



---

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОВАРНАТА СПОСОБНОСТ И РАЗРЯДНИЯ ТОК НА КАСКАДЕН УМНОЖИТЕЛ НА НАПРЕЖЕНИЕ

Любомир Секулов, Ирена Божичкова, Мартин Златков, Мартина Томчева  
[res\\_start@abv.bg](mailto:res_start@abv.bg), [mlenium\\_26@abv.bg](mailto:mlenium_26@abv.bg), [dj\\_marti79@mail.bg](mailto:dj_marti79@mail.bg), [martito\\_666@abv.bg](mailto:martito_666@abv.bg)

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“  
София, ул. „Гео Милев № 158  
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

**Ключови думи:** ТВН, Техника на високите напрежения, лаборатория, изпитвателна високоволтова уредба, трекингоустойчивост, пропълзващ ток, пробив, изолация, изолатор, импулсен генератор, искроустойчивост, дъгоустойчивост.

**Резюме:** В учебната програма на факултетите, които изучават енергетика задължително присъства дисциплината „Техника на високите напрежения“. Това налага необходимостта от онагледяване на някои от преходните процеси, които протичат по време на работа на високоволтовите съоръжения при постоянен ток и напрежение. Тези процеси биха могли да бъдат пресъздадени частично в учебна лаборатория с помощта на специална апаратура, като в случая за постоянно напрежение това се осъществява от каскаден умножител.

В доклада е описан начинът, по който е направено изследването на товарната способност и разрядния процес на проектирания и вече изграден каскаден умножител на напрежение. Описан е начинът по който е направено измерването и самата опитна постановка. Дадени са данните от направеното измерване, които се явяват технически параметри и характеристики на изпитвателната високоволтова уредба за постоянно напрежение. Тя ще бъде полезно допълнение при окомплектоването на оборудването в бъдещата лаборатория по „Техника на високите напрежения“ на Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“. Целта е да се създаде възможност за провеждане на упражнения по дисциплината „Техника на високите напрежения“. Студентите да се запознаят нагледно с устройството и принципът на действие на схемата, нейните параметри и характеристики, начините на въздействие върху товарната способност на уредбата. Уредбата може да се използва и като маломощен източник на високо захранващо постоянно напрежение.

### УВОД

Умножителят на напрежение намира приложение в различни апарати като например йонизатори на въздуха, промишлени електрофилтри, електрошокови палки, ускорители на частици, каскади за кинескопи, апарати за високоволтови изпитания. В България все още нямаме изградени високоволтови трасета на постоянен ток за пренос на електрическа енергия, но в света се използват поради преимуществата, които имат пред промливотоковите. Преходните процеси при постоянен ток и напрежение са от изключително значение при изграждането на подобни системи за пренос на

електрическа енергия. Там, където е необходимо използването на високо постоянно напрежение често се използва генератора на *Cockcroft-Walton*. По тази схема е изградена уредба за лабораторни упражнения осигуряваща високо постоянно напрежение до 12000VDC.

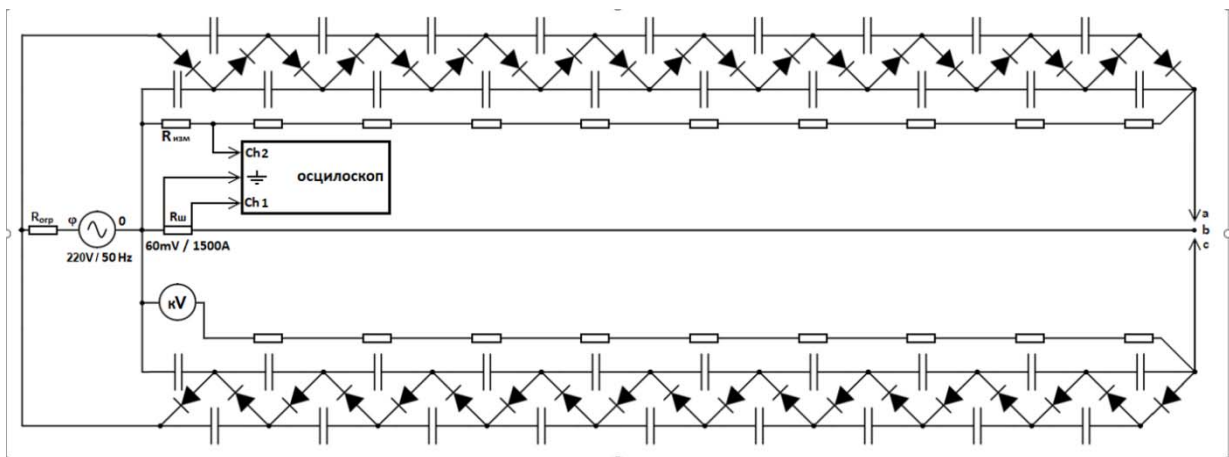
## 1. УСТРОЙСТВО НА СХЕМАТА

Изработената схема представлява двуполупериоден 9+9 стъпален симетричен каскаден умножител на напрежение (фиг. 1)[3][4].

Захранващото мрежово напрежение 220VAC/50Hz, се подава към двете рамена на каскадата през ограничителния резистор  $R_{огр}$  50Ω. 9 групи състоящи се от два диода (всеки съставен от два паралелно свързани диода) и два кондензатора на рамо (всеки от които съставен от два последователно свързани кондензатора). Кондензаторите  $C_1-C_{10}$  и  $C_{30}-C_{38}$  са изпълнени с два последователно свързани униполярни кондензатори 400μF/400V. Останалите кондензатори  $C_{10}-C_{29}$  са съставени от два последователно свързани кондензатора с намаляващ капацитет на първия кондензатор спрямо втория кондензатор. Посоката за понижаване на капацитета е от захранването към разряда и е в диапазона от 400μF/400V до 100μF/400V. Последователно на всеки диод е свързан токоограничаващ резистор 10Ω/5W, който служи за предпазване на диода от повреда по време на разрядния процес. Направена е симулация на *Matlab-Simulink*, която показва токове от порядъка на 1500A[6].

Съпротивлението  $R_{огр}$  служи за ограничаване на зарядния ток при първоначално включване на схемата, тъй като кондензаторите тогава са разредени и токът без този резистор би достигнал моментни стойности няколко стотин ампера. Съпротивленията последователно на диодите имат същата функция при заряд и разряд.

Схемата от фиг.1 работи в следната последователност: При първата полувайна на входното напрежение се зарежда първият кондензатор, при втората се зарежда вторият кондензатор, при третата - третият и т.н., докато не се зареди последният кондензатор от каскадния умножител. Това означава, че схемата има голяма инертност, като тази инертност зависи от честотата на напрежението.



Фиг. 1. Принципна схема на еднополупериоден 9+9 стъпален каскаден умножител

## 2. ИЗМЕРВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА КАСКАДНИЯ УМНОЖИТЕЛ

За измерване на напрежението на каскадата е изграден делител на напрежение, чиято високоомна част е 6750kΩ, изпълнена от 9 съпротивления по 750kΩ свързани последователно, а нискоомната част е 1kΩ и е свързана към „0“ на захранващото мрежово напрежение. За измерване на разрядния ток се използва шунт 1500A/60mV, който също е свързан към „0“ на захранващото напрежение (фиг.1.). Така се

осъществява измерването на тока и напрежението едновременно, в реално време, във функция от времето с двуканален осцилоскоп. Осцилоскопът има възможност за запис на разрядния процес и по този начин да се измери и изчисли точно товарната способност на каскадния умножител. Захранването на осцилоскопа се осъществява от мрежата посредством разделителен трансформатор, който не е показана на схемата. Това е удобно и същевременно безопасно, тъй като масата на осцилоскопа е галванично разделена от нулата на мрежовото захранване. Горепосланото свързване на сондите (фиг. 1.) позволява измерваните стойности на тока и напрежението да са в границите на измервателния обхват на осцилоскопа.

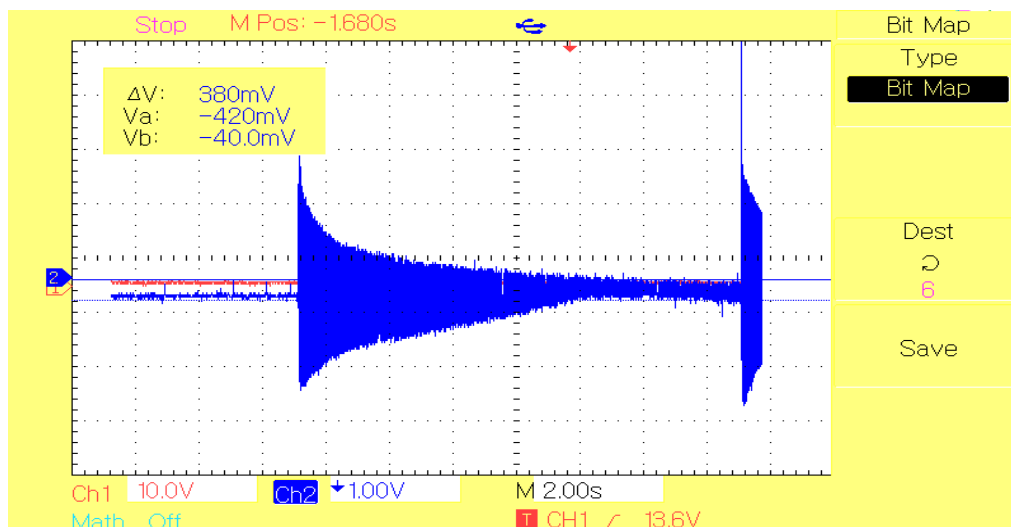
Предвид описаните по-горе схемни особености измерването се осъществява, като чрез двуканалния осцилоскоп, като се настройва неговия Ch1 на тригерен режим на амплитудно задействане съответстващо на 2/3 от пиковата стойност на очаквания измерван ток. При разряд тригерът се задейства по ток и записва преходния процес, именно напрежение и ток във функция от времето, като точността на измерването зависи само от честотния обхват на осцилоскопа и неговата дискретизация.

### 3. РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗМЕРВАНИЯТА

Режимите на работа на каскадния умножител са два, заряд и разряд. За целите на доклада са направени измервания и в двата режима на работа.

#### 3.1. Режим на заряд

При режим на заряд след включване на захранващото напрежение се следят две стойности - зарядния ток и изходното напрежение като на фиг. 2 е показан токът на заряд на каскадния умножител за едното рамо.



Фиг. 2 Заряден ток на каскадния умножител

Синята графика е токът, който намалява по експонента във функция от времето, като коефициентът на преобразуване е 1V/1A за стойностите по ордината, а по абсцисата е времето в секунди. Ясно се вижда зарядът, който е около 10 секунди, като максималният ток е в началото и е със стойност  $3.8A_{p-p}$  след 8-та секунда той остава постоянен  $0.5A_{RMS}$ .

Напрежението на заряда в случая на изследваната величина се определя от формулата:

$$(1) \quad U_c = U_s \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}}), \text{ V}$$

Където  $U_c$  е захранващото напрежение,  $C$  е общия капацитет на кондензаторите в каскадата в едното рамо,  $R=150$

От тук се определя, че общия капацитет на едното рамо е около  $150\mu F$ .

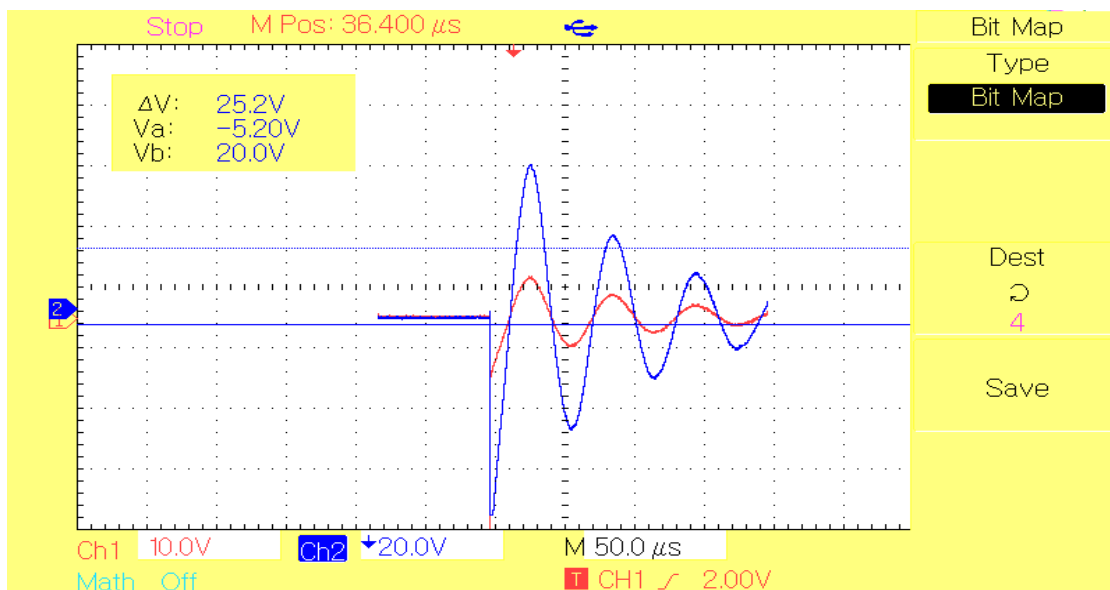
Кондензаторът във веригата с постоянно напрежение се характеризира със съхранената енергия  $CU^2$  на дадено ниво и честота на пулсации на напрежението (ниво на висши хармоници на напрежение) [1].

$$(2) \quad W_c = \frac{1}{2} C \cdot U^2, J$$

Ако се пренебрегнат загубите за изходно напрежение  $6000V$  DC енергията в едното рамо на каскадата ще е  $2700J$ . За улеснение приемаме, че каскадата е LC контур със собствени затихващи колебания [5].

### 3.2. Режим на разряд

Направени са измервания и на изходния ток и напрежение при разряд на каскадата (изпразване на кондензаторите) и те са показани графично на фиг. 3 за едното рамо и на фиг. 4 за другото рамо. Червената линия на Ch1 е токът през шунта  $R_{sh}$ , а синята линия Ch2 е напрежение на делителя. И при двете измервания се отчита затихване на колебанията за време около  $300\mu s$ . Това е времето за гасене на дъгата. Периодът на колебанията е постоянен и се вижда от измерването на фиг.4, като то е  $60\mu s$  и това е схемното време  $t_{ex}$  на разрядната верига.



Фиг. 3 Разряден ток и напрежение на едното рамо на каскадата

$$(3) \quad t_{ex} = \frac{\pi}{\omega} \cdot \arccos\left(\frac{I_r}{I_m}\right), s$$

$I_r$  и  $I_m$  са големините зарядния и презарядния ток на LC контура и се отчитат от графиките фиг. 3 и фиг. 4.

$$(4) \quad \arccos\left(\frac{I_r}{I_m}\right) = 1.00826$$

За

$$(5) \quad \omega = \frac{\pi}{t_{ex}} \cdot \arccos\left(\frac{I_r}{I_m}\right), \text{rad}^{-1}$$

$$\omega = 33608.67, \text{rad}^{-1}$$

$$(6) \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_0}}$$

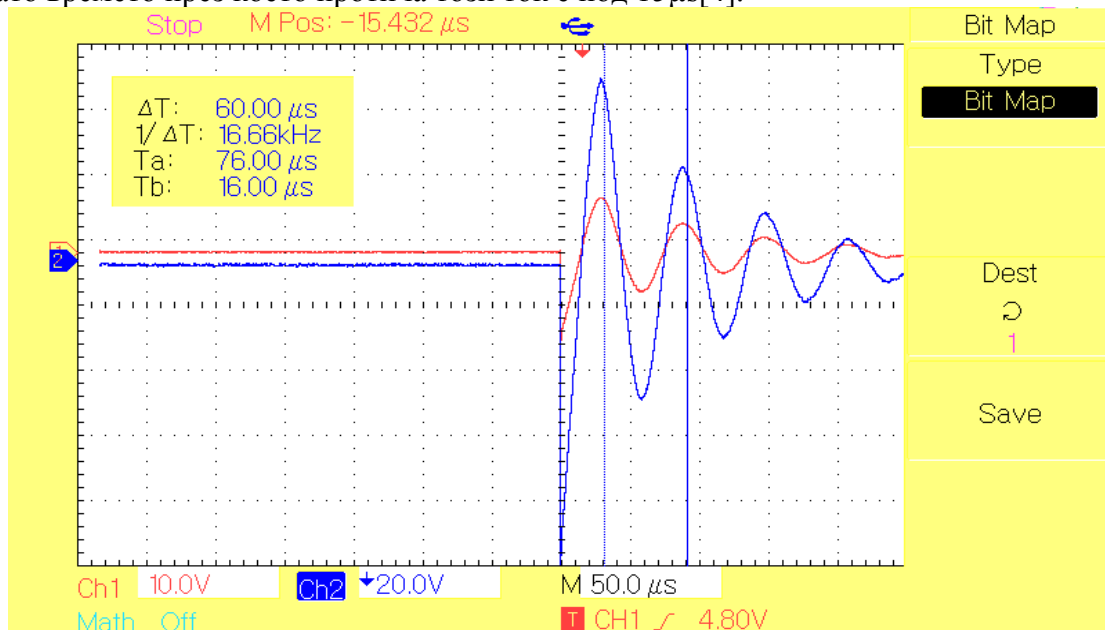
е кръгова честота на собствени колебания на контура;

Откъдето,

$$(7) \quad L_c = \frac{1}{C_p \cdot \omega^2}$$

$$L_c = 5.902, \mu\text{H}$$

Отчетена е максималната пикова стойности на тока при 6000V, която е 25 000A, като времето през което протича този ток е под 15μs[4].



Фиг. 4 Разряден ток и напрежение на другото рамо на каскадата

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати от изследванията ще се използват за реализиране на стенд в лаборатория по ТВН при ВТУ Тодор Каблешков. Параметрите на силовите прибори са подбрани така, че да отговарят на изискванията за работа на схемата без повреда при номинални напрежения и токове. Не е нужно елементите от схемата да бъдат бързодействащи. Токоограничаващите резистори ще предпазят схемата от повреда в процесите на заряд и разряд.

Направеното изследване ни дава следните резултати:

- известна е формата на напрежението по време на разряд;
- известен е консумирания от мрежата заряден ток, като той е в нормални граници;
- известна е стойността на разрядния ток;
- известно е времето за разряд;
- известна е енергията на дъгата по време на разряда.

Времето за разряд, както и товарната способност на каскадния умножител изцяло зависят от:

- средата, в която се осъществява този процес;
- от разстоянието между електродите;
- от заряда(енергийният запас) на схемата;
- видът на електродите.

Малката индуктивност на схемата се доказва и от направените измервания и от изчисленията към тях, което предпазва каскадния умножител от пренапрежения.

Установи се явна симетрия при двете рамена на каскадния умножител, което допуска и работа на разряд между двете рамена, като по този начин се повишава двойно изходното напрежение на каскадата, респективно енергията на разряд, която определя товарната способност на каскадния умножител.

### ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Dwivedi C.K., Daigavane M.B. Multi-purpose low cost DC high voltage generator (60 kV output), using Cockcroft-Walton voltage multiplier circuit. International Journal of Science and Technology Education Research, 2011, vol.2(7), pp. 109-119. 2. Cortez D.F.
- [2] E. Kuffel, Dean Emeritus, W.S. Zaengl, High Voltage Engineering Fundamentals Second edition ISBN 0 7506 3634
- [3] Cockcroft J.D., Walton E.T.S. Experiments with high velocity positive ions. (I) Further developments in the method of obtaining high velocity positive ions. Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, physical and engineering sciences, 1932, vol.136, no.830, pp. 619-630. doi: 10.1098/rspa.1932.0107.
- [4] Важов В. Ф., Лавринович В. А. Техника высоких напряжений / Учебник для бакалавров направления -140200 "Электроэнергетика" — ТПУ, 2014.
- [5] Розанов Ю. К. "Основы силовой электроники": Енергоиздать, 1992. – 296 с. ISBN 5-283-00681-6
- [6] Секулов. Л., И. Божичкова, П. Костадинов, М. Златков, “Симуляция и проектиране на процесите в еднополупериоден каскаден умножител на напрежение” Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации”, ISSN 2367-6620, том 18, 3/2, 2020 г. статия № 2032, стр. X-46–X-51

## INVESTIGATION OF LOAD CAPACITY AND DISCHARGE CURRENT OF A CASCADE VOLTAGE MULTIPLICATOR

**Lyubomir Sekulov, Irena Bozhichkova, Martin Zlatkov, Martina Tomcheva**  
[res\\_start@abv.bg](mailto:res_start@abv.bg), [mlenium\\_26@abv.bg](mailto:mlenium_26@abv.bg), [dj\\_marti79@mail.bg](mailto:dj_marti79@mail.bg), [martito\\_666@abv.bg](mailto:martito_666@abv.bg)

*Todor Kableshkov University of Transport  
Sofia, 158 Geo Milev Str.  
THE REPUBLIC OF BULGARIA*

**Key words:** *High voltage equipment, high voltage laboratory, high voltage test system, trekking resistance, creeping current, breakdown, insulation, insulator, pulse generator, spark resistance, Cockcroft-Walton generator, arc resistance.*

**Abstract:** *The university departments offering studies in Power Economy necessarily give a course of High Voltage Engineering on their curricula. This requires the visualisation of some of the transitional processes occurring during high-voltage equipment operation on direct current and constant voltage. A visualisation of these processes could be recreated in a training laboratory with the help of specialised equipment, where a voltage multiplier is used to ensure a constant voltage.*

*This report provides a description of the testing method used in the testing of the load capacity and the discharge process for the voltage multiplier designed and constructed for the purpose. It also accounts for the measurement method and the experimental laboratory design. The measurement data are provided as they constitute the technical parameters and features of the high-voltage testing equipment for constant voltage. The equipment will be used to complete the furnishing of the future High-Voltage Engineering Lab of Todor Kableshkov University of Transport. The objective is to create an opportunity for conducting exercises in High Voltage Engineering, so that the students can familiarise themselves visually with the circuit construction and method of operation, its parameters and features and its effect on the load capacity of the equipment. The latter can be used as a powerful supply source of constant high voltage.*