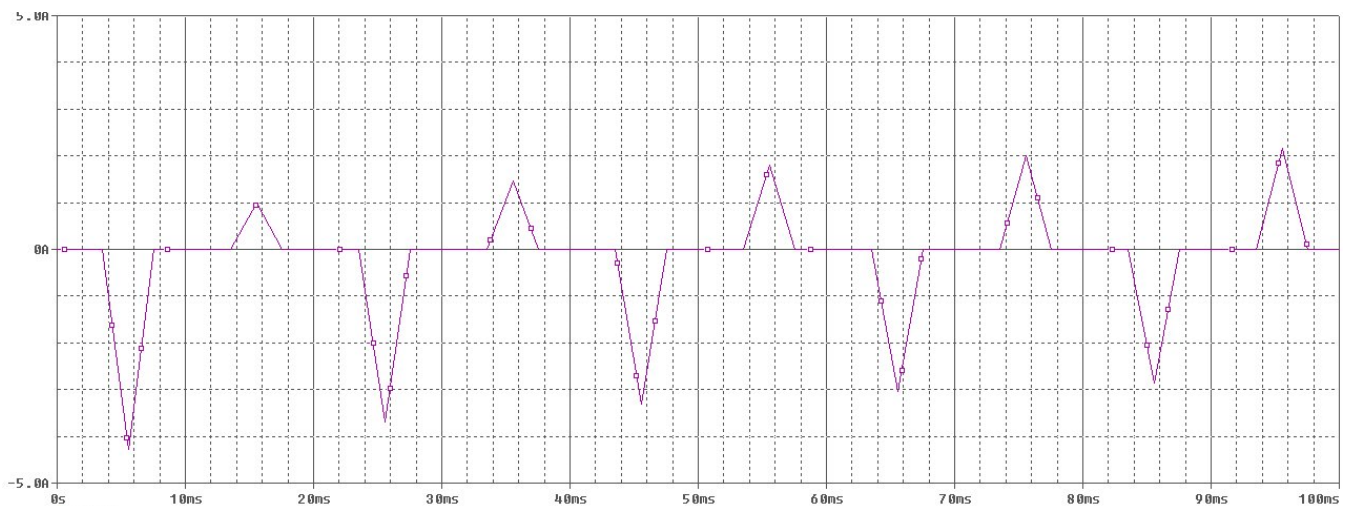


Fig. 9 Curentul de intrare în convertorul necomandat.

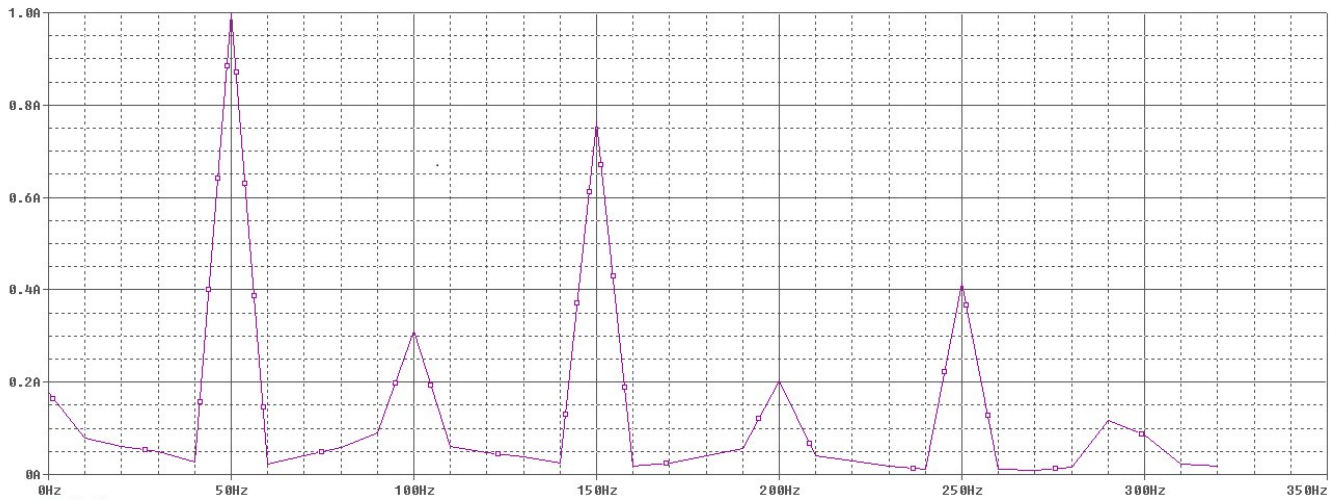


Fig. 10 Analiza Fourier a curentului de intrare în convertorul necomandat.

Această figură evidențiază existența unor armonici de ordinul 3 și 5 cu amplitudine mare. Se remarcă valoarea mare a THD.

Investigații privind circuitul cu inductivitate comună.

Fig. 11 și Fig. 12 arată evoluția curentului de intrare și analiza Fourier a acestuia.

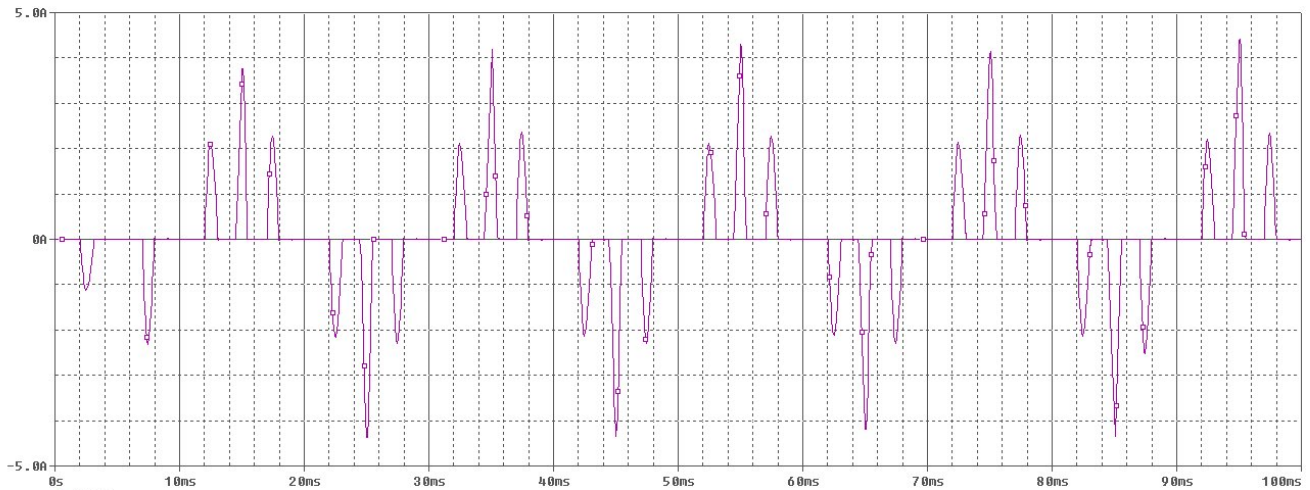


Fig. 11 Curentul de intrare în circuitul corector cu bobine identice.

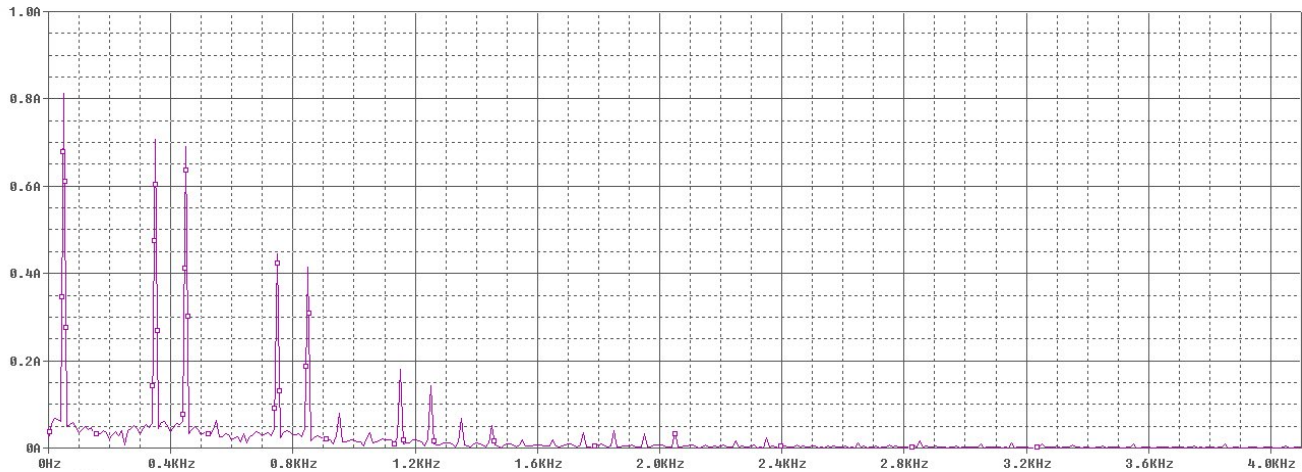


Fig. 12 Analiza Fourier a curentului de intrare în circuitul corector cu bobine identice.

Se constată chiar o creștere a THD.

Cercetări asupra circuitului cu inductivitate principală diferită de inductivitatea de repolarizare.

Pentru a se îmbunătăți performanțele circuitului s-a procedat la studiul unui circuit cu bobine cu inductivitate distinctă și rezistențe reduse.

Fig. 13 și 14 relevă curentul de intrare și analiza Fourier a acestuia, în cazul folosirii bobinelor cu inductivități diferite.

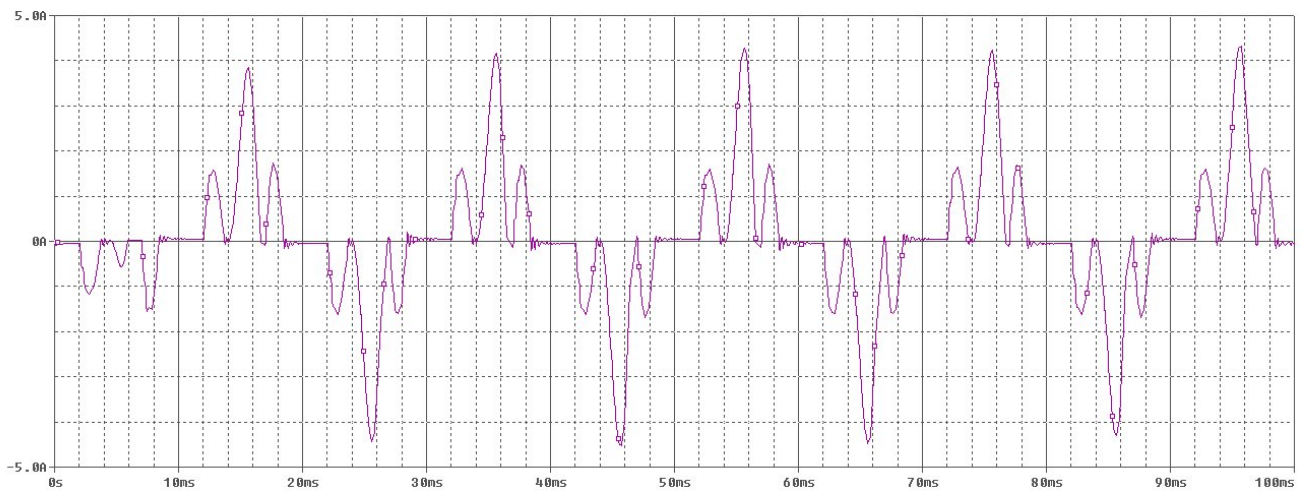


Fig. 13 Curentul de intrare în cazul folosirii de bobine diferite.

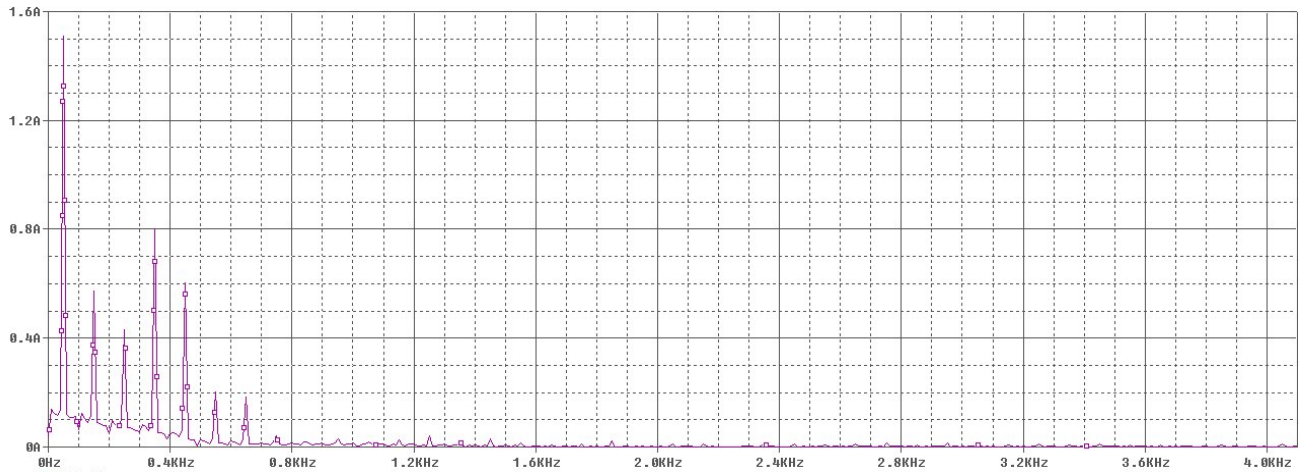


Fig. 14 Analiza Fourier a curentului de intrare.

La această variantă de circuit se constată o scădere a THD, dar rezultatele nu sunt încă satisfăcătoare. Se constată că este nevoie de o amplasare mai precisă a pulsurilor de curent rezonant. Procedura de determinare a impulsurilor de comandă din acest program nu permite acest lucru.

Modificări asupra procedurii de generare a semnalelor de comandă. Analize suplimentare asupra armonicilor de curent.

Fig. 16 și Fig. 17 prezintă doar curentul de intrare care interesează din punctul de vedere al corectării factorului de putere și analiza Fourier a acestuia.

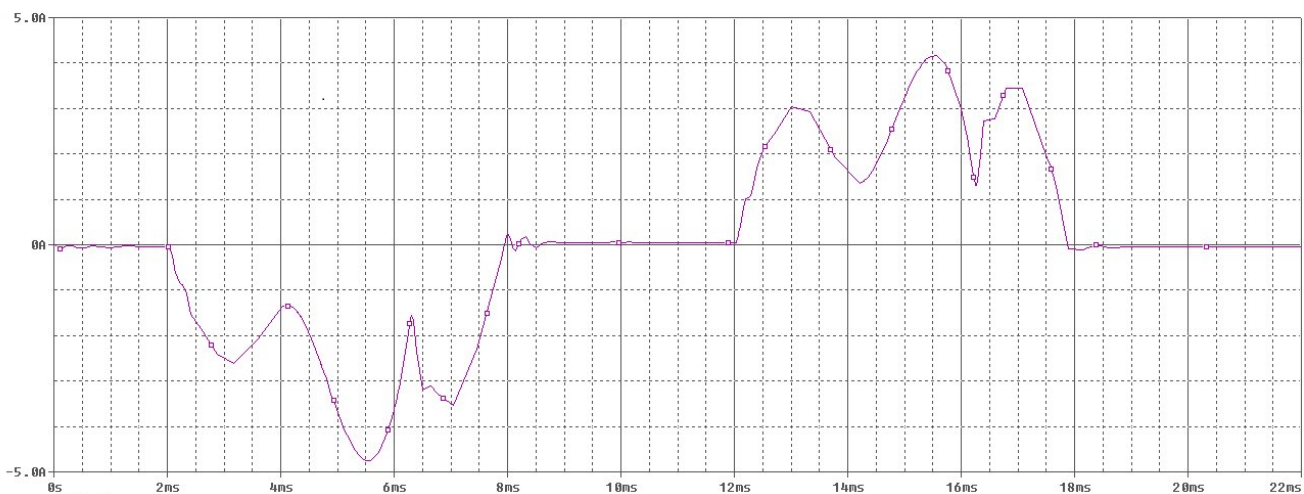


Fig. 16. Curentul de intrare cu poziționare optimă a pulsurilor PFC.

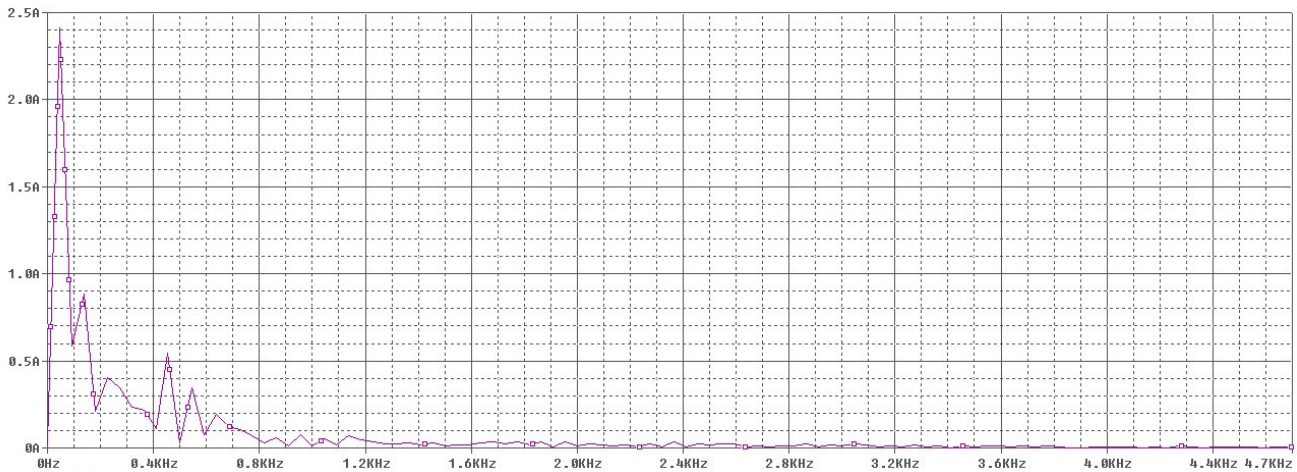


Fig.17. Analiza Fourier a curentului de intrare cu pozitionare optima a pulsurilor PFC.

Se constată o scădere foarte favorabilă a THD. Ca urmare se recomandă investigarea cu atenție a acestei variante de circuit. Rezistoarele folosite îi conferă un relativ bun randament, calculabil prin reprezentarea adecvată a pierderilor. Poziționarea liberă a pulsurilor asigură și THD ridicat. Deci devine importantă sau calcularea off-line a pozițiilor optime sau folosirea unui sistem de reglare a THD. Este importantă funcționarea în regim de curent neîntrerupt pe partea de alternativ. Si aceasta dacă se poate cu un filtru de rețea minim sau chiar fără.

5. Implementarea la nivel de model experimental al convertorului rezonant LLC

Cercetarea propune analiza prin simulare și testare experimentală a unei topologii de convertor rezonant LLC capabil să livreze o densitate de putere într-un mod cât mai eficient. Motivația acestei cercetări vine din perspectiva utilizării acestei topologii de circuit rezonant în colaborare cu topologia de inverter de tip AC-AC propusă în cadrul cererii de brevet depuse anterior în cadrul proiectului pentru aplicații universale de conversie AC-DC într-un singur etaj cu factor de putere ridicat .

Spre deosebire de convertoarele rezonante clasice, noile tipuri de convertoare utilizează de obicei rezonanța într-o manieră controlată. Astfel aceasta este permisă doar înainte și în timpul proceselor de blocare, “turn-off” și de conducție, „turn-on”, realizându-se astfel condițiile necesare de comutație la curent “zero” (ZCS), respective la tensiune “zero” (ZVS). Cu mici modificări, circuitele integrate destinate controlului convertoarelor convenționale pot fi utilizate și pentru convertoarele cu comutație “soft”. Datorită minimizării pierderilor de comutație și reducerii solicitărilor la nivelul comutatoarelor aceste

convertoare pot opera la frecvențe foarte mari (500 kHz până la câțiva MHz) fapt ce implică utilizarea unor bobine și condensatoare de valori și dimensiuni reduse, precum și a unor componente electronice cu performanțe ridicate. De asemenea, industria semiconductorilor este într-o continuă cercetare a unor materiale și mai performante în comparație cu clasicul siliciu. Astfel la nivel comercial au apărut tehnologii bazate pe carbură de siliciu (SiC) sau nitrură de galiu (GaN) ce oferă performanțe superioare în regim de conducție dar mai ales în comutație la frecvențe înalte. Un alt beneficiu major al convertoarelor cu comutație “soft” este capabilitatea acestora de a elimina cauzele apariției interferențelor electromagnetice (EMI).

În Fig.18 este reprezentată schema de simulare a circuitului, respectiv în Fig.19 și Fig.20 sunt prezentate modelul experimental de laborator realizat cu dispozitive electronice bazate pe carbură de siliciu (SiC), respectiv reprezentarea formelor de undă specifice.

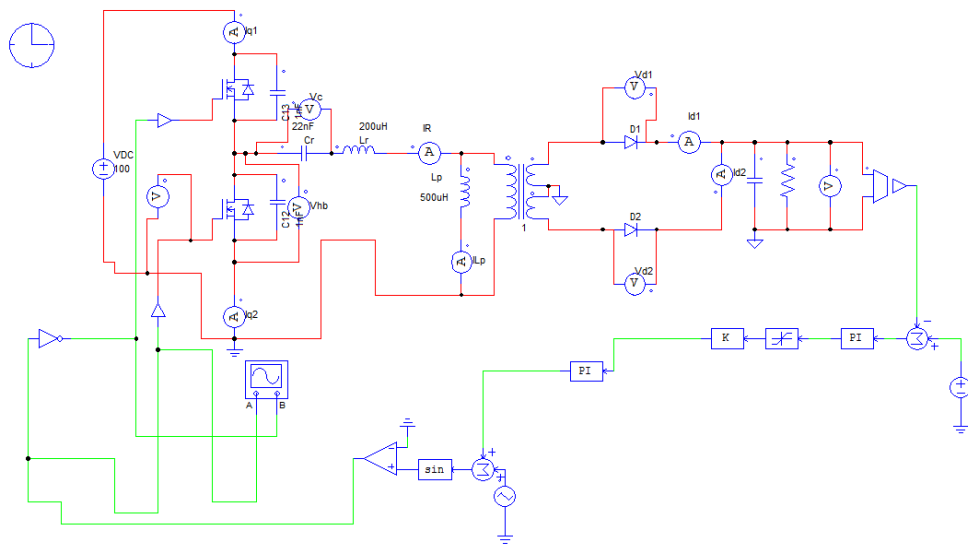


Fig. 18 Circuitul de simulare a convertorului LLC

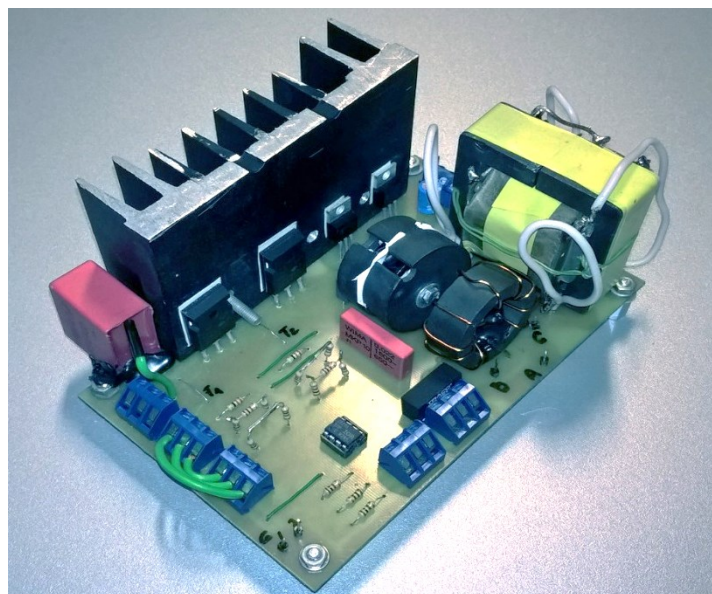


Fig. 19 Model experimental de convertor rezonant LLC

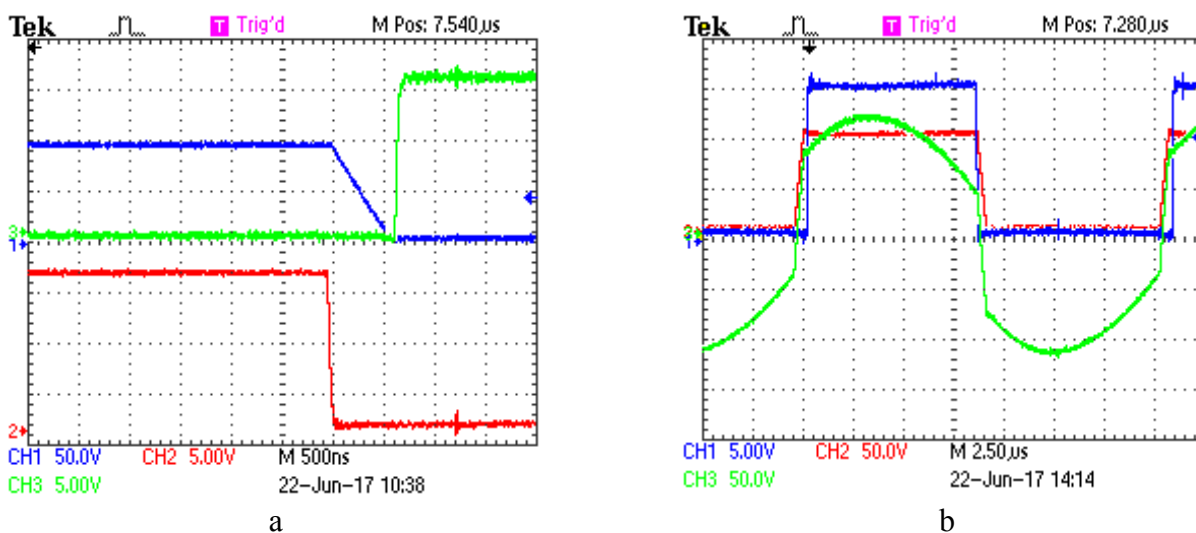


Fig. 20 Forme de undă specifice modului de funcționare a convertorului

Legendă (a): Roșu - Tensiunea de comandă a tranzistorului T1; Albastru - Tensiunea de alimentare a circuitului-ului rezonant ; Verde - Tensiunea de comandă a tranzistorului T2.

Legendă (b): Roșu - Tensiunea de alimentare a circuitului-ului rezonant; Albastru - Tensiunea de comandă a tranzistorului T1; Verde - Tensiunea la bornele primarului transformatorului.

În fig. 20a, se poate observa că pentru tranzistorul T2 comutația are loc la tensiune zero (ZVS), fapt ce reduce semnificativ pierderile în comutație ale convertorului. Figura 20b exemplifică același fenomen căruia i se mai adaugă forma de undă caracteristică tensiunii la bornele primarului transformatorului

Gradul de realizare a obiectivelor

Din perspectiva obiectivelor asumate în cadrul proiectului, rezultatele sunt peste cele preconizate. Din puncte de vedere tehnic s-au obținut rezultate bune cu aplicabilitate. Aceste rezultate trebuie totuși trecute prin celelalte etape de dezvoltare și de validate pentru aplicabilitate pe piață. De subliniat este faptul ca au fost deschise teme de cercetare ce pot fi abordate în cadrul altor proiecte de cercetare printre care cel mai semnificativ este utilizarea convertoarelor rezonante într-un singur etaj pentru aplicații conectate la rețea cu funcția auxiliare de corectare a factorului de putere.

În mod obiectiv au fost realizate 3 modele funcționale pentru aplicații cu dispozitive LED, 1 model funcțional de convertor pentru aplicații universale AC-DC cu funcție de corectare a factorului de putere, 1 circuit experimental de laborator pentru testarea convertoarelor rezonante. De asemenea, s-a cercetat posibilitatea de implementare a rezultatelor obținute în cadrul unui convertor universal pentru aplicații generale de mică putere cu funcția de corectare a factorului de putere. Rezultatele cercetărilor au fost diseminate prin intermediul a 5 lucrări științifice publicate în reviste BDI (dintre care 2 actualizate din stadiul de acceptate spre publicare), în cadrul a unui capitol de carte publicat la editură internațională, respectiv prin intermediul a 2 lucrări de disertație.