

Proračun i ispitivanje metalom oklopljenog, plinom SF6 izoliranog sklopnog postrojenja 145 kV na unutarnji luk

Štimac, Eugen

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:434704>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-31**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 1601

**PRORAČUN I ISPITIVANJE METALOM
OKLOPLJENOG, PLINOM SF6
IZOLIRANOG SKLOPNOG POSTROJENJA
145 kV NA UNUTARNJI LUK**

Eugen Štimac

Zagreb, lipanj 2017.

Hvala Daliboru Gorencu i Ivani Lončar iz Končar Električnih visokonaponskih aparata na svoj pomoći i materijalima dobivenima tijekom izrade ovog rada. Hvala i mom mentoru, Damiru Sumini, na razumijevanju mojih ostalih obaveza tijekom izrade rada, obitelji na podršci te prijateljima na svim kritikama tijekom studija.

Sadržaj

Uvod.....	3
1. Unutarnji luk u visokonaponskim aparatima.....	4
1.1. Unutarnji luk u sklopnim uređajima.....	4
1.2. Osnovni fizikalni model s konstantnim parametrima plina.....	6
1.2.1. Proračun rasta tlaka i temperature prije prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora	10
1.2.2. Proračun rasta tlaka i temperature nakon prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora	13
1.3. Model s konstantnim parametrima plina, evaporacijom elektroda, ablacijom izolatora i egzotermnom reakcijom	15
1.3.1. Proračun rasta tlaka i temperature prije prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora	18
1.3.2. Proračun rasta tlaka i temperature nakon prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora	21
1.4. Model s promjenjivim parametrima plina te evaporacijom, ablacijom i egzotermnom reakcijom.....	22
1.4.1. Proračun porasta tlaka i temperature prije prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora	23
1.4.2. Proračun porasta tlaka i temperature nakon prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora.....	24
2. Termodinamičke karakteristike plazme.....	25
3. Programi za izračun parametara unutarnjeg luka.....	33
4. Programsko sučelje izrađeno u Matlab programskom okruženju.....	35
4.1. Sučelje programa, Sucelje_VN_GIS.m i Sucelje_VN_GIS.fig.....	36
4.2. Funkcija provjere i unosa podataka, Unos_podataka.m.....	42
4.3. Glavna funkcija proračuna varijabli, Proracun.m.....	42
4.4. Pomoćne funkcije proračuna, tmpAl i tmpCu	43
4.5. Funkcija crtanja i spremanja grafa u datoteku, Crtanje.m	44

5. Praktična testiranja i usporedba rezultata	45
5.1. Ispitivanje provedeno u IPH GmbH institutu i usporedba s rezultatima računalne simulacije	47
5.2. Ispitivanje provedeno u Končar - Institutu za elektrotehniku d.d. i usporedba s rezultatima simulacije.....	52
Zaključak	67
Literatura	69
Sažetak	70
Ključne riječi	70
Summary.....	71
Keywords.....	71
Privitak I. Glavno sučelje programa, 'Sucelje_VN_GIS.m'.....	72
Privitak II. Glavna funkcija proračuna, 'Proracun.m'	81
Privitak III. Pomoćna funkcija u proračunu, 'tmpAI.m'	95
Privitak IV. Pomoćna funkcija, 'Crtanje.m'	97
Privitak V. Funkcija za provjeru i unos podataka, 'Unos_podataka.m'.....	99
Privitak VI. Pomoćna funkcija 'tmp.Cu'	103

Uvod

U ovom radu proučavana je pojava unutarnjeg električnog luka u visokonaponskoj GIS (engl. Gas Insulated Switchgear) komori. Unutarnji luk u sklopnim aparatima najčešće se događa pri kvaru nekog od dijela aparata, te može uzrokovati značajne posljedice u cijelom postrojenju ukoliko do njega dođe, a u najgorem slučaju čak i eksploziju cijelog kućišta kojim je aparat obuhvaćen [2]. Samo testiranje visokonaponskih uređaja (nazivnog napona iznad 72.5kV) na unutarnji luk nije propisano kao obavezno testiranje, no sve je značajnije pri tipskim i rutinskim ispitivanjima, ponajprije zbog zahtjeva samih kupaca.

Ispitivanje na unutarnji luk metalom oklopljenog, plinom SF₆ izoliranog sklopnog postrojenja 145 kV definirano je normom IEC 62271-203 koja spada u grupu neobaveznih tipskih ispitivanja. Nakon što je obavljeno ispitivanje na uređaju, daljnja analiza karakteristika i ponašanja uređaja pri pojavi unutarnjeg luka može se prema normi obaviti i računalnom simulacijom, zbog čega proizvođači sklopnih aparata često izrađuju ili naručuju računalne programe koji mogu simulirati unutarnji luk. Osim pojeftinjenja analize i dizajna istih uređaja, računalni proračun olakšava dizajn adaptacija i novih modela uređaja, no ujedno i štiti okoliš od mogućeg istjecanja stakleničkog plina SF₆ kojim su sklopne komore najčešće ispunjene. Plin SF₆ najrazorniji je poznati staklenički plin, što naročito opravdava ovakvu praksu i definiciju same norme.

Da bi se neki program mogao verificirati, nužno je provjeriti njegov proračun na stvarnim ispitivanjima, a nakon toga i odrediti ulazne parametre programa koji se jedino mogu odrediti iz rezultata ispitivanja. Ukoliko je program zadovoljavajuć, omogućuje verificiranje uređaja po navedenoj normi, no predstavlja i moćan alat u daljnjem razvoju sklopnih aparata.

1. Unutarnji luk u visokonaponskim aparatima

1.1. Unutarnji luk u sklopnim uređajima

Uvjeti za stvaranje električnog luka, odnosno vođenja struje kroz inače nevodljivi materijal poput zraka, su ostvareni ukoliko je dosegnut dovoljno velik napon potreban da bi struja mogla poteći na dovoljno velikom razmaku između samog izvora razlike napona. Može se reći i da je dosegnuta električna probojna čvrstoća materijala, odnosno dosegnut dovoljno visoki napon da bi određeni materijal "probio". Električna probojna čvrstoća ovisi o više faktora, od vlage materijala, tlaka, temperature i sl. Jednom kada se dogodi da struja poteče određenim materijalom te se stvori električni luk, istovremeno raste temperatura, te posljedično okolni tlak što može imati devastirajuće posljedice u električkim uređajima. Stanje u električnom luku se naziva plazma i karakterizira ju visoka temperatura i vodljivost jer se u fluidu (npr. SF₆) stvaraju ionizirane čestice koje predstavljaju vodljivi put električnoj struji, te materijal u takvom stanju karakteriziraju valne pojave, osim čestičnih.

Ukoliko se radi o sklopnim aparatima, pojava električnog luka uzrokovanog nekom od greški u radu mreže, samog aparata, ili pak uzrokovanog vanjskim uvjetima, dovodi do naglog porasta temperature i tlaka. Kako su visokonaponski aparati oklopljeni kućištem, ono se dizajnira kako bi podnijelo određeni porast tlaka i temperature i zaštitilo okolinu od kvara. Ukoliko uređaj nije dobro dizajniran, kućište može biti probijeno, a moguće su i eksplozije uslijed velike razlike između unutarnjeg i vanjskog tlaka, čime se ugrožavaju ne samo ostali uređaji u okolici, već i osoblje. Električni luk uzrokovan greškom kod visokonaponskih sklopnih aparata koji su oklopljeni kućištem te eventualno ispunjeni odgovarajućim plinom (najčešće sumporovim heksafluoridom, SF₆) pojavljuje se unutar zaštitnog kućišta te se stoga naziva unutarnjim.

Trenutni propisi ne obvezuju proizvođače sklopnih uređaja na testiranje i analizu uređaja na unutarnji luk, no postoje smjernice za testiranje i analizu uređaja na unutarnji luk, te su opisane normom IEC 62271-203 u slučaju visokonaponskih GIS aparata. Puni naziv norme je IEC 62271-203 (Edition 2, 2011-09) "High-

voltage switchgear and controlgear – Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV”. Navedena norma dopušta proširenje rezultata testiranja s proračunima i računalnim simulacijama. Ispitivanje je neobavezno, tipsko, no od samih proizvođača, zbog sigurnosti postrojenja, osoblja i javnosti sve se češće traži da podliježu navedenoj normi.

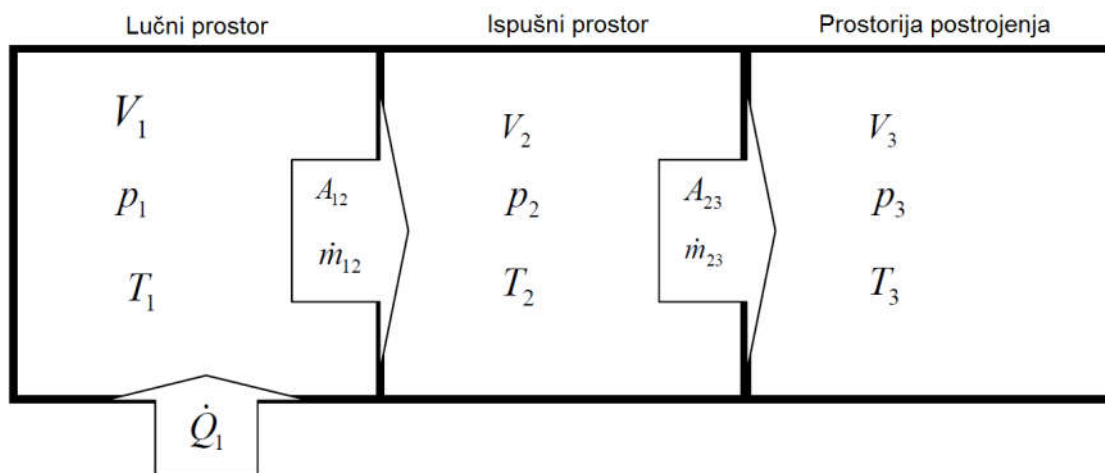
Električni luk u ispitivanju se inicira s tankom žicom koja vrlo brzo ispari, uzrokuje lokalni porast temperature i tlaka, te olakšava stvaranje uvjeta za pojavu električnog luka. Što se tiče vrsta proračuna koji se mogu obaviti prije ili nakon ispitivanja, postoji ih više vrsta, u svrhu proširenja dobivenih podataka čime se smanjuje opseg i količina ispitivanja, kao što će biti objašnjeno kasnije. Broj ispitivanja se nastoji smanjiti ne samo iz razloga cijene i izgubljenog vremena u dizajniranju i proizvodnji, već i iz ekoloških razloga. Naime, kako su često visokonaponski aparati (dalje u tekstu VN aparati) oklopljeni i iznutra izolirani plinom SF₆, pri neuspjelom ispitivanju moglo bi doći do ispuštanja plina u atmosferu, što nikako nije povoljno jer je plin SF₆ najštetniji poznati staklenički plin (oko 24000 puta štetniji od plina CO₂).

U samom proračunu, pretpostavlja se da je ispitni objekt sastavljen od glavne komore, odnosno ispitivanog uređaja i komore u koju se on montira u postrojenju - vanjske komore koja služi za samo ispitivanje. Vanjska komora štiti pri ispitivanju i povezana je s glavnom membranom putem membrane koja se otvara jednom kada se u glavnoj, odnosno prekidnoj komori dostigne dovoljno velik tlak. Jednom kada je otvor membrane otvoren, on ostaje otvoren te omogućuje smanjenje tlaka i temperature u lučnoj komori, dok se u vanjskoj komori oba parametra povećavaju. Osim toga, postoji i posljednja sigurnosna membrana na metalnom plaštu vanjske komore a koji služi otpuštanju fluida ukoliko se tlak u vanjskoj komori poveća iznad iznosa koji to komora može podnijeti. Osim takve konfiguracije, moguće je imati i više komora, što bi zahtijevalo dodatne preinake u programu koji radi proračun porasta tlaka i temperature.

1.2. Osnovni fizikalni model s konstantnim parametrima plina

Kako bi se dobio zadovoljavajući model koji bi se mogao koristiti u kompjuterskim simulacijama i proračunima, potrebno je početi od osnovnog modela s jednostavnim parametrima i jednažbama. Nakon što je postavljen takav temeljni model, on se proširuje dodatnim pojavama, promjenjivim parametrima plina, evaporacijom elektroda između kojih se javlja električni luk, ablacijom izolatora koji postoji u kućištu i držačima elektroda, te egzotermnom reakcijom između isparenog materijala elektroda i plina SF₆ [5].

Kao što je prije spomenuto, prostor modela se dijeli na tri dijela, koji je, ukoliko se ukaže potreba, moguće proširiti na više segmenata, što nije obuhvaćeno ovim radom. Na slici 1.2.1. prikazana je prostorna podjela na 3 segmenta, komore ili prostora. Sam sklopni aparat, odnosno ispitno kućište nalazi se u prvom prostoru, lučnoj komori, te tu nastaje električni luk između elektroda različitih potencijala. Ovo je ujedno i jedini prostor gdje se izvana dovodi električna energija, koja se dalje pretvara u toplinsku i izaziva porast temperature i tlaka u komori.



Slika 1.2.1. Prostorna podjela osnovnog modela

Oko lučne komore postavljena je vanjska komora, na slici nazvana ispušni prostor koje predstavlja zaštitno kućište tijekom ispitivanja. Taj segment služi za preuzimanje toplinske energije, odnosno tlaka koji se javlja u lučnom prostoru, te

je s prvom komorom povezan s membranom koja se otvara i ostaje otvorena nakon što je u prvom prostoru dostignut dovoljno visoki tlak (tlak prorade). Dalje, oko vanjske komore (ispušnog prostora), postoji i zadnji segment, odnosno prostorija postrojenja, također s prethodnom komorom povezana membranom koja ima vlastiti tlak prorade nakon čega se ona otvara i dalje ostaje otvorena.

Cijeli osnovni model karakteriziraju konstantni termodinamički parametri medija (plina) kojime su komore ispunjene, te se ne uzimaju u obzir kompleksne pojave, već samo prijenos energije iz jednog u drugi prostor. Specifični toplinski kapaciteti pri konstantnom tlaku i temperaturi (T) se uzimaju kao konstantne veličine (1, 2):

$$h = C_p T \quad (1)$$

$$u = C_v T \quad (2)$$

U jednadžbama (1) i (2) h označava specifičnu entalpiju plina, u specifičnu unutarnju entalpiju plina, C_p specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka, te C_v specifični toplinski kapacitet kod konstantnog volumena. Kako se termodinamički parametri plina (specifični toplinski kapaciteti C_p , C_v , adijabatski koeficijent κ i specifična plinska konstanta R_s) ne mijenjaju s temperaturom i tlakom (što nije točno u stvarnosti), model je primjenjiv samo za temperature plina SF_6 do 2000K i zraka do 6000K.

U tablici 1.2.1. dan je popis varijabli, pripadajućih jedinica i opisi varijabli koje se koriste u osnovnom modelu prije i nakon prorade membrane.

Tablica 1.2.1. Varijable koje se koriste u osnovnom modelu

Oznaka varijable	Mjerna jedinica	Opis
κ	-	omjer između C_p i C_v (adijabatski koeficijent)
τ	s	vremenska konstanta istosmjerne komponente struje
φ	rad	kut nastanka kratkog spoja
α_{12}	-	koeficijent istjecanja (uzima u obzir smanjenje presjeka otvora membrane)
ρ_{12}	kg/m ³	gustoća u otvoru membrane

Δm_1	kg	promjena mase u lučnom prostoru u intervalu Δt
Δm_{12}	kg	masa plina koja je prešla iz lučnog prostora u ispušni prostor u intervalu Δt
Δm_2	kg	promjena mase u ispušnom prostoru u intervalu Δt
Δm_{23}	kg	masa plina koja je prešla iz ispušnog prostora u prostoriju postrojenja u intervalu Δt
ΔQ_1	J	udio električne energije luka koji se utroši na zagrijavanje plina
ΔT_1	K	porast temperature u lučnom prostoru u intervalu Δt
ΔT_2	K	Porast temperature u ispušnom prostoru u intervalu Δt
ΔW_{el}	J	električna energija luka u vremenskom intervalu Δt
A_{12}	m^2	presjek otvora između lučnog i ispušnog prostora
A_{12}	m^2	površina presjeka otvora membrane
A_{23}	m^2	presjek otvora između ispušnog prostora i prostorije postrojenja
C_p	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka
C_v	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet kod konstantnog volumena
d	cm	razmak između središta faznih vodiča
D	mm	najmanji razmak između vodiča i kućišta
h	J/kg	specifična entalpija plina
i_R	A	linijska struja faze R
I_{rms}	A	struja kratkog spoja
i_S	A	linijska struja faze S
i_T	A	linijska struja faze T
k_p	-	koeficijent koji pokazuje koliko se od električne snage luka utroši na zagrijavanje plina
M	kg/mol	molarna masa
m_{10}	kg	početna masa plina u lučnom prostoru
m_{12}	kg/s	maseni protok između lučnog i ispušnog prostora
m_{23}	kg/s	maseni protok između ispušnog prostora i prostorije postrojenja
p_1	Pa	tlak u lučnom prostoru
p_1^*	Pa	kritični tlak (tlak prorade membrane)

p_{10}	Pa	početni tlak u lučnom prostoru
p_{12}	Pa	tlak plina u otvoru membrane
p_2	Pa	tlak u ispušnom prostoru
p_3	Pa	tlak prostorije postrojenja
P_{el}	W	električna snaga tijekom lučnog kvara
Q_1	J	energija luka
R_s	J/(kgK)	specifična plinska konstanta
R_u	J/(molK)	univerzalna plinska konstanta
T	K	temperatura
T_1	K	temperatura u lučnom prostoru
T_{10}	K	početna temperatura u lučnom prostoru
T_2	K	temperatura u ispušnom prostoru
T_3	K	temperatura prostorije postrojenja
u	J/kg	specifična unutarnja energija plina
U_{arc}	V	prosječna vrijednost napona luka tijekom lučnog kvara
u_R	V	napon faze R
u_S	V	napon faze S
u_T	V	napon faze T
V_1	m^3	volumen lučnog prostora
V_2	m^3	volumen ispušnog prostora
V_3	m^3	volumen prostorije postrojenja
w_{12}	m/s	brzina istjecanja kroz otvor membrane
W_{el}	J	ukupna električna energija tijekom lučnog kvara trajanja t

C_p , C_v , R_s i κ se u osnovnom modelu smatraju konstantnima, a doprinos toplinske reakcije (endotermne ili egzotermne) na porast tlaka i temperature uzima se u obzir povećanjem faktora k_p koji pokazuje koliko se električne energije luka troši na zagrijavanje plina. Za elektrode od bakra k_p je između 0.5 i 0.7, a za elektrode od aluminija, k_p može biti i veći od 1, čak do 1.6.

U tablici 1.2.2. dane su vrijednosti parametara C_p , C_v , R_s i κ za zrak i plin SF_6 pri temperaturi od 300K i tlaku 0.1MPa, približno sobnoj temperaturi i tlaku.

Tablica 1.2.2. Termodinamička svojstva zraka i plina SF₆ pri T=300K i p=0.1MPa

Oznaka	Opis	Jedinica	Zrak	SF ₆
C _v	specifični toplinski kapacitet kod konstantnog volumena	J/(kgK)	716.000	608.0000
C _p	specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka	J/(kgK)	1005.000	665.0000
κ	adijabatski koeficijent	-	1.403	1.0936
R _s	specifična plinska konstanta	J/(kgK)	287.000	56.9000
M	molarna masa	kg/mol	0.029	0.1460

1.2.1. Proračun rasta tlaka i temperature prije prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora

Prije prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora, porast temperature se računa prema:

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta Q_1}{m_{10} C_v} \quad (3)$$

Temperatura i tlak, odnosno njihov porast u lučnom prostoru nakon intervala Δt , prije prorade membrane računaju se prema izrazima (5) i (6). Jednadžbom (4) dana je početna masa plina u lučnom prostoru, za što su potrebne početna temperatura i tlak u komori.

$$m_{10} = \frac{p_{10} V_1}{R_s T_{10}} \quad (4)$$

$$T_1(t + \Delta t) = T_1(t) + \Delta T_1 \quad (5)$$

$$p_1(t + \Delta t) = \frac{(\kappa - 1)}{V_1} m_{10} C_v T_1(t + \Delta t) \quad (6)$$

Do sada se može vidjeti princip računanja varijabli. Naime u programskom računanju, odnosno simulaciji na računalu, sve varijable se računaju korak po korak, gdje je razmak pojedinih koraka određen vremenskim intervalom Δt . Kasnije će detaljnije biti objašnjeno izvođenje računa pomoću računala.

Specifična plinska konstanta, R_s , koja je potrebna u jednadžbi (4) računa se pomoću izraza (7):

$$R_s = \frac{R_u}{M} \quad (7)$$

Udio električne energije luka koji se potroši na zagrijavanje plina u komori i koji je potreban u izrazu (3), također određen intervalom Δt definiran je izrazom (8):

$$\Delta Q_1 = k_p P_{el} \Delta t \quad (8)$$

Kako je potrebno izračunati električnu energiju koja se pridonosi sustavu, izrazima (9) - (11) dan je proračun električne snage iz linijskih struja i faznih napona, električna energija luka u vremenskom razmaku Δt , te ukupna električna energija tijekom trajanja lučnog kvara, odnosno računalnog proračuna. U računalnim simulacijama, integral iz formule (11) računa se zbrajanjem pojedinih energija računatih u vremenskim razmacima iz svake iteracije.

$$P_{el} = u_R i_R + u_S i_S + u_T i_T \quad (9)$$

$$\Delta W_{el} = (u_R i_R + u_S i_S + u_T i_T) \cdot \Delta t \quad (10)$$

$$W_{el} = \int_0^t (u_R i_R + u_S i_S + u_T i_T) \cdot \Delta t \quad (11)$$

Izrazi (9) - (11) koriste se kada su dane mjerene vrijednosti struja i napona iz pokusa unutarnjeg luka, odnosno kada su poznati oscilogrami izmjerenih vrijednosti. Izrazi vrijede za tropolni lučni kvar, a ukoliko nisu dane mjerene vrijednosti, snaga i energija se za tropolni kvar pri istovremenom gorenju dva luka računaju prema formulama (12) - (14):

$$P_{el} = 0.5 \cdot U_{arc} (|i_R| + |i_S| + |i_T|) \quad (12)$$

$$\Delta W_{el} = 0.5 \cdot U_{arc} (|i_R| + |i_S| + |i_T|) \cdot \Delta t \quad (13)$$

$$W_{el} = 0.5 \cdot U_{arc} \int_0^t (|i_R| + |i_S| + |i_T|) \cdot \Delta t \quad (14)$$

Iz izraza (12) - (14) vidi se da je potrebno znati prosječnu vrijednost napona luka tijekom kvara, U_{arc} . Iz oscilograma se prosječna vrijednost luka može odrediti izjednačavanjem jednadžbi (11) i (14), odnosno (11) i (17), ovisno o tome radi li se o tropolnoj grešci s dva ili tri luka, redom. Ako se radi o tropolnom kvaru gdje

istovremeno gore tri luka (između svake elektrode), tada se snaga i energija računaju po formulama (15) - (17):

$$P_{el} = U_{arc}(|i_R| + |i_S| + |i_T|) \quad (15)$$

$$\Delta W_{el} = U_{arc}(|i_R| + |i_S| + |i_T|) \cdot \Delta t \quad (16)$$

$$W_{el} = U_{arc} \int_0^t (|i_R| + |i_S| + |i_T|) \cdot \Delta t \quad (17)$$

Ako se radi o grešci gdje se pojavljuje samo jedan luk (jednofazna greška s jednim lukom), između dvije elektrode, koriste se jednaki izrazi kao i pri pojavi tri luka, (15) - (17), no umjesto zbroja apsolutnih vrijednosti struja tri faze uzima se samo apsolutna vrijednost jedne faze.

U_{arc} , prosječna vrijednost napona luka tijekom kvara se u slučaju kada nisu poznati mjereni podaci, računa se iz izraza (18) ako se radi o zraku, odnosno iz izraza (19) ako se radi o plinu SF_6 .

$$U_{arc} = d \cdot (30 + 0.5 \cdot I_{rms}) \leq 40 \frac{V}{cm} \quad (18)$$

$$U_{arc} = d \cdot (30 + 0.5 \cdot I_{rms}) \leq 50 \frac{V}{cm} \quad (19)$$

Za luk u plinu SF_6 i struje kratkog spoja za koje vrijedi $I_{rms} \geq 40kA$ gradijent napona luka, U_{arc}/d , jednak je $50V/cm$. Radi li se o jednopolnom lučnom kvaru u aluminijskim kućištima punjenim plinom SF_6 pri 1 do 4 bara, napon luka koji uključuje i k_p faktor dobiva se iz izraza (20):

$$U_{arc} = 250 + (D - 50) + 4I_{rms} \quad (20)$$

Vrijednosti faznih struja vodiča pri pojavi kratkog spoja slijede jednadžbe (21) - (23). Pretpostavlja se simetričan sustav, a za vrijednost vremenske konstante istosmjerne komponente struje uzima se $0.045s$.

$$i_R = \sqrt{2} \cdot I_{rms} \left[\sin(\omega t + \phi) - \sin(\phi) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (21)$$

$$i_S = \sqrt{2} \cdot I_{rms} \left[\sin\left(\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\phi - \frac{2\pi}{3}\right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (22)$$

$$i_T = \sqrt{2} \cdot I_{rms} \left[\sin\left(\omega t + \phi - \frac{4\pi}{3}\right) - \sin\left(\phi - \frac{4\pi}{3}\right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (23)$$

Dakle, da bi se odredio porast tlaka i temperature iz izraza (5) i (6), najprije je potrebno odrediti specifičnu plinsku konstantu, R_s i početnu masu plina u lučnom prostoru (4) i (7). Nakon toga se ili uzima prosječna vrijednost napona luka iz mjerenih vrijednosti, ili računa iz izraza (18) - (20). Dalje, uzima se mjerena vrijednost snage električnog luka, ili računa iz izraza (9), (12) ili (15), ovisno o tome radi li se o jednofaznoj grešci ili trolejnoj grešci s dva ili tri luka između elektroda. Konačno, moguće je izračunati udio električne energije luka koji se potroši na zagrijavanje plina u komori (8) i porast temperature u lučnom prostoru (3) čime se dobivaju konačni porasti temperature i tlaka (5) i (6).

Sve do sada korištene formule vrijede samo u slučaju kada nije dosegnut tlak prorade membrane između lučne i ispušne komore. Jednom kada se taj tlak dostigne, potrebno je koristiti modificirane izraze dane u sljedećem potpoglavlju.

1.2.2. Proračun rasta tlaka i temperature nakon prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora

Nakon prorade membrane, tj. kad je dosegnut kritični tlak membrane, ona se otvara i ostaje otvorena (odnosno puca). Ako je omjer tlakova između lučnog i ispušnog prostora p_1/p_2 veći od 1.89 za zrak ili veći od 1.7 za plin SF₆, tlak u otvoru membrane, p_{12} , jednak je kritičnom tlaku p_1^* :

$$p_{12} = p_1^* = p_1 \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (24)$$

Ako je omjer tlakova između lučnog i ispušnog prostora p_1/p_2 manji od 1.89 za zrak ili manji od 1.7 za SF₆, tlak u otvoru membrane p_{12} je jednak tlaku u ispušnom volumenu p_2 :

$$p_{12} = p_2 \quad (25)$$

Brzina strujanja plina kroz membranu, odnosno otvor membrane računa se iz izraza (26):

$$w_{12} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \left(1 - \left(\frac{p_{12}}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)} \quad (26)$$

Iz tlakova se računa gustoća plina koji prolazi kroz otvor membrane:

$$\rho_{12} = \rho_1 \left(\frac{p_{12}}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (27)$$

Masa plina koja je prešla iz lučnog prostora u ispušni prostor u intervalu Δt iznosi:

$$\Delta m_{12} = \alpha_{12} A_{12} \rho_{12} w_{12} \Delta t \quad (28)$$

Promjena mase plina u lučnoj komori u intervalu Δt iznosi:

$$\Delta m_1 = -\Delta m_{12} \quad (29)$$

Masa plina koji se nalazi u početnom prostoru nakon intervala Δt dobiva se iz izraza (30):

$$m_1(t + \Delta t) = m_1(t) + \Delta m_1 \quad (30)$$

Porast temperature u lučnoj komori nakon prorade membrane u intervalu Δt je:

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta Q_1 - \Delta m_{12} (C_p - C_v) T_1(t)}{m_1(t) C_v} \quad (31)$$

Konačno, nakon prorade membrane temperatura i tlak početne komore na kraju intervala Δt mogu se dobiti iz izraza (32) i (33):

$$T_1(t + \Delta t) = T_1(t) + \Delta T_1 \quad (32)$$

$$p_1(t + \Delta t) = \frac{\kappa - 1}{V_1} \cdot m_1(t + \Delta t) \cdot C_v \cdot T_1(t + \Delta t) \quad (33)$$

U ovom potpoglavlju je do sada razrađen postupak dobivanja porasta temperature i tlaka u početnoj komori nakon prorade membrane koja spaja lučni i ispušni prostor. U nastavku su dani izrazi pomoću kojih se računaju porast temperature i tlaka u ispušnoj komori.

Masa plina koja je prešla iz ispušnog prostora u prostoriju postrojenja u vremenskom intervalu Δt , ukoliko je otvor između ispušne komore i postrojenja otvoren, računa se pomoću formule (34):

$$\Delta m_{23} = \alpha_{23} A_{23} \rho_{23} w_{23} \Delta t \quad (34)$$

Masu plina koji izlazi iz ispušne komore često nije ni potrebno računati, jer se često vanjska membrana ni ne stavlja, odnosno plašt ispušne komore radi se bez otvora, ili se pretpostavlja da tlak neće dostići vrijednost da vanjska membrana proradi. No ukoliko se to želi uzeti u obzir, promjena mase plina, Δm_{23} , računa se analogno masi plina koja prelazi iz lučne u ispušnu komoru.

Promjena mase plina u ispušnom prostoru u vremenskom intervalu, te masa plina u ispušnom prostoru nakon što je vremenski interval prošao, računaju se iz izraza (35) i (36):

$$\Delta m_2 = \Delta m_{12} - \Delta m_{23} \quad (35)$$

$$m_2(t + \Delta t) = m_2(t) + \Delta m_{12} - \Delta m_{23} \quad (36)$$

Porast temperature u ispušnom prostoru tijekom intervala Δt iznosi:

$$\Delta T_2 = \frac{\Delta m_{12} (C_p T_1(t) - C_v T_2(t)) - \Delta m_{23} (C_p - C_v) T_2(t)}{m_2(t) C_v} \quad (37)$$

Na kraju, temperatura i tlak u ispušnom prostoru na kraju intervala Δt dobiju se iz jednadžbi (38) i (39):

$$T_2(t + \Delta t) = T_2(t) + \Delta T_2 \quad (38)$$

$$p_2(t + \Delta t) = \frac{\kappa_2 - 1}{V_2} \cdot m_2(t + \Delta t) C_v T_2(t + \Delta t) \quad (39)$$

1.3. Model s konstantnim parametrima plina, evaporacijom elektroda, ablacijom izolatora i egzotermnom reakcijom

Kako na visokim temperaturama dolazi od isparavanja elektroda i izolatora čime dolazi i do egzotermne reakcije između isparenog materijala i fluida u komorama, točniji proračun dobiva se uzimanjem u obzir ovih pojava. Time se dopunjuje osnovni model predstavljen u potpoglavlju 1.2. Termodinamičke varijable dobivene mješavine - C_p , C_v i κ računaju se linearnom ekstrapolacijom u ovisnosti o masenim koncentracijama pojedine primjese, iako su moguće i drukčije

ekstrapolacije (kvadratna, kubna...). Ako je lučni prostor ispunjen plinom SF₆ dolazi do kemijske reakcije između plina i isparenog materijala, što se uzima u obzir tijekom proračuna u ovome modelu. Za izolacijski materijal, koji je često sastavljen uglavnom od epoksidne smole i punila na bazi stakla, se pretpostavlja da pri ablaciji ploča nastaje jedino plin metan, CH₄, što je dovoljno točno za proračun.

Električna energija loka troši se na zagrijavanje mješavine i isparavanje elektroda i izolatora. To znači da zbroj koeficijenata k_p , k_{evap} i k_{abl} uvijek mora biti jednak 1, prema zakonu o očuvanju energije. Faktori evaporacije i ablacije, te k_p ovise o materijalu i određuju se eksperimentalno. Dalje navedeni račun vrijedi, kao i objašnjeni osnovni model za temperature plina SF₆ do 2000K i temperature zraka do 6000K. U tablici 2 dane su nove varijable koje nisu korištene kod osnovnog modela, iako se u proračunu još uvijek koriste i varijable definirane u osnovnom modelu tablicom 1.3.1.

Tablica 1.3.1. Proširenje skupa varijabli iz tablice 1 za dopunjeni model s evaporacijom elektroda, ablacijom izolatora i egzotermnom reakcijom

Oznaka varijable	Mjerna jedinica	Opis
ρ_{ins}	kg/m ³	specifična gustoća čvrstog izolacijskog materijala
κ_{mix}	-	adijabatski koeficijent mješavine
Δm_{abl}	kg	masa isparenog (plinovitog) izolacijskog materijala u intervalu Δt
Δm_{evap}	kg	masa isparenog materijala elektroda u intervalu Δt
ΔQ_{ex}	J	dodatna toplina uslijed egzotermne reakcije
C_{abl}	-	Masena koncentracija isparenog izolacijskog materijala
C_{evap}	-	masena koncentracija isparenog materijala elektroda u mješavini
C_{gas}	-	masena koncentracija plina SF ₆ u mješavini
C_{pevap}	J/kgK	specifični toplinski kapacitet isparenog materijala elektroda kod konstantnog tlaka

C_{pmix}	J/kgK	specifični toplinski kapacitet mješavine kod konstantnog tlaka
C_{vabl}	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet isparenog izolacijskog materijala kod konstantnog volumena
C_{vevap}	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet isparenog materijala elektroda kod konstantnog volumena
C_{vmix}	J/kgK	specifični toplinski kapacitet mješavine kod konstantnog volumena
k_{abl}	-	udio električne energije luka koji se utroši na ablaciju čvrstog izolacijskog materijala
k_{evap}	-	udio električne energije luka koji se utroši na isparavanje elektroda
m_1	kg	ukupna masa u lučnom prostoru (plin SF ₆ + ispareni metal + isparena izolacija)
m_{abl}	kg	masa isparenog izolacijskog materijala
m_{evap}	kg	masa isparenog materijala elektroda
m_{gas}	kg	masa plina SF ₆ u lučnom prostoru
T_{abl}	K	temperatura ablacije (isparavanja) izolacijskog materijala
T_{evap}	K	temperatura isparavanja materijala elektroda
V_{abl}	m ³ /J	volumen disociranog čvrstog materijala po jedinici energije
W_{abl}	J/kg	specifična energija disocijacije izolacijskog materijala
W_{evap}	J/kg	specifična energija koja je potrebna za taljenje, isparavanje te zagrijavanje materijala elektroda do T_{evap}
W_{ex}	J/kg	specifična energija egzotermne reakcije između isparenog metala i SF ₆ plina/plazme
η_{CH4}	-	udio plina (CH ₄) u isparenom materijalu
η_{filler}	-	udio punila u izolatoru

1.3.1. Proračun rasta tlaka i temperature prije prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora

Masa isparenog materijala elektroda u intervalu Δt računa se prema:

$$\Delta m_{evap} = \frac{k_{evap} P_{el} \Delta t}{W_{evap}} \quad (40)$$

Specifična energija koja je potrebna za taljenje, isparavanje te zagrijavanje materijala elektroda do temperature isparavanja elektroda je dana u tablici 1.3.2.

Tablica 1.3.2. Isparavanje za razne materijale elektroda i pripadajuće apsorbirane energije

Faze i W_{evap}	Cu, [MJ/kg]	Al, [MJ/kg]	Fe, [MJ/kg]
Faza 1: zagrijavanje	0.41	0.57	0.68
Faza 2: taljenje	0.21	0.40	0.27
Faza 3: zagrijavanje	0.73	1.97	1.00
Faza 4: isparavanje	4.83	10.79	6.09
Ukupna apsorbirana energija [MJ/kg]	6.18	13.73	8.04

Dodatna toplina uslijed egzotermne (endotermne) reakcije između isparenog metala i plina prikazana je jednadžbom (41) i predstavlja dodatan izvor energije:

$$\Delta Q_{ex} = W_{ex} \Delta m_{evap} \quad (41)$$

Specifična energija egzotermne reakcije između isparenog metala i SF_6 plazme (W_{ex}) za razne metale dana je u tablici 1.3.3. Pri spajanju jednog mola aluminija (26.98g) sa plinom SF_6 oslobađa se 850kJ toplinske energije, prema prvom retku navedene tablice. Isto tako, može se vidjeti da se pri reakciji isparenog aluminija sa zrakom, ili SF_6 plinom otpušta više energije (zadnji stupac tablice) nego što je potrebno dovesti aluminiju kako bi on ispario, što znači da je to egzotermna reakcija. Kod bakra i željeza to nije slučaj, te se kod njih događaju endotermne reakcije.

Tablica 1.3.3. Specifične topline otpuštene tijekom egzotermnih/endotermnih reakcija

Element	Specifična energija isparavanja [MJ/kg]	Molarna masa, [g/mol]	Redoks reakcija	Specifična generirana toplina, [MJ/kg]
Al	13.73	26.98	$Al + \frac{3}{2}SF_6 \rightarrow AlF_3 + \frac{3}{2}SF_4 + 850 \text{ kJ}$	31.5
			$Al + \frac{3}{4}O_2 \rightarrow \frac{1}{2}Al_2O_3 + 837 \text{ kJ}$	31
Cu	6.18	63.54	$Cu + \frac{1}{4}O_2 \rightarrow \frac{1}{2}Cu_2O + 75 \text{ kJ}$	1.2
Fe	8.04	55.85	$Fe + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow FeO + 250 \text{ kJ}$	4.5

Udio električne energije luka koji se utroši na zagrijavanje plina SF₆ iznosi:

$$\Delta Q_1 = k_p P_{el} \Delta t + \Delta Q_{ex} \quad (42)$$

Da bi se odredila promjena mase isparene izolacije, potrebno je odrediti volumen disociranog čvrstog materijala po jedinici energije:

$$V_{abl} = \frac{1}{W_{abl} \rho_{ins}} \quad (43)$$

Specifična energija disocijacije izolacijskog materijala (W_{abl}) ovisi o materijalu a u radu je korištena vrijednost 95.7kJ/g. Masa isparenog izolacijskog materijala u intervalu Δt je:

$$\Delta m_{abl} = k_{abl} P_{el} \Delta t V_{abl} \rho_{ins} \eta_{CH_4} (1 - \eta_{filler}) \quad (44)$$

Masa plina SF₆ u lučnom prostoru, isparenog materijala elektroda i izolacijskog materijala nakon intervala Δt dani su izrazima (45) - (47):

$$m_{gas}(t + \Delta t) = m_{gas}(t) \quad (45)$$

$$m_{evap}(t + \Delta t) = m_{evap}(t) + \Delta m_{evap} \quad (46)$$

$$m_{abl}(t + \Delta t) = m_{abl}(t) + \Delta m_{abl} \quad (47)$$

Ukupna masa mješavine u lučnom prostoru nakon intervala Δt je zbroj pojedinih masa:

$$m_1(t + \Delta t) = m_{gas}(t + \Delta t) + m_{evap}(t + \Delta t) + m_{abl}(t + \Delta t) \quad (48)$$

Masene koncentracije plina SF_6 , isparenog materijala elektroda i isparenog izolacijskog materijala u mješavini određuju se pomoću izraza (49) - (51):

$$c_{gas}(t + \Delta t) = \frac{m_{gas}(t + \Delta t)}{m_1(t + \Delta t)} \quad (49)$$

$$c_{evap}(t + \Delta t) = \frac{m_{evap}(t + \Delta t)}{m_1(t + \Delta t)} \quad (50)$$

$$c_{abl}(t + \Delta t) = \frac{m_{abl}(t + \Delta t)}{m_1(t + \Delta t)} \quad (51)$$

U tablici 1.3.4. dane su vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta za aluminij, bakar i metan te temperature isparavanja.

Tablica 1.3.4. Vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta i temperature isparavanja za materijale elektroda i metan

Oznaka	Mjerna jedinica	Element	Opis	Vrijednost
C_{vevap}	J/(kgK)	Al	Specifični toplinski kapacitet kod konstantnog volumena	470
C_{pevap}	J/(kgK)	Al	Specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka	793
T_{evap}	K	Al	Temperatura isparavanja	2720
C_{vevap}	J/(kgK)	Cu	Specifični toplinski kapacitet kod konstantnog volumena	201
C_{pevap}	J/(kgK)	Cu	Specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka	384
T_{evap}	K	Cu	Temperatura isparavanja	2870
C_{vabl}	J/(kgK)	CH ₄	Specifični toplinski kapacitet kod konstantnog volumena	1633
C_{pabl}	J/(kgK)	CH ₄	Specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka	2225

Specifični toplinski kapacitet mješavine kod konstantnog volumena iznosi:

$$C_{vmix}(t + \Delta t) = c_{gas}(t + \Delta t)C_v + c_{evap}(t + \Delta t)C_{vevap} + c_{abl}(t + \Delta t)C_{vabl} \quad (52)$$

Specifični toplinski kapacitet mješavine kod konstantnog tlaka pak iznosi:

$$C_{pmix}(t + \Delta t) = c_{gas}(t + \Delta t)C_p + c_{evap}(t + \Delta t)C_{pevap} + c_{abl}(t + \Delta t)C_{pabl} \quad (53)$$

Iz izraza (52) i (53) dobiva se adijabatski koeficijent mješavine:

$$\kappa_{mix}(t + \Delta t) = \frac{C_{pmix}(t + \Delta t)}{C_{vmix}(t + \Delta t)} \quad (54)$$

Porast temperature u lučnom prostoru prije prorade membrane u intervalu Δt se sada može odrediti pomoću formule (55):

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta Q_1 + \Delta m_{evap}C_{vevap}(T_{evap} - T_1(t)) + \Delta m_{abl}C_{vabl}(T_{abl} - T_1(t))}{m_1(t)C_{vmix}(t)} \quad (55)$$

Konačno, mogu se odrediti temperatura i tlak u lučnom prostoru nakon intervala Δt :

$$T_1(t + \Delta t) = T_1(t) + \Delta T_1 \quad (56)$$

$$p_1(t + \Delta t) = \frac{(\kappa_{mix}(t + \Delta t) - 1)}{V_1} \cdot m_1(t + \Delta t)C_{vmix}(t + \Delta t)T_1(t + \Delta t) \quad (57)$$

1.3.2. Proračun rasta tlaka i temperature nakon prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora

Masa plina u kućištu, masa isparenog metala u kućištu i masa isparenog ablacijskog materijala nakon intervala Δt dani su izrazima (58) - (60):

$$m_{gas}(t + \Delta t) = m_{gas}(t) - c_{gas}(t)\Delta m_{12} \quad (58)$$

$$m_{evap}(t + \Delta t) = m_{evap}(t) - c_{evap}(t)\Delta m_{12} \quad (59)$$

$$m_{abl}(t + \Delta t) = m_{abl}(t) - c_{abl}(t)\Delta m_{12} \quad (60)$$

Ukupna masa mješavine, nakon intervala Δt je:

$$m_1(t + \Delta t) = m_{gas}(t + \Delta t) + m_{evap}(t + \Delta t) + m_{abl}(t + \Delta t) \quad (61)$$

Varijable c_{abl} , c_{evap} , c_{gas} i Δm_{12} računaju se kako je već pokazano u jednadžbama (28) i (49) - (51). Porast temperature u kućištu GIS-a nakon prorade lomljive membrane u intervalu Δt iznosi:

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta Q_1 + \Delta m_{evap} c_{vevap} (T_{evap} - T_1(t)) + \Delta m_{abl} c_{vabl} (T_{abl} - T_1(t)) - \Delta m_{12} (c_{pmix}(t) - c_{vmix}(t)) T_1(t)}{m_1(t) c_{vmix}(t)} \quad (62)$$

Temperatura i tlak u lučnoj komori nakon intervala Δt dobiju se iz izraza (56) i (57). Što se tiče ispušne komore, ako se zanemare utjecaji miješanja plinova koji se dobivaju u lučnoj komori ablacijom i evaporacijom, vrijede jednake jednadžbe kao i u osnovnom modelu, u poglavlju 1.2.2. Često se ti utjecaji u ispušnom prostoru mogu zanemariti pošto ne utječu znatno na model, pa je ova pretpostavka opravdana.

1.4. Model s promjenjivim parametrima plina te evaporacijom, ablacijom i egzotermnom reakcijom

Kod modela s promjenjivim parametrima plina, s obzirom na prethodni model, mijenjaju se parametri u i h , gdje h označava specifičnu entalpiju plina, a u specifičnu unutarnju entalpiju plina. To znači da jednadžbe (1) i (2) više ne vrijede. U tablici 1.4.1. definirane su nove varijable koje se koriste u ovome modelu.

Tablica 1.4.1. Varijable korištene kod promjenjivih parametara plina

Oznaka varijable	Mjerna jedinica	Opis
$u_{evap}(p_1, T_{evap})$	J/kg	specifična unutarnja energija isparenog materijala elektroda kod temperature T_{evap} i trenutnog tlaka p_1 u lučnom prostoru
$u_{evap}(p_1, T_1)$	J/kg	specifična unutarnja energija isparenog materijala elektroda kod temperature T_1 i trenutnog tlaka p_1 u

		lučnom prostoru
$u_{abl}(p_1, T_{abl})$	J/kg	specifična unutarnja energija isparenog izolacijskog materijala kod temperature T_{abl} i trenutnog tlaka p_1 u lučnom prostoru
$u_{abl}(p_1, T_1)$	J/kg	specifična unutarnja energija isparenog izolacijskog materijala kod temperature T_1 i trenutnog tlaka p_1 u lučnom prostoru
h_{mix}	J/kg	specifična entalpija mješavine
$u_{mix}(p_1, T_1)$	J/kg	specifična unutarnja energija mješavine
m_{flow12}	kg/s	maseni protok kroz membranu između 1. i 2. komore
h_2	J/kg	specifična entalpija plina SF ₆
u_2	J/kg	specifična unutarnja energija plina SF ₆
C_{v2}	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet fluida u ispušnom prostoru kod konstantnog volumena

1.4.1. Proračun porasta tlaka i temperature prije prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora

Specifični toplinski kapacitet mješavine kod konstantnog volumena i kod konstantnog tlaka, te adijabatski koeficijent mješavine u ovome modelu ovise osim o masenim koncentracijama (c_{gas} , c_{evap} , c_{abl}) i o temperaturi i tlaku (p_1 , T_1):

$$C_{vmix} = f(c_{gas}, c_{evap}, c_{abl}, p_1, T_1) \quad (63)$$

$$C_{pmix} = f(c_{gas}, c_{evap}, c_{abl}, p_1, T_1) \quad (64)$$

$$\kappa_{mix}(t) = \frac{C_{pmix}(t)}{C_{vmix}(t)} \quad (65)$$

Porast temperature u lučnom prostoru prije prorade membrane u intervalu Δt je:

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta Q_1 + \Delta m_{evap}[u_{evap}(p_1, T_{evap}) - u_{evap}(p_1, T_1)] + \Delta m_{abl}[u_{abl}(p_1, T_{abl}) - u_{abl}(p_1, T_1)]}{m_1(t)C_{vmix}(t)} \quad (66)$$

Ostale jednadžbe su dane u poglavljima 1.2. i 1.3. za osnovni model i model s konstantnim parametrima plina.

1.4.2. Proračun porasta tlaka i temperature nakon prorade membrane između lučnog i ispušnog prostora

Masa i maseni protok plina koji je prešao iz lučnog prostora u ispušni prostor u intervalu Δt dani su u izrazima (28) i (67).

$$m_{flow12} = \alpha_{12} A_{12} \rho_{12} w_{12} \quad (67)$$

Porast temperature u lučnom prostoru nakon prorade membrane u intervalu Δt jednak je izrazu (66), s tim da se brojniku razlomka još oduzme vrijednost $\Delta m_{12}(h_{mix} - u_{mix})$. Ako se zanemari miješanje plinova u ispušnom prostoru uslijed ablacije i evaporacije u lučnom prostoru, porast temperature u ispušnom prostoru nakon prorade membrane u intervalu Δt računa se prema:

$$\Delta T_2 = \frac{\Delta m_{12}(h_{mix} - u_2) - \Delta m_{23}(h_2 - u_2)}{m_2(t)C_{v2}} \quad (68)$$

2. Termodinamičke karakteristike plazme

Jednom kad temperatura plina dosegne visoku razinu, dolazi do razgradnje plina te on prelazi u stanje plazme, što još više povećava njegovu vodljivost. U plinu dolazi do kemijskih reakcija između pojedinih elemenata, čime se mijenjaju termodinamička svojstva fluida. Pretpostavlja se lokalna termodinamička ravnoteža, odnosno da su sve čestice fluida zagrijane na jednaku temperaturu. U proračunima su potrebne termodinamičke vrijednosti parametara koje su karakteristične za plin - C_p , R_s , ρ , u i h , a koje ovise o temperaturi, tlaku i masenim koncentracijama elemenata. Te varijable uz određene početne uvjete plina je potrebno poznavati, ili odrediti kako bi se mogli postaviti matematički ili računalni modeli. C_v , R_s i κ se mogu izračunati iz spomenutih parametara prema formulama (69) - (71):

$$R_s = \frac{p}{\rho T} \quad (69)$$

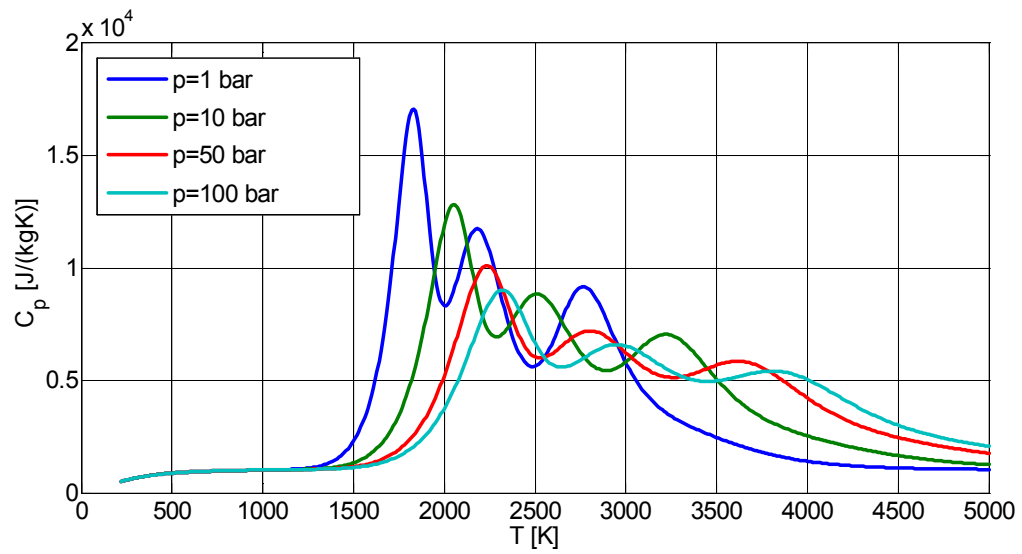
$$C_v = C_p - R_s \quad (70)$$

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v} \quad (71)$$

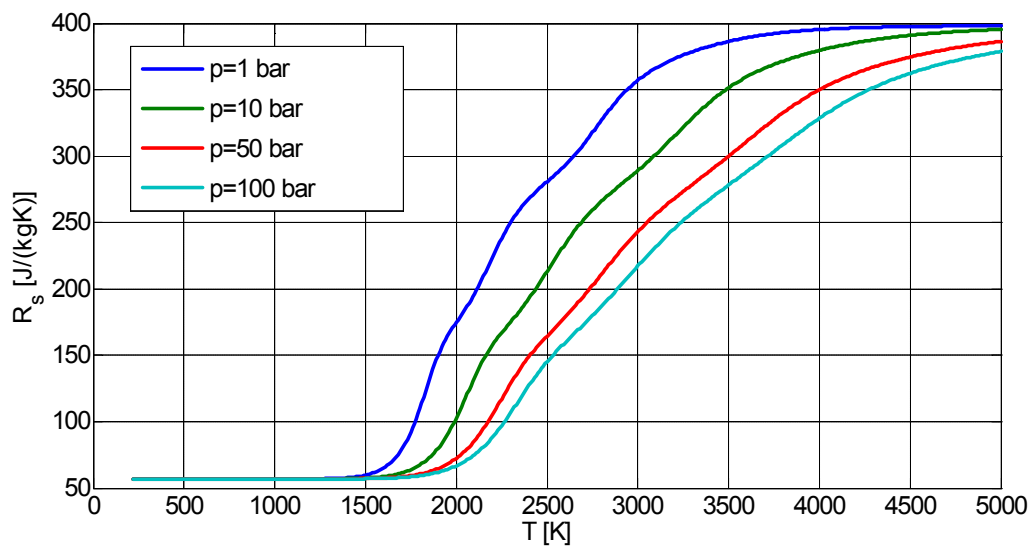
Što se tiče parametara C_p , ρ , u i h , proračun nadilazi opseg ovog rada te se oni često mogu proračunati u ovisnosti o temperaturi i tlaku za potrebne kemijske spojeve ili elemente (npr. SF_6) pomoću drugih računalnih programa, ili pak prateći literaturu iz tog područja. Primjer programa koji računa navedene parametre je besplatna aplikacija NASA CEA, koja se koristi u aerodinamici i termodinamici. Program računa parametre složenih mješavina i predstavlja jedan od novijih programa koji su napravljeni u NASA-inom Glenn istraživačkom centru tijekom posljednjih 45 i više godina [1].

U nastavku su dani rezultati simulacija različitih mješavina plina. Koristeći NASA-in CEA program (ili neki drugi program), moguće je dobiti podatke o mješavinama u određenom broju točaka i, ukoliko je potrebno, ostale točke ekstrapolirati, ovisno o potrebama proračuna [3, 4]. Na slikama 2.1. - 2.5. prikazani su specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka, specifična plinska konstanta, specifična entalpija,

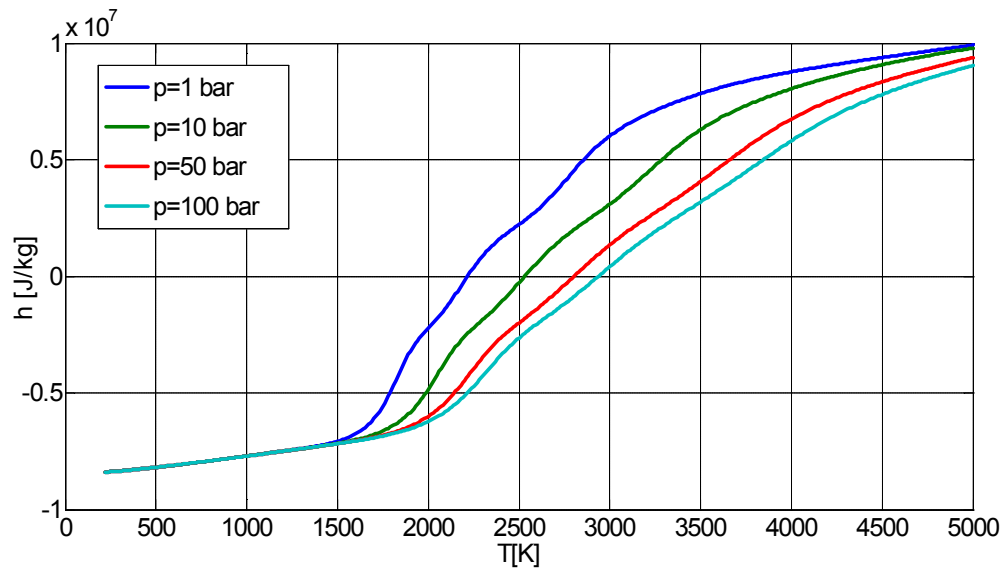
specifična unutarnja energija i gustoća plina SF₆ za različite tlakove u ovisnosti o temperaturi.



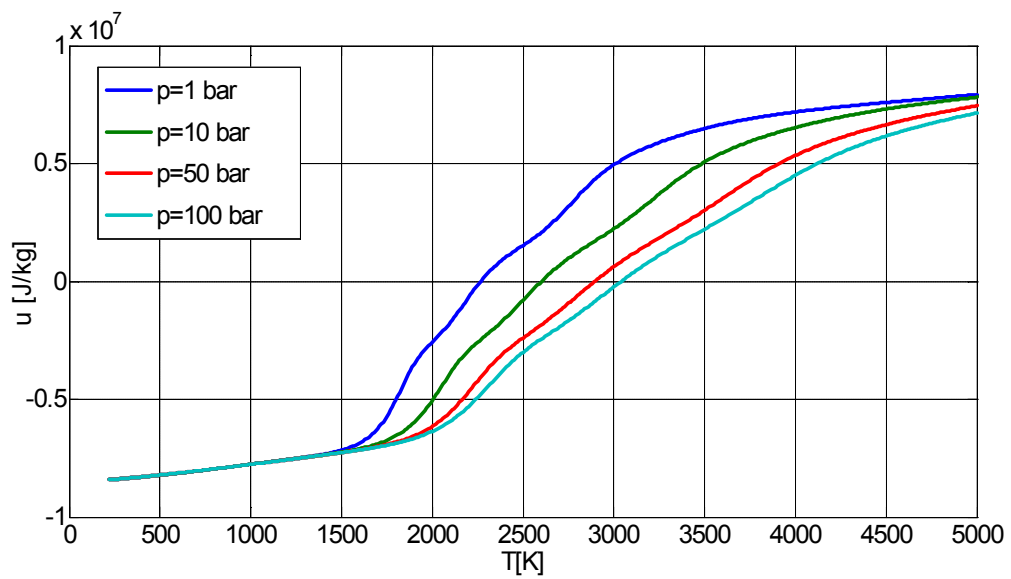
Slika 2.1. Specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka



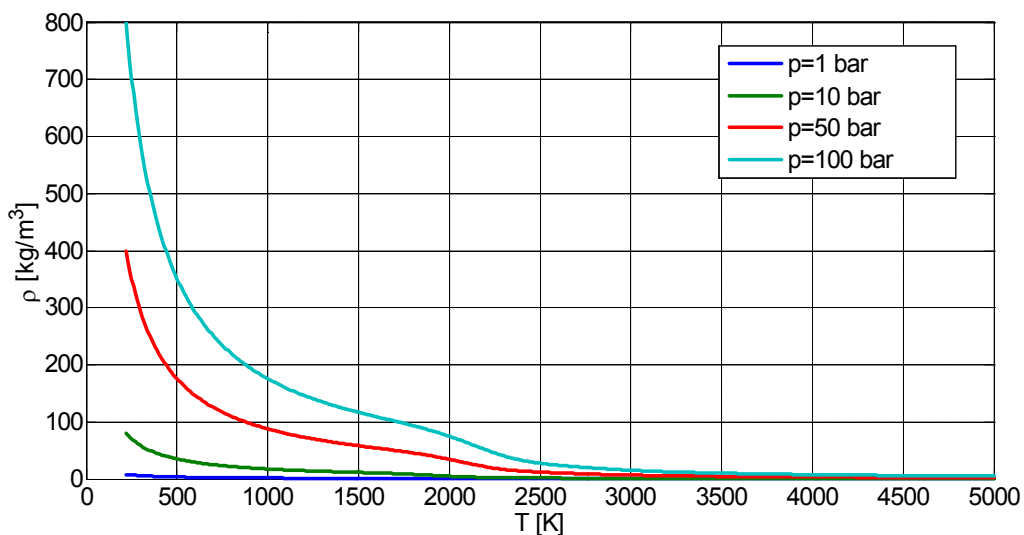
Slika 2.2. Specifična plinska konstanta



Slika 2.3. Specifična entalpija

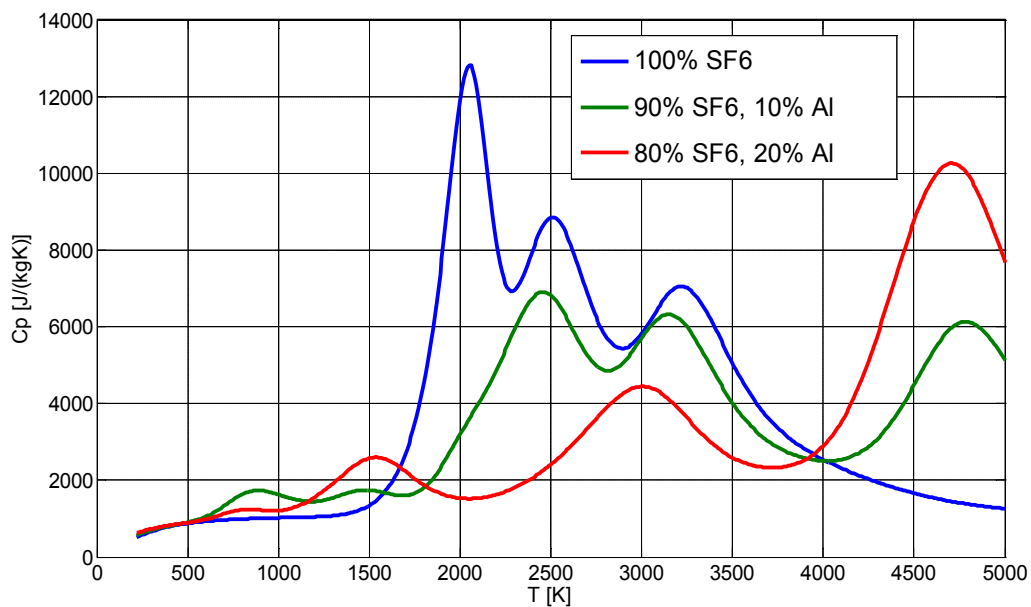


Slika 2.4. Specifična unutarnja energija

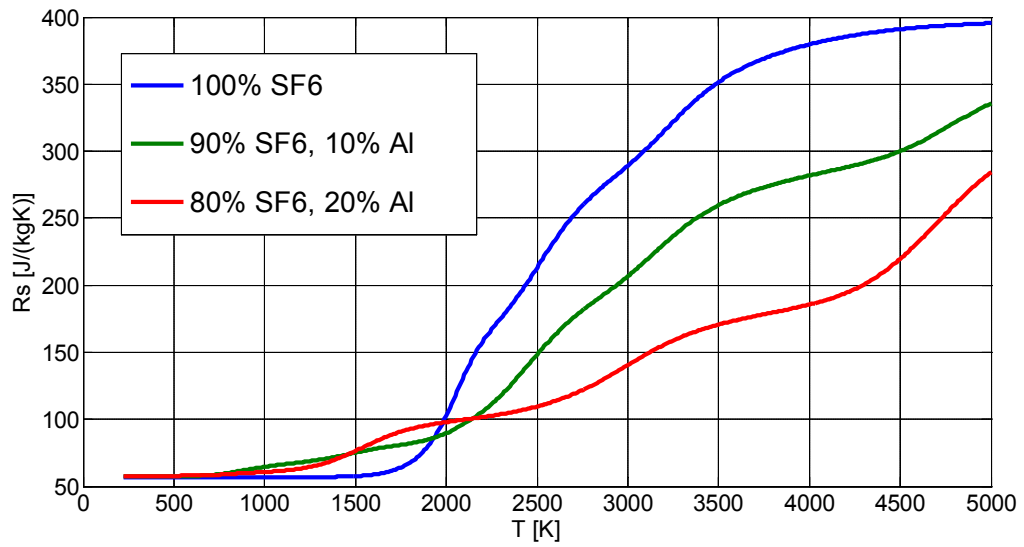


Slika 2.5. Gustoća plina

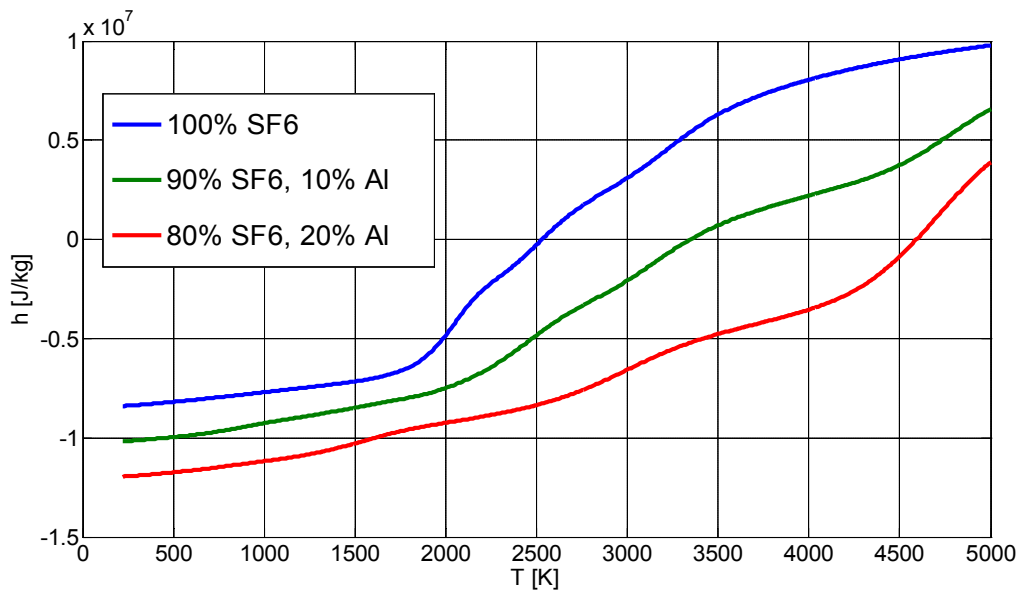
Na slikama 2.6. - 2.10. prikazani su isti parametri, no ovog puta dana je usporedba čistog plina i mješavine plina SF₆ i isparenog aluminija pri tlaku od 10 bara.



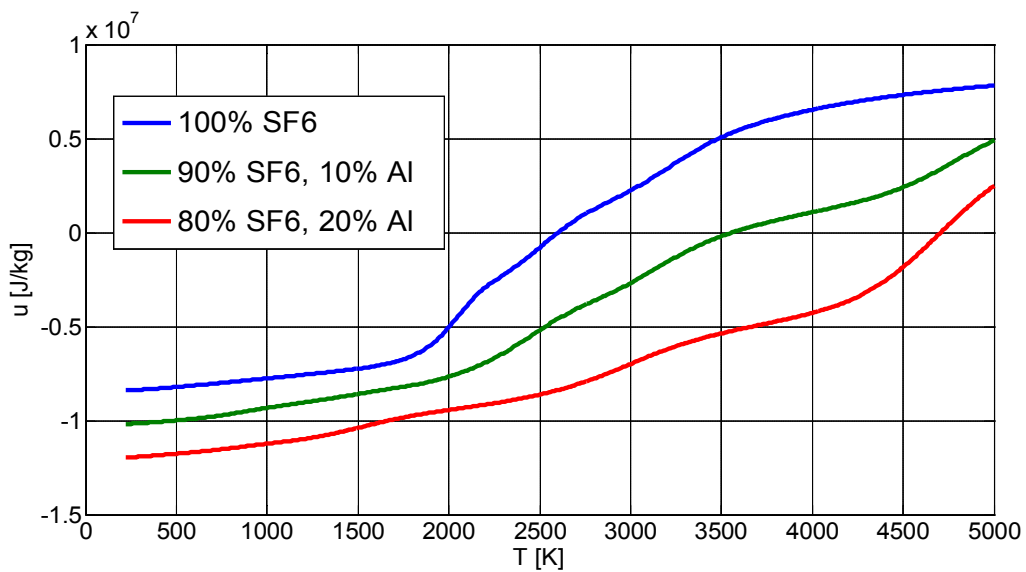
Slika 2.6. Specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka



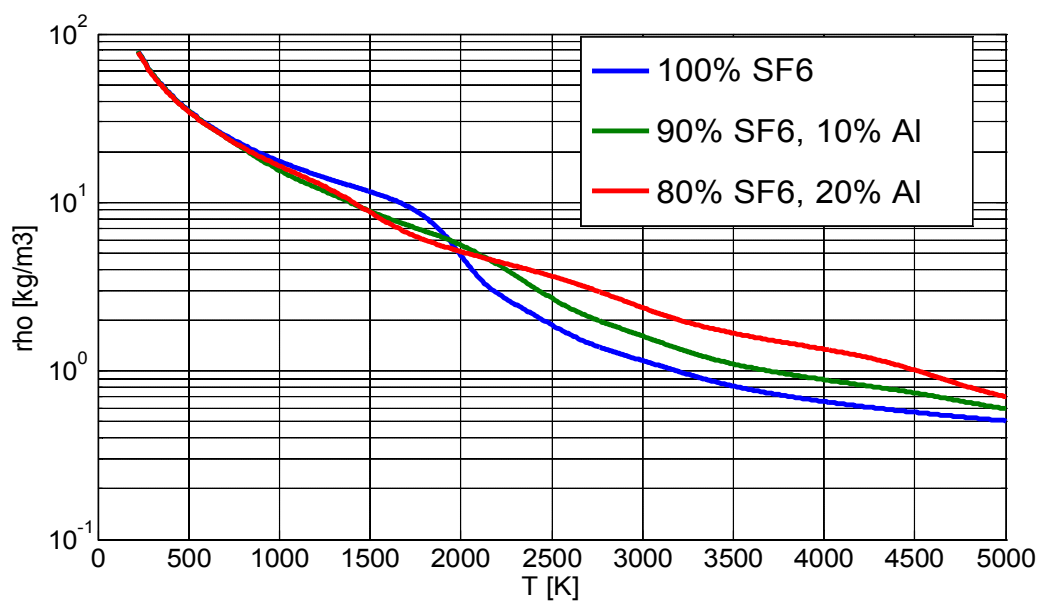
Slika 2.7. Specifična plinska konstanta



Slika 2.8. Specifična entalpija

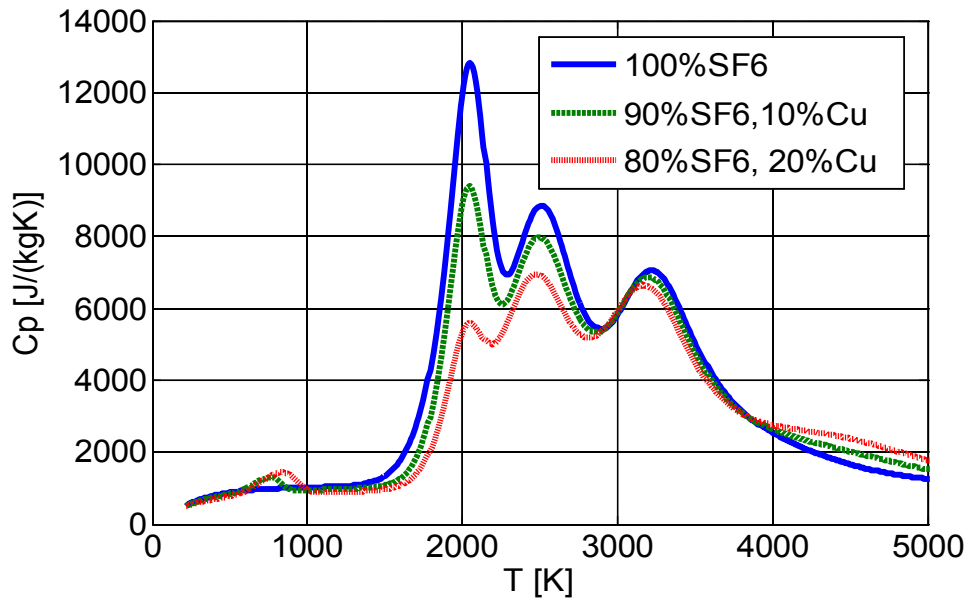


Slika 2.9. Specifična unutarnja energija

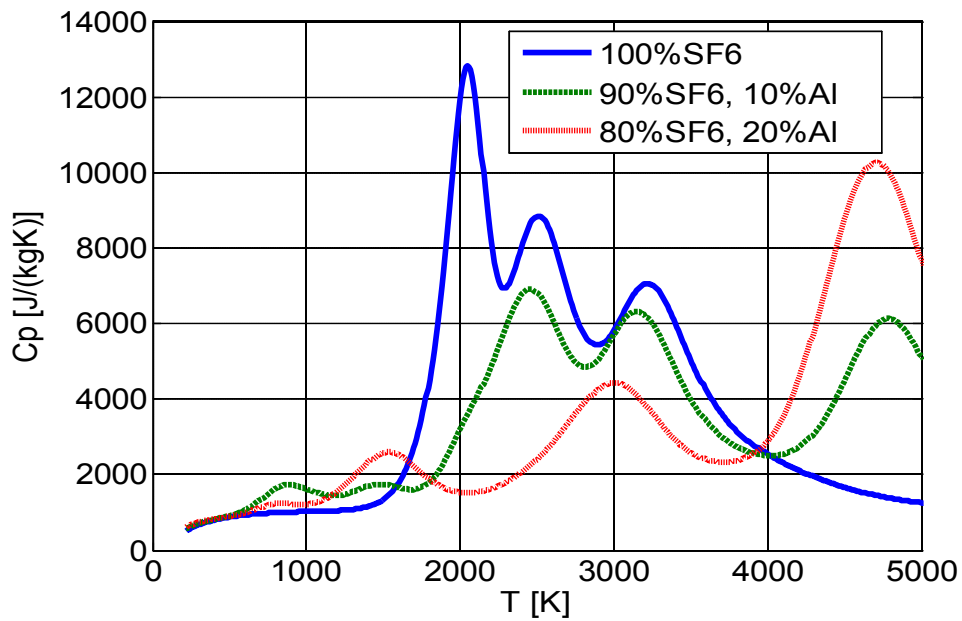


Slika 2.10. Gustoća plina

Na slici 2.11. prikazan je za primjer specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka za čisti plin SF₆ i mješavinu s isparenim bakrom pri tlaku od 1MPa, a na slici 2.12. za čisti plin SF₆ i mješavinu s isparenim aluminijem pri tlaku od 1MPa.

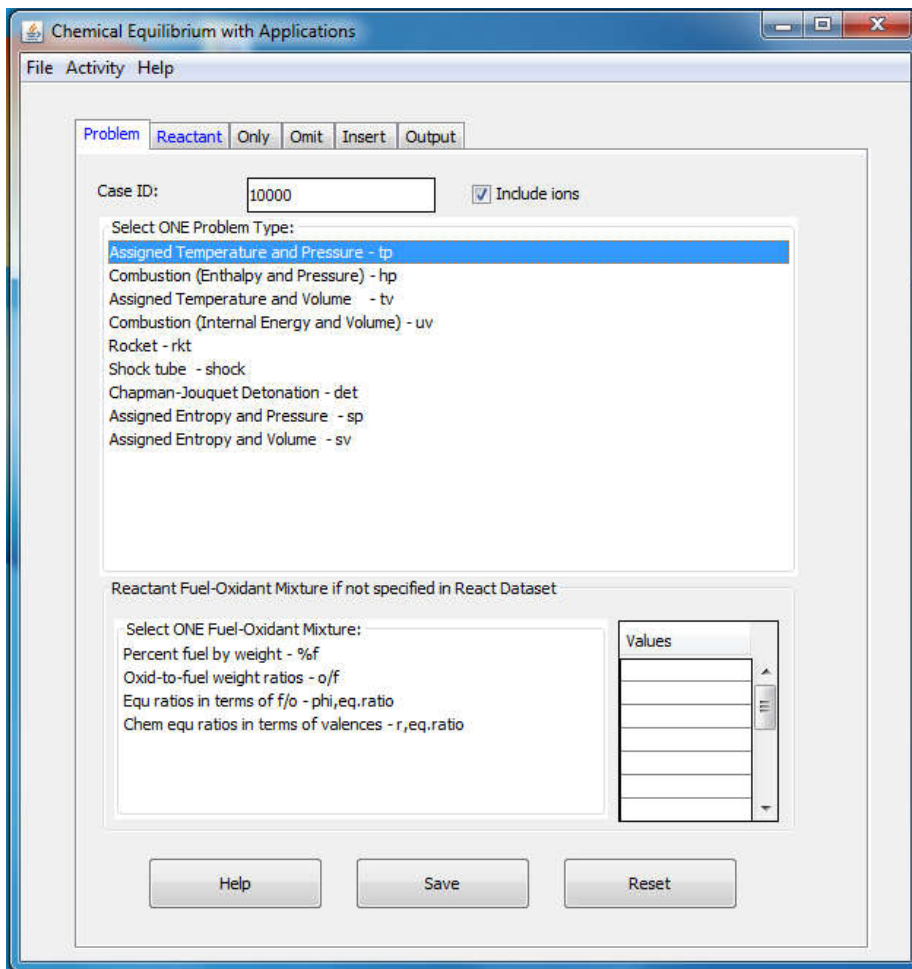


Slika 2.11. C_p faktor za različite mješavine plina SF_6 i isparenog bakra u ovisnosti o temperaturi, pri tlaku 1MPa



Slika 2.12. C_p faktor za različite mješavine plina SF_6 i isparenog aluminija u ovisnosti o temperaturi, pri tlaku 1MPa

Na kraju, na slici 2.13. prikazano je i sučelje NASA CEA programa s kojim su proračunati termodinamički koeficijenti.



Slika 2.13. Sučelje NASA CEA programa

3. Programi za izračun parametara unutarnjeg luka

Da bi se dobio dojam o količini ispuštene energije tijekom lučnog kvara i onoga što se događa unutar GIS komore, mogu se navesti neke od vrijednosti. Porast tlaka može biti i do 12 bara unutar 4 perioda frekvencije napona napajanja, temperatura luka dostiže vrijednosti i do 10000°C, a energija luka unutar lučnog prostora pri kvaru uzrokovanom strujom od 25kA usporediva je s onom koju stvara eksplozija 2kg dinamita. Dalje, razina jakosti zvuka dosiže 160dB (približno buka koju stvara pucanj sačmarice), a komadi materijala dostižu brzinu od 1000km/h [5]. Iz navedenog može se zamijetiti da proračun mora imati veliki opseg vrijednosti računatih varijabli, reakcije se događaju u malom dijelcu vremena pa je potrebno malo vrijeme integracije, a do sada se da zaključiti kako je proračun prilično složen, te je za očekivati duže vrijeme računalnog proračuna.

Modeli, odnosno programi koji računaju unutarnji luk i pripadajuće varijable mogu se stoga podijeliti u nekoliko skupina, ovisno o tome kolika je potrebna točnost, što pak ovisi o kompleksnosti uređaja, ali i zahtjevima kupaca [5]:

- osnovni modeli: zasnovani na tzv. "klasičnom idealnom plinu", temeljeni su na temperaturi plina i promjeni mase kroz ispusnu membranu, a karakteristike plina se smatraju neovisne o temperaturi i tlaku
- poboljšani modeli: uzimaju u obzir promjenjive karakteristike plina u ovisnosti o temperaturi i tlaku, a mogu uzimati u obzir i evaporaciju materijala komore, egzotermne reakcije, miješanje plinova i sl.
- CFD modeli: temeljeni na metodi konačnih elemenata, opisani dinamičkim jednadžbama fluida za očuvanje mase, momenta i energije fluida, a koriste tzv. CFD (engl. Computational Fluid Dynamics, računska dinamika fluida) solve

Za sve vrste modela moguće je napraviti računalne programe, što se u praksi i radi zbog velike kompleksnosti i broja iteracija u proračunima. Osnovni model je u ovom radu opisan u poglavlju 1.2. dok su poboljšani modeli opisani u poglavlju 1.3. te, dodatno poboljšani model u poglavlju 1.4. CFD model i program nisu bili tema ovog rada zbog još veće složenosti, te se u praksi pokazalo kako i poboljšani

modeli pokazuju dovoljno dobru točnost za realnu primjenu i podvrgavanje potrebnim normama, kao što je opisano u narednim poglavljima.

U tablici 3.1. spomenute su glavne mane i prednosti navedenih troje vrsta proračuna (simulacija) [5]. U narednom poglavlju opisan je i program korišten u radu, a koji je zasnovan na unaprijeđenom modelu opisanom u poglavlju 1.4.

Tablica 3.1. Usporedba tri modela za proračun unutarnjeg luka

Model	Prikladna primjena	Ograničenja
Osnovni (mala kompleksnost proračuna)	Brz proračun jednolikog porasta tlaka i temperature u lučnoj i ispušnoj komori	Ne uzima u obzir prostornu promjenu parametara. Nije primjenjiv ako je otvor membrane prevelik obzirom na komoru. Jednadžbe nisu pouzdane pri temperaturama iznad 2000K za SF ₆ i 6000K za zrak. Ne uzima u obzir mješavine plinova u ispušnoj komori. Nije primjenjiv za velike instalacijske prostorije.
Poboljšani (srednja kompleksnost proračuna)	Proračun porasta tlaka i temperature s većom preciznošću, koja bolje prati rezultate testiranja	Ne uzima u obzir prostornu promjenu parametara. Ograničenja i primjene ovise o aproksimacijama koje se koriste.
CFD (visoka kompleksnost proračuna)	Za proračun prostorne raspodjele tlaka, temperature i tijeka fluida u složenim geometrijama i velikim prostorima	Potrebno mnogo vremena za modeliranje prostorija i aparata. Zahtjeva veliku računalnu moć i mnogo vremena za simulaciju.

4. Programsko sučelje izrađeno u Matlab programskom okruženju

Glavni dio ovog rada je izrada programskog sučelja za izračun porasta tlaka, temperature i pomoćnih varijabli u GIS sklopnom postrojenju pri pojavi unutarnjeg luka. Sučelje je temeljeno na srednje kompleksnom modelu iz prethodnog poglavlja, odnosno na poboljšanom osnovnom modelu. Prednosti i mane modela su spomenute u 3. poglavlju, a jednadžbe i priprema podataka u prvom i drugom poglavlju. Podaci o termodinamičkim parametrima C_p , C_v , h , u , P , T , R_s i ρ pripremljeni su unaprijed upotrebom NASA CEA programa. Uz poznate početne uvjete koje unosi korisnik, te učitava program, računaju se svi parametri plina i to Eulerovom metodom (podjelom na diskretne vremenske intervale) za integraciju običnih diferencijalnih jednadžbi.

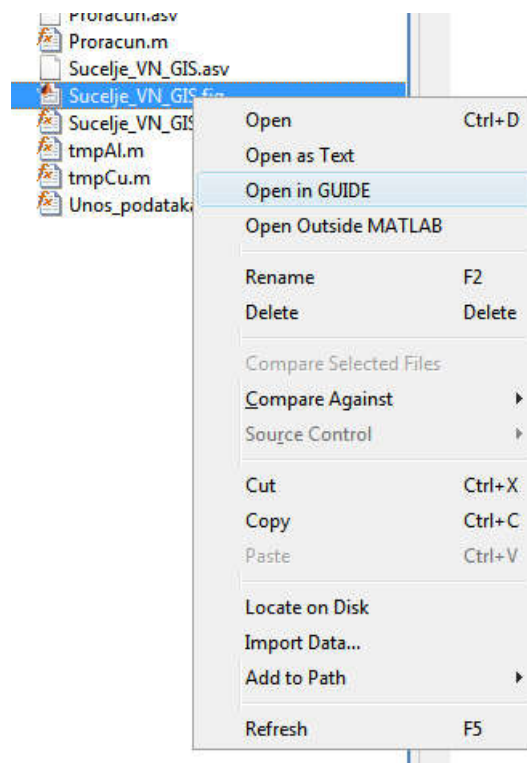
Finalni program je podijeljen u nekoliko cjelina:

- '**Sucelje_VN_GIS.m**' - glavno sučelje za upis i spremanje ulaznih podataka, odabir vrste kvara i elektroda i pokretanje (zaustavljanje) računalne simulacije postavljenih jednadžbi (prilog I)
- '**Unos_podataka.m**' - funkcija za provjeru i spremanje podataka unesenih u sučelje (prilog V)
- '**Proracun.m**' - glavna funkcija koju poziva sučelje i koja kroz diskretne vremenske korake, dt , računa porast tlaka i temperature, uz dodatne elemente i funkcije, te spremanje izlaznih podataka (prilog II)
- '**tmpAl.m**' - pomoćna funkcija koja ekstrapolira termodinamičke podatke između točaka, odnosno vrijednosti, koje su unesene iz NASA CEA aplikacije ukoliko se koriste aluminijske elektrode (prilog III)
- '**tmpCu.m**' - pomoćna funkcija koja ekstrapolira termodinamičke podatke između točaka, odnosno vrijednosti, koje su unesene iz NASA CEA aplikacije ukoliko se koriste bakrene elektrode (prilog VI)

- 'Crtanje.m' - crtanje grafa i spremanje slike jednom kada su sve vrijednosti izračunate, pomoćna funkcija glavnoj funkciji proračuna (prilog IV)

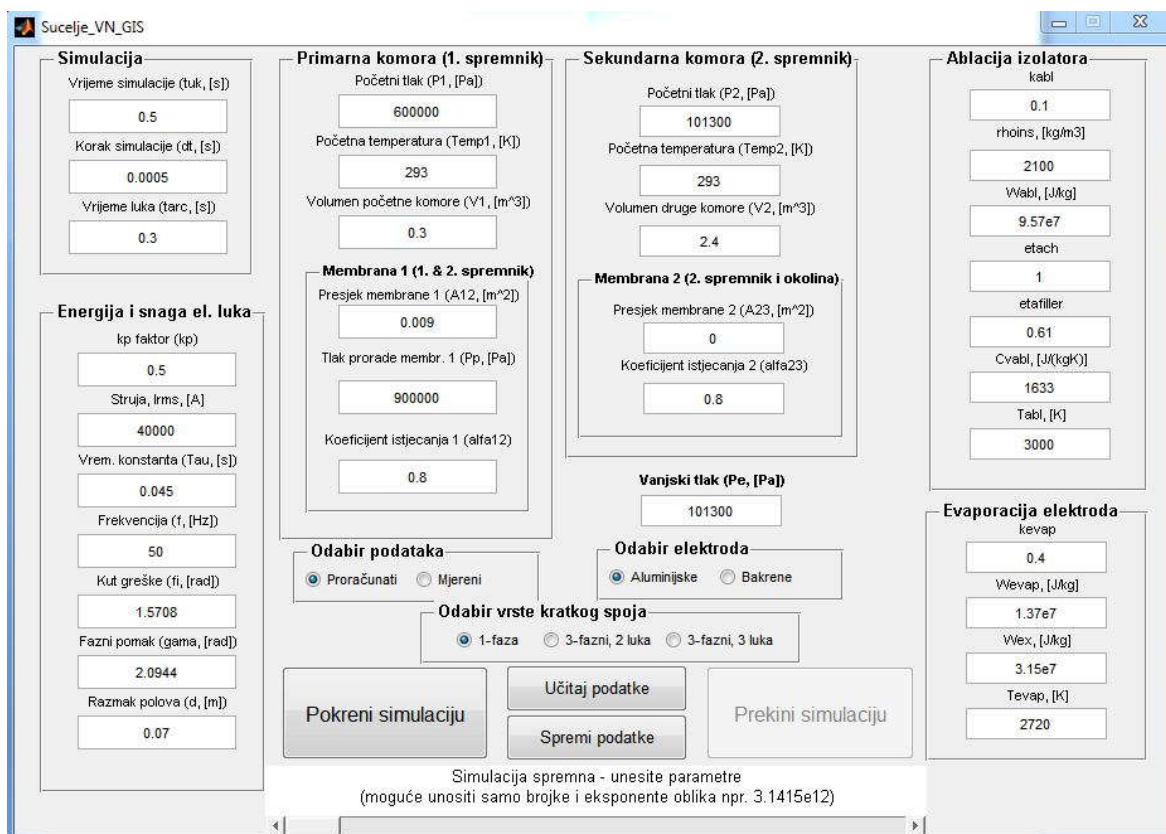
4.1. Sučelje programa, Sucelje_VN_GIS.m i Sucelje_VN_GIS.fig

Glavno sučelje programa pokreće se iz Matlab programskog okruženja desnim klikom miša na pripadnu .fig datoteku (Sucelje_VN_GIS.fig) i odabirom *Open in GUIDE* (sl. 4.1.1.), čime se pokreće vizualna datoteka koja definira sučelje u GUIDE programskom bloku Matlab-a. GUIDE omogućuje modifikaciju izgleda sučelja i definiranje oznaka (engl. tag) pomoću kojih se kasnije mogu mijenjati parametri blokova koji čine sučelje (tekstualni blokovi, tipke i sl.). Pomoću oznaka se pristupa i sadržajima koje korisnik upisuje u sučelje te kasnije učitavaju u funkciji proračuna.



Slika 4.1.1. Pokretanje programskog sučelja

Na slici 4.1.2. prikazano je kompletno sučelje s programa izrađeno u GUIDE programskom bloku, koje se pokreće odabirom *Tools/Run* jednom kada je sučelje već otvoreno u GUIDE-u. Ako se sučelje ne otvori iz GUIDE bloka, već samo dvoklikom izravno iz Matlab programskog sučelja, moguće su greške pri izvođenju, jer se .fig datoteka ne veže ispravno s pripadajućim .m kodom za odabrano sučelje pri izvođenju.



Slika 4.1.2. Programsko sučelje

Parametri pri unosu grupirani su u nekoliko sekcija, ovisno o prostoru i karakteristici - parametri primarne i sekundarne komore i pripadajućih membrana, parametri simulacije, ablacij, evaporacije te parametri za izračun snage električnog luka. Iznad bloka za unos pojedinog parametra pojavljuje se i opis ukoliko se pokazivač drži iznad njega, što je definirano u GUIDE alatu dvoklikom na odgovarajući blok i promjenom parametra *TooltipString*.

U srednjem, donjem dijelu sučelja nalaze se odabiri elektroda, podataka i vrste kratkog spoja. Ukoliko se za podatke odabere 'Proračunati', tada se električna

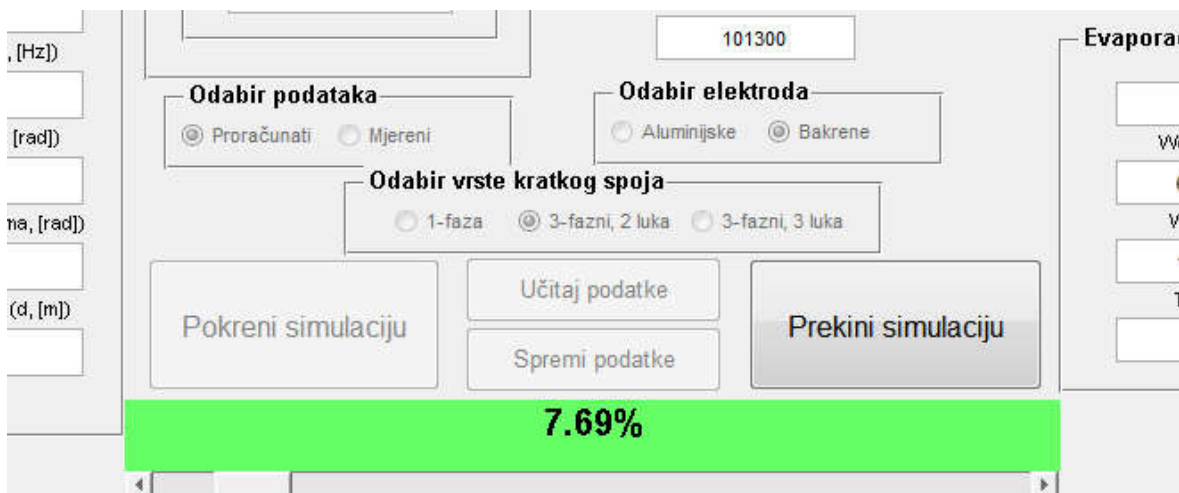
snaga luka računa iz skupine parametara 'Energija i snaga el. luka'. Ako se pak odabere 'Mjereni', tada se snaga očitava iz datoteka 'Pges.mat' i 'tges.mat' iz mape 'Aluminijske_elektrode - Podaci' ili 'Bakrene_elektrode - Podaci', ovisno o tome jesu li odabrane bakrene ili aluminijske elektrode u sučelju. Ostali termodinamički parametri mješavine plinova (C_p , C_v , h , u , P , T , R_s i ρ) također se isčitavaju iz pripadajućih mapa i datoteka u ovisnosti o odabiru elektroda.

Odabir vrste kratkog spoja omogućuje odabir vrste kratkog spoja pri proračunu snage električnog luka, ukoliko se radi o proračunatim podacima. Ako je odabrana opcija 'Mjereni' u odabiru podataka, tada nije moguće odabrati vrstu unutarnjeg luka, pošto se iz datoteke isčitavaju mjereni podaci.

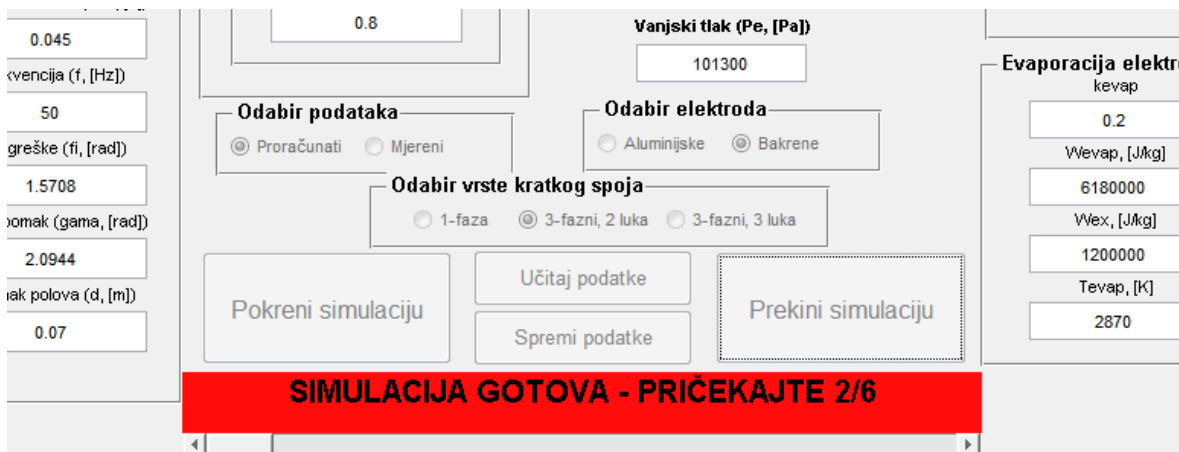
Pri pokretanju sučelja u polja za unos parametara se upisuju već unaprijed pripremljeni, početni, (engl. default) podaci. Početni parametri za aluminijske i bakrene elektrode se razlikuju, a unešene parametre je moguće i spremi (te kasnije učitati) odabirom tipki 'Spremi podatke' i 'Učitaj podatke'. Odabirom spremanja podataka, u datoteku 'Pocetni_pod.mat' spremaju se trenutno uneseni parametri koji se kasnije mogu učitati odabirom učitavanja podataka, neovisno je li u međuvremenu sučelje zatvoreno ili simulacija prekinuta. Pri pokretanju simulacije i spremanja podataka provjeravaju se i spremaju trenutno uneseni podaci, te javlja greška ukoliko je format nekog od parametara neispravan. Za pomoć u provjeri i spremanju podataka poziva se funkcija 'Unos_podataka.m' (privitak V).

Pokretanjem simulacije počinje glavna funkcija programa, 'Proracun.m'. Ona računa sve jednadžbe modela i daje odgovarajuće izlaze. Nakon što je simulacija pokrenuta, ispod tipki za pokretanje i zaustavljanje simulacije pokazuje se postotak dovršenosti simulacije (sl. 4.1.3.) i poruka da je simulacija gotova (sl. 4.1.4.), nakon čega korisnik treba pričekati još nekoliko sekundi da se rezultati proračuna spremaju u novostvorenu mapu u rezultatima, te sučelje bude spremno za ponovo pokretanje proračuna. Spremanje rezultata je opisano kod glavne funkcije proračuna, a sam proračun je moguće u bilo kojem trenutku i zaustaviti odabirom tipke 'Prekini simulaciju', nakon čega se također spremaju do onda proračunati podaci.

Valja spomenuti da pri simulaciji proračuna nije nužno paziti na korak simulacije (dt) i prilagođavati ga onome pri kojem su dobivena mjerenja, jer to ne smeta proračunu. Ispod svih tipki sučelja nalazi se tekstualni element koji daje obavijesti korisniku o postotku dovršenosti proračuna, među ostalim.



Slika 4.1.3. Izgled dijela sučelja pri pokrenutoj simulaciji



Slika 4.1.4. Izgled dijela sučelja jednom kada je simulacija gotova ili prekinuta

U privitku I. dan je kod sučelja programa. Na početku same funkcije sučelja su definicije koje GUIDE alat sam generira pri spremanju vizualnog dijela sučelja, nakon čega se nalaze, također automatski generirane, funkcije za pojedine elemente sučelja (Callback i CreateFcn funkcije). Funkcije TriF_triLFIG_Callback, TriF_dvaLFIG_Callback, JednaF_1LFIG_Callback, Podaci_mjerFIG_Callback,

Podaci_prorFIG_Callback su funkcije koje se pozivaju pri odabiru vrsta kratkog spoja (tri faze - tri luka, tri faze - dva luka i jedna faza - jedan luka) i podataka (mjereni ili proračunati), te se tipke međusobno isključuju.

Vrijednosti nekih od elemenata sučelja se pozivaju ili mijenjaju u drugim funkcijama glavnog programa. Pri odabiru elektroda (BakreneFIG_Callback i AluminijskeFIG_Callback) postavljaju se drukčije početne vrijednosti parametara upisanih u sučelje naredbom *set*, te se te dvije opcije međusobno isključuju.

Odabirom tipke 'Učitaj podatke' pokreće se funkcija UcitajFIG_Callback koja iz datoteke 'Pocetni_pod.mat' učitava spremljene parametre i upisuje ih u odgovarajuća polja. Odabirom tipke 'Spremi podatke' pokreće se funkcija SpremiFIG_Callback koja prvo provjerava upisane parametre funkcijom 'Unos_podataka.m' i ako su svi podaci upisani ispravno, upisuje podatke preko starih u datoteci 'Pocetni_pod.mat'.

Odabirom pokretanja simulacije poziva se funkcija PokreniFIG_Callback koja također najprije provjerava unesene podatke (funkcijom Unos_podataka.m) te ukoliko je sve ispravno, pokreće glavni proračun, odnosno funkciju Proracun.m i predaje joj unesene parametre i upravljačke parametre sučelja (engl. handles).

U tablici 4.1.1. dan je popis ulaznih parametara koji korisnik može mijenjati.

Tablica 4.1.1. Popis ulaznih parametara sučelja

Parametar	Jedinica	Opis
tuk	s	Ukupno vrijeme simulacije
dt	s	Vremenski korak simulacije
tarc	s	Trajanje električnog luka (ukoliko se radi o proračunatim podacima)
kp	-	koeficijent koji pokazuje koliko se od el. snage luka utroši na zagrijavanje plina
Irms	A	RMS iznos simetrične komponente struje kratkog spoja
Tau	s	Vremenska konstanta asimetrične komponente struje kratkog spoja

f	Hz	Frekvencija struje
fi	rad	Kut inicijacije greške
gama	rad	Fazni pomak struje
d	m	Udaljenost centara polova elektroda
P1	Pa	Početni tlak u lučnoj komori
Temp1	K	Početna temperatura u lučnoj komori
V1	m ³	Volumen lučne komore
A12	m ²	Presjek membrane između lučne i ispušne komore
Pp	Pa	Tlak prorade membrane između lučne i ispušne komore
alfa12	-	Koeficijent istjecanja membrane između lučne i ispušne komore
P2	Pa	Početni tlak u ispušnoj komori
Temp2	K	Početna temperatura u ispušnoj komori
V2	m ³	Volumen ispušne komore
A23	m ²	Presjek membrane između ispušne komore i vanjskog prostora
alfa23	-	Koeficijent istjecanja membrane između ispušne komore i vanjskog prostora
kabl	-	Udio električne energije luka za ablaciju izolacijskog materijala ($k_p+k_{evap}+k_{abl}=1$)
rhoins	kg/ m ³	Specifična gustoća čvrstog izolacijskog materijala
Wabl	J/kg	Specifična disocirana energija izolacijskog materijala
etach	-	Udio plina (CH ₄) na abliranom materijalu
etafiller	-	Udio materijala ispune u izolatoru
Cvabl	J/(kgK)	Specifična toplina metana (CH ₄) pri konstantnom volumenu
Tabl	K	Ablacijska temperatura epoxy materijala
kevap	-	Udio električne energije luka za evaporaciju elektroda ($k_p+k_{evap}+k_{abl}=1$)
Wevap	J/kg	Specifična energija evaporacije elektroda [J/kg]
Wex	J/kg	Specifična energija egzotermne reakcije
Tevap	K	Temperatura evaporacije elektroda
Pe	Pa	Vanjski tlak

4.2. Funkcija provjere i unosa podataka, Unos_podataka.m

Funkcija provjere i unosa podataka vraća unesene parametre u sučelje, ukoliko su oni ispravno uneseni (prilog V). Ulazni podaci su upravljački parametri elemenata sučelja, struktura *handles*. Cijela funkcija je prilično jednostavna, uzastopnim *if* uvjetima provjerava se je li pojedino polje za unos prazno ili ne sadrži broj, i ukoliko je to slučaj, obaviještava korisnika, a ukoliko je polje ispravno popunjeno, nastavlja na sljedeći uvjet. Ukoliko su svi parametri ispravno uneseni, uspjeh unosa vraća se upisivanjem vrijednosti 1 u povratnu varijablu funkcije, Uspjeh.

4.3. Glavna funkcija proračuna varijabli, Proracun.m

Glavna funkcija proračuna poziva se pokretanjem simulacije iz programskog sučelja ukoliko su svi parametri ispravno uneseni. Funkcija proračuna je podijeljena u nekoliko dijelova (prilog II). Na početku funkcije se postavljaju elementi sučelja, odnosno omogućuje pokretanje odbrojavanja koje se kasnije vrti u glavnoj petlji proračuna te onemogućuje korisniku odabir tipki.

Nakon toga se učitavaju svi parametri simulacije koji su prethodno provjereni i predani varijabli 'gd'. Inicijaliziraju se i varijable koje će petlja proračunavati, te se iz pripadnih datoteka učitavaju termodinamički parametri koji su proračunati pomoću NASA CEA aplikacije. U ovom dijelu se računa i snaga električnog luka, ukoliko u sučelju nije odabrano da se za snagu uzimaju mjereni podaci.

Glavni dio funkcije čini petlja u kojoj se računaju svi podaci i izlazne varijable (porast temperature i tlaka, prijenos energije i sl.), a prije petlje računa se vrijeme i inicijalizira energija električnog luka. Glavna petlja u funkciji se neće opisivati, pošto su to zapravo formule prenesene i napisane u jeziku prihvatljivom Matlab okruženju, no u nastavku je ukratko opisana njezina struktura. Na početku petlje provjerava se glavni uvjet, je li proradila membrana između lučne i ispušne komore, te se u skladu s tim računaju odgovarajući izrazi. Za računanje specifične

unutarnje energije plina koriste se pomoćne funkcije 'tmpAl.m' ili 'tmpCu', ovisno o odabranim elektrodama (aluminij - Al ili bakar - Cu), a koje računaju parametre mješavine plinova. Na početku same petlje se provjerava i pritisak tipke za prekid simulacije, u čijem slučaju se petlja prekida, a na kraju petlje se osvježava vrijednost postotka dovršenosti proračuna.

Nakon glavne petlje ponovno se postavljaju odgovarajući elementi sučelja programa, snimaju izlazni podaci u mapu 'Rezultati', te crtaju nekoliko izlaza proračuna u novi *figure* element, odnosno novi prozor. Snimanje izlaznih podataka u mapu odvija se sljedno, najprije se stvara nova mapa čije ime čini trenutni datum i vrijeme, za kasniju lakšu referencu, nakon čega se u mapu spremaju izlazni podaci u .txt, .xls i .mat obliku. Za vrijeme spremanja osvježava se izgled glavnog tekstualnog elementa sučelja koji se nalazi ispod svih tipki, kako bi korisnik mogao dobiti informaciju o preostalom vremenu. Ukoliko mapa 'Rezultati' ne postoji, ona se stvara prije snimanja podataka.

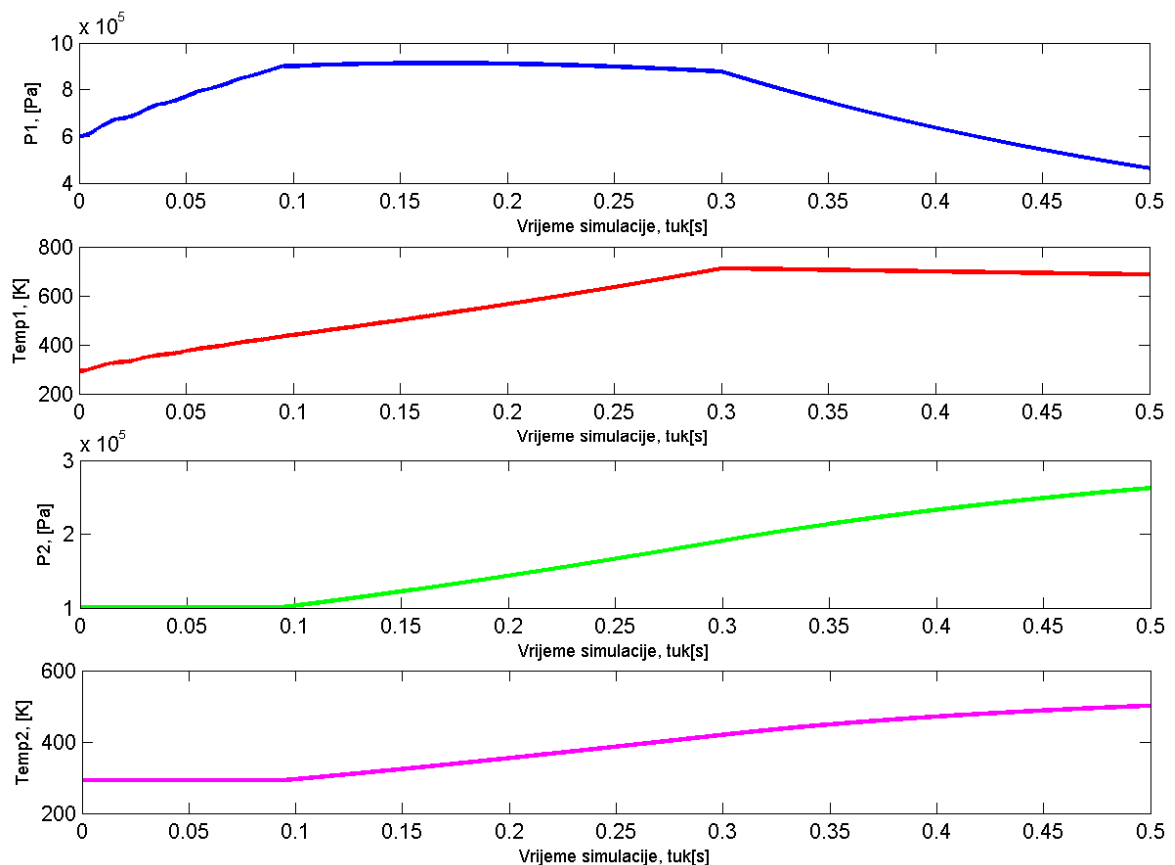
Nakon što su izlazni podaci spremljeni, na kraju glavne funkcije proračuna crta se graf ovisnosti izlaza o proteklom vremenu simulacije, te se graf sprema u .tiff formatu u mapu gdje su prethodno spremljeni izlazni parametri funkcije. Za ovu svrhu pokreće se pomoćna funkcija, 'Crtanje.m'.

4.4. Pomoćne funkcije proračuna, tmpAl i tmpCu

Funkcije koje računaju parametre mješavine, tmpAl.m i tmpCu.m, su veoma slične i razlikuju se samo u tome što je za bakrene elektrode proračunato manje podataka pomoću aplikacije NASA CEA. Funkcije pomoću interpolacije i prethodno objašnjenih jednadžbi računaju specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka i volumena, specifičnu plinsku konstantu, specifičnu entalpiju, specifičnu unutarnju energiju, adijabatsku konstantu i gustoću plina. Kodovi funkcija dani su u prilogima III i VI.

4.5. Funkcija crtanja i spremanja grafa u datoteku, Crtanje.m

Funkcija crtanja grafa (Prilog IV) prima vektore izlaza i vremenske osi, te podatak o imenu mape gdje su spremljeni ostali izlazni podaci - TrenutnoVrijeme. Definira poziciju pojedine slike na grafu kako bi prostor bio maksimalno iskorišten, crta ovisnost izlaza o vremenu, te sprema konačnu sliku grafova u mapu (engl. folder) gdje su spremljeni i ostali podaci pomoću naredbe print. Na slici 4.5.1. prikazana je slika koju funkcija crta za nepromijenjene parametre, pri odabiru bakrenih elektroda i trofaznog kvara s pojavom 2 luka između elektroda.



Slika 4.5.1. Primjer rezultata crtanja grafa pomoću programa i funkcije Crtanje.m

5. Praktična testiranja i usporedba rezultata

Praktična provjera simulacijskih proračuna obavlja se u institutima koji mogu provesti ispitivanja. Što se tiče ovog rada, kako je sučelje rađeno za i u suradnji s tvrtkom Končar Električni visokonaponski aparati d.d. uzeti su eksperimentalni podaci koje je tvrtka napravila u dva instituta.

Prva eksperimentalna ispitivanja metalom oklopljenog, GIS 145kV kućišta provedena su u njemačkom IPH GmbH institutu. Drugi niz ispitivanja GIS kućišta obavljen je u tvrtci Končar - Institut za elektrotehniku d.d.

Što se tiče samih ispitivanja, ona se obavljaju u skladu s normom IEC 62271-203 (Edition 2, 2011-09) "High-voltage switchgear and controlgear – Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV", koja je već spomenuta u poglavlju 1. Za nazivnu efektivnu struju kratkog spoja od 40kA preporučeno trajanje struje je 0.1s za prvi stupanj zaštite, odnosno najviše 0.3s za drugi stupanj zaštite. Podaci o prolaznim kriterijima sa stupnjevima zaštite, trajanjima i vrijednostima struje dani su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Kriteriji za prolaz ispitivanja na unutarnji luk prema normi IEC 62271-203 (Edition 2, 2011-09)

Efektivna vrijednost nazivne struje kratkog spoja mreže	Trajanje struje	Stupanj zaštite	Kriterij
<40 kA r.m.s.	1	0.2 s	Nema vanjskih efekata osim prorade uređaja/membrane za rasterećenje od pretlaka
	2	≤0.5 s	Nema rasprskavanja/fragmentacije dijelova (dopušteno je progaranje kućišta)
	1	0.1 s	Nema vanjskih efekata osim prorade uređaja/membrane za rasterećenje od pretlaka

≥ 40 kA r.m.s.	2	≤ 0.3 s	Nema rasprskavanja/fragmentacije dijelova (dopušteno je progaranje kućišta)
---------------------	---	--------------	---

Kriteriji za prolaz ispitivanja su da u prvih 0,1 s trajanja struje nema vanjskih efekata na ispitnom kućištu osim prorade membrane za rasterećenje od pretlaka, a nakon 0.3 s da nema rasprskavanja tj. fragmentacije kućišta, ali je dopušteno progaranje kućišta. Za ispitivanje je potrebno odabrati kućište GIS-a koje ima najmanju vjerojatnost da izdrži porast tlaka i temperature u slučaju pojave unutarnjeg luka. U praksi to znači kućište s najmanjim volumenom. Ispitivanje se provodi pri nazivnom tlaku SF₆ plina u ispitnom kućištu. IEC dopušta da se rezultati ispitivanja postignuti na jednoj plinskoj sekciji koriste u proračunu i dokazivanju otpornosti na unutarnji luk ostalih plinskih sekcija.

Na slici 1.2.1. prikazana je teoretska prostorna raspodjela komora. Električni luk se inicira tankom žicom između elektroda u lučnoj komori oko koje se nalazi ispušna komora, koja preuzima višak topline i tlaka, a kako bi se ujedno i zadržao staklenički plin SF₆, što je zahtijevano i od strane ispitnih laboratorija. U zaštitnom kućištu može biti zrak ili najčešće SF₆ plin pod tlakom od 0.1 MPa.

Prilikom prorade membrane za rasterećenje od pretlaka na ispitnom kućištu dolazi do istjecanja SF₆ plina u zaštitno kućište, miješanja vrućeg plina lučne komore s hladnim plinom zaštitne komore te porasta tlaka u zaštitnom kućištu. Razlika tlakova između ispitnog i zaštitnog kućišta treba tijekom ispitivanja uvijek biti manja od tlaka loma ispitnog kućišta, čemu i služi zaštitna membrana. Ispitni laboratoriji iz sigurnosnih razloga često zahtijevaju da se i zaštitno kućište opremi membranom za rasterećenje od pretlaka, kako ne bi došlo do veće štete, pošto i ono može izdržati određeni tlak prije pojave znatnijih oštećenja.

Za ispitivanje je potrebno odabrati kućište GIS-a koje ima najmanju vjerojatnost da izdrži porast tlaka i temperature u slučaju pojave unutarnjeg luka, što znači kućište s najmanjim volumenom. Ispitivanje se provodi pri nazivnom tlaku SF₆ plina u ispitnom kućištu. IEC dopušta da se rezultati ispitivanja postignuti na jednoj plinskoj sekciji koriste u proračunu i dokazivanju otpornosti na unutarnji luk ostalih

plinskih sekcija zbog čega se i koriste računalne simulacije koje znatno smanjuju cijenu razvoja i proizvodnje kućišta. Fizikalne pojave i matematički modeli, te sam računalni program koji je razvijen za proračun parametara plina pri pojavi unutarnjeg luka opisan je u prethodnim poglavljima, a u nastavku su dane usporedbe s praktičnim rezultatima.

5.1. Ispitivanje provedeno u IPH GmbH institutu i usporedba s rezultatima računalne simulacije

GIS komora i prekidač u IPH institutu nisu izdržali ispitivanje, te je osim membrane između lučne komore i ispušne komore proradila i membrana koja dijeli ispušnu komoru od vanjskog prostora. Spriječene su veće štete, a ispitivanje je dalo vrijedne podatke za daljnje ispitivanje u Končar - Institutu za elektrotehniku.

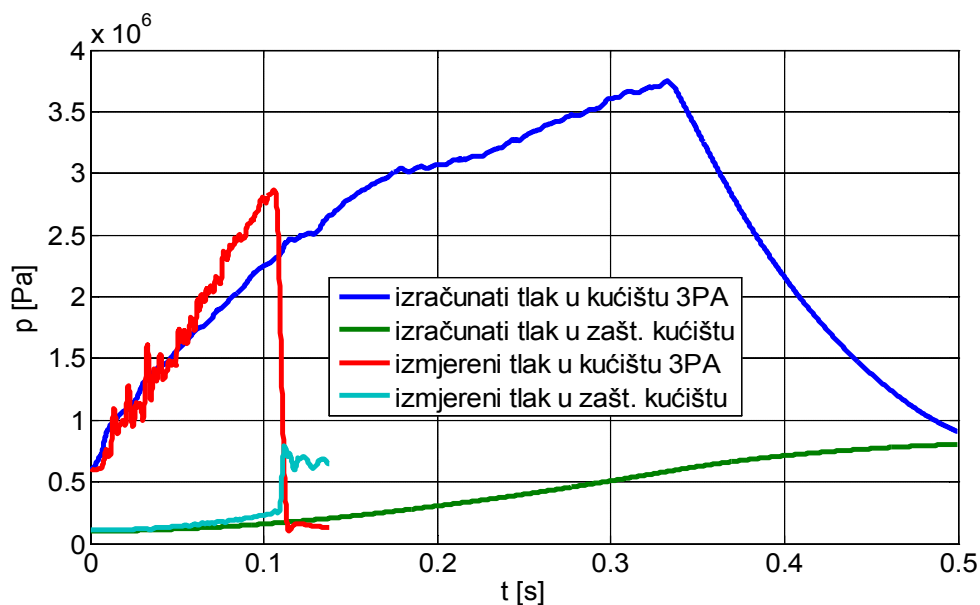
Eksperiment je proveden s aluminijskim elektrodama i plinom SF₆, a simuliran je tropolni kvar. U ovom ispitivanju oslobođena je prevelika toplinska energija koja je dijelom posljedica egzotermne reakcije između isparenog aluminijskog oksida i plina SF₆, a dijelom egzotermne reakcije između isparenog epoksida i SF₆ plina. Zaključeno je da je potrebno detaljnije ispitati utjecaj isparenog aluminijskog oksida, bakra i epoksida na porast tlaka na ispitnim modelima te odrediti specifičnu energiju egzotermne reakcije između epoksida i plina SF₆. Također, potrebno je istražiti utjecaj provodne ploče na porast tlaka. Predloženo je rješenje - iniciranje luka na čim manjem razmaku, što je kasnije i ostvareno, te eventualno povećanje presjeka propusne membrane koja dijeli lučni i ispušni prostor.

U nastavku su dani ulazni parametri s ispitivanja (tablica 5.1.1.), te rezultati proračuna (sl. 5.1.1. - sl. 5.1.4.) i dana usporedba dviju metoda.

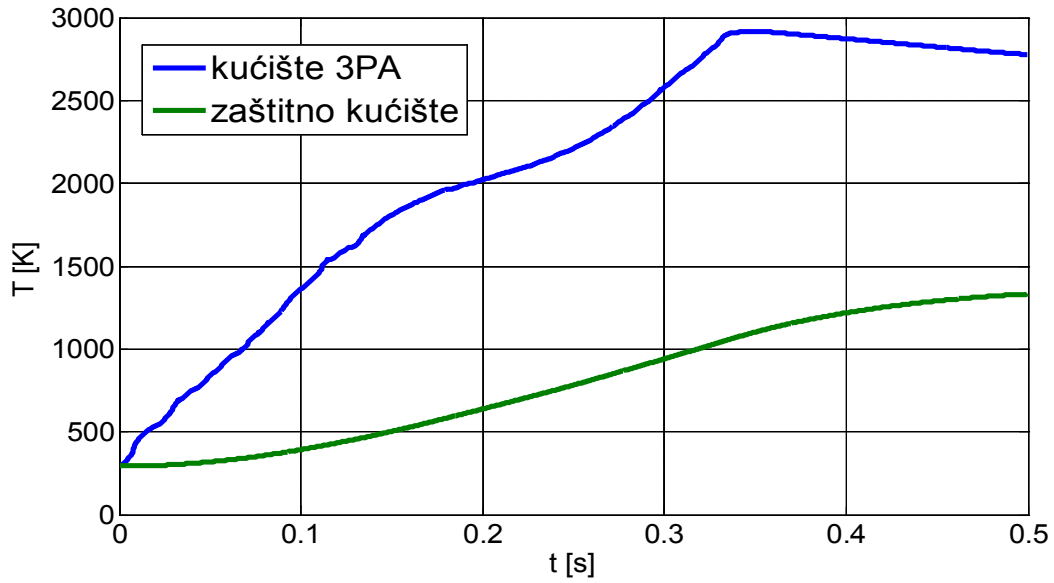
Tablica 5.1.1. Ulazni podaci proračuna za ispitivanje u IPH institutu

Parametar	Mjerna jedinica	Iznos
Tip lučnog kvara	-	tropolni (2 luka)
Volumen lučnog prostora, V_1	m^3	0.3
Volumen ispušnog prostora, V_2	m^3	2.4
Početni tlak u lučnom prostoru, P_1	Pa	600000
Početni tlak u ispušnom prostoru, P_2	Pa	101300
Presjek otvora membrane 1, A_{12}	m^2	0.009
Koeficijent istjecanja membrane 1, α_{12}	-	0.7
Tlak prorade membrane, P_p	kPa	900
Presjek membrane između ispušnog prostora i vanjskog prostora, A_{23}	m^2	0
Struja kratkog spoja, I_{rms}	kA	40
k_p faktor	-	0.65
Podaci za evaporaciju:		
Faktor evaporacije, k_{evap}	-	0.25
Specifična energija isparavanja za Al, W_{evap}	MJ/kg	13.7
Temperatura isparavanja Al, T_{evap}	K	2720
Specifična energija egzotermne reakcije između Al i SF_6 , W_{ex}	MJ/kg	31.5
Podaci za ablaciju		
Faktor ablacije k_{abl}		0.1

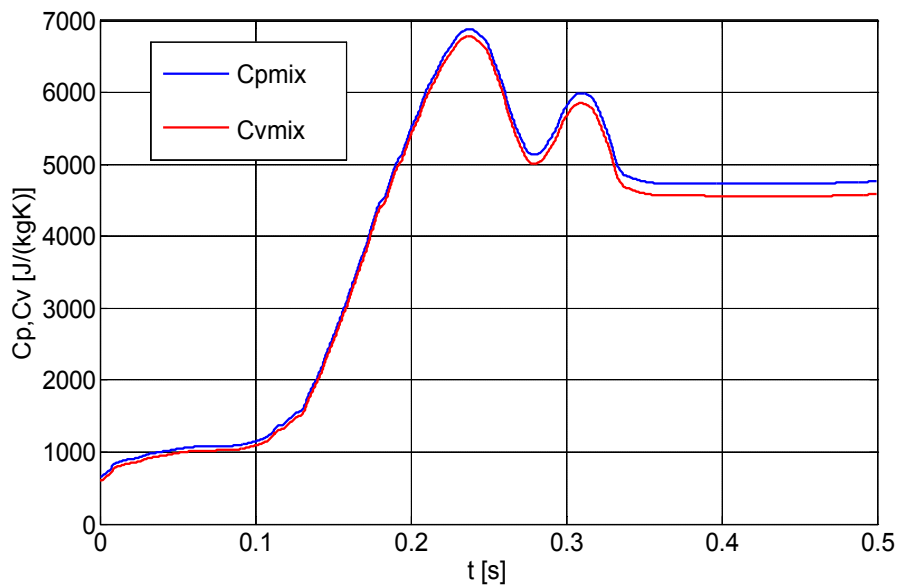
Gustoća izolacijskog materijala (epoksid), ρ_{ins}	kg/m ³	2100
Specifična energija disocijacije izolacijskog materijala (epoksid), W_{abl}	MJ/kg	95.7
Udio plina CH ₄ (metan) u isparenom izolacijskom materijalu, η_{CH_4}	-	1
Udio punila u izolatoru, η_{filler}	-	0.61
Specifična toplina metana CH ₄ kod konstantnog volumena, C_{vabl}	J/(kgK)	1633
Specifična toplina metana CH ₄ kod konstantnog tlaka, C_{pabl}	J/(kgK)	2225
Temperatura ablacije izolacijskog materijala (epoksid), T_{abl}	K	3000 (pretpostavka)



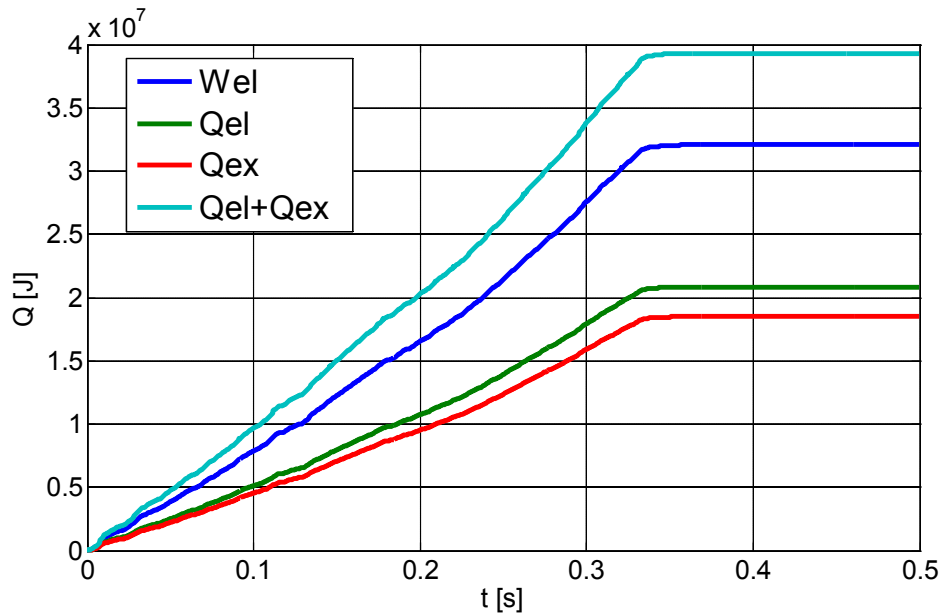
Slika 5.1.1. Računski i izmjereni porast tlaka u lučnoj komori (3PA kućište) i zaštitnom kućištu (eksplozija 3PA kućišta nakon 115 ms)



Slika 5.1.2. Računski dobivena temperatura u 3PA (lučnom) i zaštitnom kućištu

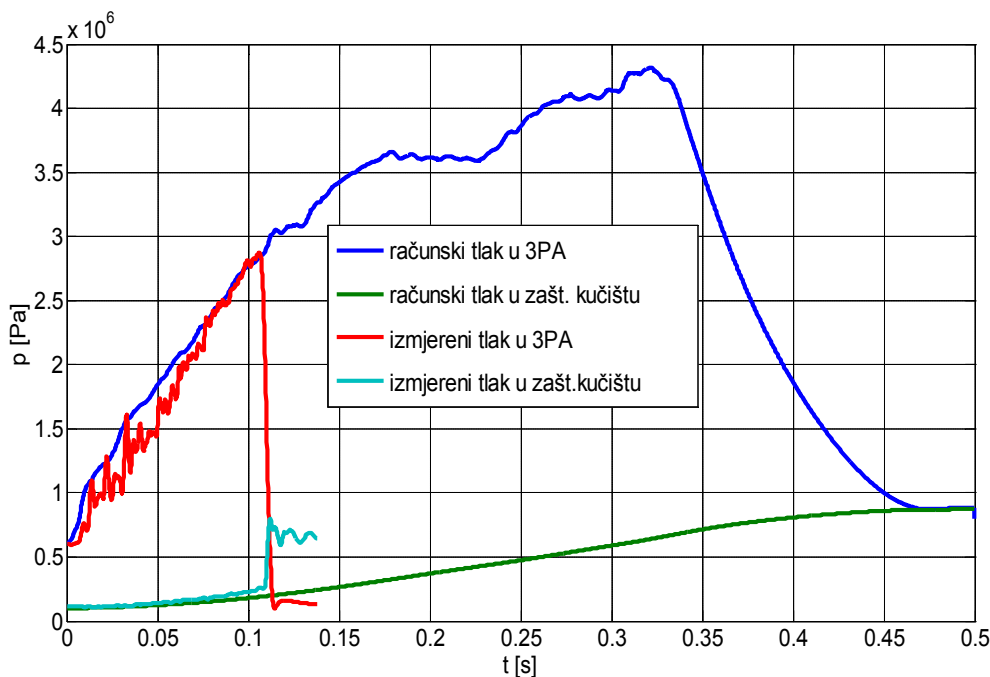


Slika 5.1.3. Specifični toplinski kapacitet kod konstantnog volumena ($C_{v,mix}$) i kod konstantnog tlaka ($C_{p,mix}$) u mješavini plina i isparenog materijala elektroda i izolacijskog materijala



Slika 5.1.4. Toplinska energija predana plinu SF₆ tijekom stvorenog unutarnjeg luka ($Q_{el}+Q_{ex}$)

Na slici 5.1.1. može se vidjeti da simulacija prati eksperimentalne podatke uz veća odstupanja s porastom vremena, te nakon eksplozije dolazi do znatne razlike u rezultatima jer računalni proračun ne uzima u obzir proradu vanjske membrane. Da bi se dobio točniji proračun i manja odstupanja, promijenjeni su parametri α_{12} , k_p , k_{evap} i k_{abl} u nove vrijednosti - $\alpha_{12} = 0.8$, $k_p = 0.5$, $k_{evap} = 0.5$, $k_{abl} = 0$. Rezultati novog proračuna dani su na slici 5.1.5. te se može vidjeti da je sada simulacija znatno bliža stvarnom ispitivanju.

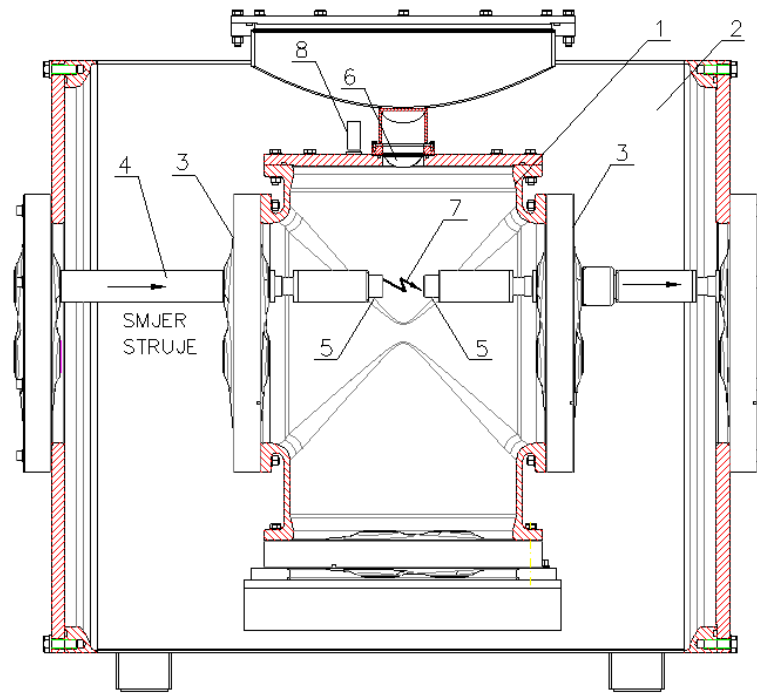


Slika 5.1.5. Računski i izmjereni porast tlaka u lučnoj komori (3PA kućište) i zaštitnom kućištu nakon promjene ulaznih parametara

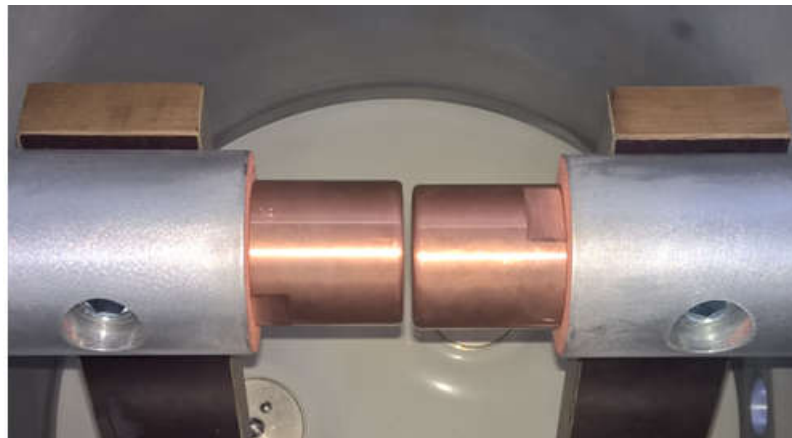
Iz ove analize može se zaključiti da je bitno točno unijeti ulazne parametre i aproksimirati one parametre koji se određuju ispitivanjem na uređaju (α_{12} , k_p , k_{evap} i k_{abl} i sl.) kako bi kasnije simulacije bile točnije i prikladne razvijanju novih modela uređaja i dodatnoj provjeri postojećih.

5.2. Ispitivanje provedeno u Končar - Institutu za elektrotehniku d.d. i usporedba s rezultatima simulacije

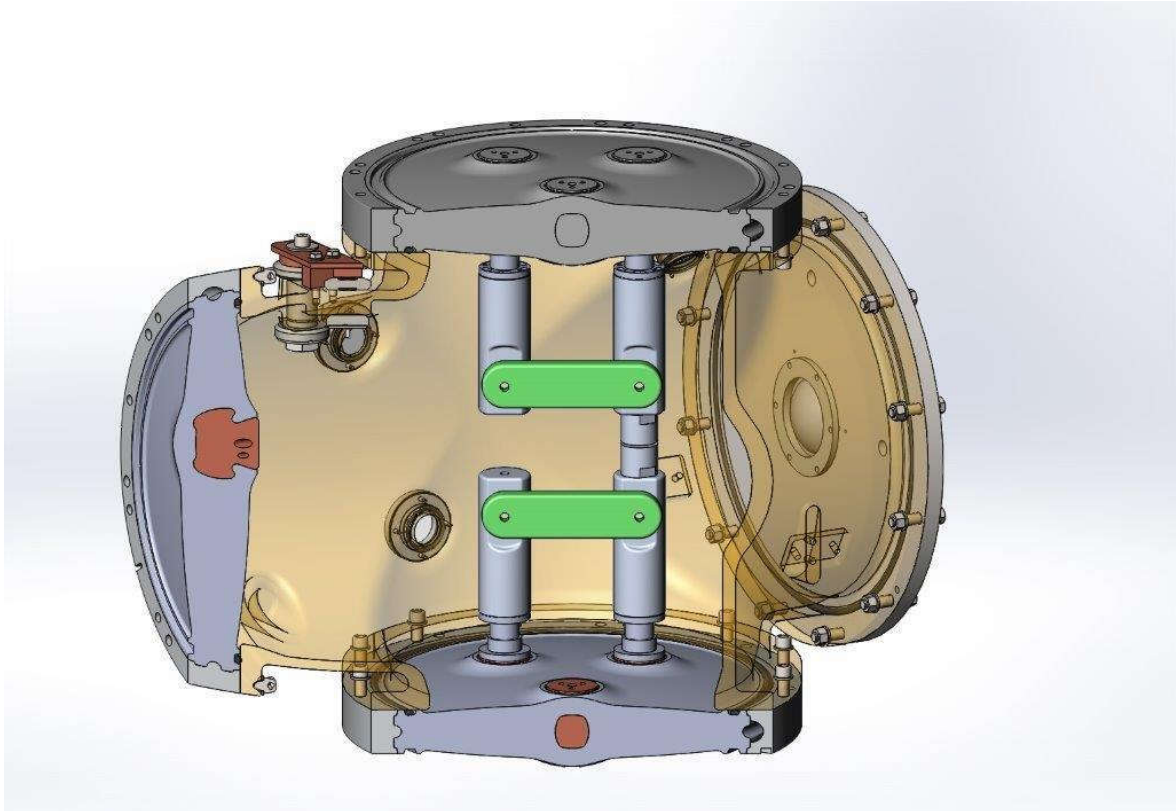
Osmišljene su dvije konfiguracije ispitnog modela na kojima je provedeno razvojno ispitivanje kućišta GIS-a na unutarnji luk. Provedeno je ukupno 4 ispitivanja. U prva dva pokusa luk je iniciran jednopolno između elektroda okruglog presjeka (sl. 5.2.2. i 5.2.3) prema ispitnoj konfiguraciji na slici 5.2.1. Elektrode su u prvom ispitivanju bile od bakra, a u drugom od aluminija.



Slika 5.2.1. Presjek ispitne konfiguracije za razvojno ispitivanje na jednopolni unutarnji luk - 1. ispitno kućište, 2. zaštitno kućište, 3. provodna ploča, 4. vodiči, 5. zamjenjive elektrode, 6. lomljiva membrana, 7. električni luk, 8. senzor za mjerenje tlaka

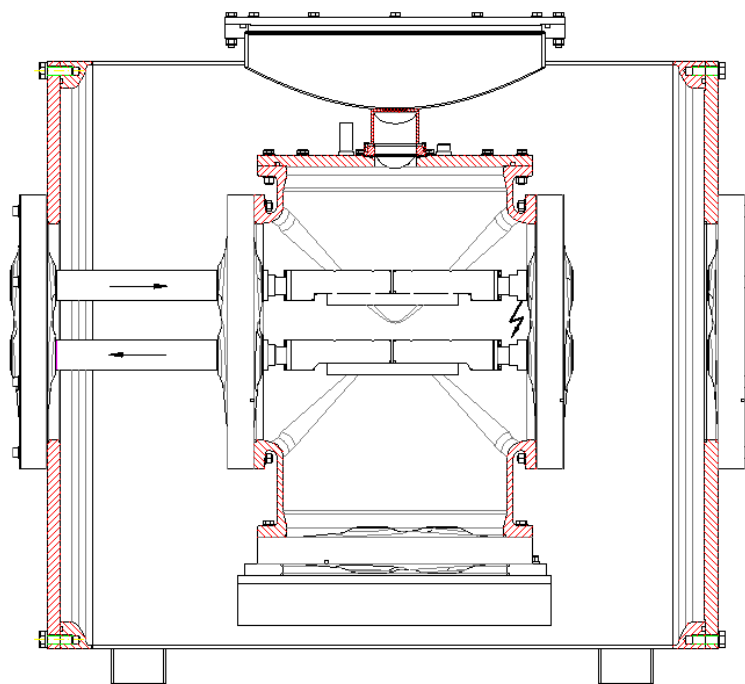


Slika 5.2.2. Elektrode za jednopolni lučni kvar (Cu)



Slika 5.2.3. Izgled ispitivanja unutarnjeg luka pri jednopolnom kvaru

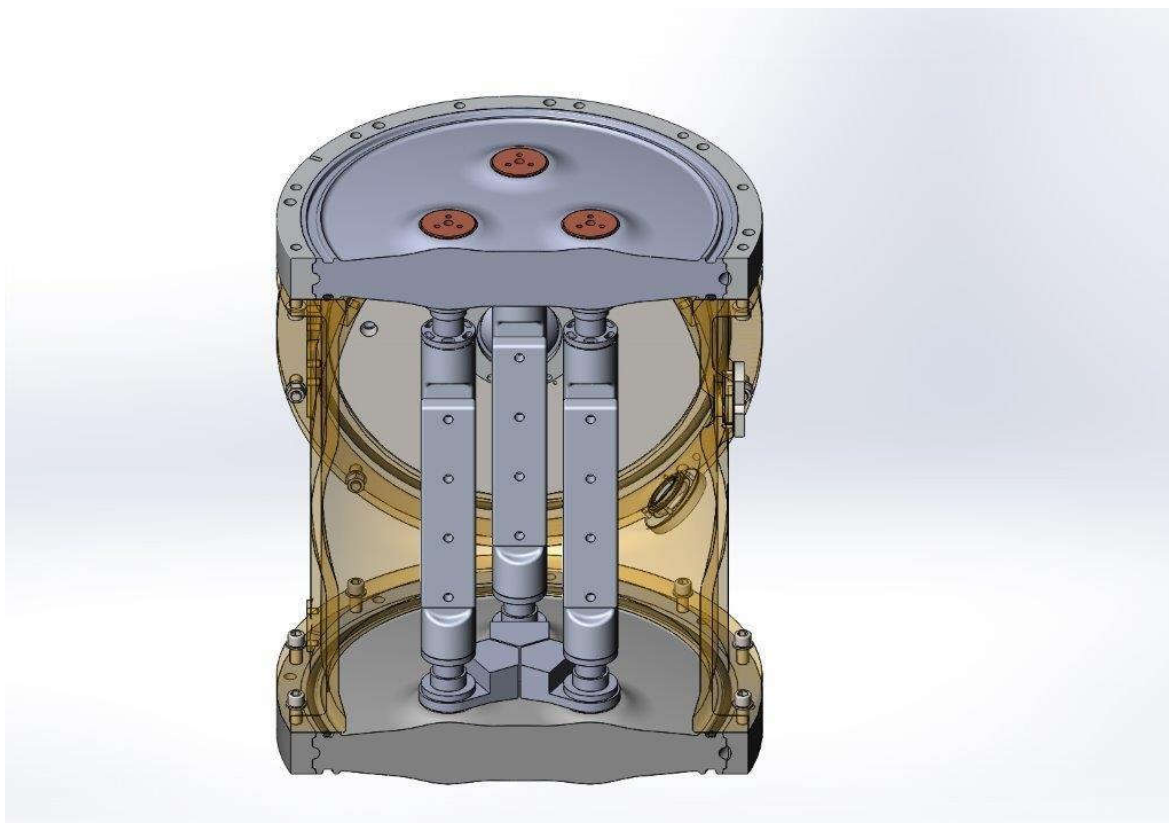
Druga dva pokusa provedena su prema ispitnoj konfiguraciji na slici 5.2.4. Luk je iniciran trolno, na elektrodama pravokutnog presjeka u blizini provodne ploče (sl. 5.2.5. i 5.2.6.) U prvom pokusu elektrode su kao i kod jednopolnog ispitivanja bile od bakra, a u drugom od aluminija. U tablici 5.2.1. dane su vrijednosti parametara pri ispitivanju.



Slika 5.2.4. Presjek ispitne konfiguracije za razvojno ispitivanje na troljni luk



Slika 5.2.5. Elektrode za ispitivanje na unutarnji luk pri ispitivanju na troljni kvar



Slika 5.2.6. Izgled ispitivanja unutarnjeg luka pri trolelnom kvaru

Tablica 5.2.1. Vrijednosti parametara laboratorija pri ispitivanju u Končar institutu

Parametar	Vrijednost
Efektivni napon izvora (ograničenje)	600V
Početni razmak između elektroda	3-4mm
Početni tlak plina SF ₆ u ispitnom kućištu	0.6MPa
Početni tlak plina SF ₆ u zaštitnom kućištu	0.1MPa
Volumen ispitnog kućišta	0.3m ³
Volumen zaštitnog kućišta	2.4m ³
Deklarirani tlak prorade membrane	0.9MPa ±5%
Površina presjeka otvora membrane	0.009 m ²

Tijekom ispitivanja mjereni su napon i struja luka, tlak u ispitnom i zaštitnom kućištu, a nakon ispitivanja i erozija materijala elektroda. Erozijsku izolacijskog

materijala s provodne ploče (u pokusima kad je luk gorio u blizini provodne ploče) nije bilo moguće precizno izmjeriti zbog relativno velike mase provodne ploče u odnosu na eroziju izolacijskog materijala, a također i zbog činjenice da je prilikom gorenja luka došlo i do erozije ulivenih bakrenih elektroda na samoj provodnoj ploči. Nakon ispitivanja, na temelju oscilograma struje i napona luka, izračunata je električna snaga i ukupna električna energija luka. Na slici 5.2.7. prikazani su izgled komora netom prije ispitivanja i tijekom sastavljanja pokusa.



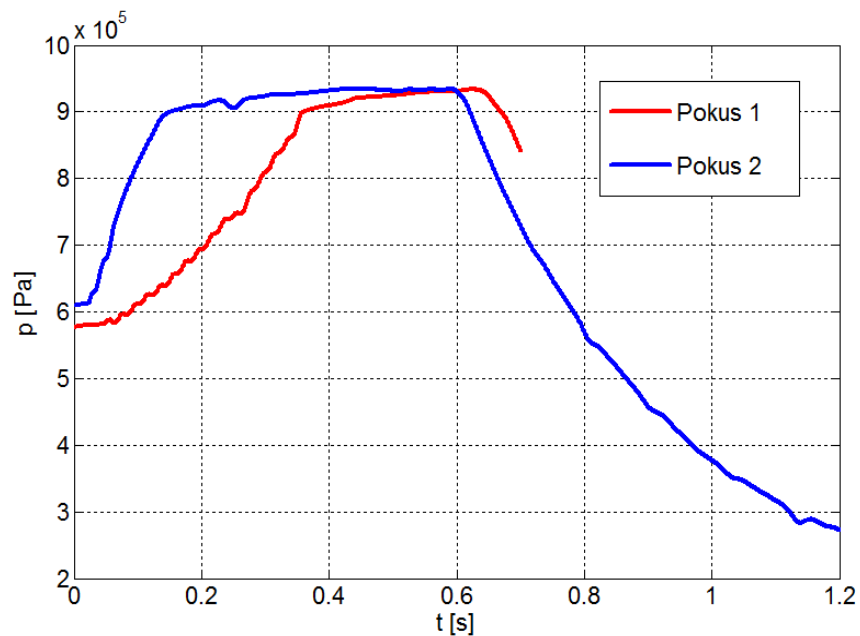
Slika 5.2.7. Komore prije ispitivanja (lijevo) i tijekom sastavljanja (desno)

Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 5.2.2. i na slikama 5.2.8. - 5.2.11. Analizom krivulja tlaka u pokusima br. 1 i 2 može se uočiti da je maksimalni porast tlaka gotovo isti kod bakrenih i aluminijskih elektroda iako je električna energija luka 2.7 puta manja u pokusu s aluminijskim elektrodama. Strmina porasta tlaka također je značajno veća u pokusu s aluminijskim elektrodama. Membrana za rasterećenje od pretlaka u oba pokusa proradila je naknadno, tj. nakon gašenja luka, što se može objasniti činjenicom da je za izjednačavanje temperature, a time i tlaka plina u ispitnom kućištu potrebno određeno vrijeme.

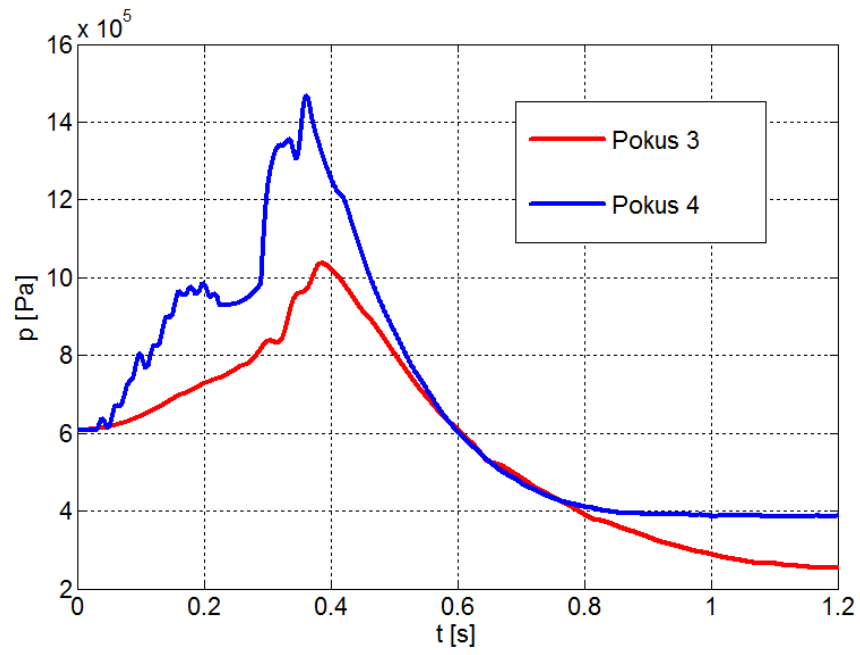
Tabčica 5.2.2. Rezultati ispitivanja u Končar institutu

Broj pokusa	1	2	3	4
Materijal elektroda	Cu	Al	Cu	Al

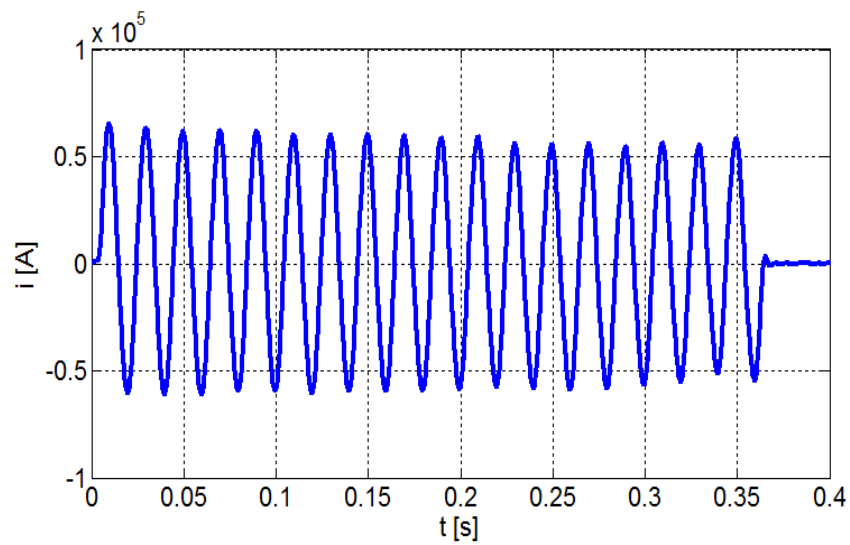
Tip lučnog kvara	jednopolni		tropolni	
	Efektivna struja luka (I_{rms}), [kA]	40	40	40
Trajanje luka (t_{arc}), [s]	0.36	0.114	0.42	0.37
Električna energija luka (W_{el}), [MJ]	1.42	0.52	2.6	2.95
Porast tlaka u ispitnom kućištu (P_1), [MPa]	0.35	0.32	0.4	0.85
Porast tlaka u zaštitnom kućištu (P_2) [MPa]	-	0.15	0.15	0.3
Vrijeme prorade membrane, [s]	0.65	0.6	0.38	0.18
Erozija materijala elektroda (m_{evap}), [g]	347.5	34.5	773.5	505.5



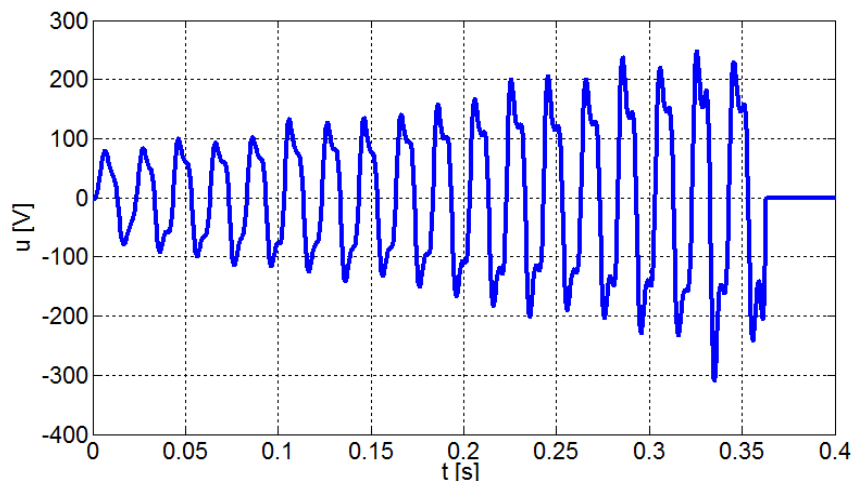
Slika 5.2.8. Tlak u ispitnom kućištu pri jednopolnom kvaru



Slika 5.2.9. Tlak u ispitnom kućištu pri trolnom kvaru



Slika 5.2.10. Oscilogram struje (prvi pokus)



Slika 5.2.11. Oscilogram napona (prvi pokus)

U trećem i četvrtom pokusu je za približno iste električne energije luka dobiven dvostruko veći porast tlaka u pokusu s aluminijskim elektrodama. Iako je membrana proradila prije gašenja luka, tlak je i dalje nastavio rasti sve do gašenja luka, što je posebno izraženo u pokusu br. 4 s aluminijskim elektrodama. Izjednačavanje tlakova u ispitnom i zaštitnom kućištu nakon gašenja luka i otvaranja membrane inače traje kraće u pokusima s većim maksimalnim tlakom (i višom temperaturom) što je posljedica veće brzine istjecanja plina.

Osim u pokusu br. 2, u svim ostalim pokusima došlo je do značajne erozije elektroda što se vidi i na oscilogramu napona luka (sl. 5.2.11.). Erozija je dijelom posljedica taljenja, a dijelom isparavanja materijala elektroda. Uslijed erozije elektroda povećava se razmak između elektroda što postepeno povećava napon luka. U trenutku kad se napon luka približi naponu izvora dolazi do gašenja luka. Kod tipskog ispitivanja na unutarnji luk se zbog većeg razmaka elektroda u kućištu GIS-a može očekivati i do desetak puta veća električna energija luka nego što je postignuto na razvojnom ispitivanju.

Na slikama 5.2.12. - 5.2.16. prikazana su kućišta i elektrode nakon ispitivanja i posljedice unutarnjeg lučnog kvara.



Slika 5.2.12. Izgled elektroda i lučnog prostora nakon jednopolnog lučnog kvara



Slika 5.2.13. Izgled izvađenih bakrenih elektroda nakon jednopolnog lučnog kvara



Slika 5.2.14. Izgled elektroda i lučnog prostora nakon jednopolnog lučnog kvara

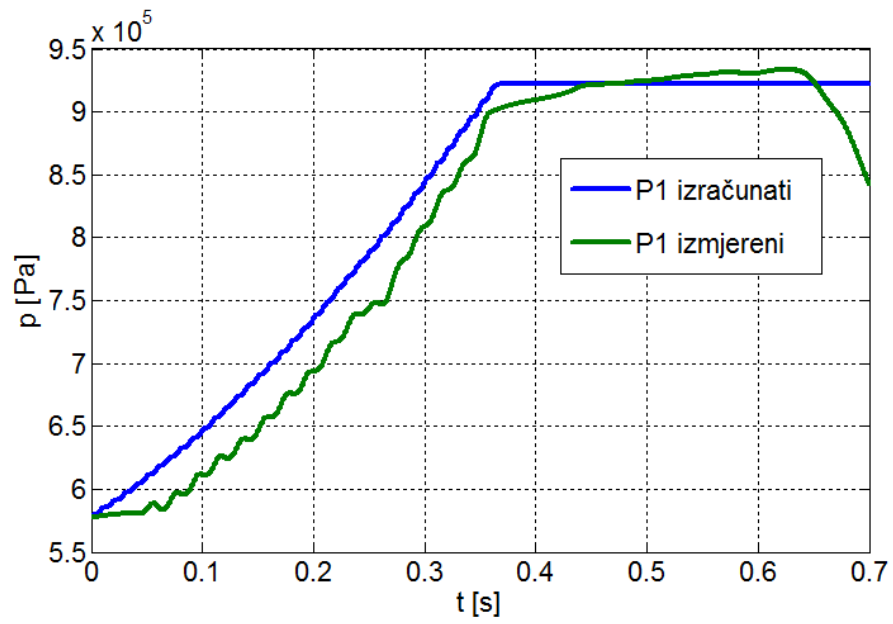


Slika 5.2.15. Izgled elektroda i provodne ploče nakon trojnog lučnog kvara

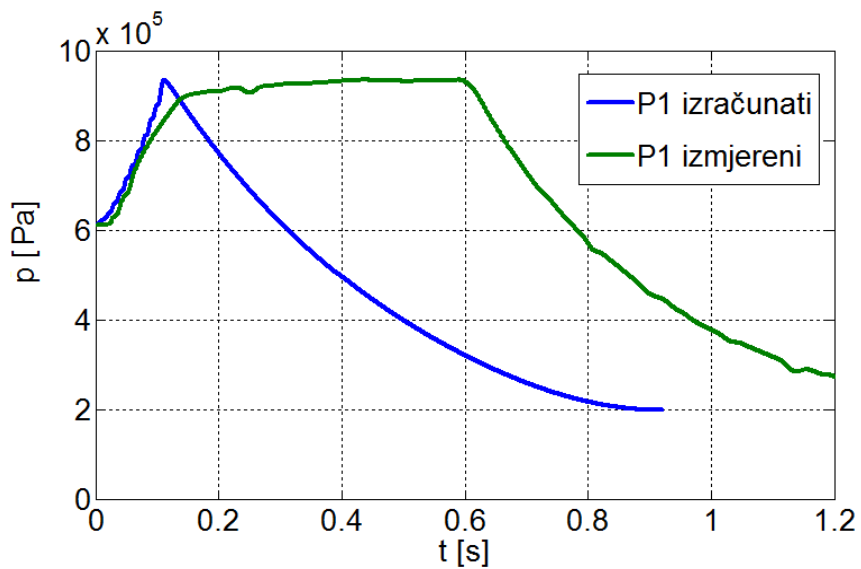


Slika 5.2.16. Izgled provodne ploče i držača elektroda nakon trofaznog lučnog kvara

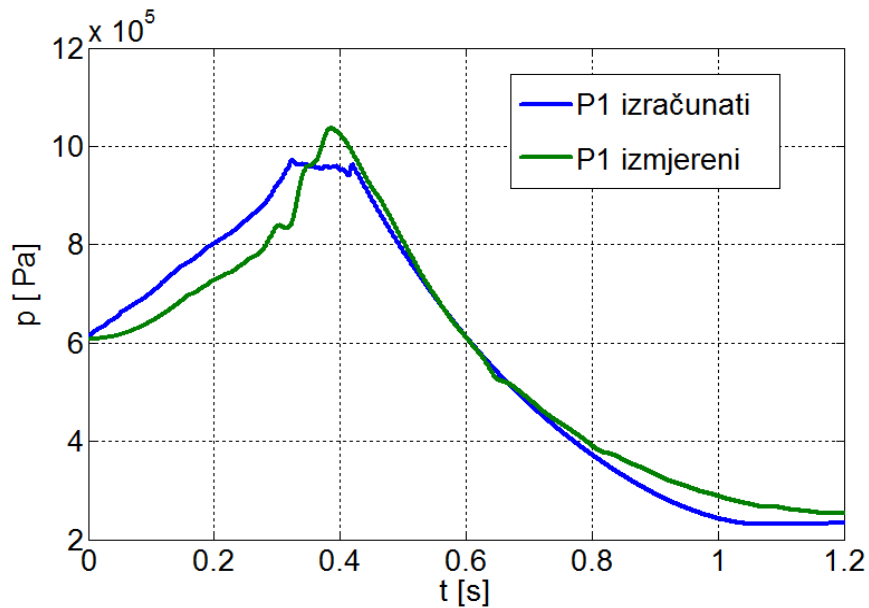
Verifikacija matematičkog modela svodi se na određivanje vrijednosti faktora k_p i koeficijenta istjecanja α_{12} za koje se postiže dobro slaganje između izmjerenog i izračunatog tlaka P_1 u ispitnom kućištu (sl. 5.2.17 - 5.2.20.). Promjenom faktora k_p u proračunu podešava se brzina porasta (strmina) tlaka, a promjenom koeficijenta istjecanja silazni dio krivulje tlaka nakon prorade membrane. Budući da je erozija elektroda istovremeno posljedica taljenja i isparavanja materijala, iz rezultata pokusa nije bilo moguće odrediti faktore evaporacije za materijal elektroda, a niti faktore ablacije za izolacijski materijal. Stoga je faktorom k_p obuhvaćen i doprinos egzotermne/endotermne reakcije elektroda na porast tlaka, a faktori k_{evap} i k_{abl} su u programu postavljeni na nulu.



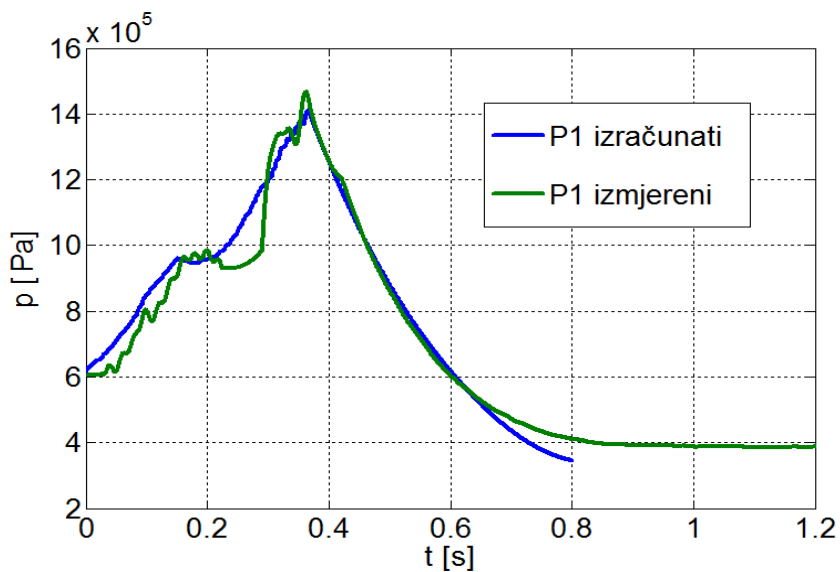
Slika 5.2.17. Tlak lučne komore u ovisnosti o vremenu za pokus 1: $k_p=0.9$



Slika 5.2.18. Tlak lučne komore u ovisnosti o vremenu za pokus 2: $k_p=2.35$,
 $\alpha_{12}=0.7$



Slika 5.2.19. Tlak lučne komore u ovisnosti o vremenu za pokus 3: $k_p=0.9$, $\alpha_{12}=0.7$



Slika 5.2.20. Tlak lučne komore u ovisnosti o vremenu za pokus 4: $k_p=2.3$, $\alpha_{12}=0.7$

Za luk na bakrenim elektrodama (pokusi br. 1 i 3), vrlo dobro slaganje rezultata proračuna s rezultatima mjerenja postiže se za k_p faktor 0.9. S druge strane, za luk na elektrodama od aluminija (pokusi br. 2 i 4), k_p faktor je između 2.3 i 2.35. Koeficijent istjecanja (α_{12}) u pokusu 1 nije imalo smisla određivati budući da nije do kraja snimljen silazni dio krivulje tlaka nakon prorade membrane. U ostalim

pokusima, za koeficijent istjecanja 0.7 postignuto je dobro slaganje rezultata proračuna s rezultatima mjerenja. Najveće odstupanje u proračunu zamijećeno je u drugom ispitivanju.

Zaključak

Analizom postojećih matematičkih modela za proračun unutarnjeg luka u GIS metalom oklopljenom sklopnom aparatu zaključeno je da bi odgovarajuće točne rezultate mogao dati poboljšani osnovni model sa srednjom razinom kompleksnosti proračuna i srednjim vremenom računalne simulacije. Uočen je utjecaj ulaznih parametara na proračun rasta tlaka i temperature i korisniku olakšano pokretanje simulacije i analiza samih rezultata.

Pri usporedbi rezultata matematičkog modela ostvarenog u programskom sučelju s ispitnim podacima dobivenima mjerenjem u dva različita instituta, uočena je važnost točnog određivanja faktora kojima se opisuje prijenos energije na mješavinu fluida unutar kućišta GIS-a - koeficijenta istjecana (α_{12}), koeficijenta koji pokazuje koliko se od električne snage luka utroši na zagrijavanje plina (k_p), udjela električne energije luka koja se utroši na isparavanje elektroda (k_{evap}) i udjela električne energije luka koja se utroši na ablaciju čvrstog izolacijskog materijala (k_{abl}). U zadnjim ispitivanjima postignuta je zadovoljavajuća točnost računalne simulacije.

Pokusi provedeni na elektrodama od bakra i aluminijskih elektroda u plinu SF₆ potvrdili su značajno veći doprinos aluminijskih elektroda na porast tlaka i temperature u kućištu GIS-a ($k_p=2.3$) u odnosu na bakrene elektrode ($k_p=0.9$). Može se zaključiti da se za istu električnu energiju luka, u slučaju aluminijskih elektroda, plinu SF₆ preda i do 2.5 puta više toplinske energije nego što je to slučaj kod bakrenih elektroda. Nešto veće vrijednosti za faktor k_p od onih u literaturi mogu se objasniti primjenom matematičkog modela s realnim svojstvima plina. Naime, porastom temperature plina dolazi do povećanja specifičnog toplinskog kapaciteta pa plin može apsorbirati više topline uz manji porast temperature, odnosno tlaka. U modelu s konstantnim svojstvima plina, koji se većinom koristi u literaturi za verifikaciju rezultata proračuna s rezultatima mjerenja, ovaj utjecaj nije uzet u obzir.

Za faktor istjecanja izračunate krivulje pada tlaka nakon prorade membrane i gašenja luka vrlo dobro se slažu s izmjerenim krivuljama što pokazuje da su istjecanje kroz otvor membrane i porast tlaka u zaštitnom kućištu dobro modelirani.

Faktore evaporacije za materijal elektroda nije bilo moguće odrediti iz rezultata pokusa jer je erozija elektroda istovremeno posljedica taljenja i isparavanja materijala. Faktore ablacije također nije bilo moguće odrediti iz rezultata pokusa jer nije bilo moguće precizno mjeriti eroziju izolacijskog materijala s provodne ploče. Unatoč tome, računalni program baziran na prikazanom matematičkom modelu može se primjenjivati za proračun porasta tlaka i temperature u ispitnom i zaštitnom kućištu tijekom planiranja i pripreme ispitnog objekta za tipsko ispitivanje na unutarnji luk, te u daljem razvoju i modifikacijama GIS sklopnih postrojenja.

Literatura

- [1] *What is CEA?*, <https://www.grc.nasa.gov/www/CEAWeb/ceaWhat.htm>, 15.06.2017.
- [2] Kumpulainen, L., *Aspects and Directions of Internal Arc Protection*, doktorska teza, University of Vaasa - Faculty of Technology, 2016.
- [3] Gordon, S.; McBride, B. J., *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications: I. Analysis*, Washington D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1994.
- [4] Gordon, S.; McBride, B. J., *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications: II. Users Manual and Program Description*, Washington D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1996.
- [5] Uzelac, N., Glinkowski, M., del Rio, L., Kriegel, M., Douchin, J., Dullni, E. et alumni, *Tools for the Simulation of the Effects of the Internal Arc in Transmission and Distribution Switchgear*, Cigre, 2014.

Sažetak

Ispitivanje na unutarnji luk metalom oklopljenog, plinom SF₆ izoliranog sklopnog postrojenja nazivnog napona 145 kV definirano je u normi za visokonaponske oklopljene sklopne aparate, IEC 62271-203 koja spada u grupu neobaveznih tipskih ispitivanja. U radu je dan opis matematičkih modela koji služe za izradu računalnih simulacija kojima se analizira unutarnji luk te je odabran unaprijeđeni osnovni model koji, osim zadovoljavajuće točnosti proračuna, ima manje vrijeme proračuna i modeliranja sklopnih aparata od složenijih modela. Nakon teorijskog osvrta, dan je opis izrađenog programskog sučelja i analizirana njegova točnost na provedenim ispitivanjima. Zaključeno je da razvijeni program daje dovoljno točan proračun vremenske promjene parametara koji opisuju unutarnji luk, te istaknuti ključni parametri na koje se pri simulaciji mora paziti kako bi ona bila reprezentativna za stvarne pojave u visokonaponskim sklopnim aparatima.

Ključne riječi

Matlab, unutarnji luk, GIS, porast tlaka, porast temperature, visoki napon, sklopni uređaj.

CALCULATION AND TESTING OF METAL CLAD SF₆ GAS INSULATED SWITCHGEAR PLANT 145 kV AT THE INNER ARC

Summary

Internal arc testing of metal enclosed, SF₆ isolated switchgear rated for 145KV is defined in IEC 62271-203, a norm for highvoltage enclosed switchgear, which is grouped in non-mandatory type tests. In this paper, an explanation is given for mathematical models which are used in making of computer simulations that analyse internal arc, and an enhanced model is picked, which apart from satisfying the accuracy of the calculation, also has less calculating and modeling time for switchgears than the more complex models. After the theoretical review, a description of the created computer interface is given and its accuracy is analyzed on the conducted tests. It is concluded that the developed program provides a sufficiently accurate calculation of the time change of the parameters that describe the internal arc, and key parameters that must be observed during the simulation are highlighted, so that the computer simulation could be representative of the real effects in high-voltage switchgear.

Keywords

Matlab, internal arc, GIS, pressure rise, temperature rise, high voltage, switchgear.

Privitak I. Glavno sučelje programa, 'Sucelje_VN_GIS.m'

```
function varargout = Sucelje_VN_GIS(varargin)
% SUCELJE_VN_GIS M-file for Sucelje_VN_GIS.fig
%     Program računa porast tlaka i temperature, te mase SF6 plinova u

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Sucelje_VN_GIS_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Sucelje_VN_GIS_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Sucelje_VN_GIS is made visible.
function Sucelje_VN_GIS_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% varargin    command line arguments to Sucelje_VN_GIS (see VARARGIN)
% Choose default command line output for Sucelje_VN_GIS
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Sucelje_VN_GIS_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function tukFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function tukFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function dtFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function dtFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```

end

function tarcFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function tarcFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function PpFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function PpFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function A12FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function A12FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function alfa12FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function alfa12FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function P1FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function P1FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Temp1FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function Temp1FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function V1FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function V1FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function kpFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function kpFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function text1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

function kevapFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function kevapFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function WevapFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function WevapFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function WexFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function WexFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function TevapFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function TevapFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function P2FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function P2FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Temp2FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function Temp2FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function V2FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function V2FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function alfa23FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function alfa23FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function A23FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function A23FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function kab1FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function kab1FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function rhoinsFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function rhoinsFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Wab1FIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function Wab1FIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function etachFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function etachFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function etafillerFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

function etafillerFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function CvablFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function CvablFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function TablFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function TablFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function IrmsFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function IrmsFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function TauFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function TauFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function fFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function fFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function fiFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function fiFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function dFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function dFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function gamaFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function gamaFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function PeFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)

function PeFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on slider movement.
function slider4_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

function text_simFIG_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

function TriF_triLFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.TriF_triLFIG,'Value',1);
set(handles.TriF_dvaLFIG,'Value',0);
set(handles.JednaF_1LFIG,'Value',0);

% --- Executes on button press in TriF_dvaLFIG.
function TriF_dvaLFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.TriF_triLFIG,'Value',0);
set(handles.TriF_dvaLFIG,'Value',1);
set(handles.JednaF_1LFIG,'Value',0);

function JednaF_1LFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.TriF_triLFIG,'Value',0);
set(handles.TriF_dvaLFIG,'Value',0);
set(handles.JednaF_1LFIG,'Value',1);

function Podaci_mjerFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.Podaci_mjerFIG,'Value',1);
set(handles.Podaci_prorFIG,'Value',0);
set(handles.TriF_triLFIG,'enable','off');
set(handles.TriF_dvaLFIG,'enable','off');
set(handles.JednaF_1LFIG,'enable','off');

function Podaci_prorFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.Podaci_mjerFIG,'Value',0);
set(handles.Podaci_prorFIG,'Value',1);
set(handles.TriF_triLFIG,'enable','on');

```



```
set(handles.TriF_dvaLFIG, 'enable', 'on');
set(handles.JednaF_1LFIG, 'enable', 'on');
```

```
function PrekiniTIPKA_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
function BakreneFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
set(handles.AluminijskeFIG, 'Value', 0);
set(handles.BakreneFIG, 'Value', 1);
%Upis početnih parametara u textbox-ove
set(handles.tukFIG, 'String', num2str(0.5));
set(handles.dtFIG, 'String', num2str(0.00005));
set(handles.tarcFIG, 'String', num2str(0.3));
set(handles.PpFIG, 'String', num2str(900000));
set(handles.A12FIG, 'String', num2str(0.009));
set(handles.alfa12FIG, 'String', num2str(0.8));
set(handles.P1FIG, 'String', num2str(600000));
set(handles.Temp1FIG, 'String', num2str(293));
set(handles.V1FIG, 'String', num2str(0.3));
set(handles.kpFIG, 'String', num2str(0.5));
set(handles.kevapFIG, 'String', num2str(0.2));
set(handles.WevapFIG, 'String', num2str(6.18e6));
set(handles.WexFIG, 'String', num2str(1.2e6));
set(handles.TevapFIG, 'String', num2str(2870));
set(handles.P2FIG, 'String', num2str(101300));
set(handles.Temp2FIG, 'String', num2str(293));
set(handles.V2FIG, 'String', num2str(2.4));
set(handles.alfa23FIG, 'String', num2str(0.8));
set(handles.A23FIG, 'String', num2str(0));
set(handles.kablFIG, 'String', num2str(0));
set(handles.rhoinsFIG, 'String', num2str(2100));
set(handles.WablFIG, 'String', num2str(9.57e7));
set(handles.etachFIG, 'String', num2str(1));
set(handles.etafillerFIG, 'String', num2str(0.61));
set(handles.CvablFIG, 'String', num2str(1633));
set(handles.Tab1FIG, 'String', num2str(3000));
set(handles.IrmsFIG, 'String', num2str(40000));
set(handles.TauFIG, 'String', num2str(0.045));
set(handles.fFIG, 'String', num2str(50));
set(handles.fiFIG, 'String', num2str(1.5708));
set(handles.dFIG, 'String', num2str(0.07));
set(handles.gamaFIG, 'String', num2str(2.0944));
set(handles.PeFIG, 'String', num2str(101300));
```

```
function AluminijskeFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
set(handles.AluminijskeFIG, 'Value', 1);
set(handles.BakreneFIG, 'Value', 0);
%Upis početnih parametara u textbox-ove
set(handles.tukFIG, 'String', num2str(0.5));
set(handles.dtFIG, 'String', num2str(0.00005));
set(handles.tarcFIG, 'String', num2str(0.3));
set(handles.PpFIG, 'String', num2str(900000));
set(handles.A12FIG, 'String', num2str(0.009));
set(handles.alfa12FIG, 'String', num2str(0.8));
set(handles.P1FIG, 'String', num2str(600000));
set(handles.Temp1FIG, 'String', num2str(293));
set(handles.V1FIG, 'String', num2str(0.3));
set(handles.kpFIG, 'String', num2str(0.5));
set(handles.kevapFIG, 'String', num2str(0.4));
set(handles.WevapFIG, 'String', num2str(1.37e7));
set(handles.WexFIG, 'String', num2str(3.15e7));
set(handles.TevapFIG, 'String', num2str(2720));
```

```

set(handles.P2FIG, 'String', num2str(101300));
set(handles.Temp2FIG, 'String', num2str(293));
set(handles.V2FIG, 'String', num2str(2.4));
set(handles.alfa23FIG, 'String', num2str(0.8));
set(handles.A23FIG, 'String', num2str(0));
set(handles.kablFIG, 'String', num2str(0.1));
set(handles.rhoinsFIG, 'String', num2str(2100));
set(handles.WablFIG, 'String', num2str(9.57e7));
set(handles.etchFIG, 'String', num2str(1));
set(handles.etafillerFIG, 'String', num2str(0.61));
set(handles.CvablFIG, 'String', num2str(1633));
set(handles.TablFIG, 'String', num2str(3000));
set(handles.IrmsFIG, 'String', num2str(40000));
set(handles.TauFIG, 'String', num2str(0.045));
set(handles.fFIG, 'String', num2str(50));
set(handles.fiFIG, 'String', num2str(1.5708));
set(handles.dFIG, 'String', num2str(0.07));
set(handles.gamaFIG, 'String', num2str(2.0944));
set(handles.PeFIG, 'String', num2str(101300));

```

```

function UcitajFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)
Pocetni_pod=load('Pocetni_pod.mat');
Pocetni_pod=Pocetni_pod.Pocetni_pod;
set(handles.tukFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.tuk));
set(handles.dtFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.dt));
set(handles.tarcFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.tarc));
set(handles.PpFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Pp));
set(handles.A12FIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.A12));
set(handles.alfa12FIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.alfa12));
set(handles.P1FIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.P1));
set(handles.Temp1FIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Temp1));
set(handles.V1FIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.V1));
set(handles.kpFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.kp));
set(handles.kevapFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.kevap));
set(handles.WevapFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Wevap));
set(handles.WexFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Wex));
set(handles.TevapFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Tevap));
set(handles.P2FIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.P2));
set(handles.Temp2FIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Temp2));
set(handles.V2FIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.V2));
set(handles.alfa23FIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.alfa23));
set(handles.A23FIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.A23));
set(handles.kablFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.kabl));
set(handles.rhoinsFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.rhoins));
set(handles.WablFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Wabl));
set(handles.etchFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.etch));
set(handles.etafillerFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.etafiller));
set(handles.CvablFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Cvabl));
set(handles.TablFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Tabl));
set(handles.IrmsFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Irms));
set(handles.TauFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Tau));
set(handles.fFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.f));
set(handles.fiFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.fi));
set(handles.dFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.d));
set(handles.gamaFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.gama));
set(handles.PeFIG, 'String', num2str(Pocetni_pod.Pe));

```

```

function SpremiFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)
[ Pocetni_pod, Uspjeh ] =Unos_podataka( handles );
if Uspjeh==1
save('Pocetni_pod.mat', 'Pocetni_pod');

```

```
end
```

```
% SKUPLJANJE PODATAKA I PROVJERA JE LI KOJI PRAZAN
```

```
function PokreniFIG_Callback(hObject, eventdata, handles)  
[ gd,Uspjeh ] =Unos_podataka( handles );  
if Uspjeh==1  
Proracun(gd,handles); %Pokretanje glavnog proračuna  
end
```

Privitak II. Glavna funkcija proračuna, 'Proracun.m'

```
function [ masa1, masa2,Temp1,Temp2,P1,P2 ] = Proracun( gd,handles )
%Program računa porast tlaka i temperature, te mase SF6 plinova u
%spremniciima pri jednopolnom ili trolpolnom električnom luku.
%Sučelje i program su izrađeni i modificirani za diplomski rad, u
%lipnju 2017. godine.
%Autor: Eugen Štimac.
%gd :      Varijabla za ulazne parametre
%handles:  Upravljanje elementima sučelja

%      *****
%      PRORAČUN INICIJALNIH PODATAKA I SNAGE EL. LUKA
%      *****

%Varijable koje treba učitati iz sučelja (simulacija):
%-----
dt=gd.dt;          %Vremenski korak [s]
tuk=gd.tuk;        %Ukupno vrijeme simulacije [s]
n=round(tuk/dt);   %Broj koraka simulacije
tarc=gd.tarc;      %Trajanje luka [s]
l=round(tarc/dt);  %Broj vremenskih koraka za lučni napon
%Inicijalizacija textbox-a i ostalih elemenata
set(handles.slider4,'Min',0);
set(handles.slider4,'Max',n);
set(handles.text_simFIG,'BackgroundColor',[0.4 1 0.4]);
set(handles.text_simFIG,'FontWeight','bold');
set(handles.text_simFIG,'FontSize',15);
set(handles.PokreniFIG,'enable','off'); %Isključenje tipki
set(handles.UcitajFIG,'enable','off');
set(handles.SpremiFIG,'enable','off');
set(handles.Podaci_prorFIG,'enable','off');
set(handles.Podaci_mjerFIG,'enable','off');
set(handles.TriF_triLFIG,'enable','off');
set(handles.TriF_dvaLFIG,'enable','off');
set(handles.JednaF_1LFIG,'enable','off');
set(handles.PrekiniTIPKA,'enable','on'); %Uključenje prekidne tipke
set(handles.BakreneFIG,'enable','off');
set(handles.AluminijskeFIG,'enable','off');
%Kraj inicijalizacije sučelja i inicijalizacije osnovnih parametara
%-----

%Inicijalizacija varijabli - za glavni program
%-----
P1=zeros(n+1,1);      %Tlak u spremniku 1
P1(1,1)=gd.P1;        %Inicijalni tlak [Pa] - paziti jer nije [bar]!
P2=zeros(n+1,1);      %Tlak u spremniku 2
Temp1=zeros(n+1,1);   %Temperatura u spremniku 1
Temp1(1,1)=gd.Temp1; %Inicijalna temperatura [K]
Temp2=zeros(n+1,1);   %Temperatura u spremniku 2
w12=zeros(n+1,1);     %Brzina plina u otvoru A12 [m/s]
w23=zeros(n+1,1);     %Brzina plina u otvoru A23 [m/s]
Pel=zeros(n+1,1);     %Snaga električnog luka [W]
masa1=zeros(n+1,1);   %SF6 masa u lučnom spremniku [kg]
masa2=zeros(n+1,1);   %SF6 masa u ispušnom spremniku kg
```

```

dm12=zeros(n+1,1);      %SF6 masa koja istječe iz lučnog spremnika u
vremenu dt [kg]
dm23=zeros(n+1,1);      %SF6 masa koja istječe iz ispušnog spremnika u
vremenu dt [kg]
dmevap=zeros(n+1,1);    %Masa evaporiranog aluminijskog u vremenskom koraku dt
[kg]
dmabl=zeros(n+1,1);     %Masa abliranog materijala u vremenskom koraku dt
[kg]
Qel=zeros(n+1,1);       %dodatna toplina zbog doprinosa električne energije
Qel(1,1)=0;             %Količina prenesene električne energije u toplinu
Qex=zeros(n+1,1);       %Ukupna toplina egzotermne reakcije [J]
Qevap=zeros(n+1,1);     %Izvor/ponor topline zbog evaporacije [J]
Qabl=zeros(n+1,1);      %Izvor/ponor topline zbog ablacije [J]
Qout=zeros(n+1,1);      %Odvođena toplina iz lučnog spremnika zbog gubitka
mase
dT1=zeros(n+1,1);       %Promjena temperature u lučnom spremniku
dT2=zeros(n+1,1);       %Promjena temperature u ispušnom spremniku
Well=zeros(n+1,1);      %Električna energija luka u vremenskom koraku dt
Wel=zeros(n+1,1);       %Električna energija luka
rho1=zeros(n+1,1);      %Gustoća u lučnom spremniku - NEISKORIŠTENO
rho2=zeros(n+1,1);      %Gustoća u ispušnom spremniku
rho12=zeros(n+1,1);     %Gustoća u otvoru A12
rho23=zeros(n+1,1);     %Gustoća u otvoru A23
dQex=zeros(n+1,1);      %Dodatna toplina uslijed egzotermne (endotermne)
reakcije između isparenog metala i plina u dt
dQevap=zeros(n+1,1);    %Dodatna toplina uslijed isparenog metala u dt
dQabl=zeros(n+1,1);     %Dodatna toplina uslijed isparenog izolacijskog
materijala u dt
dQel=zeros(n+1,1);      %dodatna toplina zbog doprinosa električne energije u
dt
mflow12=zeros(n+1,1);   %maseni protok plina koji je prešao iz lučnog
prostora u ispušni prostor u intervalu dt
ir=zeros(1+1,1);        %Struja u fazi R
is=zeros(1+1,1);        %Struja u fazi S
it=zeros(1+1,1);        %Struja u fazi T
P12=zeros(n,1);         %Tlak membrane 12
P23=zeros(n,1);         %Tlak membrane 23
dQout=zeros(n,1);       %Toplina koja prelazi iz lučne u ispušnu komoru
cgas=zeros(n+1,1);      %Inicijalni udio mase plina
cgas(1,1)=1;
cevap=zeros(n+1,1);     %Inicijalni udio mase isparenih elektroda
cevap(1,1)=0;
cabl=zeros(n+1,1);      %Inicijalni udio mase abliranog materijala
cabl(1,1)=0;
%-----

```

```

%Učitavanje varijabli iz mape (foldera) - Aluminij
%-----

```

```

if (get(handles.AluminijskeFIG,'Value')==1 %Provjera radi li se o
aluminijskim elektrodama

```

```

TrenutniFolder0 = pwd; %Dohvaćanje radne mape

```

```

TrenutniFolder = strcat(TrenutniFolder0,'\Aluminijske_elektrode -
Podaci');

```

```

T=load(strcat(TrenutniFolder,'\T.mat')); %Učitavanje temperature (T)

```

```

T=T.T;

```

```

P=load(strcat(TrenutniFolder,'\P.mat')); %Učitavanje tlaka (P)

```

```

P=P.P;

```

```

R0=load(strcat(TrenutniFolder,'\R0.mat')); %Učitavanje R0

```

```

R0=R0.R0;

```

```

R10=load(strcat(TrenutniFolder,'\R10.mat')); %Učitavanje R10

```

```

R10=R10.R10;
R20=load(strcat(TrenutniFolder, '\R20.mat')); %Učitavanje R20
R20=R20.R20;
R30=load(strcat(TrenutniFolder, '\R30.mat')); %Učitavanje R30
R30=R30.R30;
R50=load(strcat(TrenutniFolder, '\R50.mat')); %Učitavanje R50
R50=R50.R50;
Cp0=load(strcat(TrenutniFolder, '\Cp0.mat')); %Učitavanje Cp0
Cp0=Cp0.Cp0;
Cp10=load(strcat(TrenutniFolder, '\Cp10.mat')); %Učitavanje Cp10
Cp10=Cp10.Cp10;
Cp20=load(strcat(TrenutniFolder, '\Cp20.mat')); %Učitavanje Cp20
Cp20=Cp20.Cp20;
Cp30=load(strcat(TrenutniFolder, '\Cp30.mat')); %Učitavanje Cp30
Cp30=Cp30.Cp30;
Cp50=load(strcat(TrenutniFolder, '\Cp50.mat')); %Učitavanje Cp50
Cp50=Cp50.Cp50;
rho0=load(strcat(TrenutniFolder, '\rho0.mat')); %Učitavanje rho0
rho0=rho0.rho0;
rho10=load(strcat(TrenutniFolder, '\rho10.mat')); %Učitavanje rho10
rho10=rho10.rho10;
rho20=load(strcat(TrenutniFolder, '\rho20.mat')); %Učitavanje rho20
rho20=rho20.rho20;
rho30=load(strcat(TrenutniFolder, '\rho30.mat')); %Učitavanje rho30
rho30=rho30.rho30;
rho50=load(strcat(TrenutniFolder, '\rho50.mat')); %Učitavanje rho50
rho50=rho50.rho50;
u0=load(strcat(TrenutniFolder, '\u0.mat')); %Učitavanje u0
u0=u0.u0;
u10=load(strcat(TrenutniFolder, '\u10.mat')); %Učitavanje u10
u10=u10.u10;
u20=load(strcat(TrenutniFolder, '\u20.mat')); %Učitavanje u20
u20=u20.u20;
u30=load(strcat(TrenutniFolder, '\u30.mat')); %Učitavanje u30
u30=u30.u30;
u50=load(strcat(TrenutniFolder, '\u50.mat')); %Učitavanje u50
u50=u50.u50;
uA1=load(strcat(TrenutniFolder, '\uA1.mat')); %Učitavanje uA1
uA1=uA1.uA1;
h0=load(strcat(TrenutniFolder, '\h0.mat')); %Učitavanje h0
h0=h0.h0;
h10=load(strcat(TrenutniFolder, '\h10.mat')); %Učitavanje h10
h10=h10.h10;
h20=load(strcat(TrenutniFolder, '\h20.mat')); %Učitavanje h20
h20=h20.h20;
h30=load(strcat(TrenutniFolder, '\h30.mat')); %Učitavanje h30
h30=h30.h30;
h50=load(strcat(TrenutniFolder, '\h50.mat')); %Učitavanje h50
h50=h50.h50;
tges=load(strcat(TrenutniFolder, '\tges.mat')); %Učitavanje tges
tges=tges.tges;%Ovo je mjereni podatak
Pges=load(strcat(TrenutniFolder, '\Pges.mat')); %Učitavanje Pges
Pges=Pges.Pges;%Ovo je mjereni podatak
end
%-----

%Učitavanje varijabli iz mape (foldera) - Bakar
%-----
if (get(handles.BakreneFIG, 'Value')==1 %Provjera radi li se o bakrenim
elektrodama

```

```

TrenutniFolder0 = pwd; %Dohvaćanje radne mape
TrenutniFolder = strcat(TrenutniFolder0, '\Bakrene_elektrode - Podaci');
T=load(strcat(TrenutniFolder, '\T.mat')); %Učitavanje temperature (T)
T=T.T;
P=load(strcat(TrenutniFolder, '\P.mat')); %Učitavanje tlaka (P)
P=P.P;
R0=load(strcat(TrenutniFolder, '\R0.mat')); %Učitavanje R0
R0=R0.R0;
R10=load(strcat(TrenutniFolder, '\R10.mat')); %Učitavanje R10
R10=R10.R10;
R20=load(strcat(TrenutniFolder, '\R20.mat')); %Učitavanje R20
R20=R20.R20;
Cp0=load(strcat(TrenutniFolder, '\Cp0.mat')); %Učitavanje Cp0
Cp0=Cp0.Cp0;
Cp10=load(strcat(TrenutniFolder, '\Cp10.mat')); %Učitavanje Cp10
Cp10=Cp10.Cp10;
Cp20=load(strcat(TrenutniFolder, '\Cp20.mat')); %Učitavanje Cp20
Cp20=Cp20.Cp20;
rho0=load(strcat(TrenutniFolder, '\rho0.mat')); %Učitavanje rho0
rho0=rho0.rho0;
rho10=load(strcat(TrenutniFolder, '\rho10.mat')); %Učitavanje rho10
rho10=rho10.rho10;
rho20=load(strcat(TrenutniFolder, '\rho20.mat')); %Učitavanje rho20
rho20=rho20.rho20;
u0=load(strcat(TrenutniFolder, '\u0.mat')); %Učitavanje u0
u0=u0.u0;
u10=load(strcat(TrenutniFolder, '\u10.mat')); %Učitavanje u10
u10=u10.u10;
u20=load(strcat(TrenutniFolder, '\u20.mat')); %Učitavanje u20
u20=u20.u20;
uCu=load(strcat(TrenutniFolder, '\uCu.mat')); %Učitavanje uCu
uCu=uCu.uCu;
h0=load(strcat(TrenutniFolder, '\h0.mat')); %Učitavanje h0
h0=h0.h0;
h10=load(strcat(TrenutniFolder, '\h10.mat')); %Učitavanje h10
h10=h10.h10;
h20=load(strcat(TrenutniFolder, '\h20.mat')); %Učitavanje h20
h20=h20.h20;
tges=load(strcat(TrenutniFolder, '\tges.mat')); %Učitavanje tges
tges=tges.tges; %Ovo je mjereni podatak
Pges=load(strcat(TrenutniFolder, '\Pges.mat')); %Učitavanje Pges
Pges=Pges.Pges; %Ovo je mjereni podatak
end
%-----

```

```

%Proračunate varijable - početna komora
%-----

```

```

V1=gd.V1; %Volumen početne komore [m3]
Pp=gd.Pp; %Tlak prorade membrane [Pa] - paziti jer nije [bar]!
alfa12=gd.alfa12; %Koeficijent istjecanja (unutarnji)
A12=gd.A12; %Presjek otvora membrane [m^2]
Rmix=zeros(n+1,1); %specifična plinska konstanta, komora 1
Rmix(1,1) = interp2(P,T,R0,P1(1,1),Temp1(1,1),'spline');
Cpmix=zeros(n+1,1); %specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka,
komora 1
Cpmix(1,1)= interp2(P,T,Cp0,P1(1,1),Temp1(1,1),'spline');
Cvmix=zeros(n+1,1); %specifični toplinski kapacitet kod konstantnog
volumena, komora 1
Cvmix(1,1)=Cpmix(1,1)-Rmix(1,1); %Inicijalna specifična toplina pri
konstantnom volumenu za mješavinu plina

```

```

Kmix=zeros(n+1,1); %adijabatski koeficijent, komora 1
Kmix(1,1) =Cpmix(1,1)/Cvmix(1,1); %Inicijalni adijabatski koeficijent
za mješavinu plina
umix=zeros(n+1,1); %specifična unutarnja energija, komora 1
umix(1,1)=interp2(P,T,u0,P1(1,1),Temp1(1,1),'spline');
hmix=zeros(n+1,1); %specifična entalpija, komora 1
hmix(1,1)=interp2(P,T,h0,P1(1,1),Temp1(1,1),'spline');
rhomix=zeros(n+1,1); %gustoća plina, komora 1
rhomix(1,1)=P1(1,1)/(Cvmix(1,1)*(Kmix(1,1)-1)*Temp1(1,1)); %Gustoća
plina [kg/m^3]
masa1(1,1)=rhomix(1,1)*V1; %Inicijalna masa SF6 [kg]
%-----

%Proračunate varijable - vanjski spremnik
%-----
P2(1,1)=gd.P2; %Inicijalni tlak u vanjskom spremniku [Pa]
Temp2(1,1)=gd.Temp2; %Inicijalna temperatura vanjskog spremnika [K]
V2=gd.V2; %Volumen vanjskog spremnika [m3]
alfa23=gd.alfa23; %Koeficijent istjecanja (vanjski)
A23=gd.A23; %Presjek otvora vanjske membrane [m^2]
R2=zeros(n+1,1); %specifična plinska konstanta, komora 2
R2(1,1) = interp2(P,T,R0,P2(1,1),Temp2(1,1),'spline');
Cp2=zeros(n+1,1); %specifični toplinski kapacitet kod konstantnog tlaka,
komora 2
Cp2(1,1)= interp2(P,T,Cp0,P2(1,1),Temp2(1,1),'spline');
Cv2=zeros(n+1,1); %specifični toplinski kapacitet kod konstantnog
volumena, komora 2
Cv2(1,1)=Cp2(1,1)-R2(1,1);
K2=zeros(n+1,1); %adijabatski koeficijent, komora 2
K2(1,1) =Cp2(1,1)/Cv2(1,1);
u2=zeros(n+1,1); %specifična unutarnja energija, komora 2
u2(1,1)=interp2(P,T,u0,P2(1,1),Temp2(1,1),'spline');
h2=zeros(n+1,1); %specifična entalpija, komora 2
h2(1,1)=interp2(P,T,h0,P2(1,1),Temp2(1,1),'spline');
rho2(1,1)=P2(1,1)/(Cv2(1,1)*(K2(1,1)-1)*Temp2(1,1)); %gustoća plina,
komora 2
masa2(1,1)=rho2(1,1)*V2; %Inicijalna masa SF6 plina [kg]
%-----

%Varijable vanjskog prostora
%-----
Pe=gd.Pe; %Vanjski tlak [Pa]
%-----

%Evaporacija elektroda
%-----
kevap=gd.kevap; %Udio električne energije luka za
evaporaciju (kp+kevap+kabl=1)
Wevap=gd.Wevap; %Specifična energija evaporacije aluminijska
[J/kg]
Wex=gd.Wex; %Specifična energija egzotermne reakcije
elektroda+SF6 [J/kg]
Qex(1,1)=0; %Inicijalna toplina egzotermne reakcije [J]
Qheat(1,1)=0; %Ukupna toplina prenesena plinu, Qheat=Qel+Qex [J]
Tevap=gd.Tevap; %Temperatura evaporacije elektroda [K]
mevap=zeros(n+1,1); %Masa isparenog metala

```



```

uevap1=zeros(n+1,1); %specifična unutarnja energija isparenog materijala
elektroda kod temperature Tevap i trenutnog tlaka p1 u lučnom prostoru
uevap2=zeros(n+1,1); %specifična unutarnja energija isparenog materijala
elektroda kod temperature T1 i trenutnog tlaka p1 u lučnom prostoru
if (get(handles.AluminijskeFIG, 'Value')==1
uevap1(1,1)=interp1(T,uAl,Tevap);
uevap2(1,1)=interp1(T,uAl,Temp1(1,1));
else
uevap1(1,1)=interp1(T,uCu,Tevap);
uevap2(1,1)=interp1(T,uCu,Temp1(1,1));
end
%-----

%Abllacija izolacije
%-----
kabl=gd.kabl; %Udio električne energije luka za
ablaciju (kp+kevap+kabl=1)
rhoins=gd.rhoins; %Specifična gustoća čvrstog izolacijskog
materijala [kg/m3]
Wabl=gd.Wabl; %Specifična disocirana energija epoxy
materijala [J/kg]
Vabl=1/(Wabl*rhoins); %Volumen disociranog čvrstog materijala po
energiji [m3/J]
etach4=gd.etach; %Udio plina (CH4) na abliranom
materijalu
etafiller=gd.etafiller; %Udio materijala ispune u izolatoru
Cvabl=gd.Cvabl; %Specifična toplina metana (CH4) pri
konstantnom volumenu [J/(kgK)]
Tabl=gd.Tabl; %Abllacijska temperatura epoxy materijala
[K]
mabl=zeros(n+1,1); %Masa abliranog materijala
Qabl(1,1)=0; %Dodatna toplina uslijed isparenog izolacijskog
materijala
mtotal=zeros(n+1,1);
mtotal(1,1)=masa1(1,1)+mevap(1,1)+mabl(1,1); %Ukupna inicijalna masa u
početnom spremniku
%-----

%Podaci za snagu električnog luka
%-----
kp=gd.kp; %Koeфицијent prijenosa energije (udio električne
% energije iskorišten za grijanje plina) (kp+kevap+kabl=1)
Irms=gd.Irms; %RMS iznos simetrične komponente struje kratkog spoja [A]
Tau=gd.Tau; %Vremenska konstanta asimetrične komponente struje
kratkog spoja [s]
f=gd.f; %Frekvencija [Hz]
om=2*pi*f; %Kutna frekvencija [1/s]
fi=gd.fi; %Kut inicijacije greške (trenutak greške)
gama=gd.gama; %Fazni pomak
d=gd.d; %Udaljenost između centara polova [m]
%-----

%Proračun snage električnog luka - Ako se ne uzimaju mjereni podaci
%-----
if (get(handles.Podaci_prorFIG, 'Value')==1 %Provjera radi li se o
proračunatim ili mjerenim podacima
Uarc=(4000+0.5*Irms/10); %Gradijent napona el. luka

```

```

    if Uarcd>5000
        Uarc=5000;
    end
    Uarc=Uarc*d; %Napon el. luka
    t(1,1)=0; %Definicija vremenske linije
%Glavni račun snage
    for k=1:l+1
        ir(k,1)=Irms*sqrt(2)*(sin(om*t(k,1)+fi)-sin(fi))*exp(-
t(k,1)/Tau)); %Struja u fazi R
        is(k,1)=Irms*sqrt(2)*(sin(om*t(k,1)+fi-gama)-sin(fi-gama))*exp(-
t(k,1)/Tau)); %Struja u fazi S
        it(k,1)=Irms*sqrt(2)*(sin(om*t(k,1)+fi+gama)-sin(fi+gama))*exp(-
t(k,1)/Tau)); %Struja u fazi T

        if (get(handles.JednaF_1LFIG,'Value')==1)
            Pel(k,1)=Uarc*(abs(ir(k,1))); %Snaga električnog luka
(Greška - 1 faza, 1 luk)
        else
            if (get(handles.TriF_dvaLFIG,'Value')==1)

Pel(k,1)=0.5*Uarc*(abs(ir(k,1))+abs(is(k,1))+abs(it(k,1))); %Snaga
električnog luka (Trofazna greška - 2 luka)
            else

Pel(k,1)=Uarc*(abs(ir(k,1))+abs(is(k,1))+abs(it(k,1))); %Snaga
električnog luka (Trofazna greška - 3 luka)
            end
        end
        t(k+1,1)=t(k,1)+dt;
    end
end
%-----

%Početne varijable za glavni proračun
%-----
t(1,1)=0;%Definicija vremena proračuna
for m=1:n
    t(m+1,1)=t(m,1)+dt;
end
Well(1,1)=0;
Wel(1,1)=0;
%-----

%
% *****
% GLAVNI IZRAČUN
% (PORAST TEMPERATURE I TLAKA U LUČNOJ I VANJSKOJ KOMORI PRIJE I
% POSLIJE PRORADE MEMBRANE)
% *****
%

ALG=1; %Oznaka da membrana nije proradila
for m=1:n
    if get(handles.PrekiniTIPKA,'value')==1
        break %Izlazak iz petlje i kraj simulacije ako je stisnuta
tipka 'Prekini simulaciju'
    end
    %Proračun porasta temperature i tlaka u lučnom prostoru prije prorade
membrane

```

```

    if (ALG==1) %Je li membrana zatvorena

        if (get(handles.Podaci_mjerFIG,'Value')==1 %Radi li se o mjenim
podacima
            Pel(m+1,1)=interp1(tges,Pges,t(m+1,1)); %Računanje snage iz
izmjenjenih podataka
        end
        Well(m+1,1)=Pel(m+1,1)*dt; %električna energija luka u vremenskom
intervalu dt
        Wel(m+1,1)=Wel(m,1)+Well(m+1,1); %ukupna električna energija tijekom
lučnog kvara trajanja t

        dmevap(m,1)=kevap*Pel(m+1,1)*dt/Wevap; %Masa isparenog materijala
elektroda u intervalu dt
        dQex(m,1)=Wex*dmevap(m,1); %Dodatna toplina uslijed egzotermne
(endotermne) reakcije između isparenog metala i plina u dt
        dQevap(m,1)=dmevap(m,1)*(uevap1(m,1)-uevap2(m,1)); %Dodatna toplina
uslijed isparenog metala u dt
        dmabl(m,1)=kabl*Pel(m+1,1)*dt*Vabl*rhoins*etach4*(1-etafiller); %Masa
isparenog izolacijskog materijala u intervalu dt
        dQabl(m,1)=dmabl(m,1)*Cvabl*(Tabl-Templ(m,1)); %Dodatna toplina
uslijed isparenog izolacijskog materijala u dt
        dQel(m,1)=kp*Pel(m+1,1)*dt; %dodatna toplina zbog doprinosa
električne energije u dt

        dT1(m,1)=(dQel(m,1)+dQex(m,1)+dQevap(m,1)+dQabl(m,1))/(mtotal(m,1)*Cvmix(
m,1)); %Porast temperature u lučnom prostoru prije prorade membrane u
intervalu dt

        Temp1(m+1,1)=Temp1(m,1)+dT1(m,1); %temperatura u lučnom prostoru
nakon intervala dt
        masal(m+1,1)=masal(m,1); %Masa SF6 nakon intervala dt, lučna komora
        mevap(m+1,1)=mevap(m,1)+dmevap(m,1); %Masa isparenog materijala
elektroda nakon intervala dt
        mabl(m+1,1)=mabl(m,1)+dmabl(m,1); %Masa isparenog izolacijskog
materijala nakon intervala dt
        mtotal(m+1,1)=masal(m+1,1)+mevap(m+1,1)+mabl(m+1,1); %Ukupna masa u
lučnom prostoru nakon intervala dt
        P1(m+1,1)=((Kmix(m,1)-
1)/V1)*mtotal(m+1,1)*Cvmix(m,1)*Temp1(m+1,1); %tlak u lučnom prostoru
nakon intervala dt

        cgas(m+1,1)=masal(m+1,1)/mtotal(m+1,1); %Masena koncentracija plina
SF6 u mješavini
        cevap(m+1,1)=mevap(m+1)/mtotal(m+1,1); %Masena koncentracija
isparenog materijala elektroda u mješavini
        cabl(m+1,1)=mabl(m+1,1)/mtotal(m+1,1); %Masena koncentracija
isparenog izolacijskog materijala u mješavini

        if (get(handles.AluminijskeFIG,'Value')==1 %Radi li se o
aluminijskim elektrodama, proračun parametara mješavine

            [Rmix(m+1,1),Cpmix(m+1,1),Cvmix(m+1,1),Kmix(m+1,1),umix(m+1,1),hmix(m+1,1
),rhomix(m+1,1)]=tmpAl(cevap(m+1,1),P1(m+1,1),Temp1(m+1,1),P,T,R0,R10,R20
,R30,R50,Cp0,Cp10,Cp20,Cp30,Cp50,u0,u10,u20,u30,u50,h0,h10,h20,h30,h50,rh
o0,rho10,rho20,rho30,rho50);
            uevap1(m+1,1)=interp1(T,uAl,Tevap); %specifična unutarnja
energija isparenog materijala elektroda kod temperature Tevap i trenutnog
tlaka p1 u lučnom prostoru

```

```

    uevap2(m+1,1)=interp1(T,uAl,Temp1(m+1,1)); %specifična unutarnja
energija isparenog materijala elektroda kod temperature T1 i trenutnog
tlaka p1 u lučnom prostoru
    else %Račun za bakrene elektrode, proračun parametara mješavine

[Rmix(m+1,1),Cpmix(m+1,1),Cvmix(m+1,1),Kmix(m+1,1),umix(m+1,1),hmix(m+1,1)
),rhomix(m+1,1)]=tmpCu(cevap(m+1,1),P1(m+1,1),Temp1(m+1,1),P,T,R0,R10,R20
,Cp0,Cp10,Cp20,u0,u10,u20,h0,h10,h20,rho0,rho10,rho20);
    uevap1(m+1,1)=interp1(T,uCu,Tevap); %specifična unutarnja
energija isparenog materijala elektroda kod temperature Tevap i trenutnog
tlaka p1 u lučnom prostoru
    uevap2(m+1,1)=interp1(T,uCu,Temp1(m+1,1)); %specifična unutarnja
energija isparenog materijala elektroda kod temperature T1 i trenutnog
tlaka p1 u lučnom prostoru
end

    Qel(m+1,1)=Qel(m,1)+dQel(m,1); %dodatna toplina zbog doprinosa
električne energije
    Qex(m+1,1)=Qex(m,1)+dQex(m,1); %Dodatna toplina uslijed egzotermne
(endotermne) reakcije između isparenog metala i plina
    Qevap(m+1,1)=Qevap(m,1)+dQevap(m,1); %Dodatna toplina uslijed
isparenog metala
    Qabl(m+1,1)=Qabl(m,1)+dQabl(m,1); %Dodatna toplina uslijed isparenog
izolacijskog materijala
    Qheat(m+1,1)=Qel(m+1,1)+Qex(m+1,1); %Udio električne energije luka
koji se utroši na zagrijavanje plina SF6

    P2(m+1,1)=P2(m,1); %Tlak u ispušnoj komori
    Temp2(m+1,1)=Temp2(m,1); %Temperatura u ispušnoj komori
    masa2(m+1,1)=masa2(m,1); %Masa SF6 nakon intervala dt, ispušna komora

    rho2(m+1,1)=rho2(m,1); %gustoća plina, komora 2
    Cp2(m+1,1)=Cp2(m,1); %specifični toplinski kapacitet kod konstantnog
tlaka, komora 2
    K2(m+1,1)=K2(m,1); %adijabatski koeficijent, komora 2
    Cv2(m+1,1)=Cv2(m,1); %specifični toplinski kapacitet kod konstantnog
volumena, komora 2
    u2(m+1,1)=u2(m,1); %specifična unutarnja energija, komora 2
    h2(m+1,1)=h2(m,1); %specifična entalpija, komora 2

    if P1(m+1,1)>=Pp %Provjera je li membrana proradila
    ALG=2; %Oznaka da je membrana proradila
end

%Proračun porasta temp. i tlaka u lučnom prostoru nakon prorade membrane
    else %'else' za glavni 'if' uvjet, znači da je membrana proradila

    if (get(handles.Podaci_mjerFIG,'Value')==1 %Radi li se o
mjerenim podacima
        Pel(m+1,1)=interp1(tges,Pges,t(m+1,1));%Računanje snage iz
izmjerenih podataka
    end
    Well(m+1,1)=Pel(m+1,1)*dt; %električna energija luka u vremenskom
intervalu dt
    Wel(m+1,1)=Wel(m,1)+Well(m+1,1); %ukupna električna energija
tijekom lučnog kvara trajanja t
    if (P1(m,1)/P2(m,1))>=1.7 %Proračun tlaka u otvoru membrane 1
        P12(m,1)=P1(m,1)*(2/(Kmix(m,1)+1))^(Kmix(m,1)/(Kmix(m,1)-1));
    else
        P12(m,1)=P2(m,1);
    end
end

```

```

        if (P1(m,1)/P2(m,1))<=1.01
            P1(m,1)=1.01*P2(m,1);
        end
    end

    rho12(m,1)=rhomix(m,1)*(P12(m,1)/P1(m,1))^(1/Kmix(m,1)); %gustoća
    plina koji prolazi kroz otvor membrane 1
    w12(m,1)=sqrt(2*Kmix(m,1)*P1(m,1)/((Kmix(m,1)-1)*rhomix(m,1))*(1-
    (P12(m,1)/P1(m,1))^((Kmix(m,1)-1)/Kmix(m,1)))); %Brzina strujanja plina
    kroz membranu 1

    dm12(m,1)=alfa12*A12*rho12(m,1)*w12(m,1)*dt; %Masa plina koja je
    prešla iz lučnog prostora u ispušni prostor u intervalu dt
    mflow12(m,1)=alfa12*A12*rho12(m,1)*w12(m,1); %maseni protok plina
    koji je prešao iz lučnog prostora u ispušni prostor u intervalu dt
    dmevap(m,1)=kevap*Pel(m+1,1)*dt/Wevap; %Masa isparenog materijala
    elektroda u intervalu dt
    dmabl(m,1)=kabl*Pel(m+1,1)*dt*Vabl*rhoins*etach4*(1-
    etafiller); %Masa isparenog izolacijskog materijala u intervalu dt

    dQel(m,1)=kp*Pel(m+1,1)*dt; %dodatna toplina zbog doprinosa
    električne energije u dt
    dQex(m,1)=Wex*dmevap(m,1); %Dodatna toplina uslijed egzotermne
    (endotermne) reakcije između isparenog metala i plina u dt
    dQout(m,1)=dm12(m,1)*(hmix(m,1)-umix(m,1)); %Toplina koja prelazi iz
    lučne u ispušnu komoru u dt
    dQevap(m,1)=dmevap(m,1)*(uevap1(m,1)-uevap2(m,1)); %Dodatna toplina
    uslijed isparenog metala u dt
    dQabl(m,1)=dmabl(m,1)*Cvabl*(Tabl-Temp1(m,1)); %Dodatna toplina
    uslijed isparenog izolacijskog materijala u dt

    dT1(m,1)=(dQel(m,1)+dQex(m,1)-
    dQout(m,1)+dQevap(m,1)+dQabl(m,1))/(mtotal(m,1)*Cvmix(m,1)); %Porast
    temperature u lučnom prostoru prije prorade membrane u intervalu dt
    Temp1(m+1,1)=Temp1(m,1)+dT1(m,1); %temperatura u lučnom prostoru
    nakon intervala dt

    masal(m+1,1)=masal(m,1)-cgas(m,1)*dm12(m,1); %Masa SF6 nakon
    intervala dt, lučna komora
    mevap(m+1,1)=mevap(m,1)+dmevap(m,1)-cevap(m,1)*dm12(m,1); %Masa
    isparenog materijala elektroda nakon intervala dt
    mabl(m+1,1)=mabl(m,1)+dmabl(m,1)-cabl(m,1)*dm12(m,1); %Masa
    isparenog izolacijskog materijala nakon intervala dt
    mtotal(m+1,1)=masal(m+1,1)+mevap(m+1,1)+mabl(m+1,1); %Ukupna masa u
    lučnom prostoru nakon intervala dt
    P1(m+1,1)=((Kmix(m,1)-
    1)/V1)*mtotal(m+1,1)*Cvmix(m,1)*Temp1(m+1,1); %tlak u lučnom prostoru
    nakon intervala dt

    cgas(m+1,1)=masal(m+1,1)/mtotal(m+1,1); %Masena koncentracija plina
    SF6 u mješavini
    cevap(m+1,1)=mevap(m+1,1)/mtotal(m+1,1); %Masena koncentracija
    isparenog materijala elektroda u mješavini
    cabl(m+1,1)=mabl(m+1,1)/mtotal(m+1,1); %Masena koncentracija
    isparenog izolacijskog materijala u mješavini

    if (get(handles.AluminijskeFIG,'Value')==1 %Radi li se o
    aluminijskim elektrodama, proračun parametara mješavine

    [Rmix(m+1,1),Cpmix(m+1,1),Cvmix(m+1,1),Kmix(m+1,1),umix(m+1,1),hmix(m+1,1)

```

```

), rhomix(m+1,1)]=tmpAl(cevap(m+1,1),P1(m+1,1),Temp1(m+1,1),P,T,R0,R10,R20
,R30,R50,Cp0,Cp10,Cp20,Cp30,Cp50,u0,u10,u20,u30,u50,h0,h10,h20,h30,h50,rh
o0,rho10,rho20,rho30,rho50);
    uevap1(m+1,1)=interp1(T,uAl,Tevap); %specifična unutarnja
energija isparenog materijala elektroda kod temperature Tevap i trenutnog
tlaka p1 u lučnom prostoru
    uevap2(m+1,1)=interp1(T,uAl,Temp1(m+1,1)); %specifična unutarnja
energija isparenog materijala elektroda kod temperature T1 i trenutnog
tlaka p1 u lučnom prostoru
    else %Račun za bakrene elektrode, proračun parametara mješavine

[Rmix(m+1,1),Cpmix(m+1,1),Cvmix(m+1,1),Kmix(m+1,1),umix(m+1,1),hmix(m+1,1
), rhomix(m+1,1)]=tmpCu(cevap(m+1,1),P1(m+1,1),Temp1(m+1,1),P,T,R0,R10,R20
,Cp0,Cp10,Cp20,u0,u10,u20,h0,h10,h20,rho0,rho10,rho20);
    uevap1(m+1,1)=interp1(T,uCu,Tevap); %specifična unutarnja
energija isparenog materijala elektroda kod temperature Tevap i trenutnog
tlaka p1 u lučnom prostoru
    uevap2(m+1,1)=interp1(T,uCu,Temp1(m+1,1)); %specifična unutarnja
energija isparenog materijala elektroda kod temperature T1 i trenutnog
tlaka p1 u lučnom prostoru
    end

    Qel(m+1,1)=Qel(m,1)+dQel(m,1); %dodatna toplina zbog doprinosa
električne energije
    Qex(m+1,1)=Qex(m,1)+dQex(m,1); %Dodatna toplina uslijed egzotermne
(endotermne) reakcije između isparenog metala i plina
    Qout(m+1,1)=Qout(m,1)+dQout(m,1); %Toplina koja prelazi iz lučne u
ispušnu komoru
    Qevap(m+1,1)=Qevap(m,1)+dQevap(m,1); %Dodatna toplina uslijed
isparenog metala
    Qabl(m+1,1)=Qabl(m,1)+dQabl(m,1); %Dodatna toplina uslijed isparenog
izolacijskog materijala
    Qheat(m+1,1)=Qel(m+1,1)+Qex(m+1,1); %Udio električne energije luka
koji se utroši na zagrijavanje plina SF6

%Proračun porasta temperature i tlaka u ispušnoj komori
    if (P2(m,1)/Pe)>=1.7 %Proračun tlaka u otvoru membrane 2
        P23(m,1)=P2(m,1)*(2/(K2(m,1)+1))^(K2(m,1)/(K2(m,1)-1));
    else
        P23(m,1)=Pe;
    end

    rho23(m,1)=rho2(m,1)*(P23(m,1)/Pe)^(1/K2(m,1)); %gustoća plina koji
prolazi kroz otvor membrane 2
    w23(m,1)=sqrt(2*K2(m,1)*P2(m,1)/((K2(m,1)-1)*rho2(m,1))*(1-
(P23(m,1)/P2(m,1))^(K2(m,1)-1)/K2(m,1))); %Brzina strujanja plina kroz
membranu 2

    dm23(m,1)=alfa23*A23*rho23(m,1)*w23(m,1)*dt; %Masa plina koja je
prešla iz ispušnog prostora i vanjski prostor u intervalu dt
    dT2(m,1)=(dm12(m,1)*(hmix(m,1)-u2(m,1))-dm23(m,1)*(h2(m,1)-
u2(m,1)))/(masa2(m,1)*Cv2(m,1)); %Porast temperature u ispušnom prostoru
tijekom intervala dt

    Temp2(m+1,1)=Temp2(m,1)+dT2(m,1); %temperatura u ispušnom prostoru
na kraju intervala dt
    masa2(m+1,1)=masa2(m,1)+dm12(m,1)-dm23(m,1); %masa plina u ispušnom
prostoru nakon što je vremenski interval prošao
    P2(m+1,1)=(K2(m,1)-1)/V2*masa2(m+1,1)*Cv2(m,1)*Temp2(m+1,1); %tlak u
ispušnom prostoru na kraju intervala dt

```

```

        R2(m+1,1) =
interp2(P,T,R0,P2(m+1,1),Temp2(m+1,1),'spline'); %specifična plinska
konstanta, komora 2
        Cp2(m+1,1)=
interp2(P,T,Cp0,P2(m+1,1),Temp2(m+1,1),'spline'); %specifični toplinski
kapacitet kod konstantnog tlaka, komora 2
        Cv2(m+1,1)=Cp2(m+1,1)-R2(m+1,1); %specifični toplinski kapacitet kod
konstantnog volumena, komora 2
        K2(m+1,1) =Cp2(m+1,1)/Cv2(m+1,1); %adijabatski koeficijent, komora 2

u2(m+1,1)=interp2(P,T,u0,P2(m+1,1),Temp2(m+1,1),'spline'); %specifična
unutarnja energija, komora 2

h2(m+1,1)=interp2(P,T,h0,P2(m+1,1),Temp2(m+1,1),'spline'); %specifična
entalpija, komora 2

rho2(m+1,1)=interp2(P,T,rho0,P2(m+1,1),Temp2(m+1,1),'spline'); %gustoća
plina, komora 2
    end %Kraj glavnog 'if' uvjeta
    %PROGRESS BAR
    set(handles.slider4,'Value',m);
    set(handles.text_simFIG,'string',strcat(num2str((m/n)*100),'%'));
    refresh
    drawnow
    %PROGRESS BAR - kraj
end

%
%
%
%
%*****
%KRAJ 'FOR' PETLJE
%*****

%Resetiranje teksta
%-----
set(handles.text_simFIG,'BackgroundColor',[1 0.05 0.05]);
set(handles.text_simFIG,'string','SIMULACIJA GOTOVA - PRIČEKAJTE 0/6');
set(handles.slider4,'Value',0);
set(handles.PrekiniTIPKA,'value',0);
set(handles.PrekiniTIPKA,'enable','off');
refresh
drawnow
%-----

%Stvaranje foldera i snimanje rezultata u datoteke
%-----
TrenutnoVrijeme = (datestr(now,'yyyy-mm-dd HH:MM:SS'));
TrenutnoVrijeme = strrep(TrenutnoVrijeme,':','-');
Postoji = exist('Rezultati','dir');
if (Postoji)<7
mkdir Rezultati;
end
mkdir('Rezultati',TrenutnoVrijeme);

TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder,'\','Rezultati\ ',TrenutnoVrijeme,'\Izlaz_P1.txt');
csvwrite(TrenutniFolder,P1);
TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder,'\','Rezultati\ ',TrenutnoVrijeme,'\Izlaz_P1.xls');

```

```

xlswrite(TrenutniFolder,P1);
set(handles.text_simFIG,'string','SIMULACIJA GOTOVA - PRIČEKAJTE 1/6');
refresh
drawnow
TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder,'\','Rezultati\ ',TrenutnoVrijeme,'\Izlaz_Temp1.txt'
);
csvwrite(TrenutniFolder,Temp1);
TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder,'\','Rezultati\ ',TrenutnoVrijeme,'\Izlaz_Temp1.xls'
);
xlswrite(TrenutniFolder,Temp1);
set(handles.text_simFIG,'string','SIMULACIJA GOTOVA - PRIČEKAJTE 2/6');
refresh
drawnow
TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder,'\','Rezultati\ ',TrenutnoVrijeme,'\Izlaz_masa1.txt'
);
csvwrite(TrenutniFolder,masa1);
TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder,'\','Rezultati\ ',TrenutnoVrijeme,'\Izlaz_masa1.xls'
);
xlswrite(TrenutniFolder,masa1);
set(handles.text_simFIG,'string','SIMULACIJA GOTOVA - PRIČEKAJTE 3/6');
refresh
drawnow
TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder,'\','Rezultati\ ',TrenutnoVrijeme,'\Izlaz_P2.txt');
csvwrite(TrenutniFolder,P2);
TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder,'\','Rezultati\ ',TrenutnoVrijeme,'\Izlaz_P2.xls');
xlswrite(TrenutniFolder,P2);
set(handles.text_simFIG,'string','SIMULACIJA GOTOVA - PRIČEKAJTE 4/6');
refresh
drawnow
TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder,'\','Rezultati\ ',TrenutnoVrijeme,'\Izlaz_Temp2.txt'
);
csvwrite(TrenutniFolder,Temp2);
TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder,'\','Rezultati\ ',TrenutnoVrijeme,'\Izlaz_Temp2.xls'
);
xlswrite(TrenutniFolder,Temp2);
set(handles.text_simFIG,'string','SIMULACIJA GOTOVA - PRIČEKAJTE 5/6');
refresh
drawnow
TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder,'\','Rezultati\ ',TrenutnoVrijeme,'\Izlaz_masa2.txt'
);
csvwrite(TrenutniFolder,masa2);
TrenutniFolder = pwd;

```



```

TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder, '\', 'Rezultati\ ', TrenutnoVrijeme, '\Izlaz_masa2.xls'
);
xlswrite(TrenutniFolder, masa2);
set(handles.text_simFIG, 'string', 'SIMULACIJA GOTOVA - PRIČEKAJTE 6/6');
refresh
drawnow
Izlazni_podaci.P1=P1; %Spremanje izlaznih podataka u 'Izlazni_podaci.mat'
Izlazni_podaci.Temp1=Temp1;
Izlazni_podaci.masal=masal;
Izlazni_podaci.P2=P2;
Izlazni_podaci.Temp2=Temp2;
Izlazni_podaci.masa2=masa2;
Izlazni_podaci.t=t;
Izlazni_podaci.Pel=Pel;
Izlazni_podaci.Qel=Qel;
Izlazni_podaci.Qex=Qex;
Izlazni_podaci.Qheat=Qheat;
TrenutniFolder = pwd;
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder, '\', 'Rezultati\ ', TrenutnoVrijeme, '\Izlazni_podaci.m
at');
save(TrenutniFolder, 'Izlazni_podaci');
TrenutniFolder = pwd;%Spremanje ulaznih podataka u 'Ulazni_podaci.mat'
TrenutniFolder =
strcat(TrenutniFolder, '\', 'Rezultati\ ', TrenutnoVrijeme, '\Ulazni_podaci.ma
t');
Ulazni_podaci=gd;
save(TrenutniFolder, 'Ulazni_podaci');
%-----

%Plotanje
%-----
X1=t;
Y1=P1;
Y2=Temp1;
Y3=P2;
Y4=Temp2;
Crtanje(X1, Y1, Y2, Y3, Y4, TrenutnoVrijeme);
%-----

%Resetiranje Textbox-a i tipki
%-----
set(handles.text_simFIG, 'BackgroundColor', [1 1 1]);
set(handles.text_simFIG, 'FontWeight', 'normal');
set(handles.text_simFIG, 'FontSize', 10);
set(handles.text_simFIG, 'string', {'Simulacija spremna - unesite
parametre'; '(moгуće unositi samo brojke i eksponente oblika npr.
3.1415e12)'});
set(handles.PokreniFIG, 'enable', 'on');
set(handles.UcitajFIG, 'enable', 'on');
set(handles.SpremiFIG, 'enable', 'on');
set(handles.Podaci_prorFIG, 'enable', 'on');
set(handles.Podaci_mjerFIG, 'enable', 'on');
set(handles.TriF_triLFIG, 'enable', 'on');
set(handles.TriF_dvaLFIG, 'enable', 'on');
set(handles.JednaF_1LFIG, 'enable', 'on');
set(handles.BakreneFIG, 'enable', 'on');
set(handles.AluminijskeFIG, 'enable', 'on');
%-----
end %kraj funkcije 'Proracun.m'

```

Privitak III. Pomoćna funkcija u proračunu, 'tmpAl.m'

```
function  
[Rmix, Cpmix, Cvmix, Kmix, umix, hmix, rhomix]=tmp(cevap, P1, Temp1, P, T, R0, R10, R20, R30, R50, Cp0, Cp10, Cp20, Cp30, Cp50, u0, u10, u20, u30, u50, h0, h10, h20, h30, h50, rho0, rho10, rho20, rho30, rho50)
```

```
if (cevap>=0) && (cevap<0.1)  
  
    R0A1=interp2(P, T, R0, P1, Temp1, 'spline');  
    R10A1=interp2(P, T, R10, P1, Temp1, 'spline');  
    Rmix=R0A1+cevap*(R10A1-R0A1)/0.1;  
  
    Cp0A1=interp2(P, T, Cp0, P1, Temp1, 'spline');  
    Cp10A1=interp2(P, T, Cp10, P1, Temp1, 'spline');  
    Cpmix=Cp0A1+cevap*(Cp10A1-Cp0A1)/0.1;  
  
    Cvmix=Cpmix-Rmix;  
    Kmix=Cpmix/Cvmix;  
  
    u0A1=interp2(P, T, u0, P1, Temp1, 'spline');  
    u10A1=interp2(P, T, u10, P1, Temp1, 'spline');  
    umix=u0A1+cevap*(u10A1-u0A1)/0.1;  
  
    h0A1=interp2(P, T, h0, P1, Temp1, 'spline');  
    h10A1=interp2(P, T, h10, P1, Temp1, 'spline');  
    hmix=h0A1+cevap*(h10A1-h0A1)/0.1;  
  
    rho0A1=interp2(P, T, rho0, P1, Temp1, 'spline');  
    rho10A1=interp2(P, T, rho10, P1, Temp1, 'spline');  
    rhomix=rho0A1+cevap*(rho10A1-rho0A1)/0.1;
```

```
elseif (cevap>=0.1) && (cevap<0.2)  
  
    R10A1=interp2(P, T, R10, P1, Temp1, 'spline');  
    R20A1=interp2(P, T, R20, P1, Temp1, 'spline');  
    Rmix=R10A1+(cevap-0.1)*(R20A1-R10A1)/0.1;  
  
    Cp10A1=interp2(P, T, Cp10, P1, Temp1, 'spline');  
    Cp20A1=interp2(P, T, Cp20, P1, Temp1, 'spline');  
    Cpmix=Cp10A1+(cevap-0.1)*(Cp20A1-Cp10A1)/0.1;  
  
    Cvmix=Cpmix-Rmix;  
    Kmix=Cpmix/Cvmix;  
  
    u10A1=interp2(P, T, u10, P1, Temp1, 'spline');  
    u20A1=interp2(P, T, u20, P1, Temp1, 'spline');  
    umix=u10A1+(cevap-0.1)*(u20A1-u10A1)/0.1;  
  
    h10A1=interp2(P, T, h10, P1, Temp1, 'spline');  
    h20A1=interp2(P, T, h20, P1, Temp1, 'spline');  
    hmix=h10A1+(cevap-0.1)*(h20A1-h10A1)/0.1;
```

```

rho10A1=interp2 (P, T, rho10, P1, Temp1, 'spline');
rho20A1=interp2 (P, T, rho20, P1, Temp1, 'spline');
rhomix=rho10A1+ (cevap-0.1) * (rho20A1-rho10A1) /0.1;

elseif (cevap>=0.2) && (cevap<0.3)

R20A1=interp2 (P, T, R20, P1, Temp1, 'spline');
R30A1=interp2 (P, T, R30, P1, Temp1, 'spline');
Rmix=R20A1+ (cevap-0.2) * (R30A1-R20A1) /0.1;

Cp20A1=interp2 (P, T, Cp20, P1, Temp1, 'spline');
Cp30A1=interp2 (P, T, Cp30, P1, Temp1, 'spline');
Cpmix=Cp20A1+ (cevap-0.2) * (Cp30A1-Cp20A1) /0.1;

Cvmix=Cpmix-Rmix;
Kmix=Cpmix/Cvmix;

u20A1=interp2 (P, T, u20, P1, Temp1, 'spline');
u30A1=interp2 (P, T, u30, P1, Temp1, 'spline');
umix=u20A1+ (cevap-0.2) * (u30A1-u20A1) /0.1;

h20A1=interp2 (P, T, h20, P1, Temp1, 'spline');
h30A1=interp2 (P, T, h30, P1, Temp1, 'spline');
hmix=h20A1+ (cevap-0.2) * (h30A1-h20A1) /0.1;

rho20A1=interp2 (P, T, rho20, P1, Temp1, 'spline');
rho30A1=interp2 (P, T, rho30, P1, Temp1, 'spline');
rhomix=rho20A1+ (cevap-0.2) * (rho30A1-rho20A1) /0.1;

elseif (cevap>=0.3) && (cevap<=0.5)

R30A1=interp2 (P, T, R30, P1, Temp1, 'spline');
R50A1=interp2 (P, T, R50, P1, Temp1, 'spline');
Rmix=R30A1+ (cevap-0.3) * (R50A1-R30A1) /0.2;

Cp30A1=interp2 (P, T, Cp30, P1, Temp1, 'spline');
Cp50A1=interp2 (P, T, Cp50, P1, Temp1, 'spline');
Cpmix=Cp30A1+ (cevap-0.3) * (Cp50A1-Cp30A1) /0.2;

Cvmix=Cpmix-Rmix;
Kmix=Cpmix/Cvmix;

u30A1=interp2 (P, T, u30, P1, Temp1, 'spline');
u50A1=interp2 (P, T, u50, P1, Temp1, 'spline');
umix=u30A1+ (cevap-0.3) * (u50A1-u30A1) /0.2;

h30A1=interp2 (P, T, h30, P1, Temp1, 'spline');
h50A1=interp2 (P, T, h50, P1, Temp1, 'spline');
hmix=h30A1+ (cevap-0.3) * (h50A1-h30A1) /0.2;

rho30A1=interp2 (P, T, rho30, P1, Temp1, 'spline');
rho50A1=interp2 (P, T, rho50, P1, Temp1, 'spline');
rhomix=rho30A1+ (cevap-0.3) * (rho50A1-rho30A1) /0.2;

end

```

Privitak IV. Pomoćna funkcija, 'Crtanje.m'

```
function Crtanje(X1,Y1,Y2,Y3,Y4,TrenutnoVrijeme)
%Crtanje izlaza proračuna VN luka u GIS komori
% X1:           vektor t, vrijeme
% Y1:           vektor P1, tlak u lučnoj komori
% Y2:           vektor Temp1, temperatura u lučnoj komori
% Y3:           vektor P2, tlak u ispušnoj komori
% Y4:           vektor Temp2, temperatura u ispušnoj komori
% TrenutnoVrijeme: vrijeme simulacije, za stvaranje imena slike

figure1 = figure('Name','Izlazi iz Proračuna'); % Create figure
% Stvaranje koordinatnih osi
axes1 = axes('Parent',figure1,...
    'Position',[0.0680952380952392 0.783973896807346 0.912857142857142
0.159519253877585]);
box(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
plot(X1,Y1,'Parent',axes1,'LineWidth',2,'Color',[0 0 1]);%Stvaranje plot-
a
xlabel('Vrijeme simulacije, tuk[s]','FontSize',8); % Stvaranje x-labele
ylabel('P1, [Pa]','FontSize',8); % Stvaranje y-labele

% Stvaranje koordinatnih osi
axes2 = axes('Parent',figure1,...
    'Position',[0.0686904761904773 0.545595401354231 0.912261904761905
0.166733365769057]);
box(axes2,'on');
hold(axes2,'all');
plot(X1,Y2,'Parent',axes2,'LineWidth',2,'Color',[1 0 0]);%Stvaranje plot-
a
xlabel('Vrijeme simulacije, tuk[s]','FontSize',8); % Stvaranje x-labele
ylabel('Temp1, [K]','FontSize',8); % Stvaranje y-labele

% Stvaranje koordinatnih osi
axes3 = axes('Parent',figure1,...
    'Position',[0.069285714285715 0.301637184613031 0.912261904761905
0.16754089757875]);
box(axes3,'on');
hold(axes3,'all');
plot(X1,Y3,'Parent',axes3,'LineWidth',2,'Color',[0 1 0]);%Stvaranje plot-
a
xlabel('Vrijeme simulacije, tuk[s]','FontSize',8); % Stvaranje x-labele
ylabel('P2, [Pa]','FontSize',8); % Stvaranje y-labele

% Stvaranje koordinatnih osi
axes4 = axes('Parent',figure1,...
    'Position',[0.0710714285714292 0.0674884626308555 0.91047619047619
0.161963592163665]);
box(axes4,'on');
hold(axes4,'all');
plot(X1,Y4,'Parent',axes4,'LineWidth',2,'Color',[1 0 1]);%Stvaranje plot-
a
xlabel('Vrijeme simulacije, tuk[s]','FontSize',8); % Stvaranje x-labele
ylabel('Temp2, [K]','FontSize',8); % Stvaranje y-labele
%Spremanje slike u isti folder s podacima
TrenutniFolder = pwd;
```

```
TrenutniFolder =  
strcat(TrenutniFolder, '\', 'Rezultati\ ', TrenutnoVrijeme, '\Slika-izlazi');  
print (figure1, TrenutniFolder, '-dtiff');
```

Privitak V. Funkcija za provjeru i unos podataka, 'Unos_podataka.m'

```
function [ gd,Uspjeh ] =Unos_podataka( handles )
%Provjera ulaznih parametara u sučelje.
%gd:      Spremljeni podaci učitani iz sučelja
%Uspjeh:  Jesu li svi podaci uspješno spremljeni
%handles: Upravljenje elementima sučelja

Uspjeh=0;
gd.tuk=str2double(get(handles.tukFIG,'string'));
if isempty(gd.tuk) || (isnan(gd.tuk))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.dt=str2double(get(handles.dtFIG,'string'));
    if isempty(gd.dt) || (isnan(gd.dt))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.tarc=str2double(get(handles.tarcFIG,'string'));
        if isempty(gd.tarc) || (isnan(gd.tarc))
            msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
        else
            gd.Pp=str2double(get(handles.PpFIG,'string'));
            if isempty(gd.Pp) || (isnan(gd.Pp))
                msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
            else
                gd.A12=str2double(get(handles.A12FIG,'string'));
                if isempty(gd.A12) || (isnan(gd.A12))
                    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
                else
                    gd.alfa12=str2double(get(handles.alfa12FIG,'string'));
                    if isempty(gd.alfa12) || (isnan(gd.alfa12))
                        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
                    else
                        gd.P1=str2double(get(handles.P1FIG,'string'));
                        if isempty(gd.P1) || (isnan(gd.P1))
                            msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
                        else
                            gd.Temp1=str2double(get(handles.Temp1FIG,'string'));
                            if isempty(gd.Temp1) || (isnan(gd.Temp1))
                                msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
                            else
                                gd.V1=str2double(get(handles.V1FIG,'string'));
                                if isempty(gd.V1) || (isnan(gd.V1))
                                    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
                                else
                                    gd.kp=str2double(get(handles.kpFIG,'string'));
```

```

if isempty(gd.kp) || (isnan(gd.kp))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
gd.P2=str2double(get(handles.P2FIG,'string'));
if isempty(gd.P2) || (isnan(gd.P2))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.Temp2=str2double(get(handles.Temp2FIG,'string'));
if isempty(gd.Temp2) || (isnan(gd.Temp2))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.V2=str2double(get(handles.V2FIG,'string'));
if isempty(gd.V2) || (isnan(gd.V2))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.alfa23=str2double(get(handles.alfa23FIG,'string'));
if isempty(gd.alfa23) || (isnan(gd.alfa23))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.A23=str2double(get(handles.A23FIG,'string'));
if isempty(gd.A23) || (isnan(gd.A23))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.kevap=str2double(get(handles.kevapFIG,'string'));
if isempty(gd.kevap) || (isnan(gd.kevap))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.Wevap=str2double(get(handles.WevapFIG,'string'));
if isempty(gd.Wevap) || (isnan(gd.Wevap))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.Wex=str2double(get(handles.WexFIG,'string'));
if isempty(gd.Wex) || (isnan(gd.Wex))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.Tevap=str2double(get(handles.TevapFIG,'string'));
if isempty(gd.Tevap) || (isnan(gd.Tevap))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.kabl=str2double(get(handles.kablFIG,'string'));
if isempty(gd.kabl) || (isnan(gd.kabl))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.rhoins=str2double(get(handles.rhoinsFIG,'string'));
if isempty(gd.rhoins) || (isnan(gd.rhoins))
    msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
else
    gd.Wabl=str2double(get(handles.WablFIG,'string'));
if isempty(gd.Wabl) || (isnan(gd.Wabl))

```

```

        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.etch=str2double(get(handles.etchFIG,'string'));
    if isempty(gd.etch) || (isnan(gd.etch))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.etafiller=str2double(get(handles.etafillerFIG,'string'));
    if isempty(gd.etafiller) || (isnan(gd.etafiller))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.Cvabl=str2double(get(handles.CvablFIG,'string'));
    if isempty(gd.Cvabl) || (isnan(gd.Cvabl))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.Tabl=str2double(get(handles.TablFIG,'string'));
    if isempty(gd.Tabl) || (isnan(gd.Tabl))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.Irms=str2double(get(handles.IrmsFIG,'string'));
    if isempty(gd.Irms) || (isnan(gd.Irms))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.Tau=str2double(get(handles.TauFIG,'string'));
    if isempty(gd.Tau) || (isnan(gd.Tau))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.fi=str2double(get(handles.fiFIG,'string'));
    if isempty(gd.fi) || (isnan(gd.fi))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.f=str2double(get(handles.fFIG,'string'));
    if isempty(gd.f) || (isnan(gd.f))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.gama=str2double(get(handles.gamaFIG,'string'));
    if isempty(gd.gama) || (isnan(gd.gama))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.d=str2double(get(handles.dFIG,'string'));
    if isempty(gd.d) || (isnan(gd.d))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        gd.Pe=str2double(get(handles.PeFIG,'string'));
    if isempty(gd.Pe) || (isnan(gd.Pe))
        msgbox('Nisu uneseni svi podaci, ili je format podataka kriv (podatak
nije broj).')
    else
        Uspjeh=1;
    end
end
end

```


Privitak VI. Pomoćna funkcija 'tmp.Cu'

```
function
[Rmix, Cpmix, Cvmix, Kmix, umix, hmix, rhomix]=tmp(cevap, P1, Temp1, P, T, R0, R10, R2
0, Cp0, Cp10, Cp20, u0, u10, u20, h0, h10, h20, rho0, rho10, rho20)

    if (cevap>=0) && (cevap<0.1)

        R0Cu=interp2(P, T, R0, P1, Temp1, 'spline');
        R10Cu=interp2(P, T, R10, P1, Temp1, 'spline');
        Rmix=R0Cu+cevap*(R10Cu-R0Cu)/0.1;

        Cp0Cu=interp2(P, T, Cp0, P1, Temp1, 'spline');
        Cp10Cu=interp2(P, T, Cp10, P1, Temp1, 'spline');
        Cpmix=Cp0Cu+cevap*(Cp10Cu-Cp0Cu)/0.1;

        Cvmix=Cpmix-Rmix;
        Kmix=Cpmix/Cvmix;

        u0Cu=interp2(P, T, u0, P1, Temp1, 'spline');
        u10Cu=interp2(P, T, u10, P1, Temp1, 'spline');
        umix=u0Cu+cevap*(u10Cu-u0Cu)/0.1;

        h0Cu=interp2(P, T, h0, P1, Temp1, 'spline');
        h10Cu=interp2(P, T, h10, P1, Temp1, 'spline');
        hmix=h0Cu+cevap*(h10Cu-h0Cu)/0.1;

        rho0Cu=interp2(P, T, rho0, P1, Temp1, 'spline');
        rho10Cu=interp2(P, T, rho10, P1, Temp1, 'spline');
        rhomix=rho0Cu+cevap*(rho10Cu-rho0Cu)/0.1;
    elseif (cevap>=0.1) && (cevap<0.2)

        R10Cu=interp2(P, T, R10, P1, Temp1, 'spline');
        R20Cu=interp2(P, T, R20, P1, Temp1, 'spline');
        Rmix=R10Cu+(cevap-0.1)*(R20Cu-R10Cu)/0.1;

        Cp10Cu=interp2(P, T, Cp10, P1, Temp1, 'spline');
        Cp20Cu=interp2(P, T, Cp20, P1, Temp1, 'spline');
        Cpmix=Cp10Cu+(cevap-0.1)*(Cp20Cu-Cp10Cu)/0.1;

        Cvmix=Cpmix-Rmix;
        Kmix=Cpmix/Cvmix;

        u10Cu=interp2(P, T, u10, P1, Temp1, 'spline');
        u20Cu=interp2(P, T, u20, P1, Temp1, 'spline');
        umix=u10Cu+(cevap-0.1)*(u20Cu-u10Cu)/0.1;

        h10Cu=interp2(P, T, h10, P1, Temp1, 'spline');
        h20Cu=interp2(P, T, h20, P1, Temp1, 'spline');
        hmix=h10Cu+(cevap-0.1)*(h20Cu-h10Cu)/0.1;

        rho10Cu=interp2(P, T, rho10, P1, Temp1, 'spline');
        rho20Cu=interp2(P, T, rho20, P1, Temp1, 'spline');
        rhomix=rho10Cu+(cevap-0.1)*(rho20Cu-rho10Cu)/0.1;
    end
```