

Изследване на режимите на високочестотен генератор за диелектрично заваряване на PVC

доц. д-р Анастасия Петрова Кръстева - ТУ - София

доц. инж. Панайотис Ефстратиос Синиорос – ТЕИ - Пирея

инж. Марио Евмениев Иванов – ТУ – София

**инж. Стоимен Стоянов Балинов – Институт по металознание –
БАН**

Research on the Regimes of a High-Frequency Generator for Dielectric

Welding of PVC The dielectric welding of PVC is an electrotechnological process, which is implemented at frequencies in the megahertz band and at power consumption depending on the dimensions of the weld. Using the result of a previous research, in the present work the authors offer a simulation model of a two-circuit generator and the results from the analysis of 12 variants of parameters for six matrixes at cold and heated state of the PVC sheets correspondingly. Two basic matching methods are studied: 1. At constant supply voltage and variation of the tuning capacitor of the load circuit. 2. At controlled supply voltage and constant value of the capacitance for each matrix.

Въведение

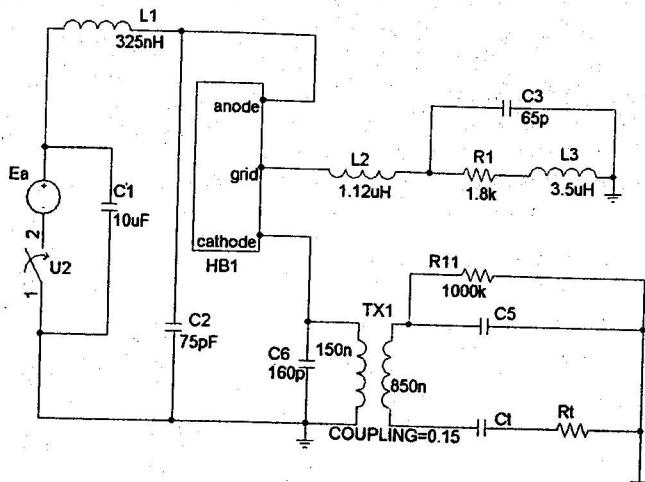
Диелектричното заваряване на PVC е електротехнологичен процес, който се реализира в мегахерцовия обхват при мощности зависещи от размерите на заварявания шев.

Проблемите за съгласуване на променливите параметри на товарния кондензатор с работния диапазон на високочестотния генератор представлява теоретичен и практически интерес [1,2,3]. Възможността да се използва програмният продукт DESIGN CENTER за симулация на избрана схема изисква от една страна създаване на адекватен модел на генераторния триод [4] и от друга страна въвеждане на параметрите на товарния кондензатор [5].

Използвайки резултати от предходни изследвания, авторите представят в настоящата работа симулационен модел на двукръгова генераторна схема и резултати от анализ на 12 варианта параметри за 6 матрици съответно в студено и нагрято състояние на PVC заваряваните листи.

Схема и параметри на високочестотен генератор

На фиг.1 е представена синтезирана схема за мегахерцов обхват с вътрешнокапацитивни обратни връзки и високочестотен изход към товарния трансформатор в катода. Наличието на разлика в потенциалите по постоянно и променливо напрежение създава технологичното удобство за маса на товарния кондензатор и в същото време води до особеностите в анализа на схемата спрямо тази анализирана в [1].



Фигура 1

Товарният кондензатор съдържа матрици с променливи геометрични размери, което променя товарните еквивалентни съпротивления и капацитети. Те се променят в процеса на заваряване и от промените на физическите параметри. Данните за матриците се въвеждат чрез r_t и C_t . Означени са стойностите на блокировъчните и разделителни елементи, които остават постоянни. Реалните им стойности компенсират паразитните индуктивности на свързващите проводници на кондензаторите и паразитните капацитети между изводите на блокировъчната индуктивност.

Стойностите на элементите на генераторната схема са определени по известна инженерна методика, чийто алгоритъм за опростено изчисляване е известен. Изчисленията се правят за линеаризирани характеристики на лампата, идеален косинусоидален импулс и работа на генератора в критичен режим.

Основните зависимости за анодното и решетъчното напрежение, при тези допускания са:

$$e_a = E_a - U \cdot \cos \omega t \quad (1)$$

$$e_g = E_g + U_g \cdot \cos \omega t \quad (2)$$

където E_a - анодно захранващо напрежение;

E_g - преднапрежение на решетката;

U - амплитуда на напрежението на анода по първи хармоник;

U_g - амплитуда на напрежението на решетката по първи хармоник;

ω - кръгова честота.

Изходните данни са за изчисляване на пасивните елементи на схемата при използване характеристиките на генераторен триод ГУ58Б ка:

Работна честота	$f=27.12\text{MHz}$
Колебателна мощност	$P_k=4 \text{ KW}$
Анодно захранващо напрежение	$E_a=5,6\text{KV}$
Коефициент на обратна връзка	$K_{ob}=0.1$
Вътрешни капацитети на триода включени в модела:	
	$C_{ag}=20\text{pF}$
	$C_{gk}=40 \text{ pF}$
	$C_{ak}=0.1\text{pF}$

Моделът на генераторния триод разработен в съответствие с [4] се свързва към схемата посредством специално създадения елемент означен на схемата като HB1.

Параметрите на работния кондензатор при промяна на ϵ и tgd и размерите на матриците са определени чрез числено моделиране по метода на крайни елементи [3] и са представени в таблица 1 за шест вида матрици за началото и края на процеса .

Оразмеряването на вторичния кръг, в който са включени променливите стойности r_t и C_t на се извършва чрез последователни приближения, като се избира L_2 и се намира диапазона на изменение на C_5 за резонанс. Стойностите на L_2 и C_5 трябва да отговарят на възможността за конструктивно изпълнение като въздушна индуктивност и регулируем въздушен кондензатор - съответно $L_2 = 850\text{nH}$ и $C_5=45\div110 \text{ pF}$. Коефициентът на връзка между първичния и вторичен кръг, означен в схемата като coupling се приема от конструктивни съображения със стойност 0.15.

Първичният кръг съдържа кондензатора C_6 и индуктивността L_1 , определени също чрез последователни приближения, така че собствения им резонанс да се получи на по-висока честота от работната в съотношение 1.15 - 1.25. Схемата на генератора работи в режим на автоколебания в диапазон определен от границите стойности на решетъчния ток. Стойностите определени при тези условия са $C_6=150\text{pF}$ и $L_1=150 \text{ nH}$.

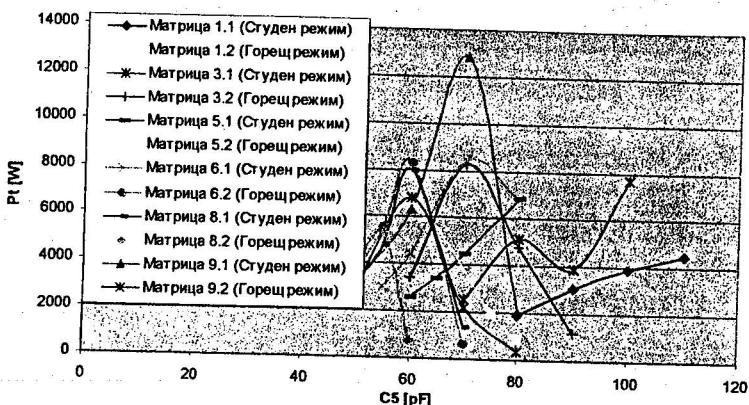
Симулация при постоянно захранващо напрежение

Проведена е компютърна симулация на голям брой варианти на работа на генератора по време на нагряване от студено до горещо състояние на материала и при смяна на матриците, като резултатите за 48 от тях са представени в табл. 1. В табл. 1 са отразени и числени резултати от компютърния анализ за максималните стойности на анодния ток I_{amax} , за преходен и установен режим; на решетъчния ток I_{gmax} и на тока I_{clmax} , и напрежението U_{clmax} в товарния кръг за установен режим.

Мощността отеляна в товара е означена с P_t и е определена чрез ефективната стойност на товарния ток и съпротивлението r_t .

На фигура 3 са представени в графичен вид резултати отразяващи зависимостта на активната мощност за заваряване в товарния кондензатор от промяната на регулировъчния кондензатор C_5 .

Товарни характеристики



Фигура 3

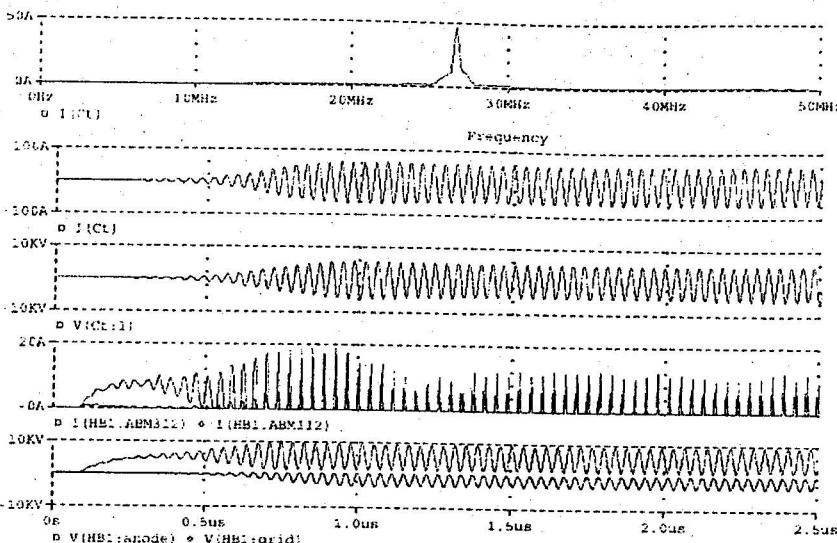
Товарните характеристики при постоянно захранващо напрежение потвърждават практическите експерименти за необходимост от промяна на C_5 в процеса на нагряване за запазване на работния диапазон на мощността, както и промяната на C_5 за всеки размер матрица.

Стойностите на I_{atmax} в таблица 1 са дадени за преходен и установен режим, а за I_{gmax} са дадени за установен режим. Отразени са и U_{ctmax} и I_{ctmax} и отчетената резонансна честота f_{pes} . В нагрято състояние за същия размер матрица, кондензатора $C_5 = 60 \text{ pF}$ за получаване на мощност близка до номиналната – 3453 W.

На фиг. 4 са представени времедиаграми получени от компютърна симулация с DESIGN CENTRE за вариант 3.1b отговарящи на $C_5 = 90 \text{ pF}$ за получаване на мощност 3892 W за студен режим. Показани са времедиаграми за анодното и решетъчното напрежение. Режимът на генерации и близък до граничен и се установява над граничен с добре изразена противофаза на анодното и решетъчното напрежение. Отделно са показани времедиаграми на анодния и решетъчен ток. Особен интерес представлява факта, че в преходен режим за студено състояние се наблюдава висока стойност на анодния ток в сравнение с тази в установен режим. Товарния ток I_{ct} и напрежението върху товарния кондензатор U_{ct} са представени на отделни графики с цел изясняване на основните енергийни параметри.

Таблица 1.

Размер	Матр.	C _t	r _t	C _s	f _{pes}	E _a	I _{amax}	I _{qmax}	U _{ctmax}	I _{ctmax}	P _t
мм	№	pF	Ω	pF	MHz	kV	A	A	kV	A	W
100x30	1.1a	54,5	3,77	110	27,0	5,6	15,9 / 9,5	3,8	5,2	48,9	4514
	1.1b			100	27,31	5,6	13,4 / 5,5	3,6	5,0	45,3	3873
	1.1c			90	27,33	5,6	12,1 / 3,8	2,8	4,2	40,4	3077
	1.1d			80	27,56	5,6	9,9 / 2,8	1,8	3,2	31,6	1889
	1.2a	91,5	2,37	110	24,62	5,6	15,0 / 15,0	3,4	1,4	20,2	479
	1.2b			100	24,93	5,6	16,0 / 16,4	4,3	2,1	28,4	957
	1.2c			90	25,33	5,6	30,0 / 29,0	10	3,9	58,5	4055
	1.2d			80	26,68	5,6	16,5 / 13,9	7,1	3,7	57,4	3904
120x30	3.1a	66,2	3,126	100	26,3	5,6	21,5 / 15,0	7,2	6,3	70,1	7680
	3.1b			90	27,0	5,6	15,3 / 7,9	3,9	4,4	49,9	3892
	3.1c			80	26,6	5,6	18,3 / 12,3	5,1	5,0	57,3	5137
	3.1d			70	27,56	5,6	12,0 / 4,0	1,7	3,4	40,4	2557
	3.2a	111	1,94	90	24,6	5,6	24,0 / 24,7	6,2	1,94	34,9	1178
	3.2b			80	25,0	5,6	31,0 / 30,4	10,0	3,8	70,2	4780
	3.2c			70	25,7	5,6	26,8 / 17,9	10,5	5,5	92,4	8281
	3.2d			60	26,4	5,6	19,3 / 9,03	4,8	3,7	59,7	3453
150x30	5.1a	81,4	2,54	80	26,3	5,6	24,1 / 14,3	8,1	5,5	73,5	6860
	5.1b			70	26,7	5,6	18,2 / 10,2	5,6	4,2	59,4	4481
	5.1c			65	27,0	5,6	15,6 / 4,4	4,4	3,7	52,1	3447
	5.1d			60	27,3	5,6	12,5 / 1,89	3,8	3,2	45,2	2594
	5.2a	137	1,58	80	24,7	5,6	25,8 / 25,5	6,7	1,6	33,5	886
	5.2b			75	24,7	5,6	25,6 / 28,4	8,5	2,2	49,8	1959
	5.2c			60	26,0	5,6	28,2 / 13,8	10	3,9	90,5	6470
	5.2d			50	27,0	5,6	15,8 / 2,85	5,35	2,5	57,6	2621
200x30	6.1a	108	1,9	80	25,0	5,6	27,0 / 35,4	10	4,9	84,7	6815
	6.1b			70	25,7	5,6	28,7 / 16,8	10	5,3	94,4	8465
	6.1c			60	26,7	5,6	20,3 / 10,2	6,9	3,7	68,3	4431
	6.1d			55	27,0	5,6	16,6 / 3,1	4,6	3,0	56,2	3000
	6.2a	182	1,18	70	24,3	5,6	25,4 / 25,4	6,9	1,2	32,7	630
	6.2b			60	25,3	5,6	38,0 / 37,1	10	4,0	118,2	8243
	6.2c			55	25,7	5,6	30,1 / 15,9	10	3,2	97,2	5574
	6.2d			50	26,3	5,6	21,7 / 11,4	8,3	2,4	76,6	3461
300x30	8.1a	163	1,27	70	24,6	5,6	26,0 / 27,0	7,0	1,7	46,3	1361
	8.1b			60	25,4	5,6	40,0 / 16,0	10	4,2	112	7965
	8.1c			55	26,0	5,6	25,0 / 12,9	10	3,2	86,7	4773
	8.1d			50	26,6	5,6	20,0 / 7,6	7,0	2,5	70,5	3156
	8.2a	273	0,79	60	24,8	5,6	27,0 / 27,7	7,1	1,0	43,5	747
	8.2b			55	25,1	5,6	35,0 / 37,0	10	2,73	116	5315
	8.2c			50	25,7	5,6	20,0 / 19,6	8	2,12	96,8	3704
	8.2d			45	26,7	5,6	20,6 / 7,1	8,0	1,6	76,0	2281
126x40	9.1a	125	2,13	80	24,7	5,6	24,7 / 26,4	7,8	2,2	43,2	1987
	9.1b			70	25,3	5,6	26,5 / 36,8	10	5,5	109,6	12792
	9.1c			60	26,0	5,6	24,3 / 16,1	9,5	3,8	72,1	6330
	9.1d			50	27,0	5,6	15,0 / 2,2	4,4	2,5	53,2	3014
	9.2a	153	1,41	80	24,3	5,6	23,8 / 24,0	5,1	0,9	23,1	376
	9.2b			70	24,7	5,6	26,8 / 29,6	9,5	2,4	55,4	2163
	9.2c			60	25,7	5,6	33,7 / 22,8	10	4,0	98,1	6784
	9.2d			50	26,7	5,6	18,5 / 5,0	6,5	2,5	64,1	2896



Фигура 4 Вариант 3.1b

Резонансната честота на товарния кръг може да се установи чрез представения анализ на Фурье на товарния ток.

Както се вижда от фиг. 3 и табл. 1, ако напрежението E_a остава постоянно мощностите за различните C_1 и r_t в нагрято състояние се повишават недопустимо, което води до сработване на защитата. Тези режими са нереални.

Симулация при регулируемо захранващо напрежение

Автоматичното провеждане на заваряването при постоянна стойност на кондензатора може да се реализира чрез въвеждане на регулируемо захранващо напрежение.

При провеждане на всеки процес на заваряване C_5 остава постоянно. В таблица 2 са показани резултати от анализ за избрани от табл. 1 стойности на C_5 . При намалено напрежение за нагрято състояние се постига намаляване на мощността в рамките на допустимото. За анодния ток са представени две стойности – максималните значения за преходен и установлен режим. За голяма част от вариантите токовете превишават допустимите за генераторния триод 20A.

Въз основата на проведени компютърни симулации и анализ за всички посочени варианти се предлагат промени на C_5 отразени в таблица 3.

От таблица 3 може да се отчете, че мощностите за заваряване се увеличават с увеличаване на размера на матрицата, което отговаря на изискванията на технологията.

Таблица 2

Размер mm	Матр. №	C_t pF	r_t Ω	C_5 pF	$f_{\text{рез}}$ MHz	E_a kV	$I_{a\max}$ A	$I_{o\max}$ A	$U_{ct\max}$ kV	$I_{ct\max}$ A	P_t W
100x30	1.1	54,5	3,77	90	27,333	5,6	12,1 / 3,8	2,8	4,2	40,4	3077
	1.2	91,5	2,37		25,333	5,6	30,0 / 29,9	10,0	5,3	79,3	7451
	1.3	91,5	2,37		25,333	4,5	22,0 / 21,6	9,0	3,9	58,5	4055
120x30	3.1	66,2	3,126	80	27,000	5,6	15,3 / 7,9	3,9	4,4	49,9	3892
	3.2	111	1,94		25,000	5,6	31,0 / 30,4	10,0	3,8	70,2	4780
	3.3	111	1,94		25,000	4,6	23,0 / 22,5	8,9	3,0	53,3	2756
150x30	5.1	81,4	2,54	70	26,667	5,6	18,2 / 10,2	5,6	4,2	59,4	4481
	5.2	137	1,58		25,000	5,6	38,0 / 37,2	10,0	4,4	96,5	7357
	5.3	137	1,58		25,000	3,5	18,0 / 17,8	7,0	2,0	45,1	1607
200x30	6.1	108	1,9	60	26,667	5,6	20,3 / 10,2	6,9	3,7	68,3	4431
	6.2	182	1,18		25,333	5,6	38,0 / 37,0	10,0	4,0	118,2	8243
	6.3	182	1,18		25,333	4,5	30,0 / 28,8	10,0	2,8	85,1	4272
300x30	8.1	163	1,27	50	26,667	5,6	20,0 / 7,6	7,0	2,5	70,5	3156
	8.2	273	0,79		25,667	5,6	29,7 / 18,4	10,0	2,2	92,8	3401
	8.3	273	0,79		25,667	4,0	18,7 / 14,2	8,2	1,5	68,8	1870

Таблица 3

Матр. №	Размер mm	C_t pF	r_t Ω	C_5 pF	$f_{\text{рез}}$ MHz	E_a kV	$I_{a\max}$ A	$I_{o\max}$ A	$U_{ct\max}$ kV	$I_{ct\max}$ A	P_t W
1.1	100x30	54,5	3,77	85	27,333	5,6	11,3/2,4	3,6	3,8	36,7	2538
		91,5	2,37		25,333	3,5	18/17	4,0	3,8	52,6	3204
3.1	120x30	66,2	3,126	75	27,333	5,6	13/4,2	3,7	4,0	46,0	3307
		111	1,94		25,333	3,5	17,8/16,4	7,6	2,9	54,2	2849
5.1	150x30	81,4	2,54	65	27,000	5,6	15,6/4,4	4,4	3,7	52,1	3447
		137	1,58		25,333	3,5	17,6/15,5	9,2	2,8	64,9	3328
6.1	200x30	108	1,9	58	26,667	5,6	19,2/6,4	6,0	3,3	62,5	3711
		182	1,18		25,333	4,5	20,2/17,2	10	2,9	81,5	3957
8.1	300x30	163	1,27	55	26,000	5,6	25,0/12,9	10	3,2	86,7	4773
		273	0,79		25,333	4,5	21,0/17,7	10	1,6	71,3	2008

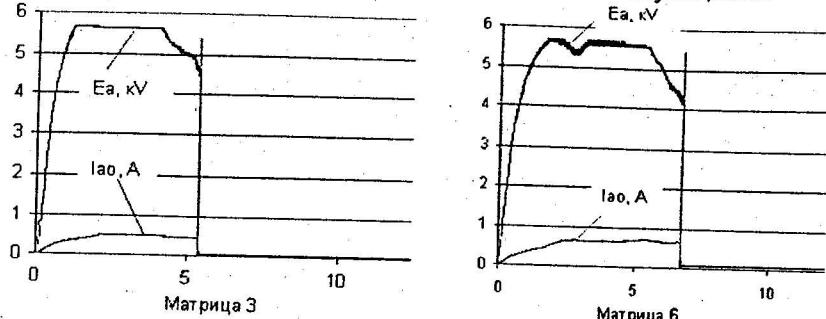
Чрез регулиране на напрежението мощнотите в нагрятото състояние се ограничават, като максималното значение на анодният ток остава в рамките на допустимото. За ограничаване на токовете в преходен режим се въвежда тиристорен регулатор с плавно повишаване на захранващото напрежение от 0 до $E_{a\max}$.

Изследвани са реални процеси с разработена и въведена система за управление с регулиране на захранващото напрежение при стабилизация на анодния ток. На фиг. 5 са показани снети осцилограми на изменението на E_a и I_{ao} с матрици означени като м3, мб съответстващи на № на матрицата според Табл. 1. Използван е осцилоскоп HEWETT PACKARD 54645D с токова и напреженова сонди и цифров запис.

Представените осцилограми на тока и напрежението от проведени реални процеси показват добро съвпадение с резултатите от симулацията.

Зададените стойности на кондензатора C_5 съответстват на тези от таблица 3. В процеса на пускане е въведено плавно повишаване на напрежението, което позволява да се елиминира сработването на

защита от високите стойности на тока, които са установени експериментално и са потвърдени от данните от симулацията.



Фигура 5

За матрица 3 стабилизираната стойност на тока $I_{ao} = 0,5\text{A}$, за матрица 6 стабилизираната стойност на тока $I_{ao} = 0,8\text{A}$, като захранващото напрежение E_a се изменя в диапазона 5,6-4,2 kV.

Заключение

Представените резултати от изследвания на преходни и установени режими на високочестотен генератор за диелектрично заваряване на PVC при променливи размери на товарния кондензатор за студено и нагрято състояние на заваряваните PVC листи, позволява да се изяснят методите за съгласуване в системата и да се предложи подходящ алгоритъм за управление за подобряване качеството на технологичния продукт. Методът и схемата за управление са обект на изследване в [6].

Литературни източници

1. Metaxas, A.C., Foundation of electroheat, John Wiley&Sons Ltd, Chichester, 1996
2. Neophytou, R. and A.C. Metaxas, Modelling of RF Heating and High Frequency Heating Conf., 18-21 september, St.Jones College, Electricity Utilization Group, Engineering Department, University of Cambridge, 1995
3. Синиорос П., М. Димитров, А.Кръстева, Числен анализ на електрическите и топлинни характеристики на кондензатор за диелектрично нагряване. Национална конференция "Електронна Техника'94", Созопол, 1994 г.
4. Синиорос П., Трифонов А., А.Кръстева, Подобрен математически модел на високочестотни генераторни триоди, Сл. "Радио Телевизия Електроника", №4-5, 1998г.
5. Siniros P., Krusteva A. Combined Analysis of the High-Frequency Generator and the Working Capacitor for Dielectric Heating, JBMSEAM'98 - Sofia.
6. Кръстева А., Г. Гигов, П. Синиорос, Иванов М., Метод и схема за управление на технологичните режими при диелектрично лепене на PVC, Приета за печат през 1999 г. в списание "E+E".

Настоящите изследвания са подпомогнати от фонд СТП на МОН чрез договор 5016/98.