

## ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ НА ТОВАРНИЯ КОНДЕНЗАТОР ПРИ ДИЕЛЕКТРИЧНО ЛЕПЕНЕ НА PVC

инж. Панайотис Силиброс – Технологичен Институт –  
Пирей, Гърция  
ст.н.с. ктн Марин А. Димитров – ИИ – БАН  
доц. ктн Анастасия П. Кръстева – Технически  
Университет – София

Технологичните устройства за диелектрично нагряване съдържат високочестотен генератор, работещ в мегагерцовия обхват и товарен кондензатор, в който се извършва преобразуване на електромагнитната енергия в топлинна.

Съществуват приблизителни аналитични методи за определяне на електрическите параметри на този кондензатор с отчитане на геометричните размери, физичните свойства на нагрявания материал и налягането [1,2,3].

Уточняване на изчислението при конкретна конфигурация или специален технологичен процес може да стане чрез числен анализ [4,5].

В настоящата работа е разработен математичен модел по метода на крайните разлики, който е използван за анализ на параметрите на товарен кондензатор със зададена геометрия, свързана с производство на надуряеми лодки от поливинилхлоридно фолио.

### Описание на математичния модел

Използва се следното уравнение за електрическия потенциал  $U$  [4]:

$$(1) \quad \int_S \epsilon \cdot \text{grad } U \, dS = 0$$

Тук  $S$  е повърхност, ограничаваща областта на интегриране, а  $dS$  представлява вектор, насочен по нормалата към тази повърхност. Диелектрическата проницаемост е комплексна величина и се определя по формулата:

$$(2) \quad \epsilon = \epsilon' \cdot \epsilon_0 \cdot (1 - j \cdot \operatorname{tg} \delta),$$

където  $\epsilon$  е диелектричната проницаемост на вакуума,  $\epsilon'$  е относителната диелектрична проницаемост,  $\operatorname{tg} \delta$  е тангенс от ъгъла на диелектричните загуби,  $j$  е комплексната единица.

Разглежда се плоскопаралелна система. Областта на интегриране е ограничена от правоъгълник със страни, успоредни на координатните оси  $X$  и  $Y$  и е разделена на правоъгълни клетки посредством мрежови линии, също успоредни на  $X$  и  $Y$ . На фиг. 1 е показана околността на възела  $(i, k)$ . Линията  $L$  свързвава центровете на клетките, които съдържат разглеждания възел. Приема се, че са известни значението на  $\epsilon$  за всеки възел, а също така, че  $\epsilon = \epsilon_{i,k} = \text{const}$  в областта, ограничена от  $L$ . Тогава потокът на електрическата индукция през повърхността  $S_I$ , определена от отрязъка 1-2 на линията  $L$  ще бъде [4]:

$$(3) \quad \int_{S_I} \epsilon \cdot \operatorname{grad} U \, dS = \epsilon_{i,k} \cdot \frac{U_{1,2} - U_{i,k}}{0,5 \cdot q_{i+1}} \cdot \frac{P_k + P_{k+1}}{2} \cdot h,$$

където  $U_{1,2}$  и  $U_{i,k}$  са значенията на потенциала съответно в отрязъка 1-2 и във възела  $(i, k)$ , а  $h$  е размерът на областта на интегриране в посока перпендикулярна на равнината  $(X, Y)$ .  $U_{1,2}$  се определя от условията за непрекъснатост на нормалната компонента на електрическата индукция на границата между двете области

$$(4) \quad \epsilon_{i+1,k} \cdot \frac{U_{i+1,k} - U_{1,2}}{0,5 \cdot q_{i+1}} = \epsilon_{i,k} \cdot \frac{U_{1,2} - U_{i,k}}{0,5 \cdot q_{i+1}}$$

След заместване на  $U_{1,2}$  в (3) се получава

$$(5) \quad \int_{S_I} \epsilon \operatorname{grad} U \, dS = \frac{\epsilon_{i+1,k} \cdot \epsilon_{i,k}}{\epsilon_{i+1,k} + \epsilon_{i,k}} \cdot (U_{i+1,k} - U_{i,k}) \cdot \frac{P_k + P_{k+1}}{q_{i+1}} \cdot h.$$

С помощта на уравнения, аналогични на (4) се определят  $U_{2,3}$ ,  $U_{3,4}$  и  $U_{4,1}$ , а след това и пълната стойност на повърхностния интеграл,

която може да бъде записана във вида:

$$(6) \quad \frac{1}{h} \int \epsilon \cdot \text{grad } U \, dS = N_{i+1,k} \cdot U_{i+1,k} + N_{i,k-1} \cdot U_{i,k-1} + \\ S_I + S_{II} + S_{III} + S_{IV} \\ + N_{i-1,k} \cdot U_{i-1,k} + N_{i,k+1} \cdot U_{i,k+1} + N_{i,k} \cdot U_{i,k} = 0 ,$$

където

$$(6a) \quad N_{i+1,k} = \frac{\epsilon_{i,k} \cdot \epsilon_{i+1,k}}{\epsilon_{i,k} + \epsilon_{i+1,k}} \cdot \frac{P_k + P_{k+1}}{q_{i+1}} ,$$

$$(6b) \quad N_{i,k-1} = \frac{\epsilon_{i,k} \cdot \epsilon_{i,k-1}}{\epsilon_{i,k} + \epsilon_{i,k-1}} \cdot \frac{q_i + q_{i+1}}{P_k} ,$$

$$(6c) \quad N_{i-1,k} = \frac{\epsilon_{i,k} \cdot \epsilon_{i-1,k}}{\epsilon_{i,k} + \epsilon_{i-1,k}} \cdot \frac{P_k + P_{k+1}}{P_{i-1,k}} ,$$

$$(6d) \quad N_{i,k+1} = \frac{\epsilon_{i,k} \cdot \epsilon_{i,k+1}}{\epsilon_{i,k} + \epsilon_{i,k+1}} \cdot \frac{q_i + q_{i+1}}{P_{k+1}} ,$$

$$(6e) \quad N_{i,k} = -(N_{i+1,k} + N_{i,k-1} + N_{i-1,k} + N_{i,k+1}) ,$$

Като се приложи (6) за всеки възел от областта на интегриране се получава система от линейни уравнения с постоянни коефициенти с размерност, съответстваща на броя на възлите. Системата е хомогенна с тривиално решение  $U_{i,k} = 0$ , но след въвеждане на гранични условия от първи род се превръща във обикновена система уравнения с единствено ненулево решение. Тези условия се задават за възлите, разположени по повърхностите на електродите на работния кондензатор и са в съответствие със стойността на напрежението между електродите.

По отношение границите на областта на интегриране е разработеният гук алгоритъм се поставя условието

$$(7) \quad U = 0$$

В много случаи е необходимо да се използват гранични условия от втори род, а именно

$$(8) \quad \frac{dU}{dn} = 0,$$

където  $n$  е нормала към граничната линия. Ако това е лявата вертикална линия, тогава от ляво на областта на интегриране се добавя една колона от клетки, като се спазват условията  $q_i = q_{i+1}$  и  $\epsilon_{i-1, k} = \epsilon_{i+1, k}$ . Границата на реалната област минава през възлите  $(i, k+1)$ ,  $(i, k)$ ,  $(i, k-1)$  и т.н., и е показана на фигура 1 с удебелена линия. За възлите  $(i-1, k+1)$ ,  $(i-1, k)$ ,  $(i-1, k-1)$  и т.н. остава формално в сила граничното условие (7). При съставяне на системата линейни уравнения коефициентът пред  $U_{i+1, k}$  след като бъде изчислен по формула (6а) се удвоява. По аналогичен начин се постъпва когато условието (8) се използва за някоя от другите граници на областта.

#### Теоретично и експериментално изследване на товарен кондензатор за диелектрично лепене на PUC

На фиг. 2 е представен чертеж на изследвания кондензатор. Всички размери са в милиметри. Дължината на кондензатора е  $h = 126\text{mm}$ . Горният електрод е електрически свързан с притискащата плоча. Областта на интегриране е правоъгълник с размери  $350 \times 54,6\text{mm}$ . Предварително са изследвани свойствата на нагревания материал при температура  $30^\circ\text{C}$  и са установени следните стойности:

$$\epsilon_{30^\circ\text{C}} = 2,7; \quad \text{tg } \delta_{30^\circ\text{C}} = 0,04.$$

Тези данни практически съпадат с характеристиките на материала ПВХ арт. 2441. За същия материал чрез екстраполация по приложената в [3] таблица е определено

$$\epsilon_{180^\circ\text{C}} = 5,2; \quad \text{tg } \delta_{180^\circ\text{C}} = 0,04.$$

Тези значения са приети за основа на численото моделиране на изследвания кондензатор при захранване от генератор  $2,5\text{kW}$ ,  $27\text{MHz}$ . За началното и крайно състояние на кондензатора, съответстващи на температури  $30^\circ\text{C}$  и  $180^\circ\text{C}$  са определени активната и реактивната мощност,

отделящи се в цялата област на интегриране, означени съответно с  $P$  и  $Q$  и само в пространството между електродите, като означенията са съответно  $P_e$  и  $Q_e$ . Прието е, че в края на нагряването температура от  $180^\circ\text{C}$  е достигната в пространството между електродите, а останалата част от нагряването PVC фолио остава при температура  $30^\circ\text{C}$ . Изходни данни за изчислението са : напрежение между електродите  $U = 1030\text{V}$ , работна честота  $f = 27\text{MHz}$ .

Таблица 1.

Температура, $^\circ\text{C}$	$P$ , W	$Q$ , VA	$P_e$ , W	$Q_e$ , VA	$I_{\text{eff}}$ , A
30	634	18096	596	14900	16,76
180	1186	31894	1148	28700	29,5

С  $I_{\text{eff}}$  в Таблица 1 е означена ефективната стойност на тока през кондензатора. Експериментално са получени следните данни за края на нагряването:

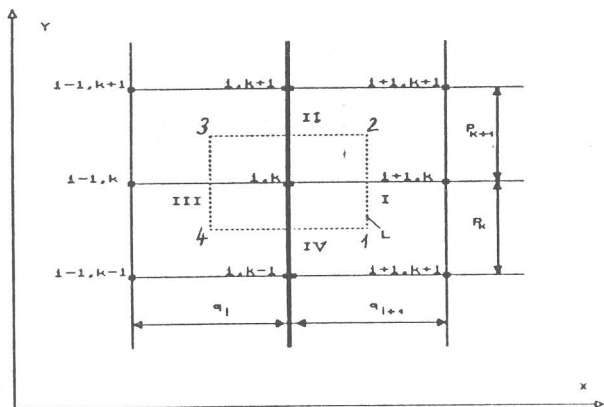
$$U = 1030\text{V} ; P_{180^\circ\text{C}} = 1100\text{W} ; I_{\text{eff},180^\circ\text{C}} = 28\text{A} .$$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

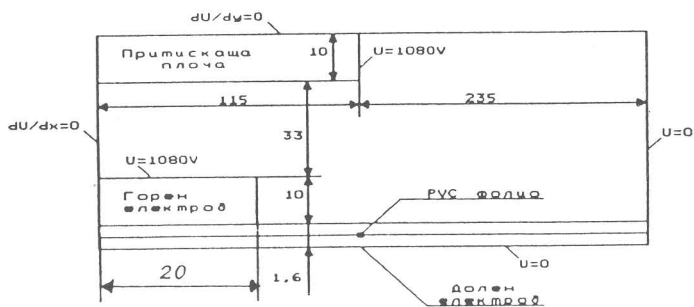
От анализа на резултатите от Таблица 1 е очевидно следното: при температура  $30^\circ\text{C}$  реактивната мощност, отделяща се в пространството между електродите е 82,3% от цялата реактивна мощност. За активната мощност този показател е 94%. Това показва, че прилагането на числено моделиране вместо приблизителни изчисления без отчитане на краевите ефекти позволява да се избегне грешка от 17,7% за реактивната мощност и от 6% за активната. Следва да се отбележи, че работният кондензатор за диелектрично лепене на PVC фолио се характеризира с относително малко разстояние между електродите. Въпреки това използването на разработените алгоритъм и компютърна програма позволява да се подобрят съществено резултатите от изчисленията.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нетушил, А. В., Б. Я. Жуковичский, В. Н. Кудин, Е. П. Парини. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. Госэнергоиздат, М.-Л., 1959г.
2. Княжевская, Г. С., М. Г. Широва. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов. "Машиностроение", Ленинград, 1980г.
3. Федорова, И. Г., Ш. В. Безменов. Высокочастотная сварка пластмасс. "Машиностроение", Ленинград, 1980г.
4. Ненков, В. С., Б. С. Полеводов. Математическое моделирование на ЭВМ устройстве высокочастотного нагрева. "Машиностроение", Ленинград, 1980г.
5. Stefens, F. F., D. M. van Dommelen. C. A. D. in dielectric heating. U. I. E. 11, 3-7-X-1988, Malaga, Espana, report #A5.1.



ФИГ. 1.



ФИГ. 2.