

СИМУЛАЦИЯ И ПРОЕКТИРАНЕ НА ПРОЦЕСИТЕ В ЕДНОПОЛУПЕРИОДЕН КАСКАДЕН УМНОЖИТЕЛ НА НАПРЕЖЕНИЕ

*Любомир Секулов, Ирена Божичкова, Петко Костадинов, Мартин Златков,
res_start@abv.bg milenium_26@abv.bg petko_kostadinov@abv.bg dj_marti79@mail.bg*

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”
гр. София, ул. „Гео Милев” 158
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

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

***Резюме:** В учебната програма на факултетите, които изучават енергетика задължително присъства предмета „Техника на високите напрежения“. Това налага необходимостта от онагледяване на някои от процесите, които протичат по време на работа на високоволтовите съоръжения. Тези процеси биха могли да бъдат пресъздадени частично в учебна лаборатория с помощта на специална апаратура. Високоволтовите изпитвателни уредби са неразделна част от оборудването на една съвременна лаборатория по „Техника на високите напрежения“. Там, където е необходимо използването на високо постоянно напрежение често се използва генератора на Cockcroft–Walton.*

В доклада са представени данните от симулация на процесите, които протичат в умножителя на напрежение на генератора на Cockcroft–Walton. Получена е стойността на напрежението на празен ход и графиката на зарядния процес на каскадата. Изпробвана е товароспособността на схемата при различни стойности на товара. Отчетена е стойността на изходния ток в момента на разряд (изпразване) на каскадата. Този симулиран режим е режим е близък до режима на късо съединение. При дадени стойности на кондензаторите на каскадата са отчетени импулсни токове от порядъка на 1500А. В реални условия това би довело до повреда на изправителните елементи в схемата. Изпробвана е симулация с токоограничаващи резистори, така, че импулсните токове да придобият нормални стойности. По този начин става възможно проектирането на умножител на напрежение с реални стойности и в последствие конструиране на реален работещ прототип. Има идея същият да бъде използван за високоволтови изпитания в бъдещата лаборатория по ТВН на ВТУ „Тодор Каблешков“. Целта е да се създаде възможност да бъдат провеждани упражнения по дисциплината ТВН със студенти и те да се запознаят нагледно с устройството и принципът на действие на схемата, а също така прототипът да се използва като източник на високо захранващо напрежение.

Увод.

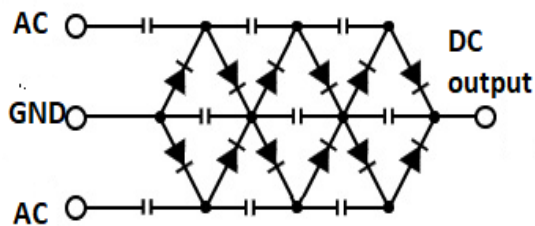
Генератора на Cockcroft–Walton представлява умножител на напрежение с няколко каскадирани полупериодни удвоители. Апаратът е именуван на английският и ирландски физици- John Douglas Cockcroft и Ernest Walton, които през 1932 г. са използвали схемата, за да създадат ускорител на частици. През 1951г. те печелят Нобеловата награда по физика, благодарение на своето устройство. 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.

При първата полувайна на входното напрежение се зарежда първият кондензатор. При втората се зарежда вторият. При третата - третия и т.н., докато не се зареди последният. Това означава, че схемата има голяма инертност.

През 1971 г. в ATOMIC ENERGY OF CANADA, LTD., Chalk River, Ontario. е конструиран 2MV генератор с товарен ток 30mA, който се е зареждал за 17 s., като това е върхово постижение за времето си.

Общи сведения.

Известни са две схеми на каскадни умножители на напрежение. На фиг. 1 е показана 3-стъпална двуполупериодна каскада. На фиг. 2 е показана 2-стъпална еднополупериодна каскада. Разликата в двете схеми освен в елементите е и в изходното напрежение, което се изчислява по формула 1 за еднополупериодния каскаден умножител и по формула 2 за двуполупериодния умножител. [1] [2]



Фиг. 1. Принципно схемата на двуполупериоден 3-стъпален каскаден умножител

$$(1) E_{out} = 2 \cdot n \cdot E_{max} - \frac{I_t}{6 \cdot f \cdot C} \cdot (4 \cdot n^3 + 3 \cdot n^2 - n), V$$

$$(2) E_{out} = 2 \cdot n \cdot E_{max} - \frac{I_t}{6 \cdot f \cdot C} \cdot (n^3 + 2 \cdot n), V$$

Където:

n - броят на стъпалата в каскадата;

E_{max} - е максималното напрежение на входа, V;

C - капацитетът на кондензаторите (когато са еднакви), F;

f - е честотата, Hz;

I_t - е товарният ток, A.

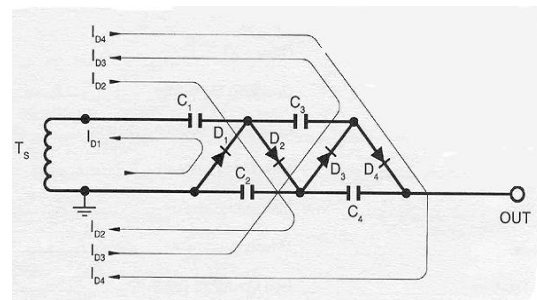
Друг параметър на генератора са пулсациите на изхода на генератора, като при еднополупериодния умножител се определят от формулата:

$$(3) E_{puls} = \frac{I_t}{2 \cdot f \cdot C} \cdot n \cdot (n + 1), V$$

Оптималният брой стъпала на каскадата се определя от формулата:[3]

$$(4) n_{opt} = \sqrt{\frac{V_{max} \cdot f \cdot C}{I_t}}$$

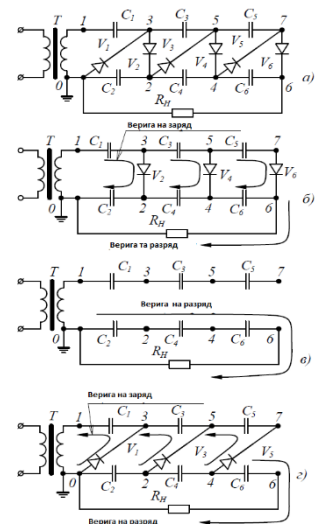
Симулация на процесите в еднополупериоден каскаден умножител на напрежение



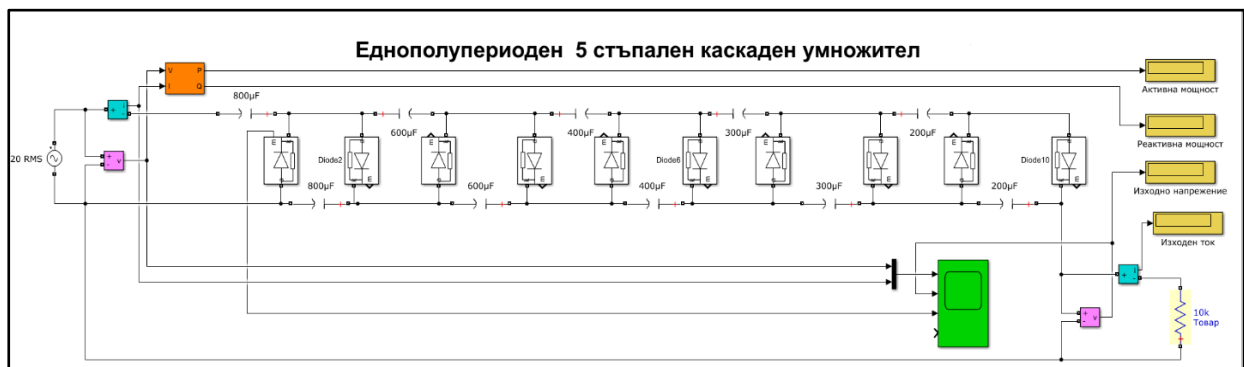
Фиг. 2. Принципно схемата на 2-стъпален полупериоден каскаден умножител

Принципът на работа на схемата е показан на фиг. 3. Схемата има два режима на работа - заряд и разряд.[4]

Проектираната схема на умножителя на напрежение е показана на фиг. 4, като изходния ток трябва да бъде до 100mA и напрежението до 2.5kV. При симулацията се използват различни по стойност кондензатори за всяко стъпало, като това се прави с цел намаляване токовете през диодите в последните стъпала. Формули (1) и (2) са верни само когато се използват еднакви кондензатори и това е основното преимущество на направената симулация. При направения подбор на елементи описани във фигура 3 се постига нужният резултат, който е показан в стойностите, а именно изходно напрежение 2226 V_{rms} и изходен ток 220mA. Важно е да се отчете, че при това схемно решение захранването е стандартно от мрежата. Консумираната активна мощност е 443.5W, а реактивната мощност е 374var. Другата особеност е, че всички диоди са защитени с RC звено със съпротивление 500R и капацитет C=250nF. За целите на изследването е проектирана схема на Matlab Simulink на 5-стъпален еднополупериоден каскаден умножител на напрежение.

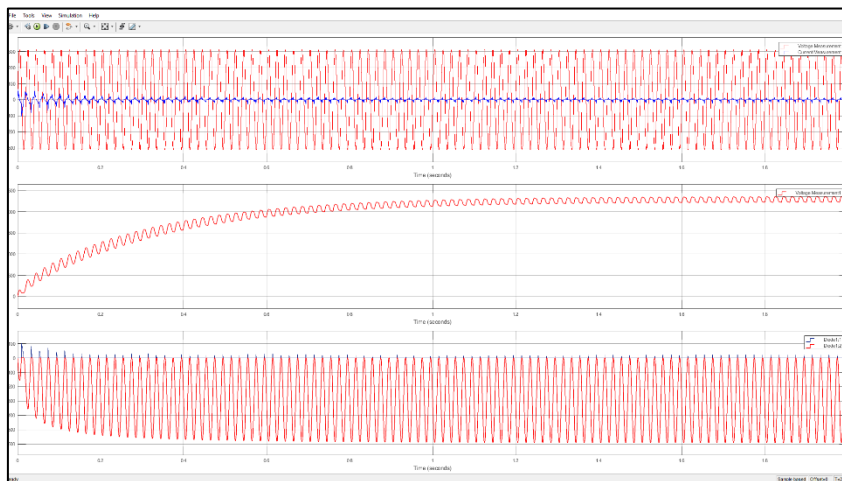


Фиг. 3 Принцип на работа на каскаден умножител на напрежение.



Фиг.4 Схема разработена на MATLAB на 5- стъпален каскаден умножител с товар 10k на изхода

На фигура 5 са показани осцилограмите от осцилоскопа свързан по схемата от фигура 2. Именно на първия канал са входното напрежение и ток на втория канал е изходното напрежение и на третия канал е токът и напрежението през първия диод D1 от каскадата. От симулацията се вижда, че времето за установяване на изходното напрежение е около 1.4 s.



Фиг. 5. Осцилограма на входно изходните напрежения

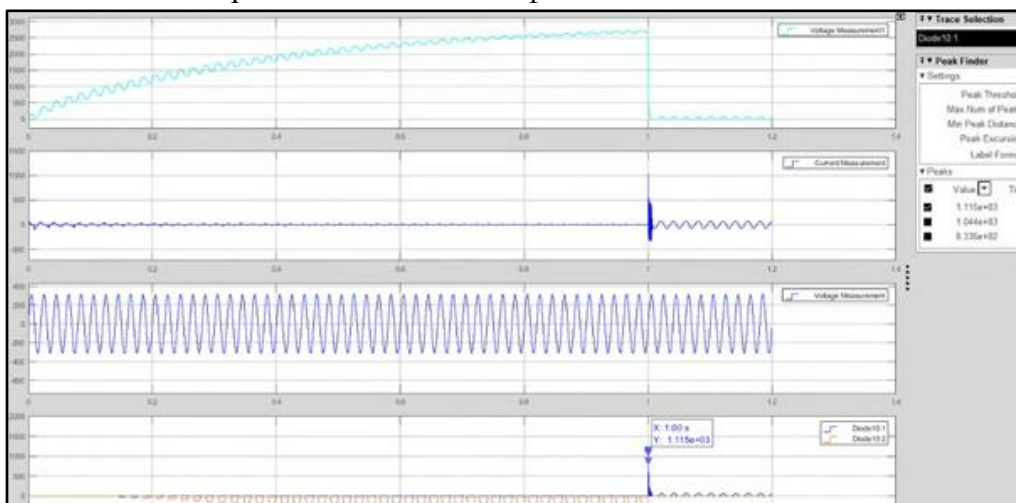
Другият показател E_{puls} за изходното напрежения отчетен от осцилограмите е 120.4V_{pp}. Отчетеният ток в първия диод D1 е с пикови стойности 169.2A_{pp}. Важно е да се отбележи, че при тази симулация товарът е присъединен към схемата още при самото и пускане. В реални условия в лабораторията товарът ще се присъединява след като

се установи изходното напрежение и това наложи да се проектира и симулира втора схема, която да присъединява товара след време на установяване на изходното напрежение по голямо от 1.4 s. Предвид резултатите от симулацията на първата схема, се симулира нова схема, като съпротивлението на изхода R_t се променя в границите от 3Ω до $30k\Omega$. Измерени са токовете във всички стъпала от каскадата и резултатите са записани в таблица 1.

Таблица 1

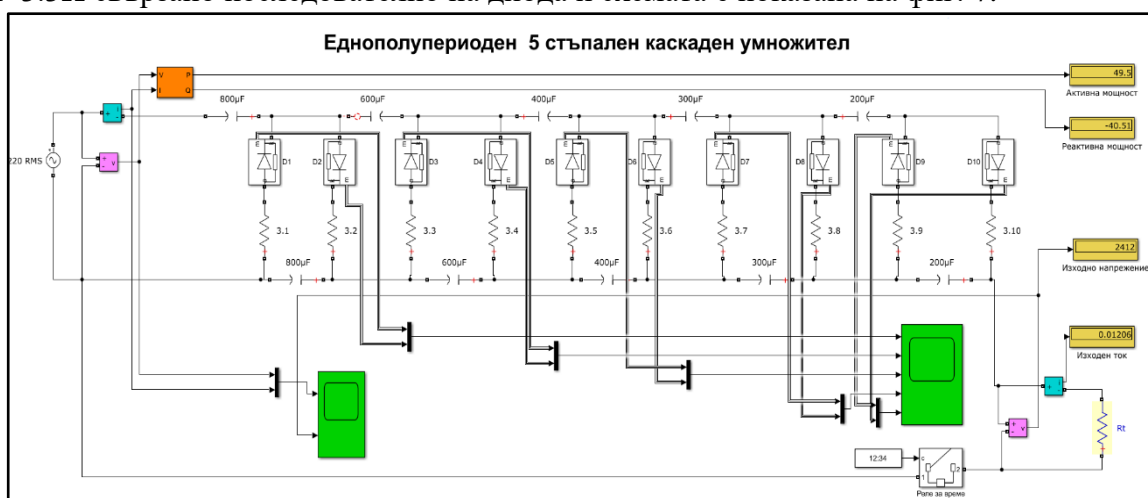
R_t	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	U изх	I out
Ω	$I_{max,A}$	$I_{max,A}$	$I_{max,A}$	$I_{max,A}$	$I_{max,A}$	$I_{max,A}$	$I_{max,A}$	$I_{max,A}$	$I_{max,A}$	$I_{max,A}$	Vrms,V	Irms,A
3	130	63.77	62.78	143.6	172.5	234	309.2	528	643	791	80	26.66667
30	128	68	34	24	36	28	32	39	78	64	237	7.9
300	104	63	34	29	20	13	10	9	8	8	738	2.46
3000	104	63	30	21	16	13	10	10	8	6.98	1526	0.508667
10000	104	63	30	21	16	13	10	8	8	6	2460	0.246

Отчетени са стойности на токовете по време на комутация на R_t при симулирано к.с. на изхода и осцилограмата е показана на фиг. 6



Фиг. 6. Осцилограма на тока с максимална стойност 1115 A при товар на изхода 1Ω

Получените резултати показват много големи стойности на токовете в първите диоди от каскадата. Бе направена нова симулация с допълнително съпротивление $R=3.3\Omega$ свързано последователно на диода и схемата е показана на фиг. 7.



Фиг.7 Еднополупериоден 5-стъпален каскаден умножител на напрежение с токограничаващи резистори

Резултатите от направената симулация са записани на таблица 2.

Таблица 2

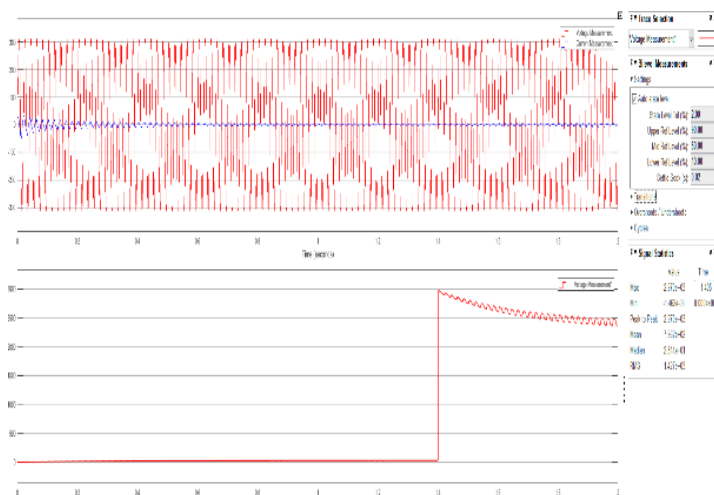
С допълнително съпротивление R=3.3												
Rt	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	U изх	I out
Ω	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	V _{rms} ,V	I _{rms} ,A
3	41	27	19	17	16	17	22	82	53	205	22	7.333333
30	41	27	19	15	14	12	12	14	24	42	152	5.066667
300	41	27	18	12	10	8	7	6	6	7	573	1.91
3000	41	27	18	8.7	8	7	6	5	4	4	1723	0.574333
10000	41	27	18	12	8	7	6	5	4	3	2436	0.2436

Предвид несиметрията са изчислени следните стойности и е направена симулация със различни допълнителни съпротивления, като резултатите са показани в таблица 3.

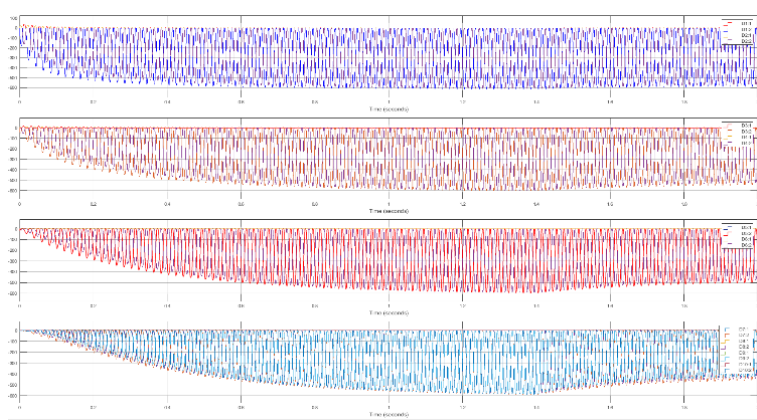
Таблица 3

	R1, Ω	R2, Ω	R3, Ω	R4, Ω	R5, Ω	R6, Ω	R7, Ω	R8, Ω	R9, Ω	R10, Ω		
Rt	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	U изх	I out
Ω	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	I _{max} ,A	V _{rms} ,V	I _{rms} ,A
1	3.13	2.89	2.67	2	0.6	1.6	0.6	0.9	0.4	1.5	2500-0.62	0.26
3	3.13	2.89	2.67	1.9	0.56	1.69	0.67	0.99	0.41	1.52	2500-1.87	0.23
30	3.13	2.89	2.67	1.839	0.6	1.52	0.47	0.81	0.403	1.36	2500-1.52	0.23
300	3.13	2.89	2.67	1.324	0.58	0.91	0.46	0.55	0.4	0.89	2500-62	0.06
3000	3.13	2.89	2.67	1.324	0.58	0.56	0.4	0.25	0.32	0.4	2500-560	0.16
30000	3.13	2.89	2.67	1.324	0.58	0.56	0.4	0.2	0.27	0.19	2500-2000	0.06
200000	3.13	2.89	2.67	1.324	0.58	0.56	0.4	0.2	0.27	0.19	2500	0.0125

Заснетите осцилограми на входно изходните напрежения са показани на фиг. 8 и токовете и напреженията на диодите в каскадата са показани на фиг. 9



Фиг. 8 Входно-изходни напрежения



Фиг. 9 Напрежения и токове на диодите D1-D10

използва в дистанционната форма на обучение по дисциплината ТВН, като се доразвие със стабилизация на изходното напрежение и повишаване на честотата на входното напрежение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените резултати при симулацията ще се използват за реализиране на стенд в лаборатория на ВН при ВТУ Тодор Каблешков. Параметрите на силовите прибори ще бъдат подбрани така, че да отговарят на изискванията на схемата за максимални напрежения и токове. Бързодействие на приборите не е нужно, а токоограничаването ще предпази схемата от повреда. Вижда се, че силовите прибори без токоизравнителни резистори не се натоварват симетрично и че първите диоди от каскадата поддържат постоянен максимален ток при работа на генератора. При к.с. на изхода се натоварват последните диоди от каскадата и без ограничителни резистори те биха се повредили. Разработената симулация на Matlab Simulink може да се

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., Barbi I. A Family of High Voltage Gain SinglePhase Hybrid Switched-Capacitor PFC Rectifiers. IEEE Transactions On Power Electronics, 2015, vol.30, no.8, pp. 4189-4198. doi:
- [2] E. Kuffel, Dean Emeritus, W.S. Zaengl, High Voltage Engineering Fundamentals Second edition ISBN 0 7506 3634
- [3] Cockroft 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.

DESIGN AND SIMULATION OF PROCESSES IN A HALF-WAVE CASCADE VOLTAGE MULTIPLIER

Lyubomir Sekulov, Irena Bozhichkova, Petko Kostadinov, Martin Zlatkov,

*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.*

Summary: *High Voltage Engineering is a subject invariably present in the curricula of the academic departments of Energy Science & Engineering. This calls for illustrating some of the processes, which take place during the operation of high-voltage equipment. In part, these processes could be recreated in a training laboratory with the help of special equipment. High-voltage test systems are an integral part of the equipment of any modern High Voltage Engineering laboratory. The Cockcroft-Walton generator is often used where the use of high DC voltage is required.*

The report lays out the process simulation data for the voltage multiplier of the Cockcroft-Walton generator. The value of the no-load voltage and the graph of the cascade charging process are obtained. The load capacity of the circuit at different load values was tested. Record was made of the output current value as at the time of cascade discharge (discharge). This simulated mode is similar to the short-circuit mode. Pulse currents in the order of 1500A were reported for certain values of the cascade capacitors. In real-life conditions, this would damage the rectifiers in the circuit. A test simulation with current limiting resistors was run to obtain normal values of pulse currents. Thus, it becomes possible to design a voltage multiplier for real values and to subsequently construct an actual working prototype. The idea is to use it for high-voltage tests in the future TVN Laboratory (High Voltage Equipment Lab) of the Todor Kableshkov University of Transport. The purpose is to set up a training capacity for practical High Voltage Equipment exercises with students, so as to give them hands-on knowledge of the device and the circuit operating principle, while using the prototype as a source of high voltage supply.