

## МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ПОНИЖАВАЩ ZVS DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ

Николай Хинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Технически Университет – София, Факултет по “Електронна техника и технологии”, катедра „Силова електроника“, бул. "Кл. Охридски" 8, София 1000, България

## MATHEMATICAL MODELLING OF BUCK ZVS DC-DC CONVERTER

Nikolay Hinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technical University of Sofia, Faculty of Electronic Engineering and Technologies, Power Electronics department, 8 blvd. “St. Kliment Ohridsky”, Sofia, Bulgaria

### Abstract

One of the methods for increasing the efficiency of DC-DC converters is the decreasing of the switching losses in the power semiconductor elements. Therefore a widely used method for achieving this is the using of a soft switching – shift switching of the power elements on zero voltage or/and zero current. For some converters this is achieved by virtue of circuit features (for example resonant power inverters), and for others by using of a additional elements (capacitor and inductor), which are connected parallel or serial to the semiconductor switch. In the paper work is done mathematical modeling of quasi-resonant Buck DC - DC converter, working with ZVS (Zero Voltage Switching). Based on equivalent schematics, mathematical equations have been compiled that describe the device under study at different stages of operation. For example, a Buck ZVS DC - DC quasi-resonance converter has been designed for verification with selected output data. The verification of these modeling has been made with computer simulations (LTSpice) and experimental measurements on a laboratory stand.

**Keywords:** ZVS DC-DC converter; buck DC-DC converter; modeling; analysis; model-based design.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Тенденциите в развитието на електронните преобразуватели на електрична енергия са свързани с подобряването на елементната база на силовата електроника. Произвеждат се MOS, IGBT и други видове транзистори за значителни мощности от порядъка на стотици kW и честоти достигащи стотици kHz [1, 2, 7, 8, 9].

Тази елементна база се налага и поради необходимостта от дълбоко регулиране на изходната мощност и честота. Използването на пълно управляеми прибори (транзистори) налага вземането на специални мерки за осигуряването на надеждна и безаварийна работа на преобразувателните устройства, в изграждането на които те участват [3, 4, 5, 6, 10].

От друга страна задачата за повишаване на ефективността на енерго-преобразуване-

то в повечето случаи основна и актуална. Основният метод за подобряване на енергийните показатели на електронните преобразуватели е намаляването на комутационните загуби в полупроводниковите прибори, чрез използването на така наречените меки комутации по ток и/или напрежение (ZVS или ZCS). Те най-често се реализират с помощта на спомагателни резонансни вериги, които се включват последователно и паралелно на полупроводниковия ключ [6, 7, 8, 9].

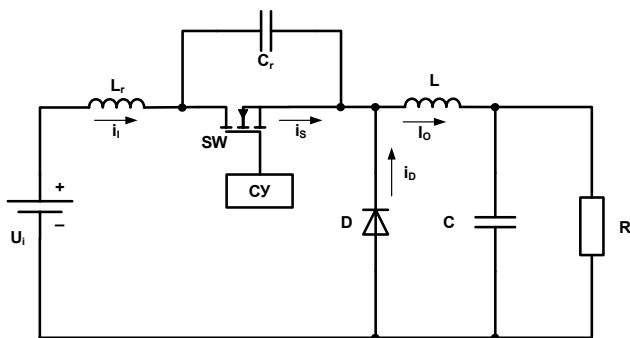
Тези схеми са известни като „квазирезонансни“ преобразуватели, тъй като резонансните елементи участват само в процеса на превключване на полупроводниковите елементи, с цел осигуряване на включване и изключване при нулево напрежение и/или нулев ток. По този начин се намаляват значително загубите от превключване и това позволява работа при високи честоти на

превключване на силовите прибори. Освен това, по този начин се редуцират масогабаритните показатели на устройствата. [2, 3, 9, 10, 13].

Основна задача на настоящата работа е моделирането на такъв тип устройство с намалени комутационни загуби - понижаващ ZVS DC-DC преобразувател.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

На фигура 1 е показана схемата на понижаващ ZVS квазирезонансен постоянен ток преобразувател. Тя се състои от резонансна индуктивност  $L_r$  и резонансен кондензатор  $C_r$ ; филтрова индуктивност  $L$  и филтров кондензатор  $C$ ; полупроводникови ключове транзистор SW и диод D; и товарно съпротивление  $R$ .



Фиг. 1. Квазирезонансен Buck ZVS DC – DC преобразувател

Работата на понижаващ ZVS квазирезонансен конвертор се състои от четири етапа по време на периода на превключване  $T$ . [11]. Тя е илюстрирана с времедиаграми, показани на фиг.2.

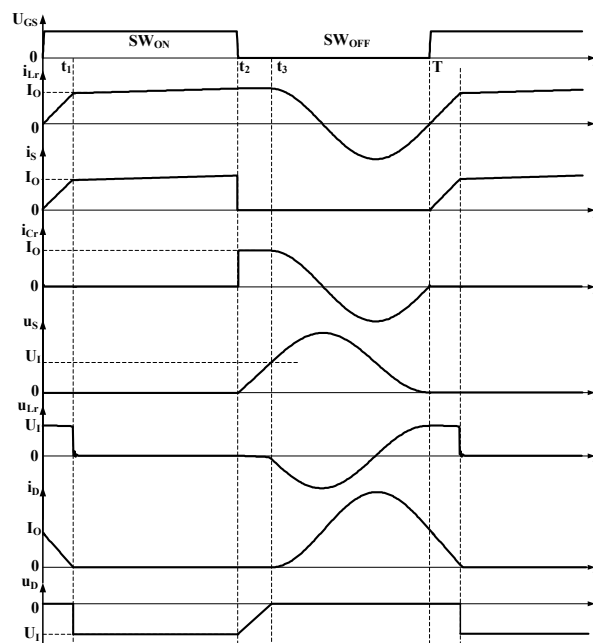
1. етап – на натрупване на енергия в резонансната индуктивност - времето за този процес е интервала  $0 < t \leq t_1$ , като ключа и диода са включени (ON). Разглеждания времеви интервал започва с подаването на управление на транзистора, а завършва когато токът през диодът стане нула;

2. етап – съответства на интервалът от време  $t_1 < t \leq t_2$ , и през него диодът е изключен (OFF). Този интервал от време завършва в момента  $t_2$ , когато транзистора се изключва с помощта на системата за управление на преобразувателя;

3. етап – на зареждане на резонансния кондензатор. Извършва се за интервала от

време  $t_2 < t \leq t_3$ , като транзисторния ключ и диода са едновременно изключени (OFF). Този етап от работата на схемата, ще завърши когато напрежението върху диода достигне нула и се създадат условия за неговото включване;

4. етап – съответства на интервала от време  $t_3 < t \leq T$ , като неговото начало започва с промяната на състоянието на диода - от запушено в отпушено. Характерно за този интервал от време е, че в схемата се развиват резонансни процеси, които включват резонансните елементи, отпушения диод и постоянно токовият хранващ източник. За да се работи в режим на ZVS трябва да се подаде управление на транзистора в момента, когато неговото напрежение стане равно на нула.



Фиг. 2. Времедиаграми, илюстриращи работата на квазирезонансен Buck ZVS DC – DC преобразувател

При описанието на схемата е разгледан по-често използвания режим на работа, при който е непрекъснат изходният ток –  $I_0$ . Освен това при построяването на диаграмите от фиг. 2 са използвани следните означения:  $I_i$  – входен ток,  $I_s$  – ток през транзистора,  $I_D$  – ток през диода и  $U_i$  – входно хранващо напрежение.

## МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ

От описанието на принципа на действие на силовата схема, е ясно, че изследвания

преобразувател е система с променяща се структура. Освен това процеса на моделиране се затруднява от факта, че за да работи преобразувателя в режим на нулеви комутации по напрежение, трябва да се осигури достатъчно време на изключване на транзистора, за да може напрежението върху него да спадне до нула в момента на включване. В работата се разглежда моделиране на режим на непрекъснат ток в изхода.

Продължителността на резонансният процес е определяща за времето на запущено състояние на транзистора, като големината на изходния ток оказва съществено влияние на работата на схемата. Горейзложеното води до това, че при промяна на товара или входното напрежение се налага да се промени и честотата на превключване.

От друга страна работата с променлива честота на управление усложнява моделирането на системата за управление, която трябва да следи превключването на транзистора да става при определени условия, а не само с фиксирани и зададени времеви интервали какъвто е случая в класическите DC-DC преобразуватели, работещи с твърди комутации.

Чрез използване на законите на електротехниката се получава следната система уравнения, която моделира работата на из-

следвания преобразувател.

$$U_i = L_r \frac{di_{Lr}}{dt} + u_{Cr} + u_L + u_C$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$i_L = C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R}$$

$$u_L = (i_{Lr} - i) R_{D\_snub} - u_C$$
(1)

Отчетени са и следните особености:

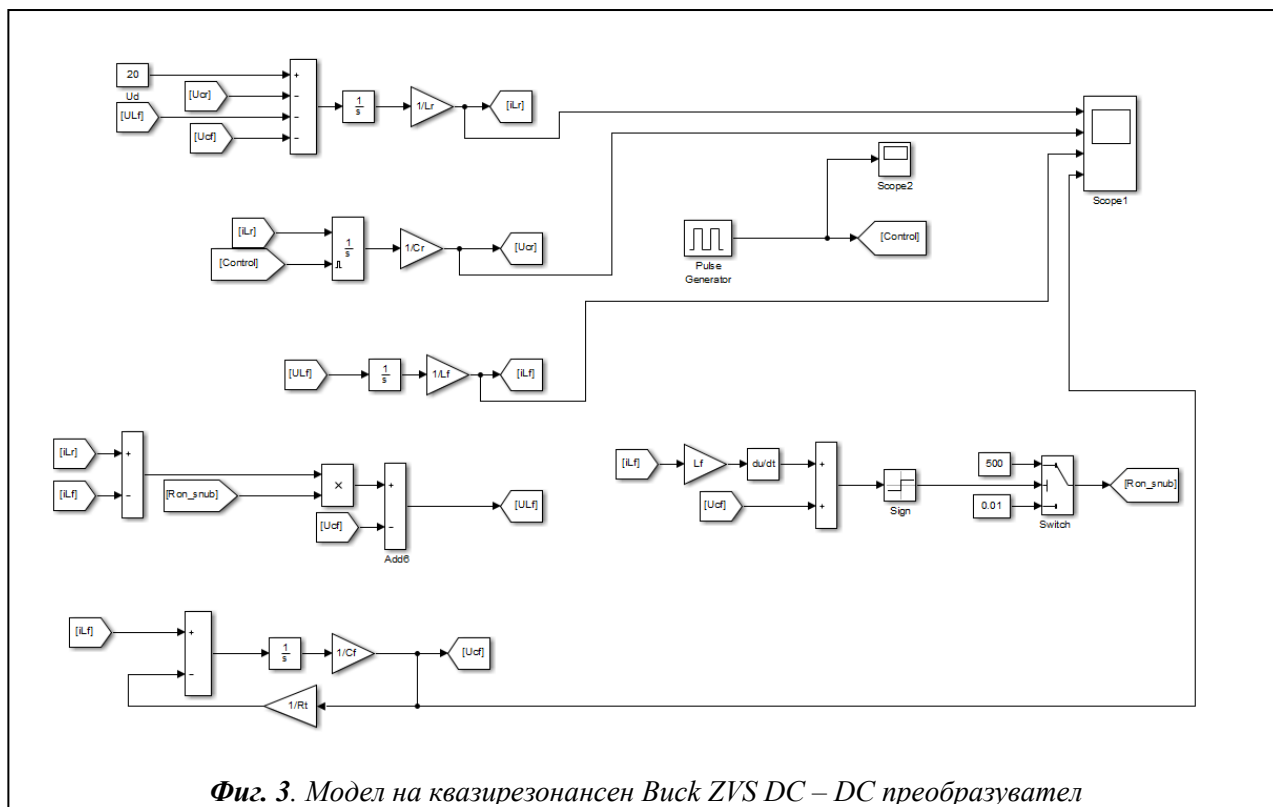
$$\begin{cases} u_{Cr} = 0, \text{ при затворен ключ;} \\ i_{Lr} = C_r \frac{du_{Cr}}{dt}, \text{ при отворен ключ;} \end{cases} \quad (2)$$

Освен това е дефинирано динамично съпротивление на диода –  $R_{D\_snub}$ , което отчита разликите при включено и изключено състояние на прибора:

$$\left. \begin{array}{l} 500, \text{ за } (u_L + u_C) \geq 0 \\ 0.01, \text{ за } (u_L + u_C) < 0 \end{array} \right\} = R_{D\_snub} \quad (3)$$

По същество математичният модел на преобразувателя е съвкупността от системите (1), (2) и (3), които представляват хибридна структура, включваща диференциални, алгебрични и логически уравнения.

Решаването на такъв тип хибридни системи е възможно с различни видове комерсиални и със свободен достъп математични



софтуери като: Matlab, Modelica, Mathcad и др. За целите на обучението, където обикновено студентите не разполагат със задълбочени познания по математика и програмиране е по-подходящо реализацията на модела да се извърши в среди за визуално програмиране като Matlab/Simulink LabView.

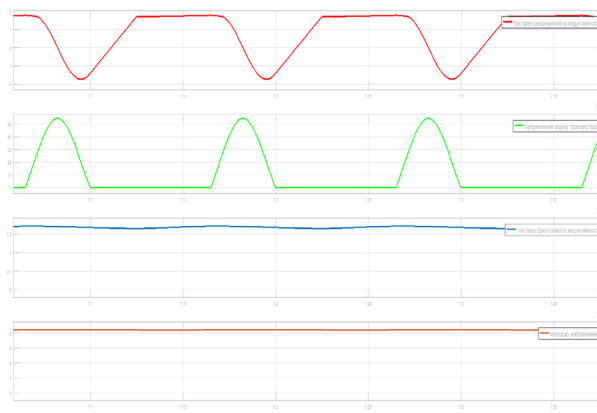
На фиг. 3 е представена реализацията на модела в средата Matlab/Simulink. За определянето на стойностите на схемните елементи е използвана методологията за проектиране на квазирезонансни преобразуватели представена в [11].

При извършването на числените експерименти с модела са използвани следните стойности и параметри:  $L_r=1.6097\mu\text{H}$ ,  $C_r=4.0242\text{nF}$ ,  $L=6\mu\text{H}$ ,  $C=15\mu\text{F}$ ,  $R=5\Omega$ ,  $U_d=20\text{V}$ ,  $f=1\text{MHz}$  и  $D=60\%$ .

На фиг.4 са представени резултатите от изследване на преходния процес на включване (при стартиране) на преобразувателя. От техния анализ може да се направи извода, че схемата е проектирана правилно с оглед осигуряване на благоприятен преходен процес на пуск (от апериодичен тип).

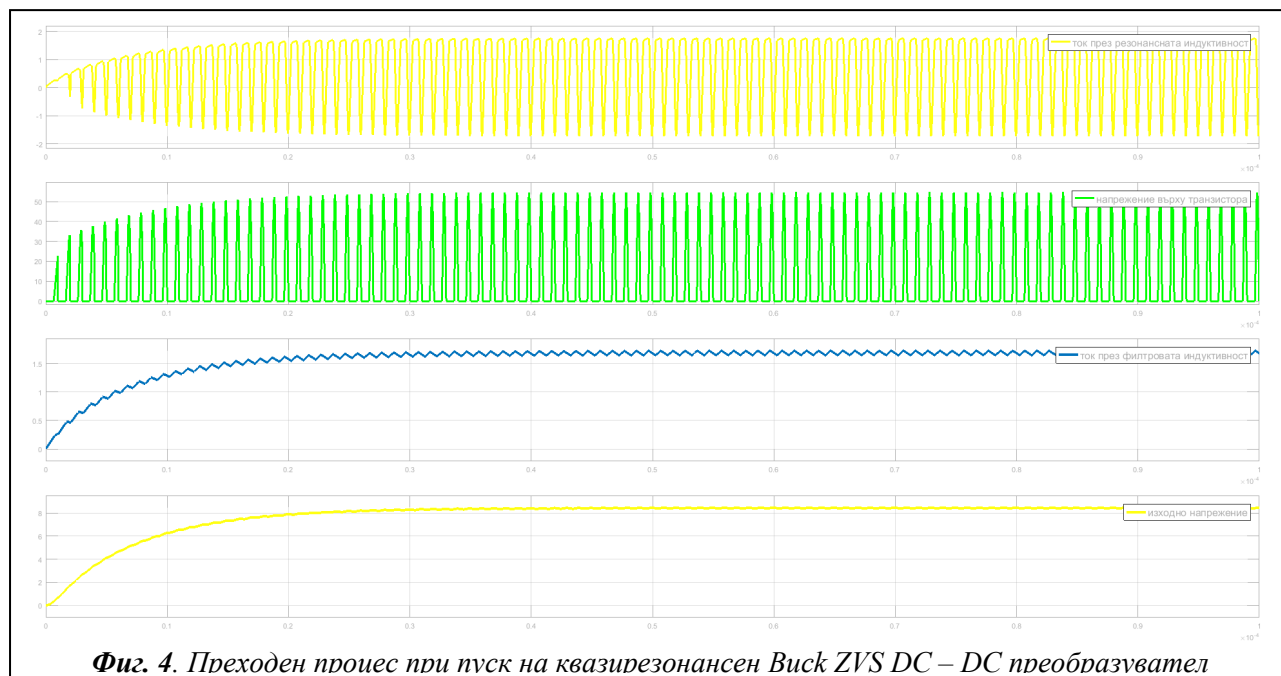
За да се установи дали преобразувателя работи в режим на нулеви комутации по на-

на резонансната верига и избора на честота на управление. Освен това чрез тях се извършва и верификация на модела, чрез сравнение с експерименти от лабораторен образец [11].



**Фиг. 5.** Преходен процес при пуск на квазирезонансен Buck ZVS DC – DC преобразувател

При синтезирането на конкретния модел е разгледана работата в отворена система – без наличието на обратна връзка. Освен това в разгледания пример се работи с фиксирана честота на превключване и коефициент на запълване на управляващите импул-



**Фиг. 4.** Преходен процес при пуск на квазирезонансен Buck ZVS DC – DC преобразувател

прежение са представени резултати от работата на силовата схема в установен режим. Времедиagramите от това изследване са показани на фиг.5. От тях се установява, че е налице работа с меки комутации по напрежение, което е и цел на проектирането

си. Едно естествено развитие на изследванията е синтезирането и добавянето на система за автоматично регулиране, като с нея да се реализират различни работни режими като: стабилизация на изходното напрежение, на изходния ток или на изходната мощност.

При анализа и проектирането на такъв тип схеми, се налага използването на сложен математичен апарат или се правят допускания, като например да се разглежда работата само в режим на непрекъснат изходен ток.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата е представен математичен модел на понижаващ ZVS квазирезонансен постоянен ток преобразувател. Той е верифициран с помощта на компютърни симулации и лабораторен макет.

Чрез моделирането се реализира гарантирането на показателите на изхода на силовите електронни устройства. Това е от изключителна важност за постигането на желаното качество на процеса на енергопреобразуване.

От друга страна съвременните методи за реализация на електронни устройства с гарантирани показатели, изискват използването на системен подход. Това означава да се използват средствата на моделирането в целия процес на реализация на устройствата – от етапа на формулиране на задание до получаването на крайния продукт.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Извършеното изследване се реализира в рамките на проекта "Моделно базирано проектиране на силови електронни устройства с гарантирани показатели", договор ДН 07/06 / 15.12.2016 г., с Фонд научни изследвания.

## REFERENCE

[1] A. Szabo, M. Kamsara, E.S. Ward, "A unified method for the small-signal modelling of multi-resonant and quasi-resonant converters", ISCAS '98. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (Cat. No.98CH36187), Year: 1998, Volume: 3, Pages: 522 - 525 vol.3.  
[2] Erickson R. W., D. Maksimovic, Fundamentals

of Power Electronics, Second Edition, Kluwer Academic Publishers Group, 2001.  
[3] F. C. Lee, "High-Frequency Quasi-Resonant Converter Technologies", Proceedings of the IEEE, vol. 76, no. 4, pp. 377-390, 1988.  
[4] Kazimierczuk M. K. and D. Czarkowski, Resonant Power Converters, IEEE Press and John Wiley & Sons, New York, NY 2nd Edition, pp. 1-595, ISBN 978-0-470-90538-8, 2011.  
[5] Kazimierczuk M. K., Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters, John Wiley & Sons, New York, NY, 008, pp. 1-782, ISBN-10: 0-470-77301-4, ISBN-13: 978-0-470-77301-7.  
[6] K. H. Liu, R. Oruganti, F.C. Lee, "Resonant Switches - Topologies and Characteristics", IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, pp. 106-116, 1985.  
[7] K. H. Liu, F.C. Lee, "Zero-voltage Switching Technique in DC/DC Converters", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 5, no. 3, pp. 293-304, 1990.  
[8] A. Szabo, M. Kamsara, P.G. Holmes, E.S. Ward, "Mathematical Modelling of Quasi-Resonant Converters", Electronics Letters, vol. 31, no. 24, pp. 2057-2058, 1995.  
[9] Mohan, Ned; Undeland, Tore M.; Robbins, William P., Power Electronics - Converters, Applications, and Design (3rd Edition), © 2003 John Wiley & Sons.  
[10] Rashid M. H., Power Electronics handbook: devices, circuits, and applications, Academic Press, 2007.  
[11] N. L. Hinov, N. R. Rangelov, Buck ZVS DC-DC Quasi-Resonant Converter: Design, Modeling, Simulation and Experimentation, ANNUAL JOURNAL OF ELECTRONICS, 2015, ISSN 1314-0078, pp.232- 237.  
[12] R. D. Middlebrook, S. Cuk, "A General Unified Approach to Modelling Switching-Converter Power Stages", IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, pp. 18-34, 1976.  
[13] Zinoviev G., Fundamentals of Power Electronics - part II, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, 2004, (in Russian).  
[14] R. D. Middlebrook, "Small-Signal Modelling of Pulse-Width-Modulated Switched-Mode Converters", Proceedings of the IEEE, vol. 76, no. 4, pp. 343-353, 1988.