

ДОКУМЕНТАЦИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

„Софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема ПАК-Е“

Аутори техничког решења

- *Др Мирослав Живковић, ред. проф.*
- *Др Радован Славковић, ред. проф.*
- *Благојевић Милан, истраживач-сарадник*
- *Марко Топаловић, истраживач-сарадник*
- *Ненад Бусарац, истраживач-сарадник*
- *Јелена Борота, дипломирани машински инжењер*

Наручилац техничког решења

- Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије

Корисник техничког решења

- Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Година када је техничко решење урађено

- 2011-2012

Техничко решење прихватио-користи

- Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Начин верификације резултата

- Резултати су верификовани поређењем са аналитичким решењима и нумеричким резултатима које дају други софтвери

Начин коришћења техничког решења

- Развијени софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема ПАК-Е, примењује се на Факултету инжењерских наука у оквиру наставе и истраживања. Такође, може се користити за прорачуне капацитивних система у индустрији.

Област технике на коју се техничко решење односи

- Рачунска електромагнетика, рачунска механика

1. Опис проблема који се решава техничким решењем

Техничко решење, софтвер ПАК-Е, припада области научно-техничких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера. Софтвер се односи на одређивање величина које карактеришу електростатичко поље, као што су електрични потенцијал, напон, електрична индукција, капацитивност и електростатичка сила, применом методе коначних елемената (МКЕ) за произвољне геометрије домена и произвољне граничне услове.

Електростатичке интеракције између наелектрисаних честица управљају многим феноменима у физици, хемији и биологији. Махине за штампање (ласерски и инк-џет штампачи) и фотокопирање, електростатички филтери за пречишћавање ваздуха само су неки од примера уређаја у свакодневној употреби чији су принципи функционисања засновани на електростатичком феномену. Наелектрисања су статичка у погледу количине и статичка или споро крећућа (без убрзања) у погледу положаја у простору. Електростатички феномени потичу од сила којима наелектрисане честице међусобно делују.

Пројектовање и оптимизација различитих проводних и капацитивних система захтевају неки вид нумеричког решавања. Одређивање карактеристика поља у некој тачки као резултат деловања више појединачних поља наелектрисања, захтева сложени математички апарат. Корисници ових софтвера су заинтересовани за прецизном дефиницијом проблема како би развијали и оптимизовали своје производе на економски најприхватљивији начин.

2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења

Данас у свету постоји велики број софтвера, комерцијалних и отвореног кода, за решавање проблема електростатике: COMSOL ACDC, ANSYS Maxwell, Adina EM, QuickField, FEMM, GetDP. Код већине софтвера специјализованих за прорачунску електромагнетику и модула за електростатику код софтвера за решавање мултифизичких проблема, методе решавања се заснивају на употреби Максвелових једначина [1]. У погледу коришћених нумеричких метода, већина постојећих софтвера је базирана на методи момената (МоМ), методи граничних елемената (БЕМ) и методи коначних елемената (МКЕ) [2]. Поред ових постоје и хибридне методе засноване на спрезању поменутих са методом коначних елемената. У таквим софтверима углавном су имплементирани троугаони елементи за 2Д и тетрадраедарски елементи за 3Д проблеме.

У нашој земљи се развија комерцијални софтвер (WIPL-D) који је намењен искључиво за прорачун електромагнетног поља.

3. Суштина техничког решења

Поједини електростатички проблеми се могу решити аналитичким методама. Међутим, примена аналитичких решења није могућа при сложеним геометријским конфигурацијама као и при сложеним граничним условима какви се често јављају у пракси. Из тог разлога примена нумеричких метода у електростатици је од великог значаја.

На основу савремених научних сазнања из области рачунске електромагнетике развијен је домаћи софтвер за решавање проблема електростатике. Под основним параметрима електростатике подразумевамо електрични потенцијал, напон, електрично поље, електрична индукција и електростатичка сила у произвољној геометрији домена који се моделира. У софтвер за решавање реалних електростатичких проблема су имплементирани најсавременије нумеричке методе (Итеративне методе решавања, паралелни солвер, 1Д, 2Д и 3Д коначни елементи и др.).

Развијени софтвер је на нивоу познатих светских софтвера (COMSOL ACDC, ANSYS Maxwell, Adina EM, QuickField, FEMM, GetDP). Развијени софтверски модул ће бити коришћен као посебан софтвер и као модул програмског пакета ПАК-Multiphysics. Развијени софтвер ће бити присутан на домаћем и иностраном тржишту софтвера и моћи ће успешно да се примењује у решавању практичних проблема у индустрији, као и у научноистраживачком раду и настави на техничким факултетима у земљи и иностранству. Развијени софтвер је једноставан за употребу

и подржан пратећом документацијом, одржавањем и обуком, са могућношћу брзе доградње модула и функционалности по захтеву корисника. Упутство за примену софтвера РАК-Е урађено је по узору на упутства светски признатих софтвера.

4. Детаљан опис техничког решења (укључујући и пратеће илустрације и техничке цртеже)

Развоју софтвера претходила је детаљна анализа теоријских поставки проблема електростатике, као и анализа могућности постојећих софтверских решења.

Према класичној електродинамичкој теорији, Максвелове једначине представљају скуп основних једначина које описују све макроскопске електромагнетне феномене [1]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (5)$$

где су: \mathbf{E} електрично поље, \mathbf{D} електрична индукција (вектор диелектичног помераја или густина електричног флука), \mathbf{H} магнетно поље, \mathbf{B} густина магнетног флука, \mathbf{J} густина електричне струје, ρ густина електричног наелектрисања, t време и ∇ диференцијални оператор.

Када се величине поља не мењају са временом, поље се сматра статичким. Тада не постоји интеракција између електричног и магнетног поља, па се једначине које описују ова поља могу решавати одвојено. Електростатичко поље тада је описано једначинама (6) и (7).

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (7)$$

Извођење једначина електростатичког поља заснива се на претпоставци да је електрично поље иротационо (6). У једначинама (1)-(5), 3 једначине су независне, док преостале две могу да се изведу из независних. Ове три једначине су индефинитне, пошто је број једначина мањи од броја непознатих величина. Максвелове једначине постају дефинитне када се уведу конститутивне релације између величина поља које описују макроскопске карактеристике посматраног медијума. У најопштијем случају, конститутивне релације су сложени нелокални функционали примарних поља:

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}(t, \mathbf{x}, \mathbf{E}, \mathbf{B}), \quad (8)$$

Уколико посматрамо електростатичко поље, конститутивна релација не зависи од времена и густине магнетног флука, па је можемо написати у облику:

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{E}, \quad (9)$$

где конститутивни параметар $\boldsymbol{\varepsilon}$ означава електричну пермитивност медијума. Према карактеру електричне пермитивности извршена је следећа подела медијума: (а) електрично анизотропни материјали, (б) електрично нехомогени материјали и (ц) електрично нелинеарни материјали.

Електрично анизотропни материјали су материјали код којих вектори \mathbf{D} и \mathbf{E} нису колинеарни.

$$\begin{Bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

Електрично нехомогени материјали су материјали код којих је електрична пермитивност функција положаја, односно електричне карактеристике материјала су различите у различитим тачкама простора:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}), \quad (11)$$

Електрично нелинеарни материјали код којих електрична пермитивност зависи од интензитета електричног поља:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{E}), \quad (12)$$

Да би се решио систем сачињен од једначина (6) и (7) неопходно је диференцијалне једначине првог реда са две непознате превести у диференцијалну једначину другог реда са једном непознатом. У том циљу електрично поље се представља у облику:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\nabla\Phi(\mathbf{r}), \quad (13)$$

где је Φ скалар који се назива електрични потенцијал. Заменом (9) и (13) у (7) добијамо диференцијалну једначину другог реда по непознатој Φ :

$$-\nabla \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} \nabla \Phi) = \rho, \quad (14)$$

У случају изотропних материјала (14) има следећи облик:

$$-\boldsymbol{\varepsilon} \nabla^2 \Phi = \rho \quad (15)$$

Једначина (14), односно (15) назива се Поасонова једначина.

Гранични услови. Опште решење диференцијалне једначине садржи неодређене функције и константе. У практичном решавању проблема тражи се оно решење за поље потенцијала $\Phi(x, y, z)$ које задовољава дате граничне услове. Гранични услови у општем случају могу бити: задат електрични потенцијал на делу површине S_1 (16), интерфејс између два диелектрика на делу површине S_2 (17) и задата површинска густина наелектрисања на делу површине S_3 (18).

$$\Phi = \Phi_s(x, y, z), \quad (16)$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = \rho_s \quad (17)$$

$$\rho_s = \rho_s(x, y, z) \quad (18)$$

где ρ_s представља површинску густину наелектрисања, а S_1, S_2 и S_3 су делови површине на којима се задају гранични услови. На деловима површине на којима нису задати гранични услови, аутоматски се примењује природни гранични услов (19).

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0 \quad (19)$$

Инкременталне једначине за коначни елемент. Применом Галеркинове методе [3,4] на Поасонову једначину (14), усвајајући као тежинске коефицијенте интерполационе функције, можемо писати:

$$\int_V \left[h_I \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\varepsilon_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) \right] dV + \int_V h_I \rho dV = 0 \quad I = 1, 2, \dots, N, \quad (20)$$

где су h_I интерполационе функције, N је број чворова по елементу, а V је запремина коначног елемента. Исопараметарски 3Д коначни елемент користимо као најопштији да прикажемо извођење основних једначина баланса коначног елемента [5]. Електрични потенцијал у тачки коначног елемента одређеној координатама r, s, t дата је једначином (21) или у матричној форми једначином (22):

$$\Phi(r, s, t) = \sum_{I=1}^N h_I \Phi^I, \quad (21)$$

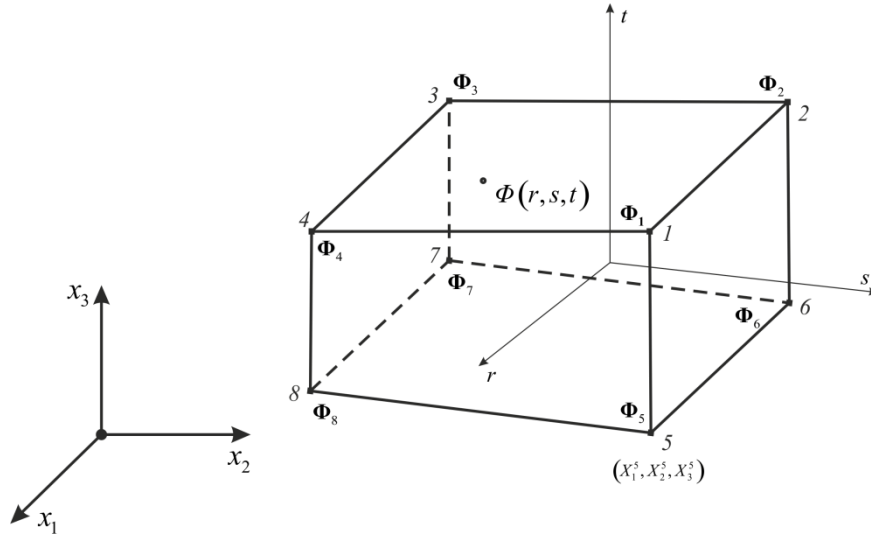
$$\Phi = \mathbf{H} \boldsymbol{\Phi} \quad (22)$$

где су \mathbf{H} и $\boldsymbol{\Phi}$ вектори интерполационих функција и електричног потенцијала у чворовима елемента, респективно.

$$\mathbf{H} = [h_1 \quad h_2 \quad \dots \quad h_N], \quad (23)$$

$$\boldsymbol{\Phi}^T = [\Phi^1 \quad \Phi^2 \quad \dots \quad \Phi^N] \quad (24)$$

Осмочворни 3Д коначни елемент са електричним потенцијалом у произвољној тачки унутар запремине елемента и електричним потенцијалима у чворовима коначног елемента приказан је на слици 1.



Слика 1: Изопараметарски 3Д коначни елемент за интерполацију поља електричног потенцијала

Применом парцијалне интеграције и Гаусове теореме на први део интеграла у једначини (20), добијамо:

$$\int_{\mathcal{V}} \left[h_1 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon_j h_{j,j}) \right] dV \Phi^J = - \int_{\mathcal{V}} \left(\sum_{j=1}^3 \varepsilon_j h_{1,j} h_{j,j} \right) dV \Phi^J + \int_{\mathcal{S}} \left[h_1^s \sum_{j=1}^3 \varepsilon_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} n_j \right] dS, \quad (25)$$

У случају да је на површини елемента задата површинска густина наелектрисања ρ_s можемо писати:

$$\int_{\mathcal{S}} \left[h_1^s \sum_{j=1}^3 \varepsilon_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} n_j \right] dS = \int_{\mathcal{S}} h_1^s \rho_s dS = Q_1^{\rho_s}, \quad (26)$$

где је $Q_1^{\rho_s}$ вектор колоне површинске густина наелектрисања и h_1^s су интерполационе функције за чворове на површини s_2 .

Коришћењем (25), (26), (20) и (21) добијамо систем једначина следећег облика [6]:

$$\mathbf{K}\Phi = \mathbf{Q}, \quad (27)$$

Где су компоненте матрице \mathbf{K} и \mathbf{Q} одређене као:

$$\mathbf{K}_{II} = \mathbf{K}_{II}^e, \quad (28)$$

$$\mathbf{Q}_I = \mathbf{Q}_I^{\rho} + \mathbf{Q}_I^{\rho_s} \quad (29)$$

Коефицијенти \mathbf{K}_{II}^e представљају матрицу електричне пермитивности:

$$\mathbf{K}_{II}^e = \int_{\mathcal{V}} \left(\sum_{j=1}^3 \varepsilon_j h_{1,j} h_{j,j} \right) dV = \int_{\mathcal{V}} (\varepsilon_x h_{1,x} h_{j,x} + \varepsilon_y h_{1,y} h_{j,y} + \varepsilon_z h_{1,z} h_{j,z}) dV, \quad (30)$$

где су изводи означени као $h_{1,x} = \partial h_1 / \partial x, \dots, h_{j,z} = \partial h_j / \partial z$.

Коришћењем интерполационе матрице \mathbf{H} , матрице и векторе у једначини (27) можемо написати у облику:

$$\mathbf{K}^e = \int_{\mathcal{V}} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{B} dV, \quad (31)$$

$$\mathbf{Q}^{\rho} = \int_{\mathcal{V}} \rho \mathbf{H}^T dV \quad (32)$$

$$\mathbf{Q}^{\rho_s} = \int_{\mathcal{S}} \rho_s \mathbf{H}^{sT} dS \quad (33)$$

Вектори врсте \mathbf{H}^s садрже интерполационе функције h_i^s за одговарајућу површину коначног елемента. Матрица \mathbf{V} је облика:

$$\mathbf{V} = [\mathbf{V}^1 \quad \mathbf{V}^2 \quad \dots \quad \mathbf{V}^N], \quad (34)$$

где је подматрица \mathbf{V}^I састоји од извода интерполационих функција за чвор I по координатама x , y и z :

$$\mathbf{V}^I = \begin{bmatrix} h_{I,x} \\ h_{I,y} \\ h_{I,z} \end{bmatrix}, \quad (35)$$

Матрична једначина (27) представља једначину баланса енергије коначног елемента за електростатички проблем. Укупан број једначина једнак је броју чворова, где сваком чвору одговара једна вредност електричног потенцијала. Уколико се ради о линијским или 2Д проблемима, претходни изрази остају непромењени, осим што се интеграл по запремини V сводје на интеграле по дужини L или површини A коначног елемента, како је показано у [1]. Интерполационе функције h_i за 1Д и 2Д проблеме имају одговарајуће облике [4].

Једначине баланса конструкције. Матрична једначина баланса конструкције (скупа коначних елемената) се може добити сабирањем матричних једначина (27) свих коначних елемената. При томе се врши сабирање одговарајућих коефицијената матрица и вектора елемената, који одговарају тим врстама и колонама матрица система:

$$\mathbf{K}_u = \sum_e \mathbf{K}_u^{(e)}, \quad (36)$$

$$\mathbf{Q}_t = \sum_e \mathbf{Q}_t^{(e)} \quad (37)$$

где индекс e означава редни број елемента. Овде је битно истаћи да се површински интеграл по површинама елемената поништавају на унутрашњим границама елемената, а остају само интеграл по спољашњим површинама конструкције.

Решавање равнотежних једначина у случају нелинеарних проблема. Посматрамо стационарно електрично поље у најопштијем случају када материјалне константе зависе од електричног потенцијала. Нелинеарна електростатичка анализа је имплементирана са имплицитном итеративном методом за решавање нелинеарних проблема [7]:

$$\mathbf{K}^{(i-1)} \Delta \Phi^{(i)} = \mathbf{Q}^{(i-1)} - \mathbf{K}^{(i-1)} \Phi^{(i-1)}, \quad (38)$$

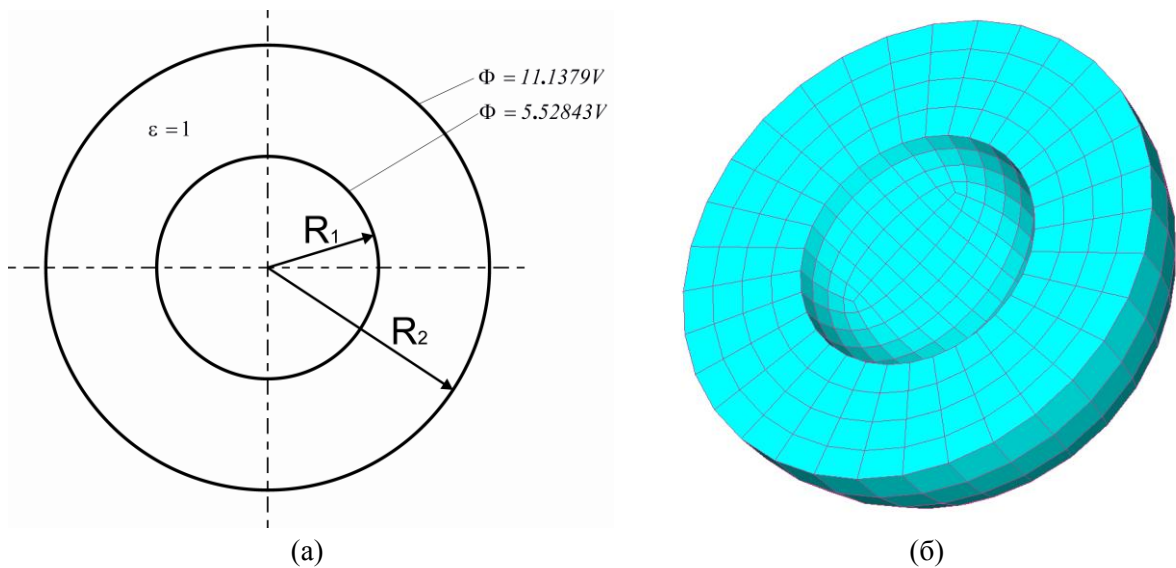
где матрица $\mathbf{K}^{(i-1)}$ и вектор $\mathbf{Q}^{(i-1)}$ одговарају последње познатом електричном потенцијалу $\Phi^{(i-1)}$ из претходне итерације. Итеративни поступак се наставља све док прираштај електричног потенцијала у чворовима не буде довољно мали, што се може представити у облику:

$$\frac{\|\Delta \Phi^{(i)}\|}{\|\Phi^{(i)}\|} \leq \varepsilon_r, \quad (39)$$

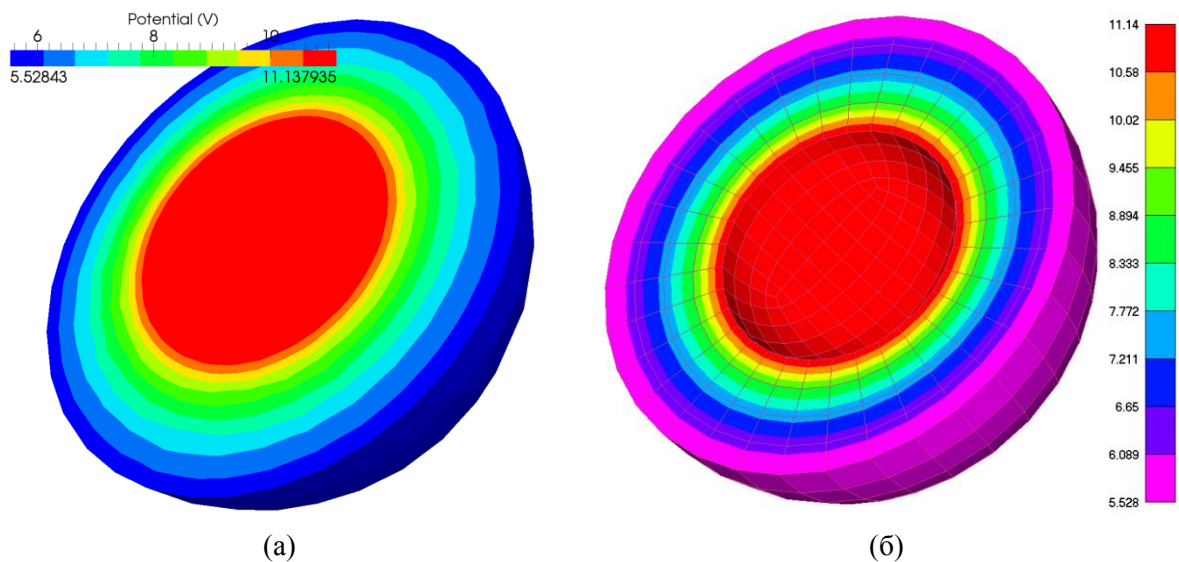
где је ε_r толеранција за релативну грешку, а $\|\Delta \Phi^{(i)}\|$ је инкреметална норма електричног потенцијала.

У току развоја софтвера урађен је велики број теоријских примера из електростатике, са циљем да се верификују нумерички резултати добијени софтверским пакетом РАК-Е [8, 9].

Пример 1 – Шупља сфера. Као benchmark пример наводимо пример који се даје код већине софтвера намењених за решавање проблема електростатике [10-13]. Домен је ограничен сферама полепручника $R_1 = 1$ и $R_2 = 2$ (слика 2а). Због постајања равни симетрије, моделирана је само једна половина домена (слика 2б). На сфери полупречника R_1 задат је потенцијал 11.1379V, док је на сфери полупречника R_2 задат потенцијал 5.52843V, према [10]. Диелектрик је ваздух са јединични коефицијентом премитивности. Одређивање поља потенцијала извршено је софтверима MaxFEM [10] и РАК-Е [6] (слика 3). Слагање резултата прорачуна је веома добро.



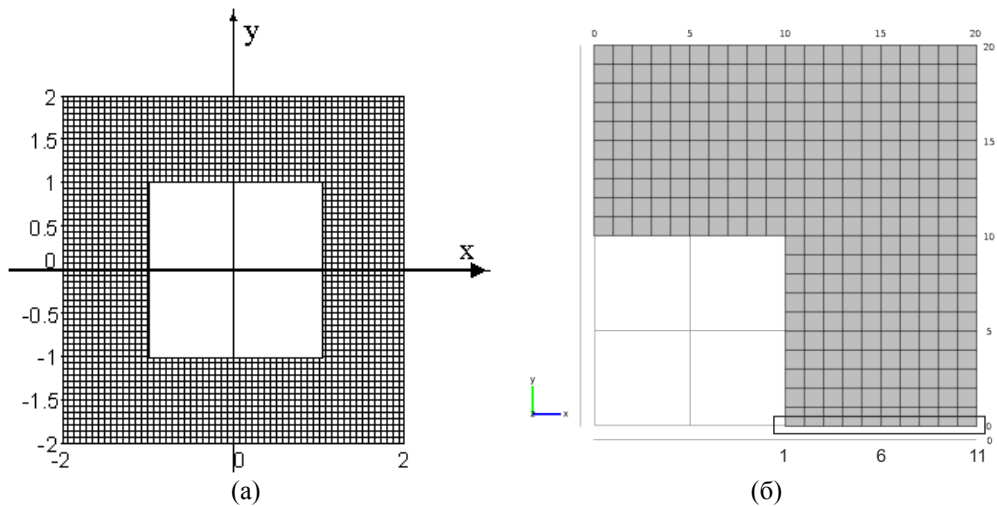
Слика 2: Шупља сфера: (а) геометрија домена и (б) модел коначних елемената



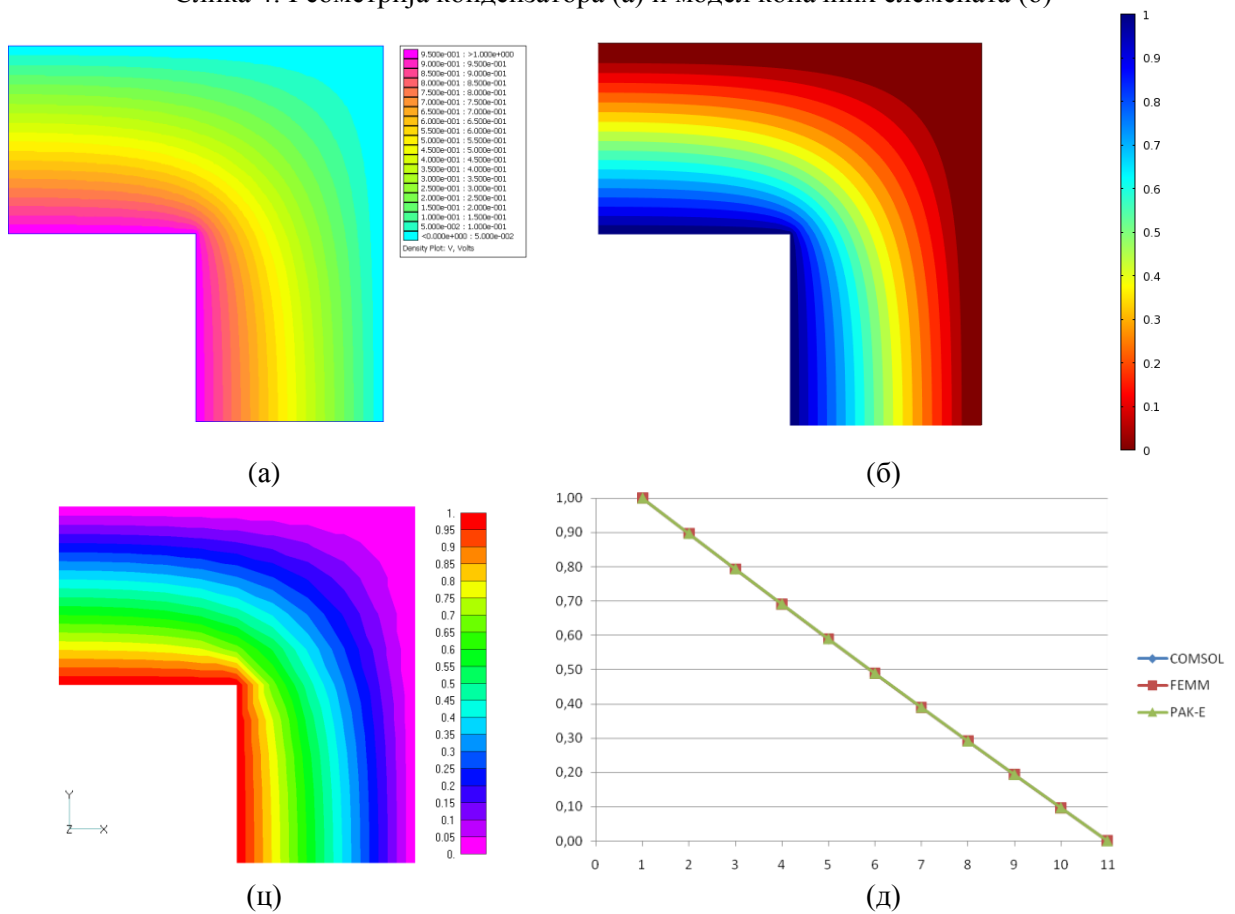
Слика 3: Поље потенцијала: (а) MaxFEM, (б) PAK-E

После верификације на тест примерима који су једноставни али у пракси неопходни за верификацију софтвера, софтвер је примењен за анализу реалних конструкција. Од реалних конструкција, приказана је анализа поља потенцијала код кондензатора и електрично поље у изолацији високонапонског проводника.

Пример 2 - Кондензатор. Посматрамо кондензатор квадратног попречног пресека, са квадратним отвором у средини [11], чија је геометрија приказана на слици 4а. Димензије на слици дате су у cm. Дужина кондензатора је 1m. Због постојања симетрије, моделирана је само $\frac{1}{4}$ уређаја. Диелектрик између плоча кондензатора је баздик са јединичном вредношћу електричне пермитивности. Унутрашња плоча кондензатора има потенцијал од 1V, док је спољашња плоча кондензатора уземљена. Модел коначних елемената састоји се од 300 елемената у 341 чвора (слика 4б). На слици 5 су приказана поља потенцијала одређена софтверима FEMM [11], COMSOL [12] и PAK-E [8, 9]. Поређење нумеричких резултата вршено је преко чворова означених на слици 4б. Поље потенцијала израчунато софтвером PAK-E је идентично резултатима софтвера COMSOL и FEMM (слика 5б).

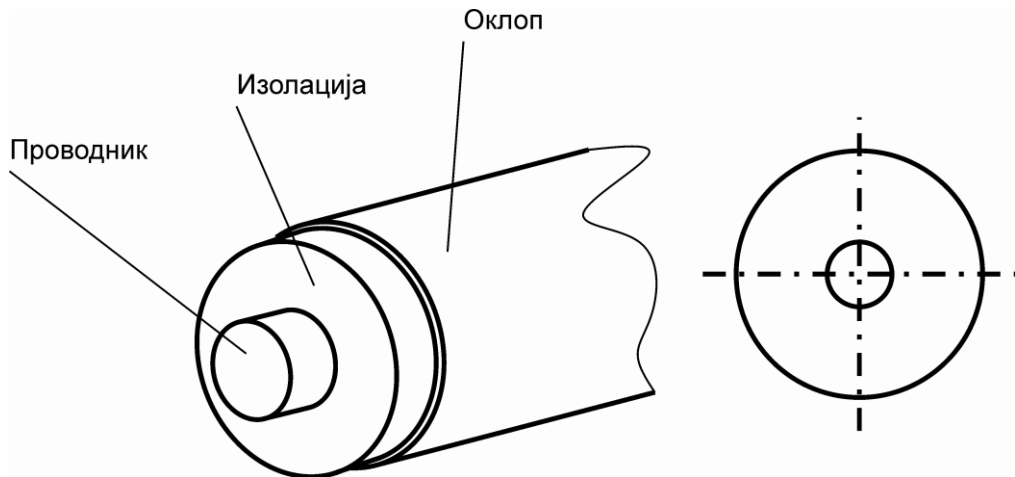


Слика 4: Геометрија кондензатора (а) и модел коначних елемената (б)

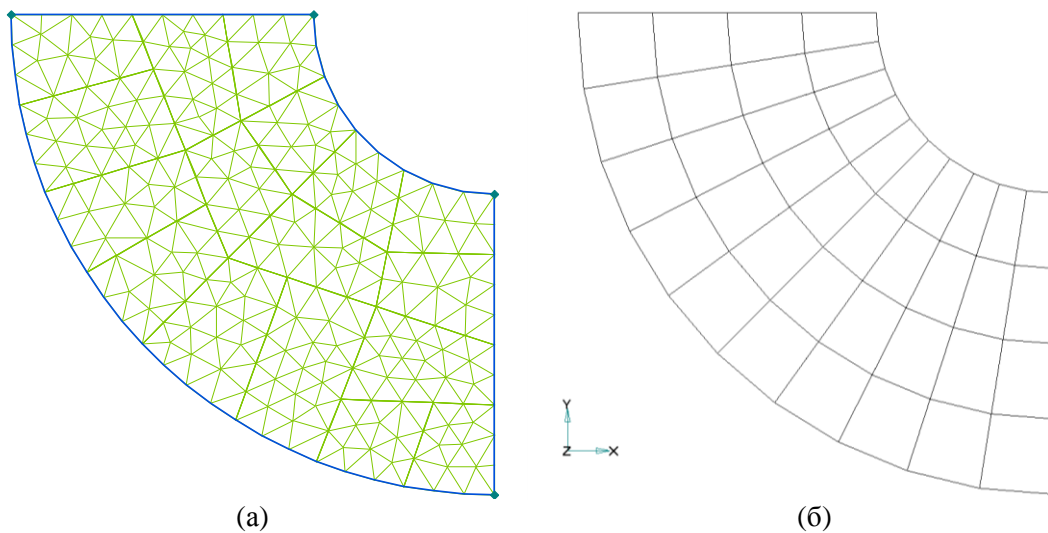


Слика 5: Поље потенцијала:
(а) FEMM, (б) COMSOL, (ц) PAK-E и (д) упоредни приказ резултата

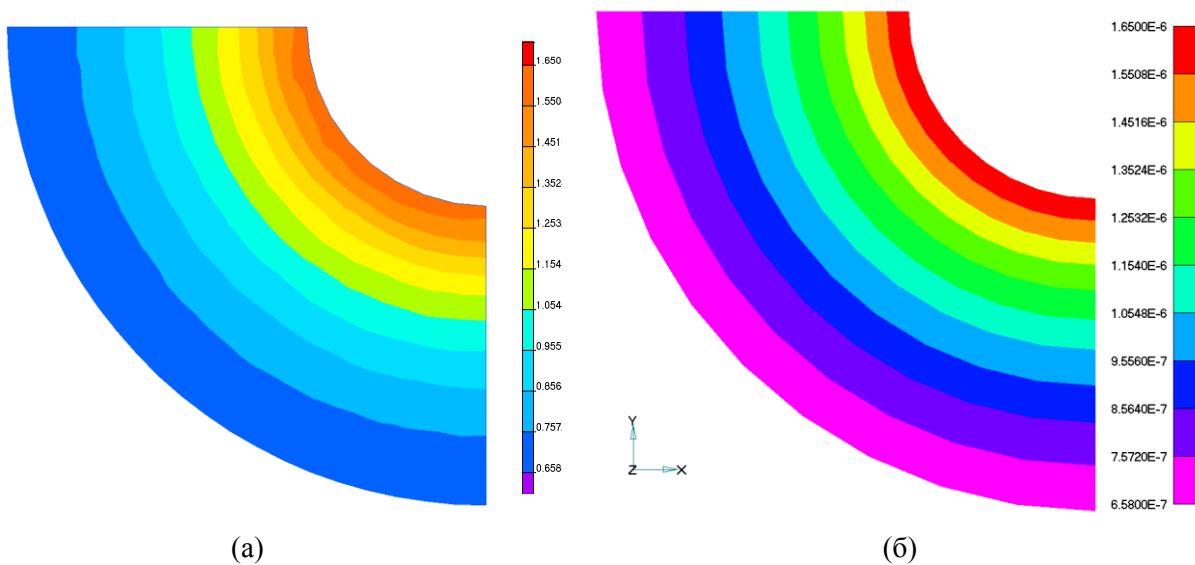
Пример 3 - Изолатор високонапонског проводника. Пример анализира електрично поље у изолацији високонапонског проводника [14]. Геометрија проводника приказана је на слици 6. Пречник проводника је 31,41 mm. Пречник изолације је 62,82 mm. Посматра се проводник дужине 1m. Због постојања симетрије, моделира се $\frac{1}{4}$ проводника (слика 7). Проводник има потенцијал од 10000V, док је оклоп проводника уземљен. На слици 8 приказано је електрично поље у изолацији високонапонског проводника израчунато софтверима QuickField [12] и PAK-E. Слагање резултата прорачуна је веома добро.



Слика 6: Геометрија високонапонског проводника



Слика 7: Модели коначних елемената изолатије високонапонског проводника:
(а) QuickField и (б) PAK-E



Слика 8: Електрично поље у изолатији високонапонског проводника:
(а) QuickField и (б) PAK-E

Решења развијеног софтвера ПАК-Е поређена су са комерцијалним софтверима COMSOL и QuickField и софтверима отвореног кода MaxFEM и FEMM. У поређењима са решењима која дају ови софтвери, решења софтвера ПАК-Е имају веома добро слагање. На основу изложеног може се закључити да се овај софтвер може успешно користити за решавање електростатичких проблема.

5. Литература

- [1] Rothwell J E, Cloud J M (2001) Electromagnetics, CRC Press.
- [2] Jin J (2002) The Finite Element Method in Electromagnetics, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [3] Bathe K J (1996) Finite Element Procedures, Prentice Hall, amazon.com
- [4] Којић М, Славковић Р, Живковић М, Грујовић Н (1996) Метод коначних елемената – Линеарна анализа, Машински факултет у Крагујевцу, Универзитет у Крагујевцу, Србија.
- [5] Којић М, Živković М, Slavković R, Grujović N (1998) ПАК-Т Finite Element Program for Heat Transfer, Машињски факултет у Крагујевцу, Универзитет у Крагујевцу, Serbia.
- [6] Благојевић М, Živković М, Slavković R (2011) Electrostatic Field Analysis Using Heat Transfer Analogy, IConSSM 2011 - Third Serbian Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Vlasina lake, Serbia, ISBN 978-86-909973-2-9.
- [7] Живковић М (2006), Нелинарна анализа конструкција, Универзитет у Крагујевцу, Машински факултет, Крагујевац.
- [8] Живковић М, Славковић Р, Благојевић М, Топаловић М, Бусарац Н, Борота Ј (2012) ПАК-Е - Софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Србија.
- [9] Благојевић М, Живковић М, Славковић Р, Топаловић М (2012) ПАК-Е - Софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема, Упутство за коришћење са примерима, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Србија, <http://fempak.fink.rs/software/ПАК-Е>.
- [10] MaxFEM - <http://www.usc.es/gl/proxectos/maxfem/index.html>
- [11] Meeker D (2010) Finite Element Method Magnetics, Version 4.2, User's Manual.
- [12] COMSOL Multiphysics, <http://www.comsol.com/>
- [13] QuickField™, Finite Element Analysis System, Version 5.10, User's Guide
- [14] Milan Blagojević, Miroslav Živković, ПАК-DCF – Multiphysics Software Modul for FEM Simulation of Current Flow Problems, 12th International Conference Research and Development in Mechanical Industry RaDMI 2012, Vrnjačka Banja, 2012, 14 - 17. September, pp. 804-808, ISBN 978-86-6075-037-4
- [15] Femap, http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/velocity/femap/index.shtml

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА	
УНУ	
Порука	17/12/2012
Опш. број	
01-1/3423	

Одлуком Наставно-научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу бр 01-1/3123-38 од 28.11.2012. године именовани смо за рецензенте техничког решења:

„Софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема - ПАК-Е“

аутора: *Др Мирослав Живковић, ред. проф., Др Радован Славковић, ред. проф., Благојевић Милан, истраживач-сарадник, Марко Топаловић, истраживач-сарадник, Ненад Бусарац, истраживач-сарадник и Јелена Борота, дипломирани машински инжењер.* На основу предлога овог техничког решења подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

Техничко решење **„Софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема - ПАК-Е“** аутора: *Др Мирослав Живковић, ред. проф., Др Радован Славковић, ред. проф., Благојевић Милан, истраживач-сарадник, Марко Топаловић, истраживач-сарадник, Ненад Бусарац, истраживач-сарадник и Јелена Борота, дипломирани машински инжењер,* реализовано 2011-2012 године, приказано је на 10 страница формата А4, писаних 11 фонтом, 1 проредом, садржи 8 слика. Састоји се од следећих поглавља:

1. Опис проблема који се решава техничким решењем
2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења
3. Суштина техничког решења
4. Детаљан опис техничког решења (укључујући и пратеће илустрације)
5. Литература

Техничко решење припада области научно-технолошких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера (класа 42).

Наручилац техничког решења је Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Техничко решење је реализовано у оквиру рада на пројекту: **ТР32036 - Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема - Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије Републике Србије, 2011-2014.**

Примена предложеног техничког решења реализована је на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

МИШЉЕЊЕ

Аутори техничког решења „Софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема - ПАК-Е“ су приказали стање решености проблема у свету и у нашој земљи, и детаљно описали развијени софтвер. Техничко решење поседује стручну компоненту, представља заокружени резултат и има научно-истраживачки допринос. Резултати техничког решења излагани су на научним скуповима.

Развијени софтвер је написан у FORTRAN-у на основу теоријских формулација електростатике, изведених за нумеричку интеграцију применом методе коначних елемената.

На основу описа техничког решења могу се донети следећи закључци:

- 1. Софтвер ПАК-Е написан је на основу стандардних теоријских формулација из области нумеричке електромагнетике,*
- 2. Аутори техничког решења су описали нумеричке алгоритме за решавање проблема електростатике,*
- 3. Развијени софтвер ПАК-Е, у поређењу са другим комерцијалним, едукативним и софтверима отвореног кода који су били доступни, има сличне могућности и даје поуздане резултате при нумеричким прорачунима,*
- 4. Развијени софтвер се може примењивати у анализи различитих капацитивних система,*
- 5. Упутство за коришћење софтвера ПАК-Е је урађено по узору на упутства познатих произвођача комерцијалних софтвера, а која подразумевају: теоријске поставке, упутства за коришћење софтвера, као и упутства са урађеним примерима,*
- 6. Већи број решених примера развијеним софтвером ПАК-Е и упоређивање резултата са резултатима добијеним коришћењем водећих светских софтверских пакета, показују велике могућности програма ПАК-Е и поузданост његове примене у решавању реалних проблема.*

„Софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема - ПAK-E“ има значајно место у нумеричкој анализи проблема електростатике. Са задовољством предлажемо да се „Софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема ПAK-E“ прихвати као техничко решење – нови софтвер - M85 према класификацији из Правилника о поступку и начину вредновања, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача („Сл. гласник РС“, бр. 32/2008).

14.12.2012., у Крагујевцу



Др Јасна Радуловић, ред. проф.



Др Златан Шошкић, ванр. проф.



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
Факултет инжењерских наука
Број: ТР-69/2012
20. 12. 2012. године
Крагујевац

Наставно-научно веће Факултета инжењерских наука у Крагујевцу на својој седници од 20. 12. 2012. године на основу члана 205. Статута Факултета инжењерских наука, донело је

О Д Л У К У

Усвајају се позитивне рецензије техничког решења „**Софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема ПАК-Е**“, аутора др **Мирослава Живковића**, ред. проф., др **Радована Славковића**, ред. проф., **Милана Благојевића**, истраживача сарадника, **Ненада Бусарца**, истраживача сарадника, **Марка Топаловића**, истраживача сарадника и **Јелене Бороте**, дипл. инж..

Решење припада класи **М85**, према класификацији из Правилника о поступку, начину вредновању, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача („Сл. Гласник РС“ - бр. 38/2008).

Рецензенти су:

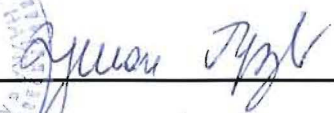
1. **Др Јасна Радуловић**, ред. проф., Факултет инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу
Уже научне области: Аутоматика и мехатроника, Примењена информатика и рачунарско инжењерство
2. **Др Златан Шошкић**, ванр. проф., Факултет за машинство и грађевинарство, Универзитет у Крагујевцу
Ужа научна област: Техничка физика

Достављено:

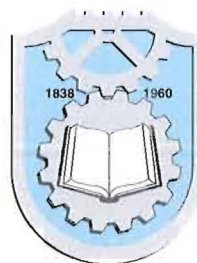
- Ауторима
- Архиви



ДЕКАН ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА


Др Мирослав Бабић, редовни професор

W.C.



Број: 01-1/281-1
Датум: 30.01.2013. год.

ПРЕДМЕТ: Техничко решење – Софтвер:
Софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема ПАК-Е

Овим се потврђују следеће чињенице у вези предметног техничког решења:

Врста техничког решења:
Софтвер (М85)

Назив техничког решења:
Софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема ПАК-Е

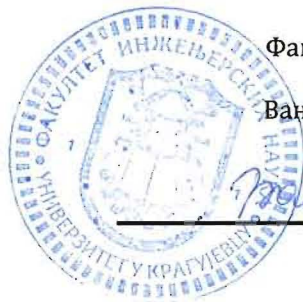
Аутори техничког решења:
Др Мирослав Живковић, ред. проф.
Др Радован Славковић, ред. проф.
Милан Благојевић, истраживач-сарадник
Марко Топаловић, истраживач-сарадник
Ненад Бусарац, истраживач-сарадник
Јелена Борота, дипломирани машински инжењер

Корисник техничког решења:
Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу

Година израде:
2011 – 2012. година

Примена техничког решења:
Развијени софтвер за нумеричко решавање електростатичких проблема ПАК-Е, примењује се на Факултету инжењерских наука у оквиру наставе и истраживања. Такође, може се користити за прорачуне капацитивних система у индустрији.

Напомена:
Техничко решење ПАК-Е је оригинални софтвер развијен на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у оквиру пројекта ТР32036 - Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема, који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја.



Факултет инжењерских наука
Продекан за НИР
Вања Шуштершич, ванр. проф.