

МОДЕЛИРАНЕ НА ПРЕХОДНИ ПРОЦЕСИ ВЪВ ВАКУУМЕН ПРЕКЪСВАЧ ВИСОКО НАПРЕЖЕНИЕ

Валентин Матеев, Росен Танев, Илиана Маринова

Резюме: В работата е изследван електрически разряд във вакуумна камера на прекъсвач за високо напрежение. Моделирано е електрическото и топлинно поле във вакуумната камера при изключване на прекъсвача. В модела се използва електрическата проводимост на дъгата, която зависи от температурата и интензитета на електрическото поле. Получени са резултати за разпределението на температурата и интензитета на електрическото поле в камерата през преходния процес на изключване на прекъсвача.

Ключови думи: Електрическа дъга, моделиране, метод с крайните елементи, електрическо поле, топлинно поле, проводимост на дъгата, вакуумен прекъсвач

MODELING OF SWITCHING-OFF PROCESSES IN VACUUM HIGH VOLTAGE INTERRUPTER

Valentin Mateev, Rosen Tanev, Iliana Marinova

Abstract: In this study the electrical arc discharge in high voltage vacuum interrupter is investigated. Electrical and thermal fields are modeled in the switching off processes of the vacuum interrupter. The electric arc conductivity according to the temperature and electric field intensity is determined in the model. Results for electric and thermal fields in transient switching off processes are obtained.

Keywords: Electrical arc discharge; modeling, finite element method; electric field; temperature field; arc conductivity, vacuum interrupter

1. Въведение

Вакуумните прекъсвачи за високо напрежение намират широко приложение в електроенергийната система. Те имат редицата предимства като висока ефективност на дъгогасене, сравнително проста конструкция, компактни размери, дълъг живот на експлоатация, ниски нива на шум при работа, липса на вредни и взривоопасни газове, малки разходи за поддръжка, висока надеждност и др. Гасенето на дъгата е улеснено многократно при вакуумни камери с налягане под 10^{-4} Pa [1].

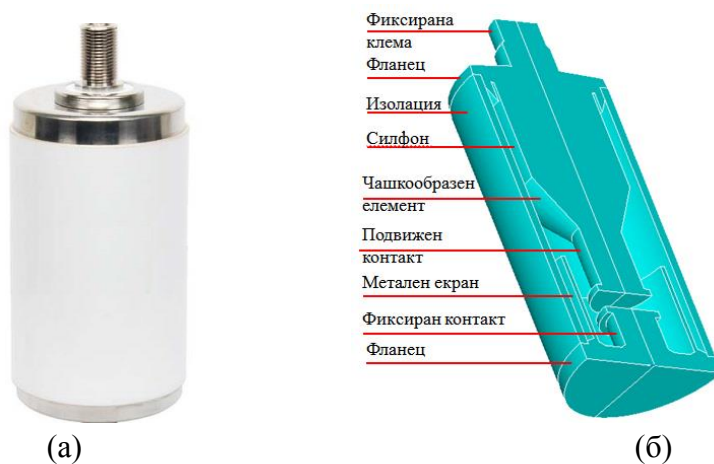
Моделирането на електрически разрядни процеси в комутационите апарати за високо напрежение е от особена важност при проектирането и оптимиза-

цията им. Дъгата, възникваща в преходния процес при прекъсване на веригата, е сложно динамично явление, обединяващо бързи, паралелно протичащи и взаимно свързани полета и процеси. Основно това са електрическото и топлинно поле, чиито ефекти служат като теоретична база при оразмеряване и проектиране конструкцията на вакуумните камери. За изследване на тези процеси се прилагат усъвършенствани числени модели [1, 3, 4]. Тези модели позволяват съществено намаляване на времето за проучване, проектиране и разработка на вакуумни прекъсвачи.

В настоящата работа е създаден смесен модел на електрическо-топлинно поле във вакуумна камера на прекъсвач за високо напрежение. В модела се използва електрическата проводимост на дъгата, която зависи от температурата и интензитета на полето. Получени са резултати за разпределението на електрическото и топлинно поле през преходния процес на изключване на прекъсвача.

2. Камера на вакуумен прекъсвач

Общ вид и конструкция на изследваната вакуумна камера модел VS2-ABB са показани на Фиг.1. Обявените работни данни на камерата са напрежение $U = 12 \text{ kV}$, ток $I = 400 \text{ A}$. Вътрешното налягане на камерата е под 10^{-6} Pa . Контактните тела в камерата са изработени от обезвъздушена мед с висока топлопроводимост (OFHC), изолацията ѝ е от керамичен материал Al_2O_3 . [5]



Фиг.1 Вакуумна камера VS2-ABB 12 kV
а) общ вид на камерата б) конструкция

3. Електрическо поле

Разпределението на статичното електрическо поле във вътрешността на вакуумната камера при наличие на горяща електрическа дъга се описва с уравнението на Лаплас [2]

$$\nabla(\sigma_a \nabla V) = 0, \quad (1)$$

където σ_a е електрическата проводимост на дъгата, зависища от интензитет на електрическото поле и температурата на дъгата, V - скаларният електрически потенциал.

Интензитетът на електрическото поле се дефинира като

$$E = -\nabla V. \quad (2)$$

Плътноста на тока в дъговия стълб J_a е

$$J_a = \sigma_a E. \quad (3)$$

Електрическата проводимост на дъгата, зависи основно от свободните електрони в зоната на разряда [6-7], се определя с помощта на израза

$$\sigma_a = ne\mu_e = \frac{ne^2}{m_e v_m}, \quad (4)$$

където n е брой свободни електрони, участващи в разряда, m_e - маса на електрона, v_m - скорост на електрона, μ_e - мобилност на електрона и e - заряд на електрона.

Средната скорост на електрон в областта на дъговия разряд е

$$v_m = -\frac{e}{m_e v_d} E, \quad (5)$$

където v_d е скорост на дрейфа на електрона, която зависи от температурата в областта на електрическия разряд [6-7].

4. Топлинно поле

Разпределението на температурата T в конструкцията на вакуумната камера е определено от уравнението за топлопроводността [2, 8]

$$\nabla^2 T - \frac{\gamma c}{\lambda} \frac{dT}{dt} = -\frac{Q}{\lambda}, \quad (6)$$

където γ е плътност на материала, c - специфичната топлина, λ - коефициент на топлопроводимост, Q - обемна плътност на източниците на топлина [2].

Основният източник на топлина във вакуумната камера е електрическата дъга. Обемната плътност на източника на топлина в уравнение (6) се изчислява посредством

$$Q = J_a^2 / \sigma_a, \quad (7)$$

където J_a е токовата плътност на електрическата дъга.

Охлаждането на вакуумната камера се извършва посредством конвекция от външната ѝ повърхност. По повърхността на модела (Фиг.2-б) са зададени гранични условия на конвекцията, описани с уравнението

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_0), \quad (8)$$

където h е коефициент на топлоотдаване чрез конвекция ($h = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}$) и T_0 е температура на околната среда.

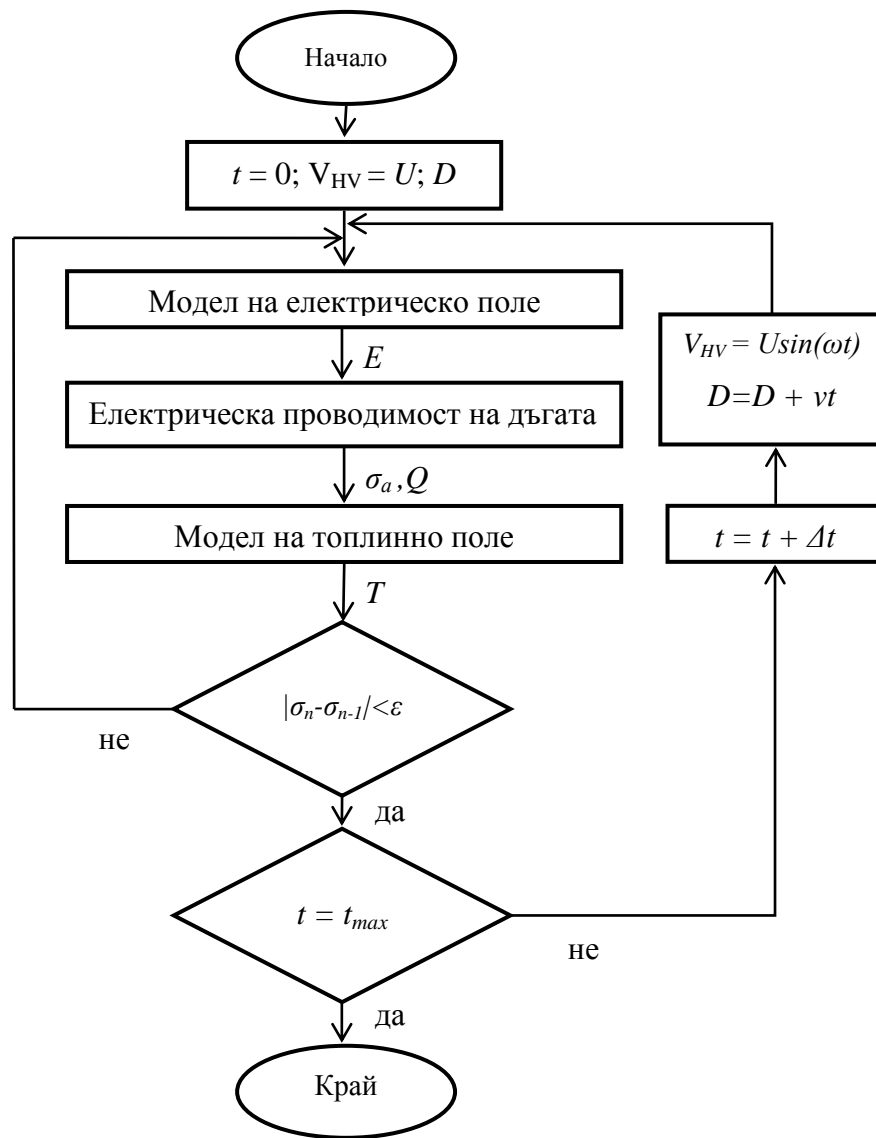
По повърхностите на контактната система (Фиг.2-б) се извършва интензивно топлоотдаване чрез лъчение, определено от уравнението на Стефан-Болцман

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \beta k_B (T^4 - T_0^4), \quad (9)$$

където β е коефициент на лъчение, за контактните части $\beta = 0.15$, за електрическата дъга $\beta = 1$, k_B - константата на Болцман ($k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K).

5. Модел на електрическо-топлинно поле

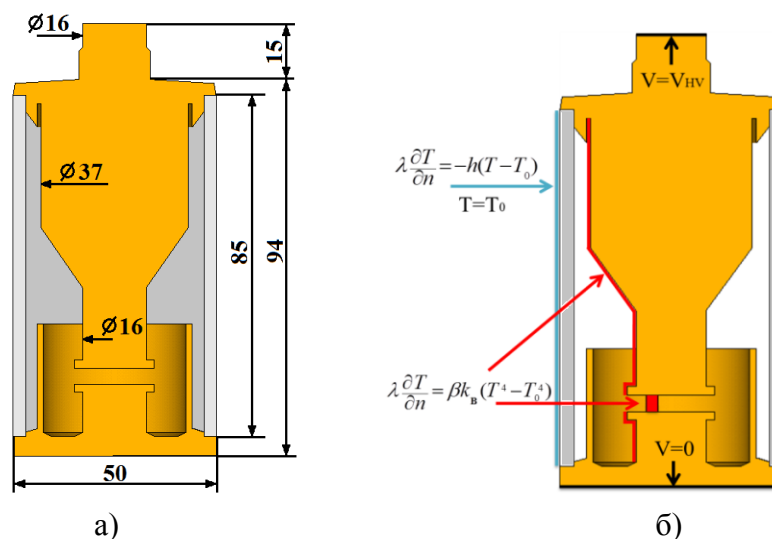
Реализираният алгоритъм на смесената задача електрическо - топлинно поле, е показан на Фиг. 2.



Фиг.2 Блокова схема

Смесеният тип на задачата е двупосочен, електрическото поле се влияе от топлинното и обратно. Използва се индиректен метод, при който задачите се решават отделно една от друга и чрез няколкократни итерации се установява, сходимост на решението по отношение на специфичната електрическа проводимост на дъгата. В случая е използвана релаксационна схема за обновяване на стойностите на специфичната проводимост на дъгата σ_a [2], която се повтаря за всяко времева стъпка.

Моделът е решен постъпково, с фиксирана стъпка във времето Δt . Източниците на топлина се определят от електрическото поле и се използват при изчисляване на топлинното поле. Получените резултати от смесената задача електрическо-топлинно поле температурата в камерата и интензитета на полето се прилагат при изчисляване на проводимостта на електрическата дъга (4), до достигане на $\varepsilon \leq 1e-3$. Резултатите за проводимостта служат за определяне на електрическото поле при следващата стъпка във времето $t_n = t_{n-1} + \Delta t$. Моделът се изследва във времеви отрязък от 10 ms (един полупериод при честота от 50 Hz), с времева стъпка $\Delta t = 500 \mu s$. Скоростта на движение на контактната система v е 2 m/s.



Фиг.3 Модел на вакуумната камера
 а) конструктивен разрез б) гранични условия

Създаденият модел на електрическо-топлинно поле използва метода с крайни елементи в програмна среда ANSYS 12.1 [9-10]. Конструктивен разрез с размери на изследваната вакуумна камера е показан на Фиг. 3-а. Приложените при моделирането гранични условия са представени на Фиг. 3-б. При реализирането на модела за температура на околната среда е приета $T_0 = 20^\circ C$. По външната повърхност на неподвижния контакт е зададен електрически потенциал $V = 0$, а по външната повърхност на подвижния контакт е зададен потенциал $V = u_{HV}(t)$, където $u_{HV}(t)$ е моментната стойност на напрежението върху камерата. За една времева стъпка геометричният модел е дискретизиран на 7 260 елемента. Създаден е отделен блок в областта на горене на дъговия разряд, за който се използва по-гъста мрежа от елементи.

В Табл.1 са представени свойствата на материалите, използвани в модела.

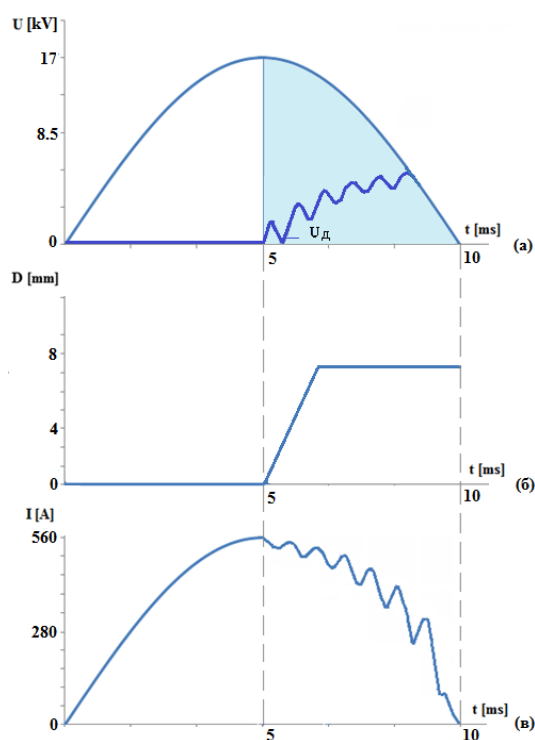
Таблица 1 Свойства на материалите

Камера	Материал	σ S/m	ϵ_r -	γ kg/m ³	c J/kgK	λ W/mK
Работен обем	Вакуум	-	1	-	-	-
Подвижно контактно тяло	Мед OFHC	5.9×10^7	-	8.94	385	401
Фиксирано контактно тяло	Мед OFHC	5.9×10^7	-	8.94	385	401
Изоляция	Керамика Al ₂ O ₃	10^{-14}	9.1	3.95	1050	26

Величини за определяне на електрическата проводимост на електрическият дъгов разряд, използвани в уравнение (4), са $n \leq 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ A.s}$.

6. Резултати

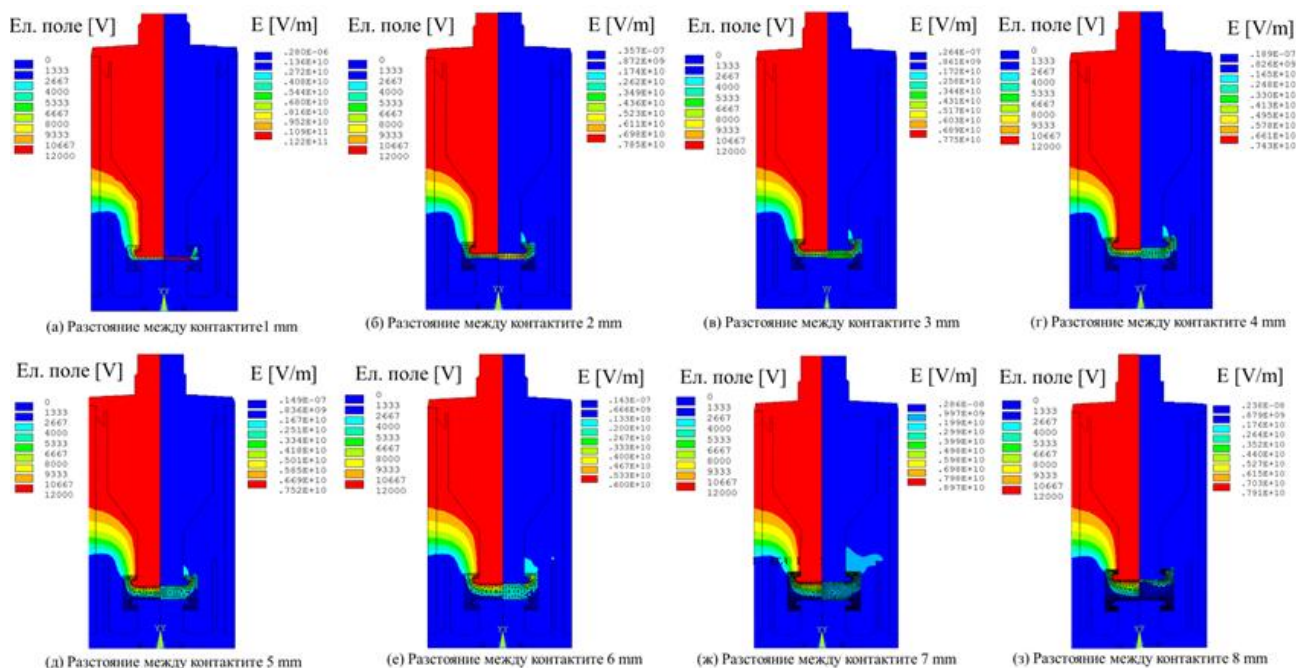
Моделираната вакуумна камера е изследвана при синусоидално напрежение с ефективна стойност 12 kV. На Фиг.4 е представен процеса на изключване на камерата под товар. На Фиг.4-а е изследваната област от синусоидата на захранващото напрежение. Представена е връзката между разтвора на контактната система D (Фиг.4-б), токът на дъгата I (Фиг.4-в), и напрежението на електрическата дъга U_д (Фиг.4-а) във функция от времето.



Фиг. 4 Динамични характеристики на вакуумния прекъсвач при изключване

Изключването на камерата се извършва във втората половина на полупериода на захранващото напрежение, който е с обща продължителност от 10 ms (50 Hz). Моментът на възникване на дъгата t_3 е във времевия отрязък от 5 до 9 ms. Скоростта на раздалечаване на контактите на камерата е 2 m/s.

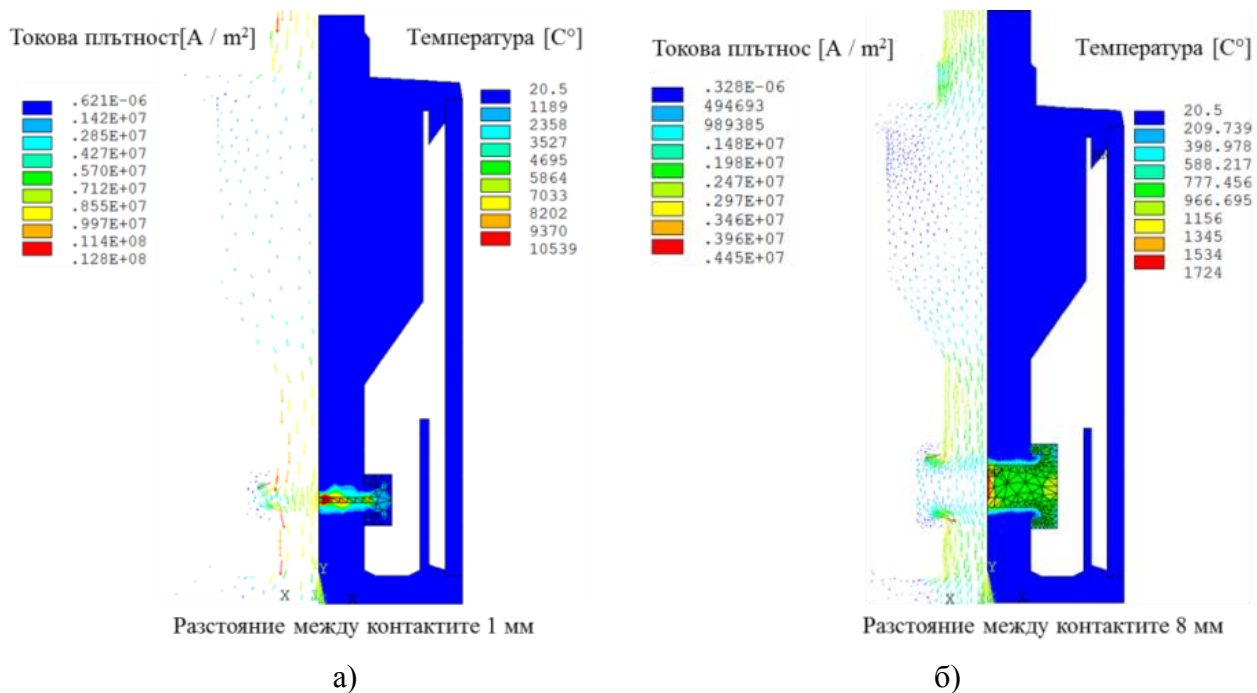
Резултати за електрическия потенциал и интензитета на електрическото поле, определени в процесът на изключване на камерата, са представени за разстояние между контактните тела от 1 до 8 mm (Фиг. 5). Захранващото напрежение е 12 kV. В лявата половина на фигурата е представено електрическото поле, а в дясната интензитета на електрическото поле.



Фиг. 5 Разпределение на електрическото поле и неговия интензитет във вакуумната камера

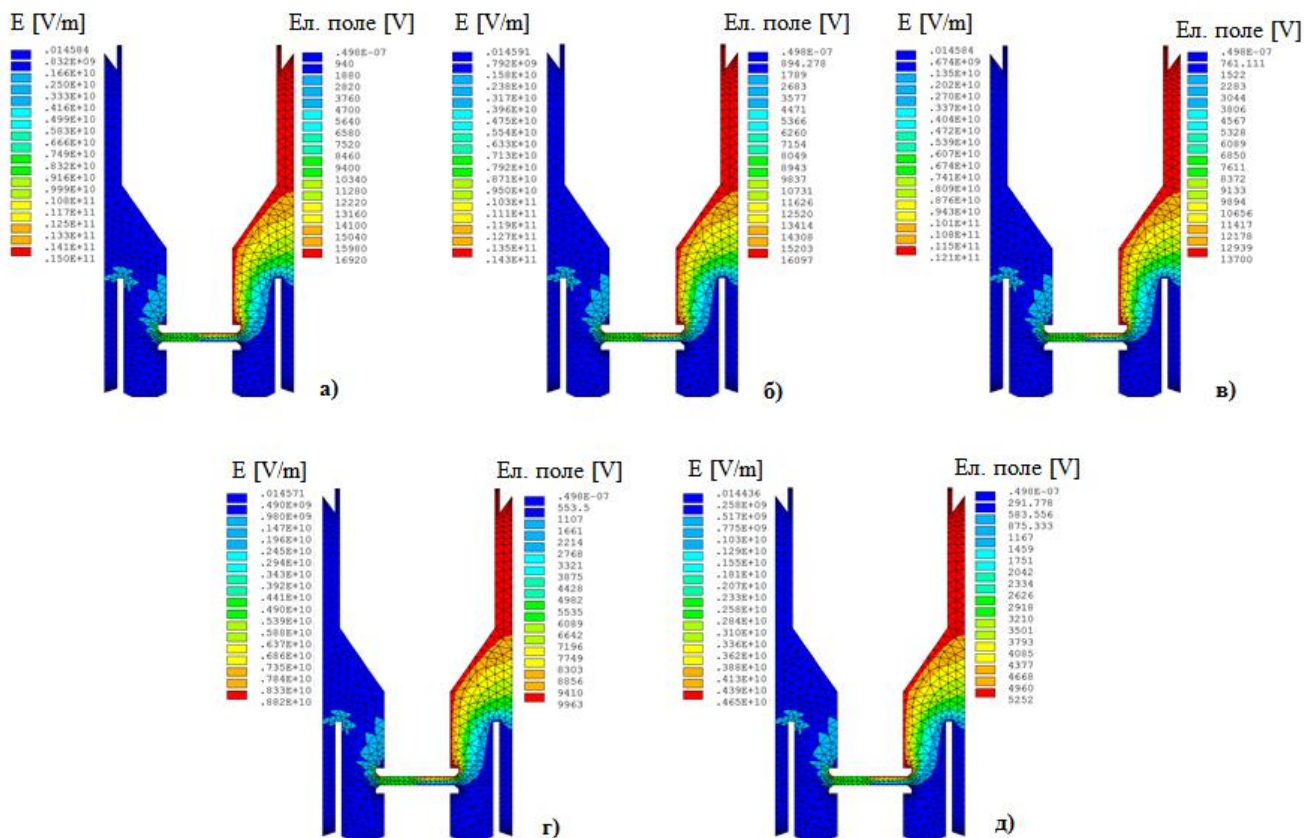
При начално разстояние между контактите на камерата $D=1$ mm, стойността на интензитета на полето е най-голяма, като намалява с увеличаване на разстоянието. При разстояние между контактите 1 mm и наличие на електрическа дъга, максималната стойност на интензитета на електрическото поле (E_{max}) е 12.2×10^9 V/m и при разстояние 8 mm, отчетената максимална стойност на интензитета на електрическото поле е 5.2×10^8 V/m. Получени са резултати за електрическото и топлинно поле през преходния процес на изключване на камерата, при различен момент на запалване на дъгата и различно напрежение (17, 16, 14, 10, 5 kV).

На Фиг. 6 са представени резултати за топлинното поле и токовата плътност на вакуумния прекъсвач за максимално захранващо напрежение и разстояние 1 и 8 mm. Най-високата температура между контактите е в порядъка на 10 000 °C по време горенето на дъгата при разстояние 1 mm и за разстояние между контактите 8 mm 1700 °C. За контактните тела температурата е в границите 40÷80°C при наличие на дъга.

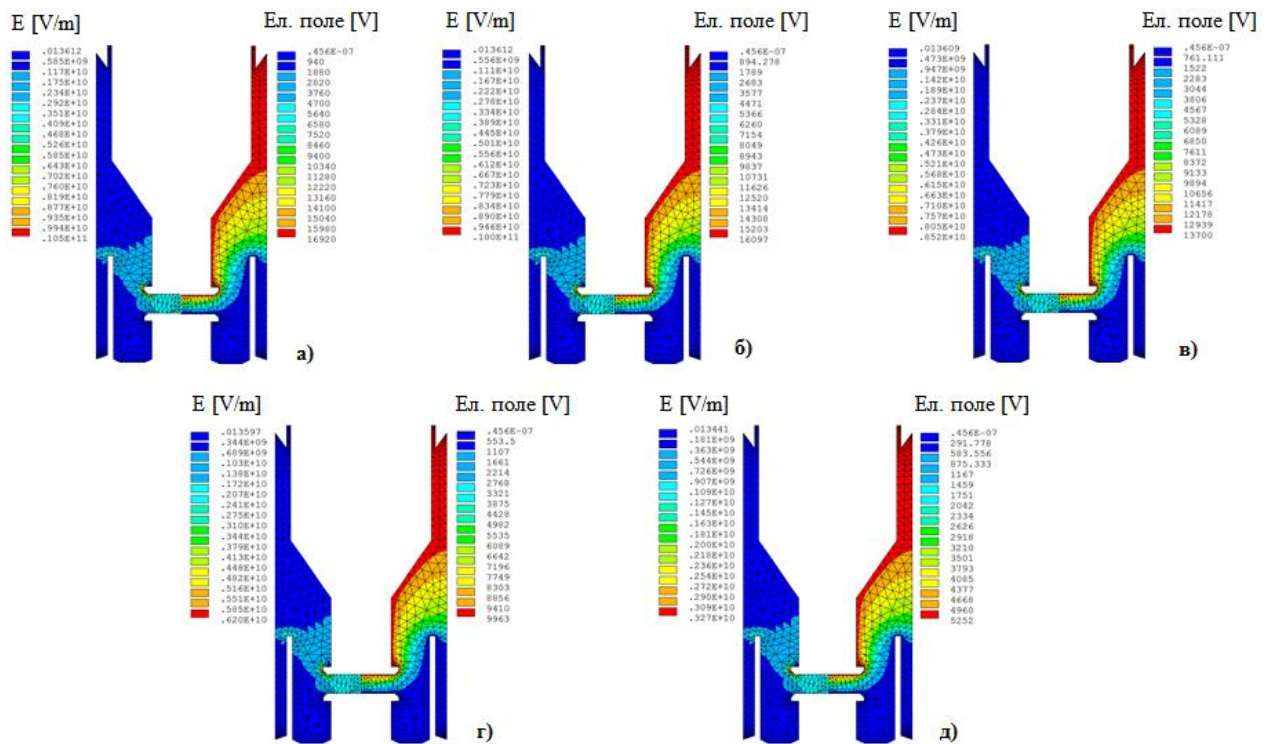


Фиг. 6 Резултати за температурата и токовата плътност във вакуумната камера

На Фиг. 7- а÷д и Фиг. 8- а÷д са показани електрическият потенциал и интензитета на полето, които са получени при захранване със синусоидално напрежение за времена, $t = 5, 6, 7, 8, 9$ ms. Представените резултати са за разстояние между контактните тела (D) 2 и 5 mm.



Фиг. 7 Разпределение на електрическото поле и неговия интензитет при D = 2 mm



Фиг. 8 Разпределение на електрическото поле и неговия интензитет $D = 5 \text{ mm}$

7. Заключение

Създаден е модел на електрическо и топлинно поле на вакуумна камера на прекъсвач високо напрежение. Определена е токовата плътност и температурата на камерата по време на изключване на прекъсвача. Резултатите показват електрическото и топлинно натоварване при различни условия и работни режими.

Получените резултати ще се използват за намиране на по-добри конструктивни решения при различни експлоатационни условия. С помощта на модела се ускорява процесът на изследване на различни конструкции, материали и режими на прекъсвача.

8. Благодарности

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани по договор 142ПД0050-01, от Вътрешния конкурс на ТУ - София - 2014.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cadick J. (2012), *Predicting the remaining life of vacuum interrupters in the field*, Finley Ledbetter, Group CBS Alan Seidel, 2012
- [2] Yatchev I., I. Marinova (2007), *Numerical Analysis and modeling of circuits and fields*, Technical University of Sofia, 2007
- [3] Marinova I., and V. Mateev (2012), *Inverse source problem for thermal fields*, *International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, COMPEL, vol. 31, 2012, pp. 996-1006
- [4] Tanev R., V. Mateev, I. Marinova (2013), *Coupled field and circuit modeling of electric arc discharge*, 7th International PhD Seminar on Computational Electromag-

netics and Bioeffects of Electromagnetic Fields – CEMBEF, Niš, Serbia, 2013, pp. 71-74

[5] ABB (1999), *New vacuum interrupters for contactors and switches*, ABB review 03/1999, pp. 32-36

[6] Piel A. (2010), *Plasma physics, an introduction to laboratory, space and fusion plasmas*, Springer Science & Business Media, 2010

[7] Nakano Y., H. Kojima, K. Tsuchiya, H. Okubol (2014), *Pre-discharge and flash-over characteristics of impulse surface discharge in vacuum, dielectrics and electrical insulation*, IEEE transactions of Dielectrics and Electrical Insulation, vol.21, 2014, pp. 403-410

[8] Krouchinin A., A. Sawicki (2003), *A theory of electrical arc heating*, издадена от Technical University of Czestochowa, 2003

[9] ANSYS Inc., ANSYS Release 12.1, Documentation Manual. 2010

[10] Mateev V., R. Tanev, I. Marinova, *Simulation of electric and thermal fields of high voltage interrupter vacuum chamber*, Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bulgaria, 2014, pp. 133-136

Автори: Валентин Матеев маг. инж. главен асистент катедра „Електрически апарати“ Електротехнически факултет Технически университет – София, E-mail: vmateev@tu-sofia.bg; Росен Танев, маг. инж., докторант в катедра „Електрически апарати“ Електротехнически факултет Технически университет – София, E-mail: rtanev@tu-sofia.bg; Илиана Маринова проф. дтн. инж. катедра „Електрически апарати“ Електротехнически факултет Технически университет – София, E-mail: iliana@tu-sofia.bg.