Механика Транспорт Комуникации

ISSN 1312-3823 (print)
ISSN 2367-6620 (online)
том 23, брой 2, 2025 г.

Научно списание **http://www.mtc-aj.com** **статия № 2665**

ИЗБОР НА СХЕМА ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА УРЕДБА ЗА ВИСОКО ИМПУЛСНО НАПРЕЖЕНИЕ

Петко Костадинов
petko__kostadinov@abv.bg

ВТУ „Тодор Каблешков"
София, 1574, ул. "Гео Милев" 158
БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: *високо напрежение, импулсен генератор, генератор на Маркс, генератор на "бягаща вълна", високоволтов импулс, високоволтова техника, импулсен генератор, разряден импулс 1,2/50 μs, линия за забавяне, високоволтова лаборатория, техника на високите напрежения*

Резюме: *Докладът представя проучване относно предимствата и недостатъците на използваните към настоящия момент високоволтови уредби за генериране на импулсни напрежения, базиран основно на утвърдената теория и добрите международни практики, описани в научната литература по високоволтова техника и в публикувани реализации на импулсни генератори. Анализирани са изискванията към стандартните разрядни и комутационни импулси по действащите норми и стандарти, както и влиянието на изолационната среда и изпитвания обект върху формата на напрежението и енергийните възможности на уредбата. Проследена е логиката на избор на схемна конфигурация, зареждана от високоволтов постояннотоков източник и разреждана през искрова междина към изпитваната изолационна система. Разгледани са критериите за определяне на нивото на изпитвателното напрежение, капацитета на товара, повърхностно и обемно съпротивление, и съгласуването на импулсния генератор с обекта, така че да се осигури доближаване до стандартна форма на импулса и необходимата повторяемост на резултатите. Високоволтовата изпитвателна техника е съществена област на електроинженерството, целяща изучаването на физичните явления в изолационните материали и тестването на електрическо оборудване спрямо пренапрежения. По този начин се осигурява връзка между изискванията на стандартите и реалните експлоатационни режими на електроенергийните обекти.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Техниката на високите напрежения е област на електроинженерството, която се занимава с физичните явления и техните специфични особености, свързани с високите напрежения. От основно значение е изучаването на свойствата на газове, плазми, течни и твърди изолационни материали. Тъй като физическите явления в тези среди не могат да бъдат обяснени само с теоретично изследване, експерименталното изследване стои на преден план.

За нуждите на изследването и изпитването на електрическо оборудване, което трябва да издържа на пренапрежения, е необходимо генерирането на високоволтови импулси. В електроенергийните системи възникват пренапрежения поради мълнии или комутационни процеси (*switching surges*). Тези преходни напрежения се разпространяват като бягащи вълни (*Wanderwellen*) по електропреносните линии и могат да причинят физически или електромагнитни смущения.

Настоящият доклад разглежда възможните решения при избора на схема за високоволтова уредба, способна да генерира високи импулсни напрежения.

Развитието на съвременните електроенергийни системи и тенденцията към повишаване на номиналните напрежения налагат все по-точно лабораторно изпитване на изолацията [2] на апаратурата при пренапрежения от мълниеносен и комутационен характер. За целите на изолационната координация се използват стандартизирани импулсни вълни, най-често пълен разряден импулс 1,2/50 μs, както и по-бавни комутационни импулси [8] [9].

Целта на настоящия доклад е да се направи анализ на предимствата и недостатъците на съществуващите схемни решения и да се избере схема, която да отговаря на поставените критерии.

ИСТОРИЧЕСКА СПРАВКА

Първите опити за лабораторно възпроизвеждане на разрядни импулси датират от началото на XX век, когато става ясно, че реалните пренапрежения по въздушни линии се описват с бягащи вълни по разпределени RLC-линии. Това води до разработване на импулсни генератори, базирани на:

- кондензаторни схеми – първоизточник на днешните *Marx*-генератори;
- линейни генератори (travelling-wave / transmission-line generators) – използват коаксиални или плоскопаралелни линии, зареждани с постоянен ток и разреждани през искров прекъсвач към изпитвания обект.

В класическите учебници по техника на високите напрежения раздели, описващи генерирането на импулсни напрежения отделят особено внимание както на *Marx*-генераторите, така и на генераторите с линии на забавяне, поради ясната връзка между теорията на бягащите вълни и реалните пренапрежения в електроенергийните системи.

В края на XX век се появяват и реални конструктивни решения за импулсни генератори с няколко стъпала, достигащи 200–300 kV, които реализират стандартни разрядни импулси 1,2/50 μs и се използват за изпитване на средно-напреженови апарати и изолация [1] [2]. Паралелно с това се развива и научната методика за планиране на високоволтови лаборатории, за избор на източници на високо напрежение [3], измервателни вериги и системи за безопасност при работа с импулсни и постоянни свръхвисоки напрежения.

Класическата схема на „генератор на Маркс” е предложена от Ерих Маркс, който формулира принципа на паралелно зареждане и последователно разреждане на кондензатори за получаване на високи импулсни напрежения. Този принцип позволява използването на кондензатори и елементи с относително нормално високо работно напрежение за реализиране на изходни напрежения, надвишаващи значително нивото на захранващия източник [3].

С увеличаване на номиналните напрежения в електропреносните мрежи до 400 kV, 750 kV [1] и повече, възниква необходимост от стандартизиране на формите и параметрите на изпитвателните импулси, както и на методите за измерването им. В резултат на това се въвеждат стандартни разрядни и комутационни импулси, които и до днес се реализират преобладаващо с генератори на Маркс – от лабораторни уредби за

учебни цели [3] [7] до големи изпитвателни станции с изходно напрежение от няколко мегаволта.

ВИДОВЕ И ИЗБОР НА ВИСОКОВОЛТОВА УРЕДБА

Известни са два основни вида високоволтови уредби:

- "бягаща вълна";
- "генератор на Маркс".

Уредбата тип „бягаща вълна" (генератор с линия на забавяне) предлага алтернативен подход към генерирането на импулсни напрежения, по-близък до реалната физика на пренапреженията по дълги електропроводи. При този тип уредба основният елемент е линия с разпределени параметри – коаксиална или плоскопаралелна – запълнена с подходящ диелектрик (въздух, газ SF_6, трансформаторно масло и др.). Линията се зарежда до определено постоянно напрежение чрез високоволтов източник [3], а при задействане на искров промеждутък в началото на линията по нея се възбужда бягаща вълна на напрежение и ток. Взаимодействието между тази вълна, изпитвания товар и отраженията от края на линията определя формата на импулса в изпитвателната точка [4].

Генераторът на Маркс представлява класическа и най-широко разпространена уредба за генериране на високоволтови импулсни напрежения. Неговият принцип се основава на последователно свързване при разряд на кондензаторни стъпала, които в режим на зареждане са свързани паралелно към източник с относително ниско напрежение [3]. Всяко стъпало съдържа кондензатор, резистор ограничаващ зарядния ток и искрова междина. В процеса на работа кондензаторите се зареждат до един и същ потенциал, след което при пробив на първата искрова междина се задейства лавинен процес на пробив в останалите искрища. В резултат на това стъпалата се свързват последователно и на изходните клеми на генератора се получава импулсно напрежение, приблизително равно на сумата от напреженията върху отделните кондензатори.

Недостатък на генератора на Маркс е неговата конструктивна сложност и разпределеният характер на всички паразитни капацитети и индуктивности. Големият брой елементи, свързващи проводници и искрови междини водят до по-висока вътрешна индуктивност и вътрешно съпротивление, което естествено ограничава стръмността на фронта и потенциалната честотна лента на импулса. Освен това разположението на стъпалата в пространството, необходимите изолационни разстояния и изискванията към охлаждане и механична стабилност правят уредбата обемна и трудна за обслужване, особено при свръхвисоки напрежения. Въпреки това, благодарение на своята гъвкавост по отношение на формата на импулса, широкия диапазон на напрежения и енергии и добре разработената методика за проектиране и изпитване, „генераторът на Маркс" остава основният инструмент за стандартни високоволтови импулсни изпитвания в лабораторни условия. Предимство е използването на еднотипни елементи при изграждането му [3] [7] [8] [9].

От конструктивна гледна точка уредбата „бягаща вълна" често е по-компактна, особено при разполагане на линията в шкаф с изолационно масло или газ. Основните функционални блокове се свеждат до високоволтов DC източник [3], зареждаща верига, една или няколко искрови междини и самата линия. Това намалява броя на критичните механични и изолационни възли спрямо еквивалентен по напрежение генератор на Маркс. Ограничение обаче е, че максималното напрежение и енергия са пряко свързани с капацитета и дължината на линията, което прави този тип уредба по-подходяща за диапазона на средни до високи напрежения и за обекти с относително малък до среден капацитет. Настройката на формата към строго стандартизирани разрядни и комутационни импулси изисква прецизен избор на геометрията и импеданса на

линията, както и допълнителни елементи за съгласуване, поради което гъвкавостта по отношение на различни типове импулси е по-малка от тази на генератора на Маркс.

Предвид споменатото по-горе, схемата която е възможно да се проектира и реализира при съществуващите условия и елементна база в лабораториите на ВТУ „Тодор Каблешков“ е генераторът на Маркс [8] [9].

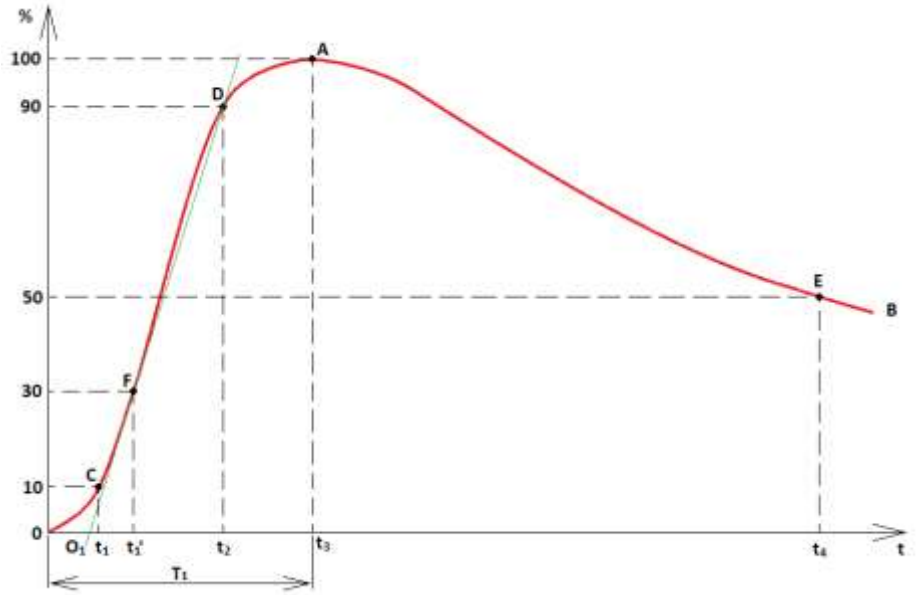
ТЕОРЕТИЧНАЧНА ОБОСНОВКА

Преходните пренапрежения, причинени от мълнии и комутации, водят до рязко нарастване на напрежението в електропреносните линии. Експериментални изследвания показват, че тези вълни имат време на нарастване от $0{,}5$ до $10\ \mu$ s и време на затихване до 50% от пиковата стойност, което е в интервала от 30 до 200μ s . Формите на вълните са произволни, но предимно еднополярни. Вълната от пренапрежение, предизвикано от мълния, може да бъде представена като двойна експоненциална вълна, определена от уравнението:

(1) $$u(t) = U_m \cdot \left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right), V$$

където $u(t)$ е коефициент, определящ максималната стойност на импулса, а α и β са константи, определящи време-константата на предния и задния фронт на вълната. За да се получи импулс от тип 1,2/50 μs, параметрите α и β се избират така, че максимумът на u(t) да се достига приблизително при t ≈ 1,2 μs, а стойността да намалява до $0{,}5 \cdot U_m$ около t ≈ 50 μs [4].

Горното уравнение представлява еднополярна вълна, която има бързо нарастване до пикова стойност и бавно спада до нулева стойност. Общата форма на вълната е показана на фиг. 1.



Фиг. 1. Форма на импулсната вълна и нейните дефиниции

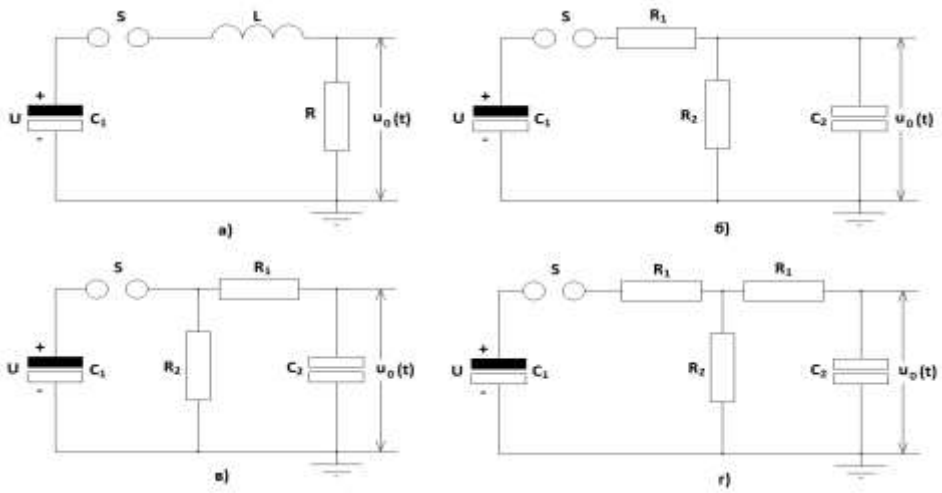
Импулсните вълни се определят чрез дефиниране на времето на нарастване (преден фронт) и времето на спад (заден фронт) до 50% от пиковата стойност на напрежението. Когато се записват импулсни форми на вълната, предният фронт на вълната няма да бъде ясно определен или понякога ще липсва. Следователно, времената на нарастване и спадане трябва да бъдат уточнени с отношението $1.2/50\ \mu s$.

Позовавайки се на формата на вълната на фиг. 1, пиковата стойност A е фиксирана и условно се нарича стойност 100 %. Точките, съответстващи на 10 % и 90 % на пиковите стойности, се намират в предния фронт (точки C и D). Линията,

свързваща тези точки, се удължава, за да пресече времевата ос в точката O_1, която се приема за виртуално начало на вълната. 1,25 пъти интервалът между времената t_1 и t_2, съответстващи на точките C и D (проекции върху времевата ос) се определя като времето на фронта, т.е. $1.25\ (O_1t_2 - O_1t_1)$. Точката E се намира на края на вълната, съответстваща на 50% на пиковата стойност, а нейната проекция върху времевата ос е t_4. Дължината на импулсната вълна е дефинирана като дължина на интервала от време от O до t_4 . В случай, че точката C не е ясна или липсва от записа на формата на вълната, се взема точката, съответстваща на 30% пиковата стойност F, и нейната проекция t_1' се намира на времевата ос. В този случай времето на вълната се определя като $1.67\ (O_1t_3 - O_1t_1')$. Допустимите отклонения във времената на предния и задния фронт са съответно $\pm 30\ \%$ и $\pm 20\ \%$. Допустимото отклонение в пиковата стойност е $\pm 3\ \%$ [4].

Импулсните вълни обикновено се представят с уравнение (1), дадено по-рано.V_0 в уравнението представлява фактор, който зависи от пиковата стойност. За импулсна вълна от $1.2/50\ \mu s, \alpha = -0.0146, \beta = -2.467$ и $V_0 = 1.04$, когато времето t се изразява в микросекунди, α и β контролират съответно времето на предната и задната част на вълната.

Двойна експоненциална вълнова форма от типа, споменат в уравнение (1), може да бъде генерирана в лаборатория с комбинация от последователна верига $R - L - C$ при условия на свръхзатихване или чрез комбинация от две вериги $R - C$. Различни видове еквивалентни вериги, които произвеждат импулсни вълни, са показани на фиг. 2 а) до г). От тези вериги най-често се използва тази от фиг. 2 а), и тя е ограничена само до модели на генератори, а търговските генератори използват веригите, показани на фиг. 2 б) до г).



Фиг. 2. Еквивалентни заместващи схеми, за производство на импулсни вълни

Практически времето на предния фронт T_1 често се определя по линейна интерполация между точките 0,3·Ũ и 0,9·Ũ [4]:

(2) $$T_1 \approx 1{,}67 \cdot (t_{90} - t_{30})\,, s$$

където t_{90} и t_{30} са моментите на достигане съответно на 90 % и 30 % от пиковото напрежение.

ПРИНЦИП НА ДЕЙСТВИЕ НА ГЕНЕРАТОРА НА МАРКС

Генераторът на Маркс се състои от N степени, всяка от които включва импулсен кондензатор, зареждащ резистор и искров разрядник [5].

При зареждане всички кондензатори се свързват паралелно към източника на постоянно напрежение [3] U_0 чрез зареждащите резистори. При сработване на разрядниците кондензаторите се свързват последователно и на изхода се получава импулсно напрежение с амплитуда, която в идеализиран случай се оценява като:

(3) $$\hat{U} \approx N \cdot U_0 \, , V$$

Реално амплитудата е по-малка поради падовете на напрежение върху искровите разрядници, паразитните индуктивности и загубите в елементите. Това се отчита чрез коефициент на ефективност k (0,8–0,9) [4], така че:

(4) $$\hat{U} \approx k \cdot N \cdot U_0 \, , V$$

ЕНЕРГИЯ, СЪХРАНЯВАНА В ГЕНЕРАТОРА

Енергията, натрупана в кондензаторите на генератора на Маркс, е ключов параметър, тъй като определя както максималната мощност на импулса, така и възможността за пробив на изолацията на изпитвания обект [4] [5] [2].

За N еднакви кондензатори с капацитет C, заредени до напрежение U_0, сумарната енергия е:

(5) $$W = N \cdot \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_0^2 \, , J$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Генераторът на Маркс представлява рационална схема за изработване на стандартни високоволтови импулси за изпитване и изследване на изолацията в електроенергийните съоръжения. Комбинацията от паралелно зареждане и последователно разреждане на кондензаторите позволява реализиране на високи напрежения при сравнително умерени изисквания към отделните елементи.

В заключение, генераторът на Маркс и уредбата тип „бягаща вълна“ представляват два допълващи се подхода към генерирането на високоволтови импулсни напрежения. Първият осигурява универсална платформа за стандартни тестове с широк диапазон от напрежения и енергии, а вторият – инструмент за изследване на бързи преходни процеси и бягащи вълни, по-близък до реалните условия в електроенергийните системи.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Божичкова И. „Калибриране на киловолтметър за постоянно напрежение“ - XXV-та Международна научна конференция „Транспорт-2021”, ВТУ, 2.10.2021, научно списание “Механика, Транспорт, Комуникации” ISSN 1312-3823 (print) том 19, брой 3, 2021 г. статия № 2148 X-103 – X-106 ISSN 2367-6620 (online) статия №2148 https://mtc-aj.com/library/2148.pdf

[2] Божичкова И., З. Бакалов, М. Златков. „Сравнително изследване на електроизолационните показатели на полимерни материали за изолиращи елементи за контактни мрежи 25 kV, 50Hz’’ IV-та научна конференция с международно участие „КЕИТ 2018”, Банско, 28-30.09.2018. Научно списание „ Механика Транспорт Комуникации“ ISSN 1312-3823 (print) том 16 , брой 3/2, 2018 г. статия № 1724 ISSN 2367-6620 (online), статия №1724 https://mtc-aj.com/library/1724.pdf

[3] Златков М. „Изграждане на каскаден умножител на напрежение за лабораторни цели“ - XXV-та Международна научна конференция „Транспорт-2021”, ВТУ, 2.10.2021, научно списание “Механика, Транспорт, Комуникации” ISSN 1312-3823 (print) том 19, брой 3, 2021 г. статия № 2149 ISSN 2367-6620 (online) https://mtc-aj.com/library/2149.pdf

[4] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High Voltage Engineering*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996.

[5] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2000.
[6] Ö. Kalenderli, H. İsmailoğlu, and A. Özdemir, "240 kV'luk yüksek darbe gerilimi üretecinin tasarımı ve yapımı," in *Proc. 8th Nat. Elect. Electron. Comput. Eng. Conf.*, Gaziantep, Turkey, 1999, pp. 715–718.
[7] Божичкова И., М.Златков. „Специфични особености при изграждане на пулт за управление на високоволтови изпитвателни уредби" – Седма научна конференция с международно участие „Комуникации, електрообзавеждане и информатика в транспорта - КЕИТ – 2024", гр. Банско, 27.06. - 29.06.2024 г., сп. „Механика, транспорт, комуникации", том 22, бр. 3/2, 2024, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online) статия №2508 https://mtc-aj.com/library/2508.pdf
[8] Секулов Л., Г. Павлов, Г. Чернева, Я. Исаев "Възможности за изследване на дъгогасителни процеси в автоматични прекъсвачи при лабораторни условия"q ISSN 1312-3823 том 11, брой 3, статия № 0861 X-50 21st INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE "TRANSPORT 2013", https://mtc-aj.com/library/861.pdf
[9] Павлов Г., В. Димитров, Я. Исаев, М. Томчева, Т. Лалев, Л. Секулов. Проектиране и изследване на транзисторен регулатор с микропроцесорно управление. VI Научна Конференция ЕФ 2014, Созопол, Годишник на ТУ-София, том. 64, книга 4, стр. 55, ISSN 1312-3823.
http://proceedings.tu-sofia.bg/volumes/Proceedings_Volume_64_book_4_2014.pdf

CHOICE OF SCHEME FOR CONSTRUCTION OF HIGH PULSE VOLTAGE DEVICE

Petko Kostadinov
petko__kostadinov@abv.bg

Todor Kableshkov University of Transport
Sofia, 1574, 158 Geo Milev Street,
BULGARIA

Key words: *high voltage, pulse generator, Marx generator, traveling wave generator, high-voltage pulse, high-voltage technology; pulse generator; discharge pulse 1.2/50 μs; delay line; high-voltage laboratory, high-voltage technology*

Abstract: *The report presents an approach for the design and construction of a high-voltage system for generating pulse voltages, based mainly on established theory and good international practices described in the scientific literature on high-voltage technology and in published implementations of pulse generators. The requirements for standard discharge and switching pulses according to current norms and standards are analyzed, as well as the influence of the insulating medium and the test object on the voltage waveform and the energy capabilities of the system. The logic of selecting a circuit configuration charged by a high-voltage direct current source and discharged through a spark gap to the tested insulation system is traced. The criteria for determining the test voltage level, load capacity, surface and volume resistance, and the coordination of the pulse generator with the object are considered in order to ensure approximation to the standard pulse shape and the necessary repeatability of the results. High-voltage testing technology is an essential area of electrical engineering, aimed at studying the physical phenomena in insulating materials and testing electrical equipment against overvoltages. This ensures a link between the requirements of the standards and the actual operating conditions of electrical power facilities.*