

**МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ НА SEPIC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ И  
СИНТЕЗИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ****MATHEMATICAL MODELING AND CONTROLLER IMPLEMENTATION  
OF A SEPIC CONVERTER****Nikolay Hinov, Hristiyan Kanchev, Sabcho Sabev**<sup>1</sup> *Technical University of Sofia, Faculty of Electronic Engineering and Technologies, Department of Power Electronics***Abstract**

*In this paper is presented mathematical modelling by the switching function approach of a SEPIC DC-DC converter in continuous conduction mode. Based on the developed model the sizing and design of the circuit elements is performed. The model is implemented in Matlab/Simulink and a controller is developed for constant input current or output voltage operation of the studied converter. Simulations are performed for validation of the circuit and controller operation are performed under disturbances at the converter input and output reference. The modeling and design of the converter and its controller are also validated through experimental results using an evaluation board.*

**Keywords:** DC-DC, power, converter, sepic, single ended, modelling, circuit, design.

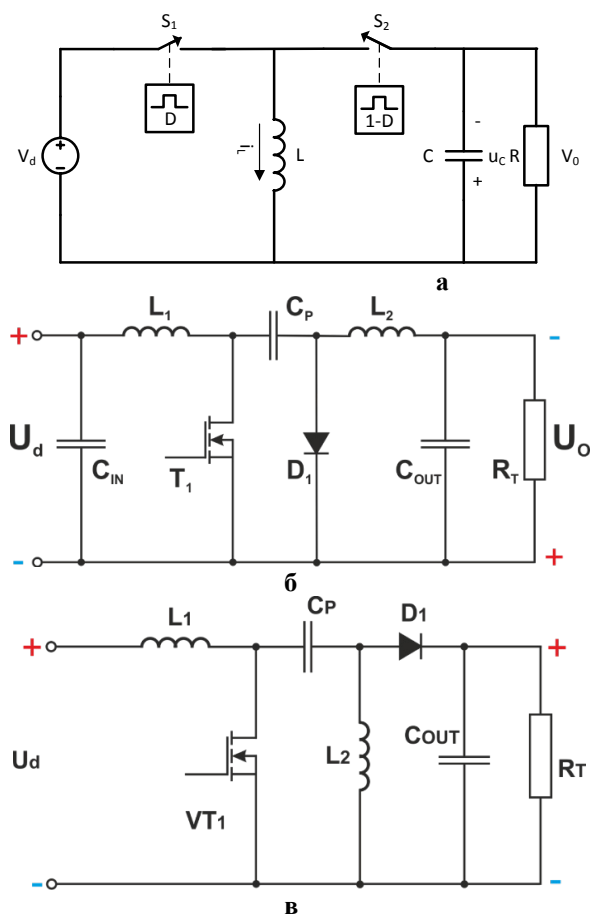
**ВЪВЕДЕНИЕ**

DC-DC преобразувателите са основно звено от процеса на енергопреобразуване. Много рядко се срещат система от силови електронни преобразуватели, с различни приложения, където те да не участват. На практика няма случай на ефективно използване на енергия, където да не се използва DC-DC преобразувател. Цел на настоящата работа е математическо моделиране и проектиране на силовата схема на Sepic преобразувател за постигане на определени параметри при използване на преобразувателя с обратна връзка по ток и напрежение.

Постояннотоковите преобразуватели основно се използват като съгласуващи и/или хранващи модули за съвременната електроника. Сред по-интересните приложения на постояннотоковите преобразуватели е възможността някои видове от тях да бъдат използвани като управляем електронен товар, например за снемане на волтамперна характеристика на фотоволтаични панели, за опитно определяне на параметрите на хранващи източници или тяхното изпитване [1-3]. При такова решение е възможно управлението на консумираната енергия от източника в широки граници според коефици-

циента на запълване на електронния ключ (или ключове, в зависимост от конкретната топология), което превръща този преобразувател в управляем товар по вход, спрямо хранващия източник. Задължително условие за устройство, изпълняващо ролята на електронен товар е токът, консумиран от схемата да бъде непрекъснат. Тук също трябва да се обърне внимание, защото не всеки тип постояннотоков преобразувател е подходящ за целта. Измежду безтрансформаторните едноклучови преобразуватели понижаващо-повишаващият (фиг.1-а), преобразувателят на Чук (фиг.1-б) и Sepic (фиг. 1-в) имат такава регулировъчна характеристика, че от гледна точка на източника могат да симулират еквивалентно съпротивление от близка до нула до близка до безкрайност стойност (таблица 1) [4-8]. Тази особеност ги прави изключително подходящи за употреба като управляем постояннотоков товар. Понижаващо-повишаващият и преобразувателят на Чук имат недостатъка, че изходното напрежение е с обрнат поляритет спрямо входното (Таблица 1). От друга страна, преобразувателят на Чук има галванично разделяне между входа и изхода посредством кондензатора  $C_p$ .

SEPIC преобразувателят има предимство пред другите две разглеждани схеми, поради факта, че изходното напрежение не е с инвертирана полярност спрямо входното, а също така входа и изхода на преобразувателя са галванично разделени (фиг. 1-в). Тези особености правят интересна за изследване топологията Sepic. В същото време, не са много научните трудове посветени на изследването на тази топология, нейното проектиране и особености на работа. Поради това в настоящия доклад е представено математическо моделиране на силовата схема и нейното проектиране за постигане на определени параметри. Представени са симулационни резултати при използване на преобразувателя с обратна връзка по ток и напрежение.



Фиг. 1. а) понижавачо-повишаващ преобразувател; б) преобразувател на Чук; в) Sepic

## МОДЕЛИРАНЕ НА СИЛОВАТА СХЕМА

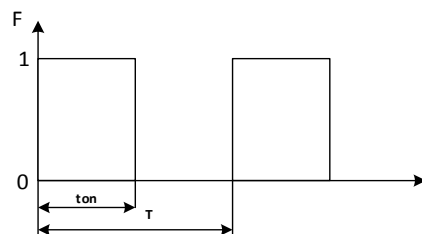
При работа в режим на непрекъснат ток могат да се разграничат две състояния на

силовата схема: първо състояние - ключ VT1 затворен, а диода D1 е запушен; и второ състояние - ключ VT1 е отворен а D1 е отпушен. Състоянието на ключа и диода се описва математически чрез използването на превключваща функция F, вида на която е показан на фиг. 2.

Таблица 1. Сравнение на трите разглеждани топологии.

	Buck-boost	Čuk	Sepic
$(V_o/V_{in})$	$-\frac{D}{1-D}$	$-\frac{D}{1-D}$	$\frac{D}{1-D}$
$(R_i/R_o)$	$\left(-\frac{1-D}{D}\right)^2$	$\left(-\frac{1-D}{D}\right)^2$	$\left(\frac{1-D}{D}\right)^2$
Поляритет на $U_o$	инвертиран	инвертиран	неинвертиран

Всъщност превключващата функция може да се разгледа, като нормиран управляващ импулс за превключване на полупроводниковите ключове. Този нормиран импулс е със две дискретни стойности 0 и 1. Като при стойност 1 полупроводниковият прибор е включен, а при 0 – изключен.



Фиг. 2. Превключваща функция

Чрез превключващата функция и анализ на еквивалентната схема при затворен и отворен ключ се получава обобщена система от диференциални уравнения (1), които описват работата на преобразувателя в режим на непрекъснат ток:

$$\begin{cases}
 L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} = V_d - F_{inv} \cdot (u_{C_1} + u_{C_2}) \\
 L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} = F \cdot u_{C_1} - F_{inv} \cdot u_{C_2} \\
 C_1 \frac{du_{C_1}}{dt} = F_{inv} \cdot i_{L_1} - F \cdot i_{L_2} \\
 C_2 \frac{du_{C_2}}{dt} = F_{inv} \cdot (i_{L_1} + i_{L_2}) - \frac{u_{C_2}}{R}
 \end{cases} \quad (1)$$

При решаване на (1) се определят моментните стойности на основните величини, които определят работата на разглеждания преобразувател.

Разработеният модел в среда Matlab/Simulink е представен на фиг. 3.

Като знаем основните параметри на преобразувателят и гледаме на него като консуматор (от гледна точка на хранящия източник), можем да изведем зависимостта между неговото входно съпротивление  $R_i$  спрямо стойността на товарния резистор  $R_T$ , включен в изходната верига на преобразувателя. Според обозначенията от фиг. 4 за еквивалентното входно съпротивление  $R_i$  можем да използваме отношението между хранящото напрежение  $U_d$  и консумираният от източника ток  $I_{in}$ . Понеже връзката между входното и изходното напрежение в общия случай се изразява чрез отношението:

$$U_d = k \cdot U_o \quad (2)$$

и коефициентът  $k$  е функция от коефициента на запълване  $D$ , ако пренебрегнем загубите в преобразувателя от баланса мощностите следва:

$$U_d \cdot I_{IN} = U_o \cdot I_o \quad (3)$$

Зависимостта, изразена чрез  $k$  между входния и изходния ток за преобразувателя ще бъде:

$$I_o = \frac{1}{k} \cdot I_{IN} \quad (4)$$

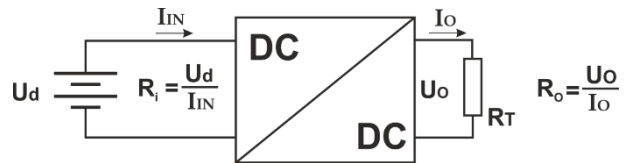
Тогава за извеждане на отношението между входното и товарното съпротивление на конвертора, използвайки изрази (3) и (4) може да запишем:

$$\frac{R_i}{R_o} = \frac{U_d}{I_{IN}} \cdot \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_d}{I_{IN}} \cdot \frac{I_o}{U_o} = \frac{U_d}{I_{IN}} \cdot \frac{I_{IN}}{kkU_d} = \frac{1}{k^2} \quad (5)$$

Използвайки резултата от (5) за SEPIC конвертора можем да изведем зависимостта между входното и изходното съпротивление

след заместване на  $k$  с израза за регулировъчната характеристика (Таблица 1) на преобразувателя се получава:

$$\frac{R_i}{R_o} = \frac{1}{\left(\frac{D}{1-D}\right)^2} = \left(\frac{1-D}{D}\right)^2 \quad (6)$$



Фиг. 4. Основни входно-изходни параметри на разглежданата схема.

## ПРОЕКТИРАНЕ НА СИЛОВАТА СХЕМА НА ПРЕОБРАЗУВАТЕЛЯ

Първо се изчисляват границите, в които се променя коефициентът на запълване:

$$D = \frac{U_{OUT} + U_D}{U_{OUT} + U_D + U_{IN}} \quad (7)$$

където  $U_{out}$  е изходното напрежение,  $U_D$  е пада по напрежение в права посока върху диода  $D1$ , а  $U_{IN}$  е входното напрежение. За минималната стойност на  $U_{IN}$  коефициентът ще има максимална стойност, респ. за максимална стойност  $D$  ще има най-ниска стойност.

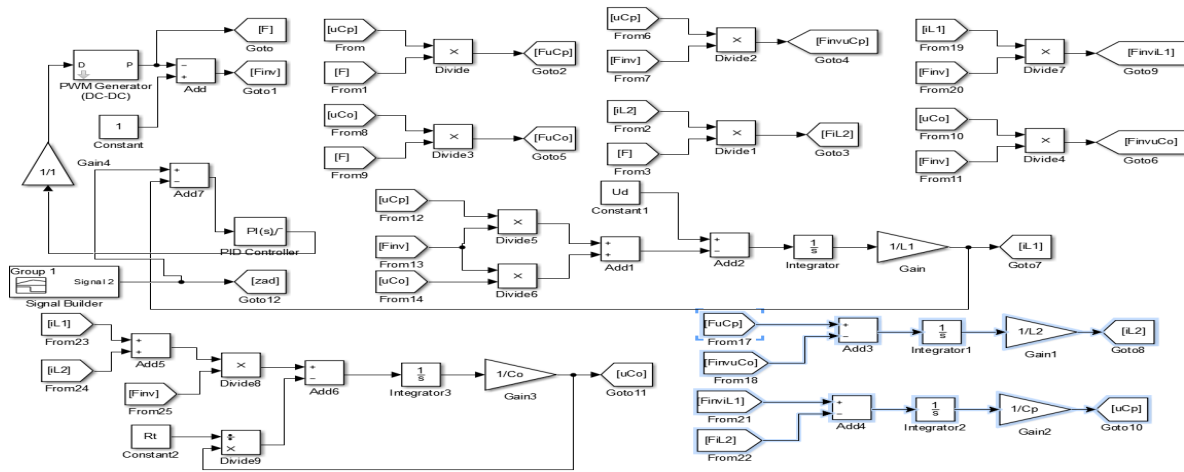
Максималният входен ток се изчислява при минималната стойност на входното напрежение и за консервативен вариант при  $\eta = 85\%$ , съгласно израза:

$$I_{IN\_max} = \frac{U_{OUT} \cdot I_{OUT}}{\eta \cdot U_{IN\_MIN}} \quad (8)$$

Минималната стойност на  $L_1$ , навита на отделна от  $L_2$  сърцевина, се определя от израза:

$$L_1 \geq \frac{U_{IN\_MAX} \cdot D_{MIN}}{f_{SW} \cdot \Delta I_{L1}} \quad (9)$$

Стойността на изходния кондензатор  $C_{OUT}$  се изчислява спрямо допустимата стойност за пулсациите на изходното напрежение  $\Delta U_{OUT}$ .



Фиг. 3. Модел в среда Matlab/Simulink на Sepic преобразувател

При пренебрегване на загубите в изходния кондензатор ( $ESR \gg 0$ ) за пулсациите на изходното напрежение получаваме:

$$\Delta U_{OUT} \leq \frac{I_{OUT} \cdot D_{MAX}}{C_{OUT} \cdot f_{SW}} \quad (10)$$

Където  $f_{sw}$  е честотата на превключване,  $I_{out}$  е средната стойност на изходния ток и  $D_{max}$  е максималният коефициент на запълване. Тогава за изчисляване стойността на изходния кондензатор може да се използва израза:

$$C_{OUT} \geq \frac{I_{OUT} \cdot D_{MAX}}{\Delta U_{OUT} \cdot f_{SW}} \quad (11)$$

Израза, от който се определя стойността на разделителния кондензатор  $C_p$  е:

$$C_p \geq \frac{I_{OUT} \cdot D_{MAX}}{0,1 \cdot U_{IN MAX} \cdot f_{SW}} \quad (12)$$

Амплитудата на пулсациите върху този кондензатор е:

$$\Delta U_{CP} = \frac{I_{OUT} \cdot D_{MAX}}{C_p \cdot f_{SW}} \quad (13)$$

Стойността на тока, протичащ през  $C_p$  се изчислява с израза:

$$I_{Cp} = I_{INDC} \cdot \sqrt{\frac{1 - D_{MAX}}{D_{MAX}}} \quad (14)$$

Където,  $I_{INDC}$  е средната стойност на входния ток. Амплитудната стойност на тока през транзистор VT1 се определя от:

$$I_{VT1m} = I_{INDC} + \Delta I_{L1} + I_{OUT} \quad (15)$$

Максимално допустимото обратно напрежение върху диода трябва да бъде по-голямо от:

$$U_{Rmax} = U_{INmax} + U_{OUT} + U_F \quad (16)$$

където  $U_F$  е пада по напрежение върху диода в права посока, а  $U_{INMAX}$  и  $U_{OUT}$  са респективно максималното входно и изходно напрежение.

## ПРОЕКТИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ И ЗАЩИТА

За управление на преобразувателя е избрана интегрална схема LT8494 на Analog Devices. Схемата е проектирана за входно напрежение до 60V и изходен ток до 2A. Принципната схема е показана на фиг. 5.

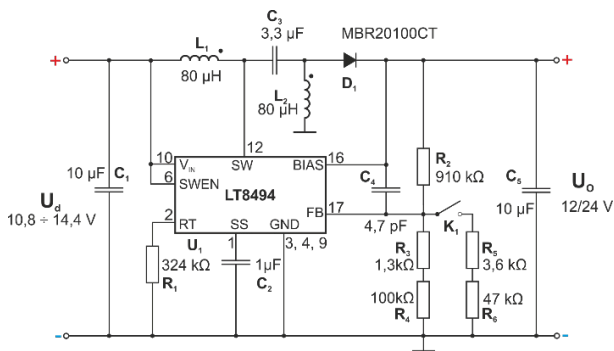
Кондензатор C2, включен към извод 1 на интегралната схема, служи за определяне времето на мек старт. Неговата препоръчителна стойност е в границите от 100 nF до 1 μF. Съгласно каталожните данни стойността на резистор R1 за работна честота 250 kHz е 324 kΩ.

За изчисляване на делителя R2 – R3 се използва изразът:

$$R_2 = R_3 \cdot \left( \frac{U_o}{1,202} - 1 \right) \quad (17)$$

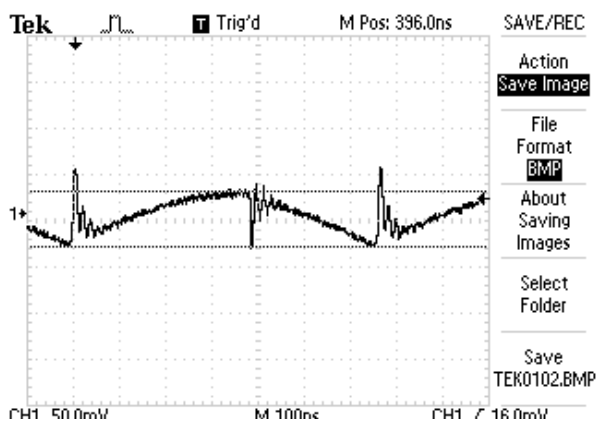
Стойността 1,202 в този израз е праговото напрежение, което активира обратната връзка към извод FB на интегралната схема.

След заместване за изходно напрежение  $U_o=12V$  за групата се получават стойности  $R_3=1,3 k\Omega$  и  $R_4=100 k\Omega$ . Тъй като проектираната схема работи с фиксирано изходно напрежение 12 или 24 V (превключването става с помощта на ключа K1), при същата стойност на R2, за стойността на съставният резистор, включен паралелно към групата R3,R4 се получава еквивалентна стойност от 47,98 kΩ. Така за последователно свързаните резистори R5,R6 се получава общо 50,6 kΩ.

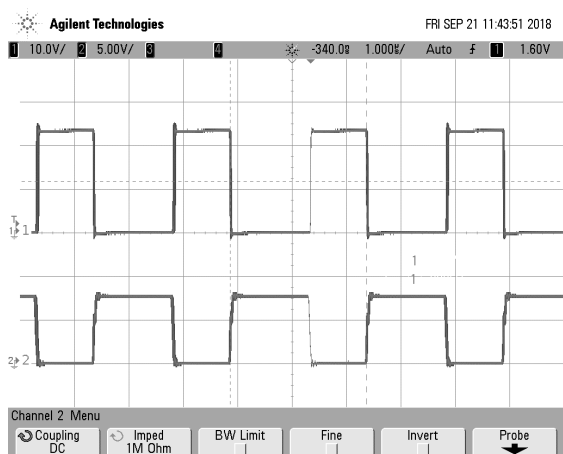


Фиг. 5. Принципна схема на реализирания SEPIC преобразувател, използван като стабилизатор на напрежение

С така проектираната схема беше проведено експериментално изследване на работата на устройството. На фиг. 6 са представени пулсациите на изходното напрежение  $\Delta U_{OUT}$ , а на фиг. 7 гейтовите импулси на транзистора и напрежението върху разделителния кондензатор.



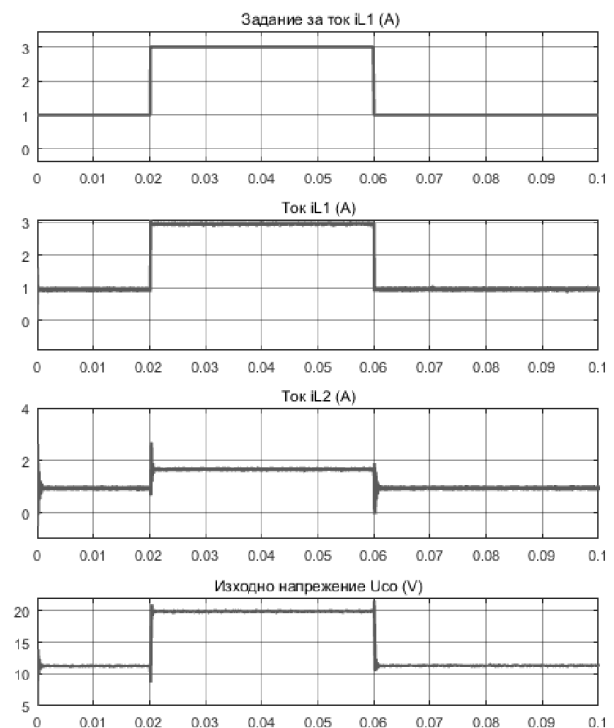
Фиг. 6. Пулсации на изходното напрежение  $\Delta U_{OUT}$



Фиг. 7. Напрежение върху кондензатора  $C_p$ , управляващи импулси на гейта на транзистора

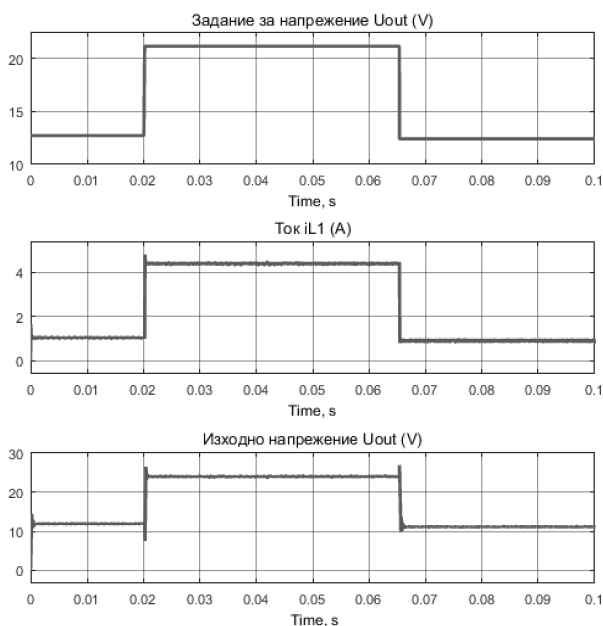
## РЕЗУЛТАТИ ОТ СИМУЛАЦИИТЕ

Разработеният модел на преобразувателя е имплементиран в среда Matlab/Simulink. За управлението са разработени два варианта чрез пропорционално-интегрален регулатор по входен ток и по изходно напрежение. Регулирането по входен ток е необходимо за употребата на преобразувателя като управляем електронен товар. На фиг. 8 са представени резултатите от симулациите с регулиране по ток  $I_{LI}$ . От симулационните резултати се вижда, че преобразувателят отработва коректно заданието по ток, което потвърждава работоспособността на проектираната схема и управление.



Фиг. 8. Резултати от симулациите като стабилизатор на ток

На фиг. 9 са представени резултатите от симулация на работата на преобразувателя като стабилизатор на напрежение. Заданието за изходно напрежение първоначално е 12V, след което се покачва на 24V. От резултатите се вижда, че заданието се спазва, силовата схема и PI-регулатора работят съгласно очакванията.



**Фиг. 9.** Резултати от симулациите като стабилизатор на напрежение

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата е представен модел на SEPIC преобразувател, който е съставен на базата на превключващата функция. Моделът е реализиран в средата Matlab/Simulink. На базата на този модел е имплементиран контролер, който осигурява работата на устройството като стабилизатор на входен ток и изходно напрежение. Представена е методология за проектиране на преобразувателя в режим на непрекъснат ток. С нейна помощ е извършено проектиране на преобразувателя при зададени входни данни. Представените симулационни резултати потвърждават правилната работа на проектираната схема и система за управление. Резултатите от проектирането и моделирането са потвърдени и експериментално.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Изследването, представено в доклада е финансирано от НИС при ТУ-София, проект 181ПР0015-03.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Marty Brown, Power supply cookbook, second edition, Butterworth-Heinemann, 2001
- [2] E. Popov. "Analysis, Modeling and Design of Converter Units (Computer – Aided Design of Power Electronic Circuits)", Technical University Printing House, Sofia, 2005 (in Bulgarian)
- [3] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Control in power electronics, Academic Press, 2002
- [4] Ned Mohan, Undeland, Tore M.; Robbins, William P., „Power Electronics - Converters, Applications, and Design (3rd Edition)”, © 2003 John Wiley & Sons
- [5] B. L. Dokić, B. Blanuša, "Power Electronics Converters and Regulators" - Third Edition, Springer International Publishing, Switzerland 2015, ISBN 978-3-319-09401-4, 2007
- [6] M. Ranjana, R. Kulkari, K. Anita and C. Pooja, Non Isolated Switched Inductor SEPIC Converter Topologies For Photovoltaic Boost Applications, Proceedings of the International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT 16), Nagercoil, India, 18-19 March, 2016, DOI 10.1109/ICCPCT.2016.7530300
- [7] Zilin Li; K. W. E. Cheng; Jiefeng Hu, Modeling of basic DC-DC converters, Proceeding of 7th International Conference on Power Electronics Systems and Applications - Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA), 12-14 Dec. 2017
- [8] Wei Gu, Designing a SEPIC converter, National Semiconductor application note 1484, June 2007.