

# Primjena termovizije u elektroenergetskom sustavu

---

**Tomas, Luka**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:291389>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**PRIMJENA TERMOVIZIJE U  
ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**

**Diplomski rad**

**Luka Tomas**

**Osijek, 2019.godina**

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. FIZIKALNE VELIČINE I POJAVE .....	2
2.1. Fizičke veličine i radiometrijske jedinice.....	2
2.2 Osnovni zakoni zračenja idealnog crnog tijela .....	7
2.3. Zračenja realnih tijela.....	11
2.4. Razmjena zračenja između dvije površine .....	12
3. OPTIČKI SUSTAV USMJEREN NA DETEKTORE.....	16
3.1 Prijemna optika .....	17
3.3. Termalni detektori .....	18
3.3.1. Bolometar .....	19
3.3.2. Pirometar .....	20
3.4. Fotonski detektori.....	21
3.5. Detektori sa fotokonduktivnim efektom .....	22
3.5.1. Šumovi fotokondukcijskih detektora .....	25
3.5.2. Fotokonduktivni materijali.....	26
3.6. Fotonaponski detektori .....	26
3.6.1. Koeficijent korisnog detektiranja i spektralni odziv detektora .....	27
3.6.2. Ekvivalentni krug fotodiode.....	28
3.6.3. Šumovi fotodiodnog detektora .....	29
4. TERMALNA I PROSTORNA REZOLUCIJA .....	30
4.1. Minimalna temperaturna razlika ekvivalentna šumu i osjetljivost.....	30
5. Termovizijske kamere .....	32
5.1. Usporedba termovizijskih kamera.....	33
6. PROGRAMSKA PODRŠKA .....	34
6.1. Mogućnosti izvještaja.....	38
6.2. Veza u živo.....	40

6.3. Produciranje i analiza datoteke .SEQ i .CSQ .....	40
7. TERMOVIZIJSKA ANALIZA OBJEKTA.....	43
7.1. Izbor termovizijskog mjernog opsega .....	44
7.2. Primjena termovizijske kamere .....	47
7.2.1. Kompenzacija efekta okoline- utjecaj atmosfere .....	49
7.3. Otklanjanje problema vrtložnih struja na provodnim pločama u trafostanicama .....	51
7.3.1. Opis postrojenja TS 110/10 kV Osijek 3 .....	51
7.3.2. Postrojenje 10 kV .....	52
7.3.3. Uočavanje problema vrtložnih struja u postrojenju .....	53
7.3.4. Rješavanje problema vrtložnih struja za TS 110/10 kV Osijek 3 .....	56
7.3.5. Problem prolaska spojnih sabirnica u ostalim postrojenjima.....	59
7.3.6. Kvarovi zabilježeni 2018./2019. godine termovizijskom kamerom na području Osječko-baranjske županije unutar trafostanica (od 35 kV do 0,4 kV) .....	60
8. ZAKLJUČAK .....	75
LITERATURA.....	76
SAŽETAK.....	77
ŽIVOTOPIS .....	78

# 1. UVOD

Termovizija je idealna za prikaz raspodjele temperature na objektu, što se vrši na osnovu detekcije infracrvenog termalnog zračenja i konverzije zračenja objekta u vizualnu sliku. U literaturi se koriste različite tehnologije, koje su posljedica povijesnog razvoja ovih uređaja i sustava.

Termovizija je nastala iz potrebe da se proširi spektar vidljivosti, odnosno da se vidi nevidljivo. Prvi eksperimenti infracrvenim sensorima izvedeni su još 1900. godine. Prve upotrebe ovih senzora u vojne svrhe zabilježene su u Prvom svjetskom ratu. Infracrveni senzori su imali relativno malu osjetljivost tako da su detektirali avione na oko 1,5 km i vojnika na oko 300 m. Brz razvoj ovih uređaja između dva svjetska rata omogućilo je značajnu primjenu u Drugom svjetskom ratu u redovima Njemačke, Velike Britanije, SAD-a i Japana. Međutim, prvi eksperiment sa termovizijom izvela je mornarica SAD-a za snimanje terena iz zraka tek 1959. godine.

Posljednjih tridesetak godina došlo je do kvalitetnog napretka termovizije tako da sada imamo treću generaciju. Prva generacija termovizije je koristila serijski niz od nekoliko detektora i dvoosno skeniranje, sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Druga generacija je koristila detektorski niz od oko 120 detektorskih elemenata i jednoosno skeniranje, sve do 1990. godine. Prostorna i termalna rezolucija su značajno popravljene, u odnosu na prvu generaciju, brojem detektora i digitalnom obradom signala sa detektora. Treća generacija koristi matrične detektore, pa nema potrebe za skeniranjem. Pored toga obrada signala je usavršena tako da termovizija danas ima jako visoku termalnu i prostornu rezoluciju.

Termovizija se primjenjuje u satelitskim sustavima za nadgledanje teritorija i objekata na Zemlji, u vojsci za kontrolu prostora, vođenja i samonavođenje raketa i drugih ubojitih sredstava. Pored toga, medicinska dijagnostika je značajno napredovala uvođenjem analize termovizijske slike dijelova ljudskog tijela. U privredi se termovizija koristi u građevinarstvu za procjenu toplotnog toka i gubitaka toplinske energije zbog loše odabranih građevinskih materijala.

U drugom poglavlju obrađene su osnovne radiometrijske i fotometrijske fizičke veličine, osnovni zakoni infracrvenog termalnog zračenja, razmjena energije između dvije površine. Procjena spektralne iradijancije je određena za različite geometrijske dispozicije Sunca, Mjeseca i Zemlje, bez i sa transmitivnosti atmosfere. Posebna pažnja je poklonjena

definiranju ekvivalentne iradijance scene i kontrasta na sceni. Utjecaj optičkih komponenata na prostornu rezoluciju se analizira korištenjem transmitivnosti modulacijske transfer funkcije optičkog sustava. Treće poglavlje bavi detekcijom infracrvenog zračenja i osjetljivošću detektora. Četvrto poglavlje se bavi prostornom i termalnom rezolucijom termovizijskih uređaja i minimalnom razdvojitom temperaturnom razlikom između objekta i okoline. Peto poglavlje opisuje samu termovizijsku kameru uspoređuje je cijenom i opisuje njene mogućnosti. Šesto poglavlje uzima za primjer FLIR-ov programski sustav za obradu termograma te opisuje mogućnosti i usmjerava na korake pri korištenju navedenog programskog paketa. Sedmo poglavlje je posvećena primjeni termovizije pri analiziranju objekata. U njemu je opisan izbor termovizijskog mjernog opsega u kojemu su opisane glavne stavke koje je potrebno poznavati prije korištenja, nakon čega slijedi njena primjena i vanjski utjecaji koji djeluju na kvalitetu snimanja kamerom. Tako je u nastavku dan primjer rješavanja problema vrtložnih struja i mjerenja obavljenih ove i prošle godine na području djelovanja HEP-ODS-a Elektroslavonije Osijek od strane centra za terenske aktivnosti odjela za transformatorske stanice u području rada od 0,4 kV do 110 kV.

## **2. FIZIKALNE VELIČINE I POJAVE**

### **2.1. Fizičke veličine i radiometrijske jedinice**

Osnovne fizičke veličine kojima se kvantificira koherentna i nekoherentna zračenja i razmjena tih zračenja između površina su: snaga ili tok zračenja, gustoća snage zračenja, radijansa i iradijansa.

Snaga ili tok zračenja

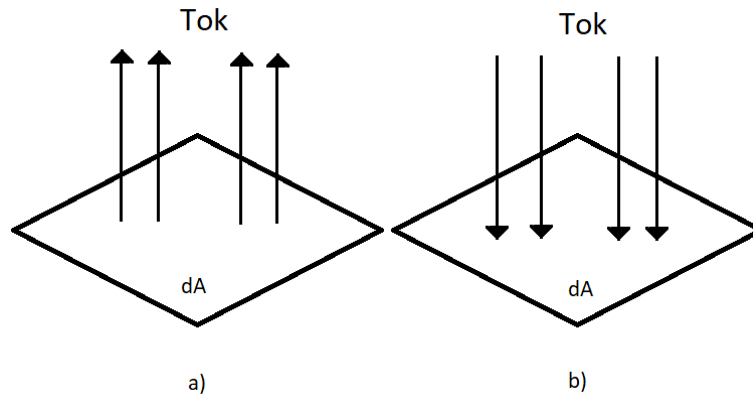
Osnovna fizička veličina koja se mjeri je optička snaga ili tok  $\Phi$ . Optička snaga ili tok se definiraju kao promjena energije u vremenu:

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad [\text{W}], \quad (2-1)$$

gdje je Q ukupna energija zračenja izražena u J (džul), a parcijalni izvod se koristi jer je energija funkcija i drugih fizičkih veličina. Gustoća emitirane snage zračenja ili emitansa.

Gustoća snage zračenja ili emitansa se definira kao ozračeni tok koji napušta elementarnu površinu, slika 2.1.a)

$$M = \frac{\partial\phi}{\partial A} \text{ [W/m}^2\text{]}. \quad (2-2)$$



**Slika 2.1.** Tok sa površine i na površinu: a) emitansa, b) iradijansa

### **Iradijansa**

Iradijansa ili gustoća snage koja dolazi na jediničnu površinu, sa drugog izvora kao što je prikazano na slici 2.1.b), definira se kao:

$$E = \frac{\partial\phi}{\partial A} \text{ [W/m}^2\text{]}. \quad (2-3)$$

### **Intenzitet zračenja**

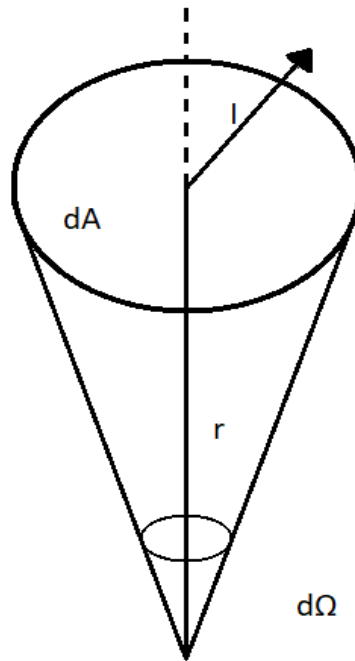
Intenzitet zračenja se definira kao tok po jediničnom prostornom uglu:

$$I = \frac{\partial\phi}{\partial\Omega} \text{ [W/sr]}. \quad (2-4)$$

Na slici 2.2 prikazan je elementarni prostorni ugao, koji se definira kao:

$$\partial\Omega = \frac{\partial A}{r^2}, \quad (2-5)$$

gdje je  $r$  razmak sa kojeg se vidi elementarna površina  $dA$ .



**Slika 2.2.** Elementarni prostorni ugao

## Zračenja

Zračenja ili sjajnost izvora zračenja definira se kao tok zračenja po jedinici površine i po jediničnom prostornom kutu, odnosno intenzitet zračenja po jedinici površine:

$$L = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial A \partial \Omega} = \frac{\partial I}{\partial A} \quad [\text{w}/(\text{m}^2 \text{sr})], \quad (2-6)$$

gdje je pretpostavljeno da su radijansa i normala na elementarnu površinu kolinearne.

U slučaju da između normale na površinu i radijansa postoji ugao  $\theta$  tada se radijansa definira kao:

$$L = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial(A \cos \theta) \partial \Omega} = \frac{\partial I}{\partial A} \quad [\text{w}/(\text{m}^2 \text{sr})]. \quad (2-7)$$

Treba primijetiti da je prva relacija opća, a druga je samo specijalan slučaj za  $\theta=0$ .

Sve fizičke veličine su funkcije valne dužine pa se definiraju spektralne fizičke veličine: spektralna gustoća snage  $M_\lambda$  u  $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ , spektralna inradijansa  $E_\lambda$  u  $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ , spektralni intenzitet zračenja  $I_\lambda$  u  $\text{W sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$  i spektralna iradijansa  $L_\lambda$  u  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ .



## Fotometrijske jedinice

Za razliku od radiometrijskih fizičkih veličina, koje su univerzalne, fotometrijske fizičke veličine su definirane za vidljivi opseg elektromagnetnog spektra (0,44,7)  $\mu\text{m}$ . Fotometrijske fizikalne veličine i jedinice su prikazane u tablici 2.1.

**Tablica 2.1** Fotometrijske fizikalne veličine

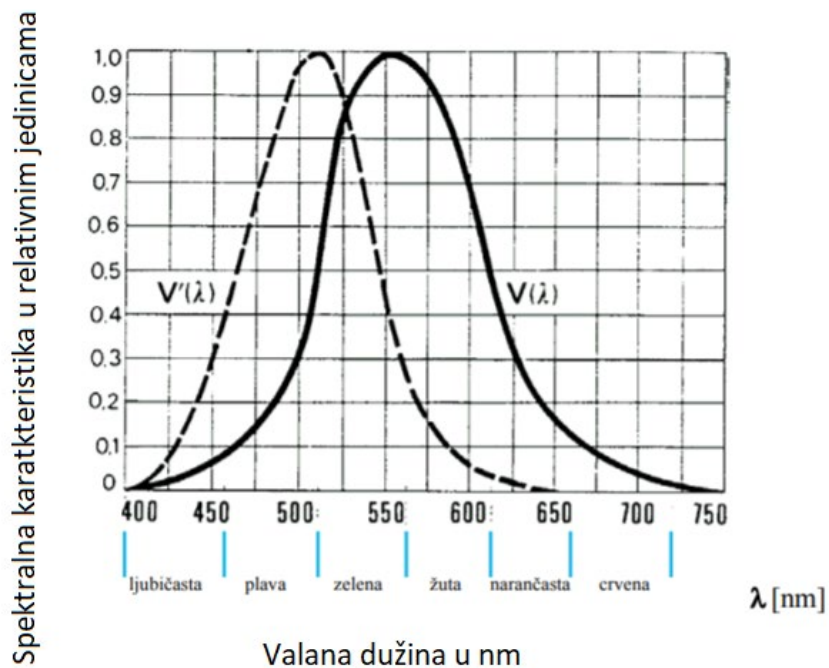
Simbol	Fizička Veličina	Definicija	Jedinica
$\Phi_v$	Tok	$dQ_v/dt$	Lumen(L)
$I_v$	Intenzitet zračenja	$d\Phi_v/d\omega$	L/sr
$M_v$	Gustoća snage	$d\Phi_v/dA$	L/m <sup>2</sup>
$E_v$	Osvjetljenje, iluminacija	$d\Phi_v/dA$	L/m <sup>2</sup> =lux
$L_v$	Sjajnost	$dI_v/dA$	L/(m <sup>2</sup> sr)

Postoji veza između radiometrijskih i fotometrijskih fizikalnih veličina. Tok ili optička snaga u fotometriji i radiometriji vezane su relacijom:

$$\Phi_v = V(\lambda)\Phi(\lambda), \quad (2-8)$$

gdje je  $V(\lambda)=K(\lambda)/K_{\text{max}}$ , a  $K_{\text{max}} = 673 \text{ L/W}$ .

Spektralna karakteristika  $V(\lambda)$  je dana na slici 2.3.

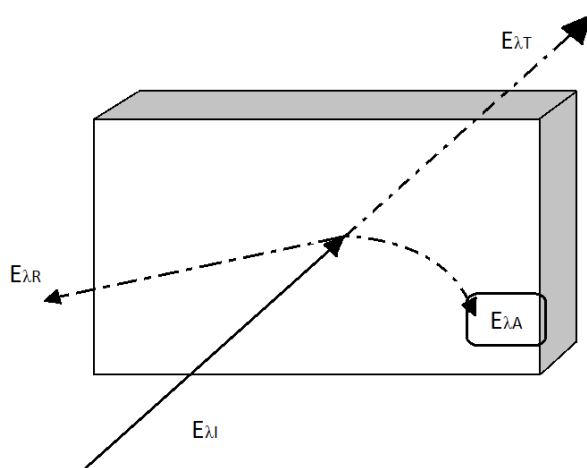


**Slika 2.3.** Spektralna karakteristika  $V(\lambda)$

Sa slike 2.3. vidi se da je spektralna karakteristika  $V(\lambda)$  ima maksimum na  $0,55 \mu\text{m}$  i da na granicama opsega vidljivosti pada na oko 15% od maksimalne vrijednosti.

### Komponente iradijance

Spektralna iradijansa, koja upada na površinu objekta i komponente ove spektralne iradijance si prikazane na slici 2.4.



**Slika 2.4.** Komponente ukupne iradijance

Ukupna rezultanta iradijansa se dijeli na apsorpcijsku, reflektivnu i transmitivnu:

$$E_{\lambda I} = E_{\lambda A} + E_{\lambda R} + E_{\lambda T}. \quad (2-9)$$

Poslije dijeljenja sa ukupnom iradijansom iz prethodne formule dobiva se poznata relacija:

$$\frac{E_{\lambda I}}{E_{\lambda I}} = 1 = \frac{E_{\lambda A}}{E_{\lambda I}} + \frac{E_{\lambda R}}{E_{\lambda I}} + \frac{E_{\lambda T}}{E_{\lambda I}} = \alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda}, \quad (2-10)$$

gdje su vrijednosti spektralne apsorpcije  $\alpha_{\lambda}$ , spektralne reflektivnosti  $\rho_{\lambda}$  i spektralne transmitivnosti  $\tau_{\lambda}$  bezimni broj između nula i jedan.

Na osnovi Kirhofovog zakona, dobar apsorber je dobar emiter na istoj valnoj dužini što se vidi iz prije navedene relacija, koju se može zapisati u obliku:

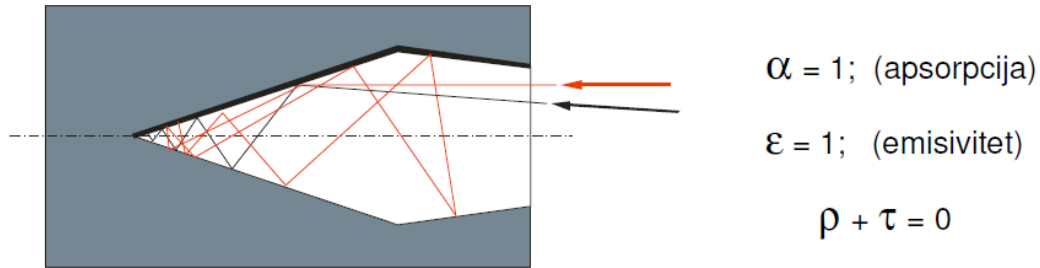
$$\varepsilon_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1, \quad (2-11)$$

gdje je  $\varepsilon_{\lambda}$  spektralna emisivnost.

Posljedice te relacije su: idealno crno tijelo  $\varepsilon=1$  i  $\rho=\tau=0$ , idealan reflektor  $\rho=1$ ,  $\tau=\varepsilon=0$ ; idealan prozor  $\tau=1$ ,  $\rho=\varepsilon=0$ .

## 2.2 Osnovni zakoni zračenja idealnog crnog tijela

Infracrveno zračenje realnih tijela može se objasniti pomoću osnovnih zakona fizike o zračenju idealno crnog tijela i uvođenjem emisivnosti realnih tijela. Pošto su zračenja mjerljiva, prvi dio ovog poglavlja se bavi radiometrijskim i fotometrijskim fizičkim veličinama. Drugi dio se odnosi na primjenu osnovnih zakona zračenja crnog tijela da bi se definirao kontrast zračenja promatranog tijela u odnosu na okolinu. Treći dio ovog poglavlja bavi se razmjenom energije između dvije površine i tipovima izvora infracrvenog termalnog zračenja.



**Slika 2.5.** Crno tijelo

Crna tijela su objekti koji idealno zrače ili apsorbiraju zračenje. Koriste se za objašnjavanje znanstvenih fenomena a u stvarnom životu sa simulatorima crnih tijela obavljamo kalibriranja termovizijskih kamera, [8].

Svako tijelo čija je temperatura veća od apsolutne nule zrače elektromagnetnu energiju. Spektralna gustoća snage zračenja crnog tijela dana je Plankovim (Planck) zakonom:

$$M_{\lambda}^{\text{CT}} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} [\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}], \quad (2-12)$$

gdje su:  $\lambda$  je valna dužina u  $\mu\text{m}$ ,  $T$  je temperatura crnog tijela u Kelvinima  $T(\text{K})=773,16+t(^{\circ}\text{C})$ ,  $c_1=3,74178*10^8 \text{ Wm}^{-7} \mu\text{m}^4$  je prva zračna konstanta, a druga zračna konstanta je  $c_2=1,4388*10^4 \text{ K}\mu\text{m}$ .

Prva zračna konstanta je izračunata iz  $c_1=2\pi hc^2$ , gdje je  $h$  Plankova konstanta ( $h=6,6256*10^{-34} \text{ Js}$ ), a  $c$  je brzina prostiranja elektromagnetnog vala u slobodnom prostoru ( $c=2,997975*10^8 \text{ m/s}$ ). Druga zračna konstanta je određena iz  $c_2= ch/k$ , gdje je  $k$  Bolcmanova (Boltzmann) konstanta ( $k=1,38054*10^{-23} \text{ J/K}$ ).

Relacija (2-12) ima dvije aproksimacije poznate u literaturi kao Vinova (Wien) i Rejli-Dinsova (Rayleigh-Jeans). Vinova aproksimacija Plankovog zakona se izvodi iz pretpostavke  $\exp(c_2/\lambda T) \gg 1$ . Tada spektralna gustoća snage zračenja crnog tijela (2-12) postaje:

$$M_{\lambda}^{\text{CT}} = c_1 \lambda^{-5} \exp(-c_2/\lambda T), \quad (2-13)$$

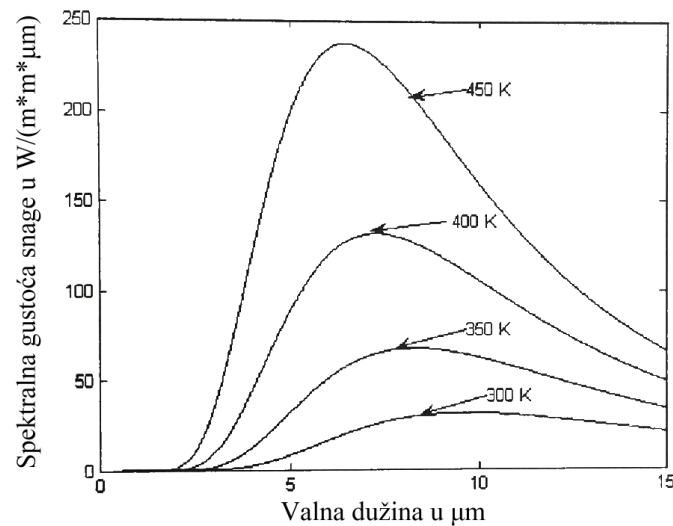
gdje je  $\lambda T \leq 5000 \mu\text{mK}$ .

Rejli-Đinsova aproksimacija se izvodi iz pretpostavke da je  $\exp(c_2/\lambda T)$  malo pa se koriste prva dva člana razvoja eksponencijalne funkcije u red ( $\exp(c_2/\lambda T) \approx 1 + c_2/\lambda T$ ). Tada spektralna gustoća snage (2-12) postaje:

$$M_{\lambda}^{CT} = \frac{c_1}{c_2} \frac{T}{\lambda^4}, \quad (2-14)$$

gdje je  $AT > 10000 \mu\text{mK}$ .

Na slici 2.6. prikazani su dijagrami promjene spektralne gustoće snage zračenja idealnog crnog tijela u funkciji temperature, prema (2-12)



**Slika 2.6.** Promjena spektralne gustoće snage u ovisnosti o temperaturi

Sa slike 2.6. se vidi da spektralna gustoća snage zračenja idealnog crnog tijela monotono raste, sa porastom valne dužine, do maksimuma a potom monotono opada, a maksimum je na valnoj dužini koja je manja za veću temperaturu.

Maksimalna vrijednost spektralne gustoće snage zračenja se može odrediti analitički ako se odredi valna dužina  $\lambda_M$ . Valna dužina se dobije iz zahtjeva ekstrema funkcije, odnosno prvog izvoda spektralne gustoće snage zračenja crnog tijela po valnoj dužini.

$$\frac{\partial M_{\lambda}^{CT}}{\partial \lambda} = 1 - \frac{c_2}{5\lambda T} - \exp(-c_2/\lambda T) = 0. \quad (2-15)$$

Rješavanjem transcendentne jednačbe po valnoj dužini dobiva se:

$$\lambda_M \approx \frac{2897,8}{T} [\mu\text{m}], \quad (2-16)$$

gdje je T u K.

Navedena relacija je poznata kao Vinov (Wien) zakon pomaka. Relacija pokazuje da valna dužina maksimuma spektralne gustoće snage opada ako temperatura raste. Maksimalna vrijednost gustoće snage zračenja crnog tijela se dobiva spajanjem jednačbi i iznosi:

$$M_{\lambda M}^{CT} = 1,2862 * 10^{-11} * T^5 [\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{K}^{-5}]. \quad (2-17)$$

Relacija pokazuje da je maksimum spektralne gustoće snage proporcionalan temperaturi na potenciju pet.

Ukupna snaga zračenja crnog tijela se dobiva integracijom spektralne gustoće snage po valnoj dužini.

$$M^{CT} = \int_0^{\infty} M_{\lambda}^{CT} d\lambda = \sigma T^4 [\text{W}/\text{m}^2], \quad (2-18)$$

gdje je  $\sigma$  Stefan Bolcmanova konstanta ( $\sigma=5,6697*10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ).

Ukupna gustoća snage zračenja crnog tijela direktno je proporcionalna temperaturi na potenciju četiri. Ovaj izraz je poznat kao Stefan-Bolcmanov (Stefan-Boltzmann) zakon. Stefan-Bolcmanov zakon pokazuje koliko snage zrači idealno crno tijelo na svim valnim dužinama, što u praksi nema primjenu. Međutim, u praksi se koristi samo dio spektralne gustoće snage u opsegu valnih dužina  $\lambda_1 - \lambda_2$ , jer detektori termalnog zračenja imaju doot detektabilnost u ograničenom opsegu valnih dužina.

### 2.3. Zračenja realnih tijela

Spektralna gustoća snage zračenja realnih tijela ne ovisi samo o temperaturi nego i o spektralnoj emisivnosti. Spektralna emisivnost se definira kao odnos spektralne gustoće snage zračenja realnog i crnog tijela.

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{M_{\lambda}}{M_{\lambda}^{CT}}, \quad (2-19)$$

gdje je  $M_{\lambda}$  spektralna gustoća snage realnog tijela.

Dakle, za određivanje spektralne gustoće snage zračenja realnih tijela pored temperature treba poznavati i spektralnu emisivnost površine tijela. Spektralna gustoća snage zračenja tijela, iz prošlog izraza je:

$$M_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1}. \quad (2-20)$$

Pošto je spektralna emisivnost manja od jedan slijedi da je spektralna gustoća snage zračenja realnih tijela manja na svim valnim dužinama od spektralne gustoće snage zračenja crnog tijela. Spektralna gustoća snage zračenja realnih tijela je funkcija temperature i spektralne emisivnosti površine tih tijela. Spektralna emisivnost površine objekata zavisi o vrstama materijala, hrapavosti, temperaturi i boji površine objekta. Pored toga, emisivnost površine objekta se mijenja i sa kutom gledanja te površine. U praksi se koristi pojava relativno visoke ali približno konstantne vrijednosti emisivnosti realnih tijela u opsegu valnih dužina, odnosno, pojam sivog tijela.

Vinov zakon pomicanja valne dužine na kojoj je maksimalna spektralna gustoća snage dobivena je iz izvoda spektralne gustoće snage po valnoj dužini. Za realna tijela vrijedi Vinov zakon samo ako je spektralna emisivnost konstantna, odnosno ako se radi o sivom tijelu. U općem smislu mora se tražiti lokalni maksimum spektralne gustoće snage zračenja realnih tijela.

Ukupna gustoća snage crnog tijela je dobivena integriranjem po svim valnim dužinama, dobiveni rezultat je poznat kao Stefan-Bolcmanov zakon. Za realna tijela može se primijeniti Stefan Bolcmanov samo u slučaju da je konstantna spektralna emisivnost, odnosno da je tijelo sivo. U normalnom slučaju ukupna gustoća snage zračenja realnog tijela je:

$$M = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} M_{\lambda}^{CT} d\lambda. \quad (2-21)$$

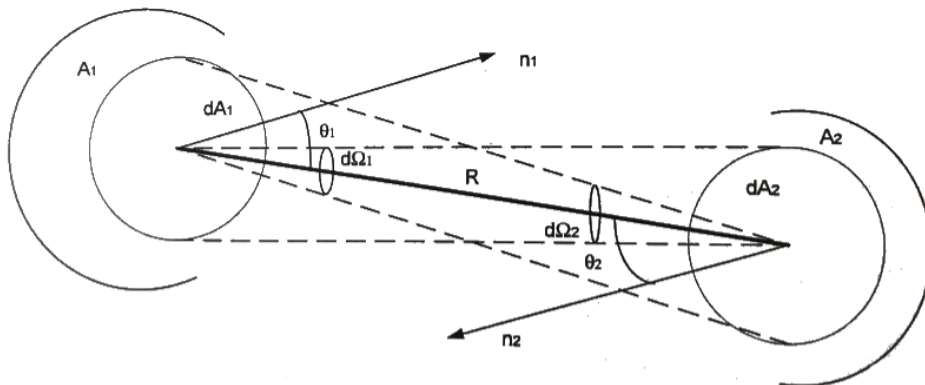
Međutim, najčešće se zahtjeva da se u opsegu valnih dužina odredi gustoća snage zračenja, koja je dana relacijom:

$$M_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} M_{\lambda}^{CT} d\lambda, \quad (2-22)$$

gdje su  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  granice opsega valnih dužina.

## 2.4. Razmjena zračenja između dvije površine

U praksi se često zahtjeva da se izračuna razmjena energije između dvije površine. Pretpostavimo da su elementarne površine  $dA_1$  i  $dA_2$ , na razmaku  $R$ , između kojih se vrši razmjena energije. Geometrijska konfiguracija elementarnih površina je prikazana na slici ispod



**Slika 2.7.** Geometrijska konfiguracija elementarnih površina

Sa slike 2.7. vidi se da se elementarne površine vide pod elementarnim prostornim vidnim kutom. Elementarni prostorni vidni uglovi, prema slici 2.7., su dati:

$$d\Omega_1 = \frac{dA_2 \cos\theta_2}{R^2}, \quad (2-23)$$



$$d\Omega_2 = \frac{dA_1 \cos\theta_1}{R^2}. \quad (2-24)$$

Ako jednadžbu pomnožimo sa  $dA_1 \cos\theta_1$ , a drugu sa  $dA_2 \cos\theta_2$ , dobivaju se jednadžbe čije su desne strane jednake pa je konačno:

$$dA_1 \cos\theta_1 d\Omega_1 = dA_2 \cos\theta_2 d\Omega_2 = \frac{dA_1 \cos\theta_1 dA_2 \cos\theta_2}{R^2}. \quad (2-25)$$

Ova relacija često se naziva faktor konfiguracije ili geometrijski faktor.

Iz definicije radiometrijskih jedinica se vidi da je radijansa fizička veličina koja definira izvor zračenja, odnosno gustoća snage po prostornom kutu. Pretpostavimo da površina  $A_1$  predstavlja površinu izvora zračenja, tada je tok na površini  $A_2$ , dat relacijom:

$$\Phi_{12} = \int_{A_2} \left( \int_{A_1} \frac{1}{R^2} L_1 dA_1 \cos\theta_1 \right) dA_2 \cos\theta_2, \quad (2-26)$$

gdje je  $L_1$  radijansa elementarne površine  $dA_1$ .

Pored toka u praksi se često određuje iradijansa koja upada na neku površinu. Iradijansa na površini  $A_2$ , od izvora čija je radijansa elementarne površine  $L_1$ , tada je relacijom:

$$E_{12} = \int_{A_1} \frac{1}{R^2} L_1 dA_1 \cos\theta_1 = \int_{\Omega_2} L_1 d\Omega_2, \quad (2-27)$$

gdje je integracija po prostornom kutu ekvivalentna integraciji po površini ograničenoj tim kutom.

Za točkaste izvore (dimenzije izvora male u odnosu daljinu sa koje se promatra) umjesto radijansa koristi se intenzitet zračenja. U ovom slučaju iradijansa:

$$E_{12} = \frac{I_1}{R^2}. \quad (2-28)$$

Navedena relacija je poznata kao inverzni zakon kvadrata udaljenosti, odnosno da intenzitet zračenja opada sa kvadratom udaljenosti.

Emisija ( $\epsilon$ )- Objekt daje energiju od sebe

Apsorpcija ( $\rho$ )- Objekt prima i zadržava energiju

Refleksija ( $\alpha$ )- Objekt prosljeđuje energiju nazad

Transmisija ( $\tau$ )- Objekt propušta energiju kroz sebe

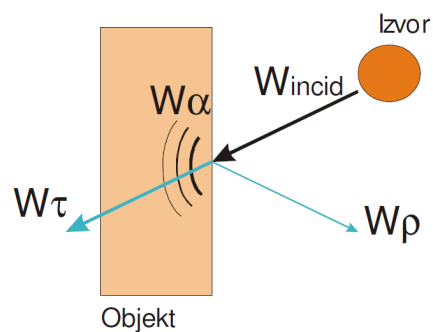
$$W_{\alpha} + W_{\rho} + W_{\tau} = W_{\text{incid}} = 100\% \quad (2-29)$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2-30)$$

Dvije vrste zračenja:

Incident radiation (zračenje prema objektu)- ne brinemo previše o tome odakle je došlo zračenje

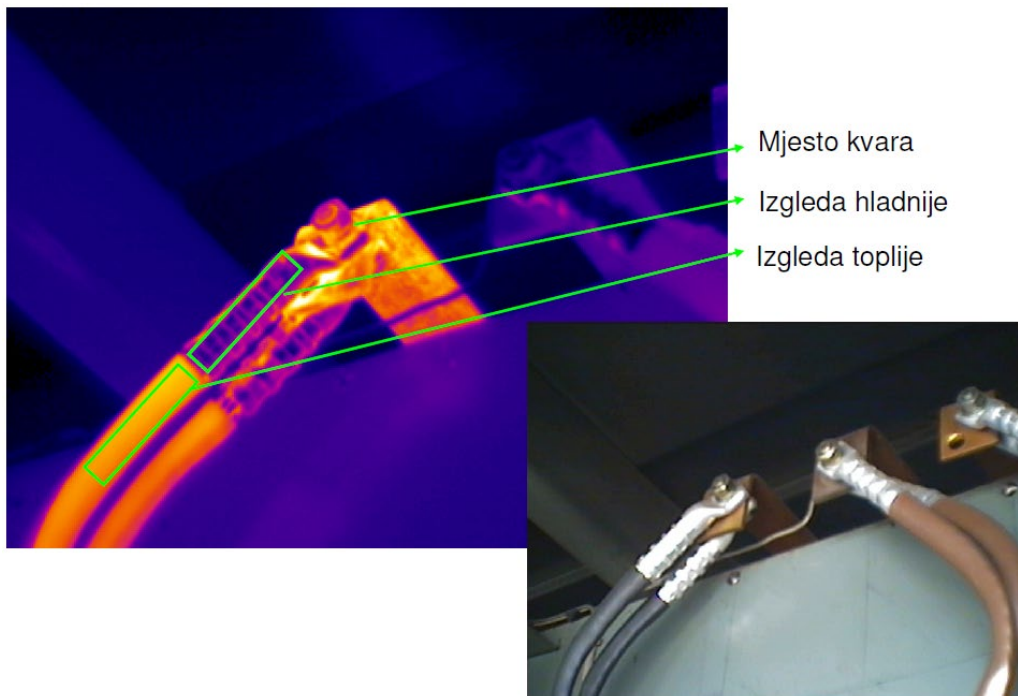
Exitant radiation (zračenje iz objekta)- promatramo zračenje koje je došlo od 3 različita izvora



**Slika 2.8.** Incident radiation (zračenje prema objektu), [8]

Kada energija  $W_{\text{incid}}$  udari u objekt tri stvari se mogu dogoditi:

- Dio je apsorbiran i objekt zadrži tu energiju
- Dio je reflektiran i on ne utječe na objekt
- Dio je propušten neizmijenjen

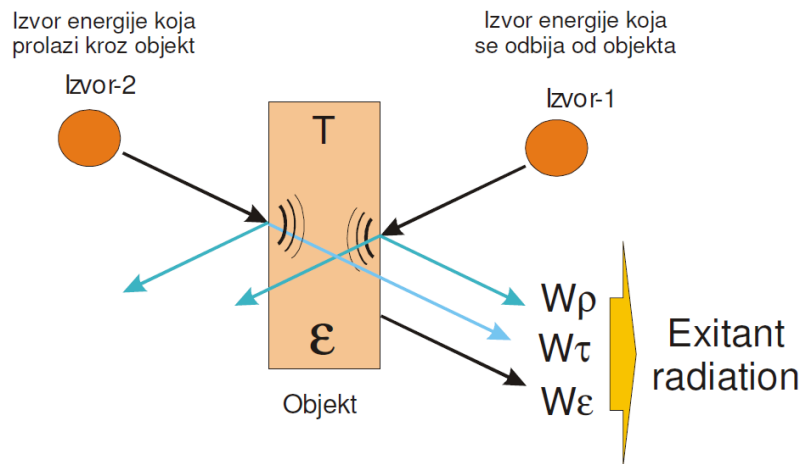


**Slika 2.9.** Objekt sa niskim emisivnošću, [8]

Doima se hladnije jer metali zbog svoje niske emisivnosti reflektiraju zračenje okoline. Dio pod izolacijom predstavlja približnu temperaturu zato što je izolacioni materijal visokog stupnja emisivnosti, i kao takva očitana vrijednost prividne temperature najčešće predstavlja stvarnu vrijednost.

Kod objekta sa visokim emisivnosti izmjerena temperatura objekta biti će blizu prave temperature objekta, pa možemo vjerovati dobivenim rezultatima mjerenja.

Kod objekta sa niskim emisivnosti izmjerena temperatura objekta biti će blizu temperature okolnih objekata, ali ne smijemo vjerovati onome što smo izmjerili, [8].



**Slika 2.10.** Exitant radiation (zračenje prema van), [8]

$W_{\epsilon}$  - ovisi o temperaturi i emisivnosti objekta

$W_{\rho} + W_{\tau}$  - ne ovise o temperaturi i emisivnosti objekta već o temperaturi i emisivnosti izvora 1 i izvora 2

$$W_{\epsilon} + W_{\rho} + W_{\tau} = W_{\text{exit}} = 100\%, \quad (2-31)$$

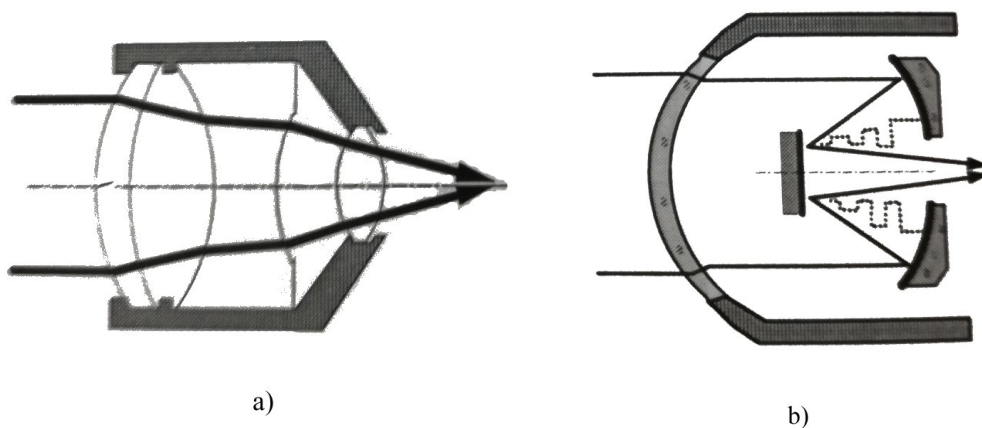
$$\epsilon + \rho + \tau = 1. \quad (2-32)$$

### 3. OPTIČKI SUSTAV USMJEREN NA DETEKTORE

Optički sustav senzora prikuplja optičko zračenje iz prostora i usmjerava ga na detektor. Optika se dijeli na primarnu i sekundarnu. Postoji više vrsta primarnih i sekundarnih optičkih podsustava, što ovisi od generacije termovizijskih uređaja. Primarna optika skeniranjem ili bez skeniranja prikuplja zračenje iz okoline, a sekundarna optika to zračenje usmjerava na detektor.

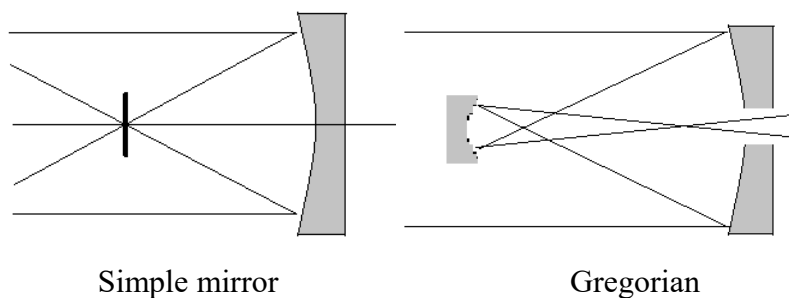
### 3.1 Prijemna optika

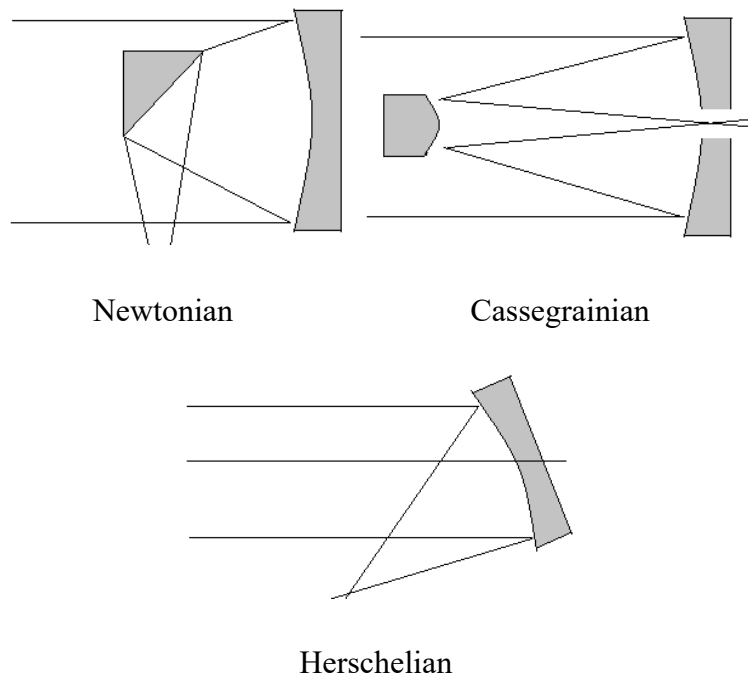
U osnovi optički sustavi sastoje se od više optičkih elemenata koji reflektiraju i prelamaju optičko zračenje. Dijele se uglavnom u tri grupe. Prva grupa su optički sustavi sa optičkim reflektivnim elementima, kao što su ogledala. Drugu grupu čine optički sustavi sa prelamajućim elementima, kao što su leće, prizme i sl. Treća grupa je kombinacija prethodne dvije, koriste se optički elementi sa refrakcijom i refleksijom (catadioptric). Ilustracije radi na slici 3.1. prikazana su dva tipična optička sustava sa refrakcijskim i refleksijskim elementima.



**Slika 3.1.** Tipični optički sustavi: a) refraktivni elementi, b) reflektivni elementi

Na slici 3.1.a) vidi se da uzrokovano zračenje prolazi kroz refrakcijske elemente, odnos skuplja na leću i usmjerava ga na detektor. Na slici 3.1.b) prikazano je da uzrokovano zračenje kroz optički prozor pada na dvije simetrično postavljene zakrivljene refleksne površine, koje se često nazivaju primarna optika senzora, koje ovo zračenje usmjeravaju na ravno ogledalo ili sekundarnu optiku. Za prikupljanje i usmjeravanje optičkog zračenja poznato je više optičkih sustava sa reflektivnim elementima kao što su Newtonian, Cassegrainian, Gregorian and Herschelian. Ovi optički elementi su prikazani na slici 3.2.





**Slika 3.2.** Tipovi reflektivnih optičkih elemenata

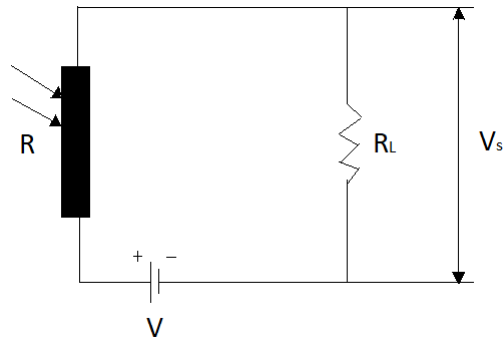
Sa slike 3.2 se vidi da postoje različite konfiguracije i tipovi reflektivnih optičkih elemenata. Navedeni tipovi optičkih sustava koriste se kao prijemna optika, čiji je osnovni zadatak prikupljanje zračenja sa scene. Sekundarna optika je po pravilu refrakcijskog tipa, odgovorna je za usmjeravanje prikupljenog zračenja na detektor. Dakle, primarna i sekundarna optika raspodjelu spektralne radijance terena transformiraju u raspodjelu spektralne iradijance na površini detektora

### 3.3. Termalni detektori

Kod termalnih detektora mijenja se otpornost, kapacitivnost ili neka druga fizička veličina materijala, uslijed apsorpcije i zagrijavanja detektora incidentnim zračenjem. Ovi detektori rade na sobnoj temperaturi i ne zahtijevaju hlađenje. Po karakteristikama su lošiji od foton detektora. Termalni detektori su: bolometar, piroelektrični detektor, termopar koji se ne koristi u termoviziji.

### 3.3.1. Bolometar

Princip rada bolometra zasniva se na promjeni otpornosti bolometra usred apsorpcije termalnog zračenja. Principijelna shema rada bolometra može se predstaviti električnom shemom, kao na slici 3.3.



Slika 3.3. Električna shema bolometra

Napon na otporniku  $R_L$  se može napisati u formi:

$$V_S = V \frac{R_L}{R + R_L} \quad (3-1)$$

Iz relacije (3-1) dobiva se temperaturni koeficijent  $\alpha$  kao (3-2)

$$\alpha = \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{1}{\Delta T} \quad (3-2)$$

gdje je  $\Delta T$  temperaturna razlika.

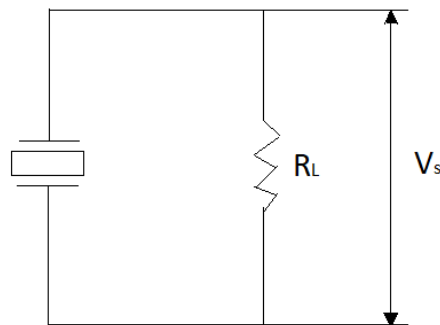
Relacija (3-2) pokazuje da sa porastom temperaturne razlike koeficijent  $\alpha$  opada, za konstantnu vrijednost  $\Delta\rho/\rho$

Tipični parametri bolometra su:

- Otpornost na sobnoj temperaturi  $R_0 = 50 \Omega$
- Struja kroz bolometar  $i = 15 \text{ mA}$
- Koeficijent prijenosa toplote  $KT = 5 \cdot 10^{-4} \text{ W/K}$
- Koeficijent apsorpcije toplote  $\alpha = 0,01 \text{ 1/K}$
- Emisivnost površine detektora  $\epsilon = 0,9$
- Faktor konverzije  $1,35 \text{ V/W}$

### 3.3.2. Pirometar

Piroelektrični detektor mijenja količinu na elektriziranja na površini elektrode u funkciji promjene temperature. Struja detektora je proporcionalna promjeni temperature u vremenu. Piroelektrični materijali su materijali koji imaju spontanu promjenu polarizacije kristala duž osi. Koriste se: BST (barijum-stroncijum-titan) i PZT (titan dopiran cirkonom). Princip rada pirometra može se objasniti principijelnom električnom shemom, koja je prikazana na slici 3.4.



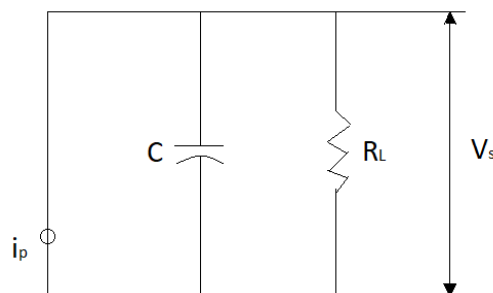
Slika 3.4. Električna šema pirometra

Princip konverzije optičke snage u električnu struju pirometra dat je relacijom:

$$i_p = p_T A_d \frac{\Delta T}{dt}, v_s = i_p R_L, \quad (3-3)$$

gdje su:  $p_T$ - piroelektrični koeficijent,  $A_d$ - površina detektora.

Ekvivalentna shema pirometra je prikazana na slici 3.5.



Slika 3.5. Ekvivalentna šema pirometra

Na slici 3.5. pirometar je predstavljen strujnim generatorom i kondenzatorom.  $R_L$  je otpornost priključena na pirometar (opterećenje kruga).



Faktor konverzije pirometra je:

$$\mathfrak{R} = \frac{\Delta V_S}{\varepsilon \Delta \Phi}, \quad (3-4)$$

gdje su:  $\varepsilon$ -koeficijent emisije protoka a  $\Delta \Phi$ - promjena optičke snage na pirometru.

Granična kružna frekvencija protoka iz ekvivalentnog kruga, slika 3.5., je  $\omega_g = 1/CR_L$

### 3.4. Fotonski detektori

Fotonski detektori su komponente koje apsorbirano elektromagnetno zračenje, odnosno optički signal pretvaraju u električni. Uslov za konverziju je da je kvant energije dovoljan da dođe do generiranja elektriziranja

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{hc}{\lambda}, \quad (3-5)$$

gdje su  $E_2$  i  $E_1$  energetske nivoe provodne i valentne osobnosti.

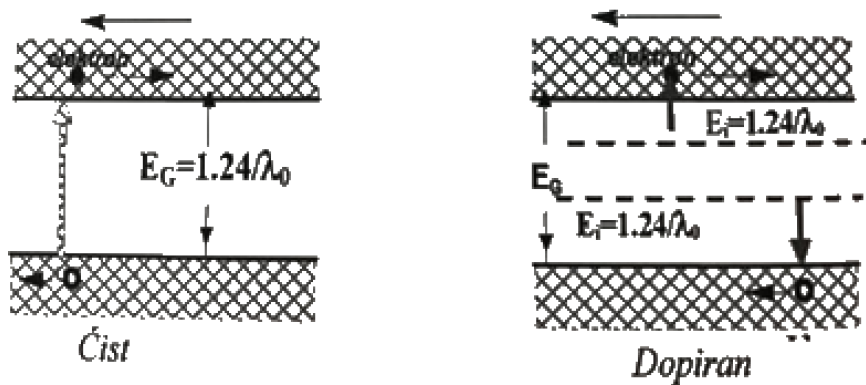
Iz relacije (3-5) vidi se da kvant energije, koji može dovesti do prelaska elektrona iz valentne u vodljivu (provodnu) sposobnost ili da atom oslobodi elektron, zavisi od razlike energetske nivoe. Sa druge strane kvant energije je obrnuto proporcionalan valnoj dužini iniciranog zračenja. Iz (3-5) za date konstante dobiva se

$$\Delta E = \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})} [\text{eV}], \quad (3-6)$$

gdje je  $1\text{eV} = 1,607 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

Relaciju treba tumačiti da za svaki materijal postoji minimalni kvant energije, koji je jednak energetske pukotini. S druge strane energetske nivo kvanta je veći na manjim valnim dužinama, veći je u vidljivom nego u infracrvenom području valnih dužina.

Na slici 3.6. prikazani su energetske nivoe u čistom poluvodiča sa primjesama. Za detekciju optičkih zračenja koriste se oba tipa poluvodiča.

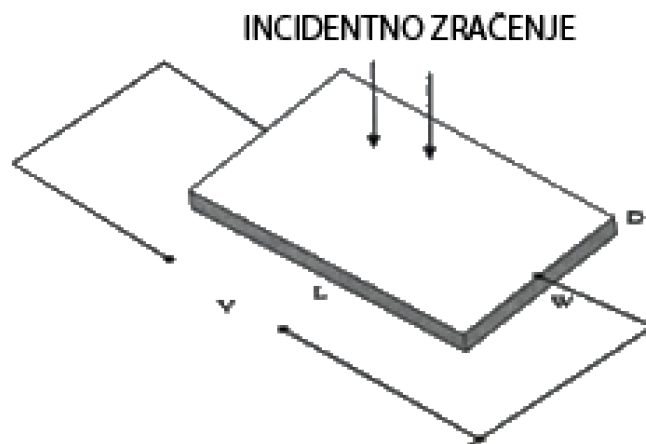


Slika 3.6. Energetski nivoi poluvodiča

Sa slike 3.6. vidi se da čist poluvodiča ima jednu energetsku zonu prelazak slobodnijih naelektriziranih, dok dopiran poluvodič ima još donorske i akceptorske nivoe, koji su blizu provodne i valentne mogućnosti, respektivno.

### 3.5. Detektori sa fotokonduktivnim efektom

Fotokonduktivni detektori su čisti poluvodiči čija se provodnost mijenja sa promjenom incidentnog zračenja. Usred apsorpcije dolazi do prelaska elektrona iz valentne u vodljivu funkciju, a u valentnoj funkciji ostaje šupljina, odnosno, dolazi do generiranja parova elektron-šupljina. Pod vodstvom električnog polja elektroni i šupljine se kreću kroz detektor i povećavaju njegovu vodljivost. Na slici 3.7. prikazan je fotokonduktivni detektorski element dimenzija L, D, W.



Slika 3.7. Fotokonduktivni detektor: L-dužina, W-širina i D-visina

Pretpostavimo da na osjetljivu površinu detektora upada iradijansa, koji se apsorbira u detektoru debljine  $D$ , pa je:

$$E(D) = E_0 \exp(-\alpha D), \quad (3-7)$$

gdje je  $\alpha$  koeficijent apsorpcije sredine, reda  $10^6$  1/m, koji se može zanemariti za valne dužine veće od maksimalne  $\lambda_{\max} = 1,24/\Delta E$ , gdje je  $\Delta E$  energetska pukotina detektora u eV.

Ukupan broj fotona u jedinici vremena, na površini detektora je:

$$n_f = \frac{E_0 WL}{hc} \lambda, \quad (3-8)$$

gdje je  $WL$  osjetljiva površina detektora. Usred apsorpcije zračenja generiraju se parovi elektron-šupljina. Njihov broj po jedinici zapremine u jedinici vremena, prema slici 3.7. i relaciji (3-9)

$$n_g = \eta_g \frac{E_0}{h\nu} \frac{1}{D}, \quad (3-9)$$

gdje je  $\nu$  frekvencija optičkog zračenja ( $\nu=c/\lambda$ ). Proces rekombinacija generiranih nosilaca elektriziranja ovisi o broju elektrona i šupljina u poluvodiča, Ukupan broj generiranih parova elektron-šupljina ovisi o temperaturi incidentnog zračenja. U čistom poluvodiču broj elektrona jednak je broju šupljina ( $n=p$ ). Broj rekombiniranih elektron i šupljina zavisi od vremena života nosilaca elektriziranja. Priraštaj nosilaca elektriziranja kod poluvodiča, generiran od incidentnog zračenja je  $\Delta n$  i  $\Delta p$ , pa je broj rekombiniranih parova dat relacijom :

$$n_r = \frac{\Delta n}{\tau_c} = \frac{\Delta p}{\tau_c}, \quad (3-10)$$

gdje su  $\Delta n$  i  $\Delta p$  priraštaj nosilaca elektriziranja usred apsorpcije uzrokovanog zračenja, a  $\tau_c$  je srednja vrijednost vremena života nosilaca elektriziranja.

U uslovima ravnoteže iz (3-11) je  $\Delta n = \Delta p = n_r \tau_c = n_g \tau_c$ . Provodnost poluvodičkih materijala je:

$$\sigma = \mu_e n q + \mu_p p q, \quad (3-11)$$

gdje su  $\mu_e$  i  $\mu_p$  pokretljivosti elektrona n i šupljina p, respektivno, a q je jedinično elektriziranja ( $q=1,602 \cdot 10^{-19}$  C).

Pokretljivost elektrona ( $\mu_e=q\tau/m_e$ ) u  $m^2 V^{-1} s^{-1}$  je veća od pokretljivosti šupljina ( $\mu_p=q\tau/m_p$ ). Na primjer za čist silicij  $n=p=1,6 \cdot 10^{16} m^{-3}$  pokretljivost elektrona je 0,35 u  $m^2 V^{-1} s^{-1}$ , a šupljina 0,048 u  $m^2 V^{-1} s^{-1}$ .

Priraštaj vodljivosti detektora, uslijed apsorpcije zračenja je  $\Delta\sigma$ , a dat je relacijom:

$$\Delta\sigma = \Delta n\mu_e q + \Delta p\mu_p q = n_g \tau_c q (\mu_e + \mu_p). \quad (3-12)$$

Ako se dovede napon na elektrode fotokondukcijskog detektora dolazi do priraštaja struje, uslijed apsorpcije zračenja, kroz detektor:

$$\Delta i = \frac{\Delta\sigma V}{L} DW = Vq \frac{E_0}{h\nu} \eta_g \frac{W}{L} \tau_c (\mu_e + \mu_p), \quad (3-13)$$

gdje je V napon priključen na detektor, kao na slici 3.5.

Relacija  $\Delta i$  pokazuje da je priraštaj struje kroz detektor direktno proporcionalna iradijansi na površini detektora. Ako ne postoji incidentno zračenje kroz detektor teče struja mraka, koja je posljedica generiranja parova elektron-šupljina koja uglavnom zavisi o temperaturi detektora. Uobičajeno je da se za fotokonduktivne detektore definira fotokonduktivno pojačanje kao odnos broja nosilaca naelektriziranih u jedinici vremena i broja generiranih parova elektron-šupljina.

$$= \frac{\Delta i/q}{n_g L W D} = \frac{\tau_c (\eta_e + \mu_p) V}{L^2} \quad (3-14)$$

Iz relacije (3-14) slijedi da se pojačanje može povećati (može biti veće od jedan) na račun smanjenja L, ali sa povećanjem napona napajanja V. Međutim, treba imati na umu i druge parametre koji se mijenjaju sa povećanjem napona ili smanjenjem dužine ovog tipa detektora.

### 3.5.1. Šumovi fotokondukcijjskih detektora

Kod ovog tipa detektora osnovni izvor šuma su generacije i rekombinacije nosilaca naelektriziranja. Optička snaga ili iradijansa i temperatura detektora dovode do ovih procesa. Usljed promjene temperature dolazi do generiranja nosilaca elektriziranja i njihov broj je proporcionalan sa  $\exp(-E_g/2kT)$ . Sa smanjenjem energetske pukotine povećava se granična valna dužina, ali se povećava i broj generiranih nosilaca elektriziranja pa se za veće valne dužine ovi detektori hlade i time ograničavaju šum.

Šum uslijed uzrokovane optičke snage se ne može ograničiti i u opsegu frekvencija  $\Delta f$ , koji je određen korisnim signalom, srednja kvadratna vrijednost struje šuma uslijed generacije i rekombinacije je:

$$\bar{I}_{nR-G}^2 = \frac{4iqG\Delta f}{1+4\pi^2f^2\tau_c^2}, \quad (3-15)$$

gdje je „i“ ukupna struja kroz fotokonduktivni detektor.

Pored šuma generacije-rekombinacije prisutan je fliker šum i termički ili Donsonov šum na otporniku detektora. Donsonov šum je dominantan na niskim frekvencijama i određuje se iz relacije:

$$\bar{I}_{nf}^2 = i^2 B \frac{\Delta f}{f}, \quad (3-16)$$

gdje je B konstanta ( $B \approx 10^{-11}$ ).

Donsonov ili termički šum javlja se na otporniku priključenom na krajevima fotodiode, srednja kvadratna vrijednost struje termičkog šuma je:

$$\bar{I}_{nT}^2 = \frac{4kT\Delta f}{R_L}, \quad (3-17)$$

gdje je  $R_L$ , otpornost u krugu detektora.

Ukupna srednja kvadratna vrijednost struje šuma je jednaka srednjoj kvadratnoj vrijednosti navedenih šumova.

### 3.5.2. Fotokonduktivni materijali

Osnovne karakteristike fotokonduktivnih materijal, koji se mogu koristiti termovizijskim prozorima, prikazane su u tablici 3.1.

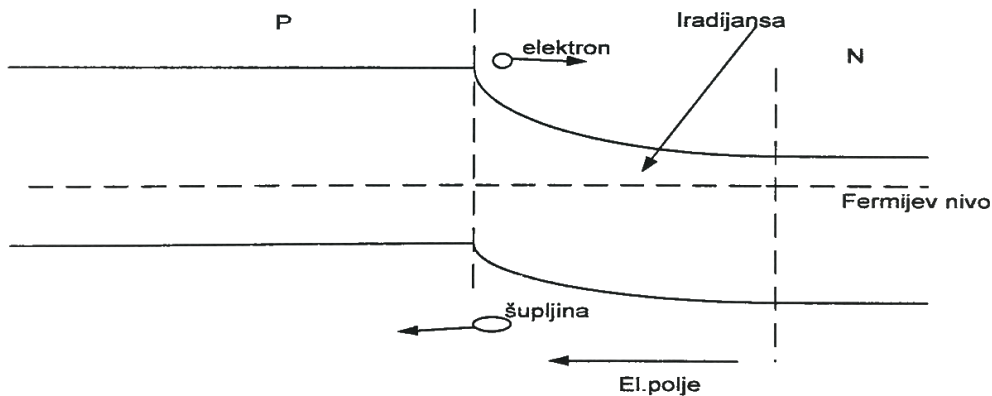
**Tablica 3.1.** Materijali za fotokonduktive detektore

Materijali	$\lambda$ u $\mu\text{m}$
PbSe	2-5
PbS	1-3
Ge	0,8-1,8
Si	0,5-1,1
Hg-Cd-Te	2-14
InSb	3-5,5
PbSnTe	2-12

Iz tablice 3.1. se vidi da olovo-selen i indijum antimon se koriste u prvom termovizijskom prozoru, a živa-kadmijum telur i olovo-kalaj-telur se koristi u drugom termovizijskom prozoru. Detektori u drugom termovizijskom prozoru se po pravilu hlade na oko 77 K (Hg-Cd-Te i PbSnTe). Dopirani poluvodiči se koriste za veće valne dužine, kao na primjer Ge dopiran Zn ili Br, od 70 do 100 $\mu\text{m}$  ali se hlade do temperature 4 K.

### 3.6. Fotonaponski dotoktori

Ova vrsta detektora se zasniva na radu fotodiode. To su u stvari PIN i lavinska fotodiode, koje generiraju nosioce elektriziranja uslijed apsorpcije optičkog zračenja u ispražnjenom elementu P-N spoja. Generirani nosioci elektriziranja pod uticanjem uspostavljenog električnog polja se kreću i to šupljine ka P, a elektroni ka N strani spoja, kao što je shematski prikazano na slici 3.8.



**Slika 3.8.** Shematski prikaz generiranja para elektron-šupljina u ispražnjenoj jezgri

Ako se P-N spoj koristi za kontrolu napona na krajevima fotodiode, otvoreni krug, naziva se fotonaponski režim rada, a kada se kratko spoje krajevi fotodiode ovaj režim je poznat kao fotostrujni režim rada.

### 3.6.1. Koeficijent korisnog detektiranja i spektralni odziv detektora

Efikasnost detekcije kvanta energije se određuje iz faktora korisnog zabilježavanja detektora. Faktor korisnog zabilježavanja ili faktor efikasnosti detektora se određuje iz odnosa broja nosilaca elektriziranja i broja kvantova energije u jedinici vremena:

$$\eta = \frac{I_p/q}{\Phi/h\nu}, \quad (3-18)$$

gdje su:  $I_p$  -struja fotodiode uslijed apsorpcije optičkog zračenja, a  $\Phi$ - tok incidentnog zračenja.

Tok apsorbiran u fotiodi je manji od incidentnog toka pa se definira koeficijent korisnog zabilježavanja kao:

$$\eta = (1 - \rho)[1 - \exp(-\alpha w)], \quad (3-19)$$

gdje su:  $(1-\rho)\Phi_0$  - optička snaga, koja dolazi u fotiodi, a  $\Phi_0$  - ukupna optička snaga,  $\alpha$  - koeficijent apsorpcije, a  $w$  - debljina elementa na kojem se vrši apsorpcija. Druga relacija

pokazuje da koeficijent korisnog zabilježavanja zavisi od koeficijenta refleksije fotodiode pa se koristi antirefleksijski premaz.

Iz prve relacije lako se uspostavlja veza između optičke snage i struje  $I_p$  fotodiode:

$$I_p = \frac{\eta q}{h\nu} \Phi = \mathfrak{R} \Phi, \quad (3-20)$$

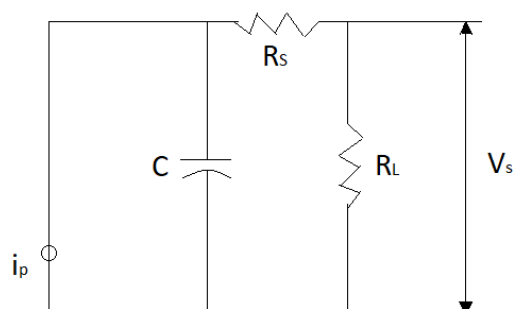
gdje je  $\mathfrak{R}$  faktor konverzije optičkog zračenja u struju ili spektralni odziv detektora. Relacija pokazuje da faktor konverzije ovisi o valnoj dužini uzrokovanog zračenja, a da je struja  $I_p$  direktno proporcionalna snazi uzrokovanog zračenja. Za fotodiode sa lavinskim strujnim pojačanjem struja uslijed apsorbiranog uzrokovanog zračenja se određuje iz relacije :

$$I_{pL} = M I_p = M \mathfrak{R} \Phi. \quad (3-21)$$

Relacija (3-21) se koristi za obje PIN ( $M=1$ ) i lavinsku ( $M>1$ ) fotodiodu.

### 3.6.2. Ekvivalentni krug fotodiode

Fotodioda se ponaša kao strujni generator, čija struja ovisi o incidentnom zračenju. Na slici 3.9. prikazano je ekvivalentni krug fotodioidnog detektora optičkog zračenja.



**Slika 3.9.** Ekvivalentni krug fotodiode

Idealni strujni generator predstavlja generiranu struju preko optičke snage, kapacitet kondenzatora je posljedica ispražnjene polja kod P-N spoja,  $R_s$  je otpornost detektorskog elementa, a  $R_L$  je otpornost opterećenja.



Napon na izlaznim stezaljkama kruga u kompleksnom obliku, za prostoperiodičnu pobudu, je izražen relacijom:

$$V(j\omega) = I_p(j\omega)R_L = I_p(j\omega) \frac{R_L}{1+j\omega C(R_S+R_L)}, \quad (3-22)$$

gdje je  $\omega$  kružna frekvencija.

Izraz za izlazni napon prikazan je relacijom:

$$V(\omega) = I_p(\omega)R_L = I_p(\omega) \frac{R_L}{\sqrt{1+\omega^2 C^2 (R_S+R_L)^2}}. \quad (3-23)$$

Iz relacije (3-23) dobije se granična kružna frekvencija signala fotodiode:

$$\omega_g = \frac{1}{C(R_S+R_L)} \approx \frac{1}{CR_L}, \quad (3-24)$$

gdje je pretpostavljeno da je  $R_S$  puno manje od  $R_L$ .

### 3.6.3. Šumovi fotodiodnog detektora

U osnovi su dominantne dvije vrste šuma, kvantni šum, zbog kvantnog efekta pobude i drugi je termički, zbog termičkog zagrijavanja otpornika. Srednja kvadratna vrijednost struje šuma fotodiode je izražena relacijom:

$$\langle i_n^2 \rangle = 2q[(I_D + P_0 R_d)M^2 F(M)]B + \frac{4kTB}{R_L}, \quad (3-25)$$

gdje su:  $q$ - jedinično elektriziranje,  $I_D$ - struja mraka fotodiode,  $P_0$ - optička snaga koja pobuđuje fotodiodu,  $R_d$  - faktor konverzije fotodiode,  $F(M)$  - faktor šuma tokom lavinskog pojačanja  $M$ ,  $B$ - ekvivalentni propusni opseg,  $T$ - apsolutna temperatura fotodiode,  $R_L$  - otpornost priključena na fotodiodu.

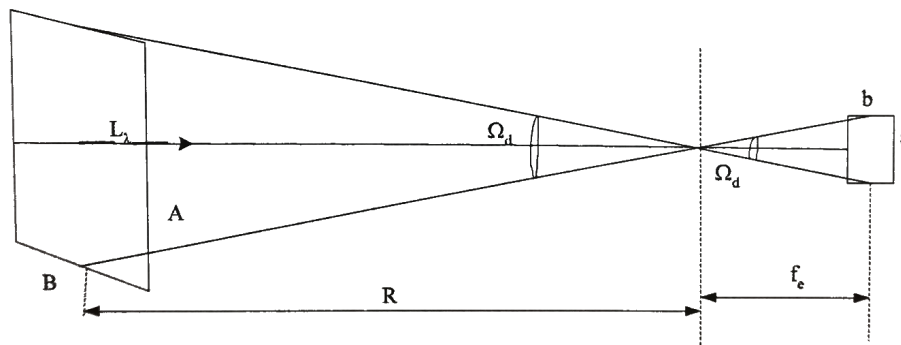
Slab signal fotodiode se uglavnom pojačava u malošumnim pojačalima. Ukupni šum u ovom slučaju uključuje i srednju kvadratnu vrijednost struje šuma pojačala ispred.

## 4. TERMALNA I PROSTORNA REZOLUCIJA

Termovizijski uređaji se uspoređuju po prostornoj rezoluciji i termalnoj rezoluciji ili osjetljivosti. Pored parametara kamere uvijek se zadaju parametri objekta od interesa i njegova okolina. Osjetljivost termovizijskog uređaja se izražava preko minimalne temperaturne razlike ekvivalentne šumu. Prostorna rezolucija se izražava minimalnim rastojanjem između dva objekta koji se mogu detektovati na termovizijskoj slici. Detekcija objekta zavisi od temperaturne razlike između objekta i okoline i od razmaka između objekta i termovizijske kamere. Dakle, osjetljivost i prostorna rezolucija zajedno definiraju kvalitetu termovizijskog uređaja.

### 4.1. Minimalna temperaturna razlika ekvivalentna šumu i osjetljivost

Promatrajmo elementarnu ćeliju na površini objekta sa koje jedan detektorski element prima zračenje. Na slici 4.1. prikazana je geometrija elementarne površine AB, koja se vidi sa udaljenosti R pod elementarnim prostornim kutom detektora  $\Omega_d$ . Površina detektorskog elementa ab se vidi pod istim elementarnim prostornim kutom sa ekvivalentnog fokusnog razmaka  $f_e$ .



Slika 4.1. Geometrijski odnos površine rezolucijske ćelije i detektora

Spektralna iradijansa na prijemnoj optici od rezolucijske ćelije je:

$$E_\lambda = \tau_\lambda^A L_\lambda \Omega_d, \quad (4-1)$$

gdje su:  $\Omega_d$ -prostorni vidni kut detektor,  $\tau_\lambda^A$ -spektralna transmitivnost atmosfere.

Treba razlikovati prostorni vidni kut detektora  $\Omega_d$  u radijanima (Instantaneously Field of View-IFOV) i kut detektora  $\alpha$  u radijanima (Detector Angular Subtense-DAS), Postoji ovisnost  $\Omega_d = \alpha\beta\pi/4$ , gdje su  $\alpha$  i  $\beta$  kutovi u horizontalnoj vektorskoj ravnini.

Tok ili snaga na površini detektora jednaka je proizvodu iradijancije i površine optike  $A_0$ , pa je signal na izlazu detektora:

$$\Phi_\lambda = A_0 \tau_\lambda^0 L_\lambda \Omega_d \tau_\lambda^A, \quad (4-2)$$

gdje je  $\tau_\lambda$  je spektralna transmitivnost optike.

Napon na izlazu detektora, koji odgovara rezolucijskoj ćeliji dobiva se integracijom spektralnog toka u opsegu termovizijskog prozora:

$$V_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda \mathfrak{R}_\lambda d\lambda, \quad (4-3)$$

gdje je  $\mathfrak{R}_\lambda$  spektralni odziv detektora.

Spektralna snaga ekvivalentna šumu  $NEP_\lambda$  definira se preko spektralne detektibilnosti detektora:

$$NEP_\lambda = \frac{\sqrt{A_d B}}{D_\lambda^*} = \frac{V_n}{\mathfrak{R}_\lambda}, \quad (4-4)$$

gdje su:  $A_d$  -površina detektora,  $B$ -ekvivalentni propusni opseg,  $V_n$  -napon šuma detektora  $D_\lambda^*$ - spektralna specifična detektibilnost detektora.

Specifična detektibilnost  $D^*$  je normalizirana na  $A_d = 1 \text{ cm}^2$  i  $B=1 \text{ Hz}$ . Dakle  $D^*(300\text{K}, 1\text{Hz}, 1\text{cm}^2)$ ,  $D^*$  je funkcija valne dužine pa se koristi  $D_\lambda^*$  spektralna specifična detektibilnost. U normalnom slučaju  $B$  zavisi od broja detektora i broja rezolucijskih ćelija, odnosno piksela na slici i broja slika u sekundi  $B = \frac{\Omega_s}{n\Omega_d} f_s$ , gdje je  $\Omega_s$  prostorni vidni kut kamere, a  $n$  broj detektora. Kod termovizijske kamere sa matričnim detektorom  $B=f_s$ , jer je broj detektorskih elemenata jednak broju rezolucijskih ćelija ( $n=\Omega_s/\Omega_d$ ), [1].

Odnos signal-Šum je dat relacijom:

$$\text{SNR} = \frac{\Phi}{\text{NEP}} = \frac{V_s}{V_n} = \frac{A_0 \Omega_d}{\sqrt{A_d B}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda}^0 D_{\lambda}^* \tau_{\lambda}^A L_{\lambda} d\lambda. \quad (4-5)$$

## 5. Termovizijske kamere

Sustav se sastoji od jedinice za obradu termograma (računala) i termovizijske kamere. Unutar kamere integrirana je IC optika, osjetnik IC zračenja, jedinica koja pretvara električni signal u video signal, monitor i memorijska kartica. Računalnom tehnikom obrađuje se slika termograma prema odgovarajućem softveru i u njemu se podaci učitavaju s kartice koja se nalazi unutar kamere. Znamo da su elektromagnetske karakteristike zračenja jednake za cijeli elektromagnetski spektar, takva optika se koristi kod IC uređaja i po obliku je jednaka onoj kod fotografskih uređaja, jedino je različita po materijalima iz kojih je izrađena. Važno je da leća bude izrađena od materijala koji su propusni za IC zračenje, a to su: germanij, cink sulfid, cink selenid kod dugovalnog IC zračenja, a silikon, safir, kvarc ili magnezij za srednjevalno IC zračenje. Osjetnik prilagođen termovizijskoj kameri mjeri količinu energije koja ulazi kroz leću i pada na njegovu površinu, ona odgovara intenzitetu zračenja definiranog dijela IC spektra.

Da bi se iz zračenja prispijelog na osjetnik kamere izračunala korektna vrijednost temperature promatranog objekta potrebno je poznavati svojstva površine objekta, temperaturu okolnih objekata, udaljenost kamere od promatranog objekta, temperaturu i relativnu vlažnost zraka. Sve te podatke potrebno je prethodno podesiti kao ulazne parametre u softveru kamere. Utjecaj zračenja iz okoliša treba svesti na minimum, osobito ako se radi o objektu koji je na temperaturi bliskoj okolišnoj ili ima nisku vrijednost emisijskog faktora. Osim utvrđivanja temperature objekta poznatog emisijskog faktora, softver u kameri pruža i drugu mogućnost. Na temelju poznavanja temperature objekta i svih prethodno navedenih ulaznih parametara moguće je dobiti vrijednost emisijskog faktora promatrane površine. Kad se pak radi o potrebi anuliranja propusnosti, ispred objektiva kamere stavljaju se različiti filtri čija je zadaća spriječiti prolaz kroz objektiv elektromagnetskih valova onih valnih duljina za koje je promatrani objekt propustan, [11].

## 5.1. Usporedba termovizijskih kamera

U sljedećim tablicama su uspoređene maksimalne temperature, cijene i rezolucije pojedinih modela kamera u pitanju su FLIR, FLUKE i TESTO.

**Tablica 5.1.** FLIR-ovi modeli kamera

Model	Rezolucija	max. temp. u F	max. temp. u °C	cijena u Am. dolarima \$
T640	640x480	3632	2000	26950
T620	640x480	1202	650	20950
T600	480x360	1202	650	16450
T440	320x240	2192	1200	11750
T420	320x240	1202	650	8750
E60	320x240	1202	650	7995
E50	240x180	1202	650	5995
E40	160x120	1202	650	3995
E8	320x240	482	250	3995
E6	160x120	482	250	2495
E5	120x90	482	250	1495
E4	80x60	482	250	995
FLIT alati + program izvješća				295
Opcija za visoke temperature - T420/620				1760



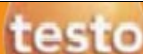
**Tablica 5.2.** FLUKE-ovi modeli kamera

Model	Rezolucija	max. temp. u F	max. temp. u °C	cijena u Am. dolarima \$
TIX-1000	1024x768	3632	2000	544955
TIX-660	640x480	3632	2000	39995
TIX-640	640x480	2192	1200	29995
TIX-560	320x240	2192	1200	15995
TIX-520	320x240	1562	850	11995
TI-400	320x240	2192	1200	8495
TI-300	240x180	1202	650	6996
TI-200	200x150	1202	650	6300
TI-125	160x120	662	350	5500
TI-110	160x120	482	250	4500
TI-105	160x120	482	250	3000
TI-100	160x120	482	250	2500
TI-95	80x80	482	250	2000
TI-90	80x60	482	250	1500



**Tablica 5.3.** TESTO-vi modeli kamera

Model	Rezolucija	max. temp. u F	max. temp. u °C	cijena u A. dolarima \$
890-2 DLX	640x480	662	350	26495
890-2	640x480	662	350	23995
890-1	640x480	662	350	20250
885-2 DXL	320x240	662	350	12995
885-2	320x240	662	350	11895
885-1	320x240	662	350	9195
882	320x240	662	350	8295
875i-2DLX	160x120	662	350	5495
875i-2	160x120	662	350	4295
875i-1	160x120	662	350	2895
870-2	160x120	536	280	3010
870-1	160x120	536	280	2282
Visoke temperature: 890-2 DLX /890-2 / 885-2 DXL / 885 - 2		2192	1200	1619



## 6. PROGRAMSKA PODRŠKA

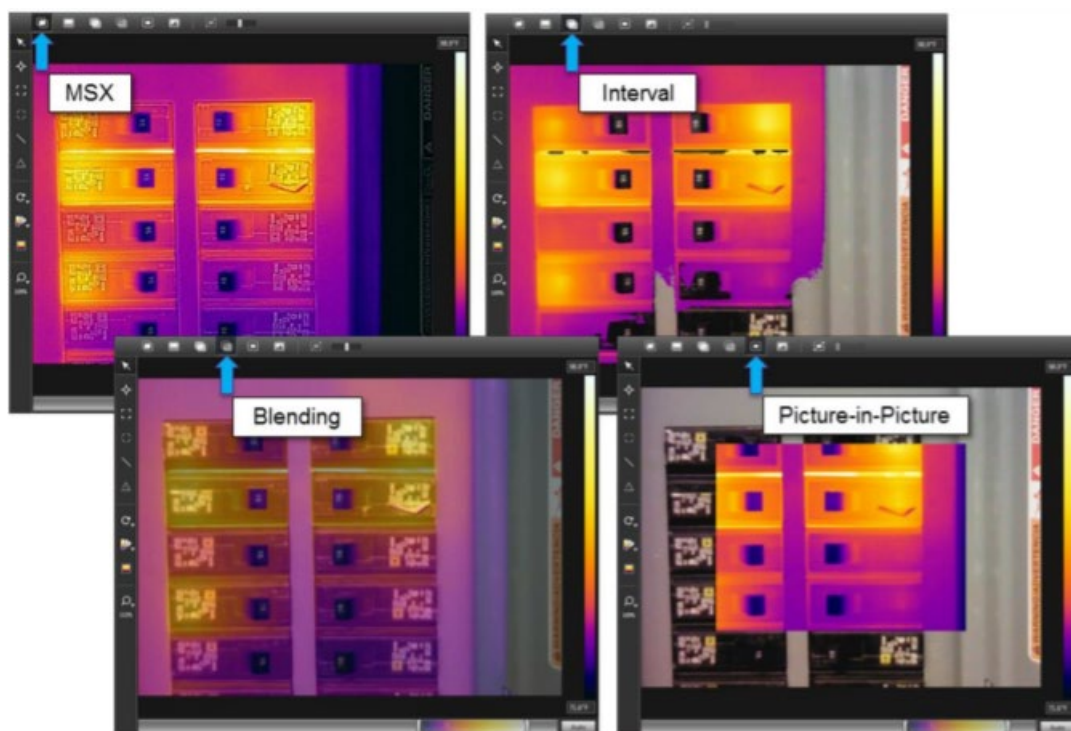
U narednom poglavlju obrađen programski paket FLIR, kao primjer programa za obradu termograma. FLIR Tools je svestrani softverski paket za uvoz i analiziranje slika, te stvaranje inspekcijskih izvještaji. Pomoću ovoga alata može se:

- Unijeti slike, videozapise i CSQ datoteke s FLIR kamera.
- Analizirajte IR slike i spremite promjene.
- Podesiti parametre objekta globalno i lokalno.
- Izraditi predloške tekstualnih napomena.
- Stvaranje i spremanje izvješća o pregledu i izvoz u PDF
- Pregledati radiometrijski videozapis uživo i spremiti JPEGu.
- Reproducirajte i analizirajte SEQ i CSQ datoteke
- Stvorite privremene radne plohe rezultata mjerenja.

Ako spojite kameru putem USB-a dok je FLIR Tools pokrenut na početnom zaslona pojavljuju se četiri uobičajene funkcije. Uvoz slika iz kamere koji omogućuje povlačenje postojećih slika na računalo. Pregled slika u datotekama će zatvoriti početni zaslon i prikazati biblioteku slika. Povezivanje s prijenosom uživo prikazat će sliku u stvarnom vremenu preko

kompatibilne FLIR kamere. Provjera ažuriranja će provjeriti ažuriranja FLIR alata na način da će usporediti postojeću verziju sa onom najnovijom, te je promijeniti ako ono postoji.

FLIR Tools će proučiti sve slike i videozapise na FLIR kameri i prikazati ih u prozoru za unos. Pojavit će se IR i grupe fotografija, MSX i Fusion slike u prozoru za uvoz i datoteci. UltraMax slike mogu se automatski poboljšati dok se uvoze. Sljedeći korak je odabir određene mape ili stvaranje nove mape, koju treba uvesti da bi dovršili prijenos datoteke. Sve mape sa snimkama pojavljuju se na ploči s lijeve strane. Gumb „Dodaj“ omogućuje dodavanje više mapa u knjižnicu. Mnoge moderne kamere mogu spremati slike koristeći jedan od različitih Fusion načina, kao što je MSX ili Picture-in-Picture. Bez obzira na to koji je mod bio korišten, FLIR Alati vam omogućuju prebacivanje između MSX, Interval, Blending i Picture-in-Picture načina. Također možete vidjeti standardnu termalnu sliku i vizualnu fotografiju.



**Slika 6.1.** Modovi slike

To pokazuje istu sliku u četiri različita načina fuzije. Drugi gumb s lijeve strane će prikazati običnu toplinsku sliku bez fuzije.

Razina i raspon mogu se podesiti pomoću zagrada ispod slike. Može se i automatski prilagođavati razmak, a možete se i upisati određene brojeve za maksimalnu i minimalnu temperaturu po želji.

Opcija „Adjust Region“ deveta u lijevo traci dopušta korisniku da definira područje od interesa za automatsko podešavanje, umjesto da koristi cijelu sliku. To može biti korisno, osobito za rad elektrotehničara na otvorenom, gdje je pozadina često hladno nebo. Kada se koristiti ovaj način automatskog podešavanja, on se primjenjuje na malo interesno područje, isključujući većinu pozadine. Rezultat je bolji termalni kontrast, koji može pomoći u identifikaciji mogućih problema.

FLIR Tools nudi brojne palete boja koje se mogu primijeniti na sliku. Boja palete mogu pomoći u interpretaciji slike u određenim slučajevima.

Izbornik za raspodjelu boja omogućuje vam promjenu načina prikaza boja raširenih po slici. Histogram izjednačavanje je najčešći mod koji koristi većina ručnih-računalnih kamera. To može pomoći u optimiziranju toplinskog kontrasta, osobito kada imate mala područje relativno visoke temperature u usporedbi sa hladnijom pozadinom.

Signalno i temperaturno ravnalo će linearizirati ljestvicu boja na temelju vrijednosti piksela ili temperature.

„Color alarms“, također poznati kao izoterme, mogu se dodati slici iz izbornika paleta. Postavke alarma mogu se prilagoditi u tablici mjerenja koja se nalazi na desnom dijelu preglednika u koliko je odabrana prije navedena opcija. Postoje i alarmi za otkrivanje područja potencijalne vlage i izolacijskih problema.

Mjerač točke, područja, linijama i funkcijama razlike može se primijeniti na slici. Opcije se nalaze u lijevom stupcu, a rezultati se prikazuju desno od slike.

Prikazane informacije o temperaturi označenih područja i linija mogu se prilagoditi desnom klikom tipke miša odabiranjem izbornika Lokalni maks / min / prosjek / oznake. Možete odabrati bilo koju kombinaciju parametara za prikaz u tablici mjerenja. Također možete prikazati ili sakriti min / max oznake na slici.

Emisivnost, reflektirana temperatura i ostali parametri objekta mogu biti lako podesivi u tablici desno od slike. Ovi parametri imaju utjecaj na točnost mjerenja temperature. Odabiranjem „Show All“ prikazuju se parametri atmosferske temperature, vlage, udaljenosti i parametri vanjske optike.

Lokalni parametri objekta mogu pomoći u slučajevima kada imate različite materijale na istoj slici. Može se postaviti emisivnost za svaki mjerni alat da reflektira materijal koji se mjeri.



Desni klik miša na alat za mjerenje i odaberi lokalni parametri. Može se koristiti lokalne postavke za emisivnost, izmjerenu temperaturu i udaljenost.

Ako su postavljeni lokalni parametri, pored mjernog alata će se pojaviti simbol "i". Ako miš postavite preko simbola "i" pojaviti će se mali prozor koji prikazuje lokalne postavke.

Bilješke i napomene o tekstu mogu se dodati i spremiti uz sliku. Polje napomena namijenjeno je za kratku bilješku, koja može davati vaše upute ili slično. Ako kliknete simbol + u odjeljku „Text Annotations“ (tekstualnih napomena) može se dodati redak sa oznakama i numeriranim poljima.

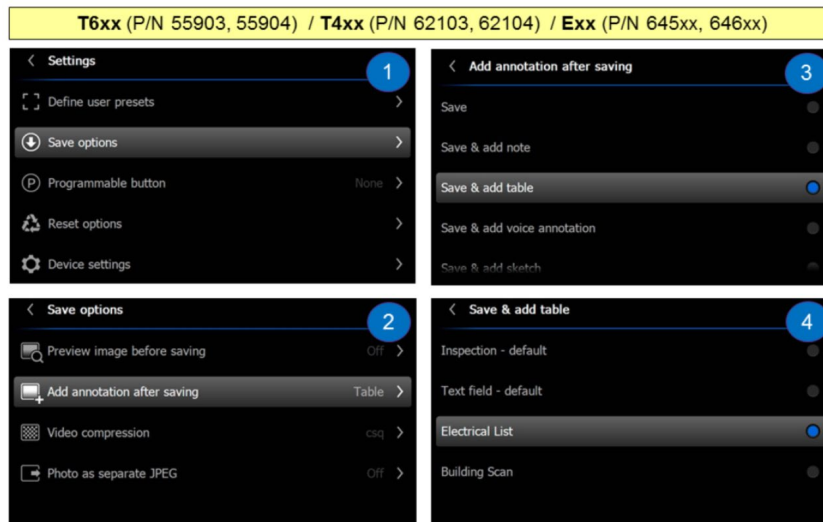
Ako kliknete + pored „Import from template“ dozvoljava da se iz predložka može uvesti tekstualne oznake i vrijednosti iz unaprijed definiranih tekstualnih predložaka uz napomenu. Pogledati odjeljak tekst predloži napomena za više pojedinosti. Ako slika sadrži tekst s kamere, tada će se pojaviti samo.

Ako je slika spremljena uz glasovne napomene u kameri, traka za reprodukciju će se pojaviti i prikazati u tablici s desne strane slike. Za reprodukciju liste klikne se gumb „Play“ za produciranje glasovnog zapisa napomene na zvučnike vašeg računala.

Na kartici predložaka klikom na uvoz TCF datoteka može biti stvorena iz starije verzije sustava reportera ili izvezena iz FLIR datoteka alata. Također se može izraditi novi predložak teksta i dodati željene vrijednosti. Predložak teksta sadrži popis polja (ili kategorija) i vrijednosti (koje se odnose na pojedino polje). Obično ćete imati nekoliko vrijednosti za svako polje. Klikom na polje može se upisati novi tekst. Ako miš postavimo iznad polja, vidjet će se mogućnosti dodavanja novog retka i brisanja stavke iz prijedloga.

Ako odaberemo polje u lijevom stupcu moguće je dodavati ili uređivati određene vrijednosti. Ove su vrijednosti ponuđeni izbori koji će se pojaviti kada se odabere polje.

Ako spojite kompatibilnu kameru preko USB kabela ili priključite SD karticu u računalo, FLIR alati će prepoznati uređaj i prikazati naziv ulaza. Kada želimo poslati predložak na kameru, jednostavno se klikne na željenu datoteku predložka, klikom na gumb sa strelicom i taj će predložak staviti u memoriju fotoaparata. Tada se može isključiti veza i započeti s pohranjivanjem slika s tekstom.



**Slika 6.2.** Predloške napomena za tekst

1. Na izborniku Postavke odabrati „Save“(Spremi) opciju
2. Zatim, dodavanje napomena nakon spremanja
3. Odabrati spremi i dodaj tablicu ili spremi i dodaj bilo koju od ponuđenih opcija
4. Odabrati predložak teksta koji želimo koristiti za spremanje slika.

## 6.1. Mogućnosti izvještaja

Ako odaberemo opcije, a nakon toga prijavi, može se konfigurirati logotip izvješća, te dodati tekst zaglavlja i podnožja za stranicu izvješća. Također se može odabrati veličina stranice. Odabirom naredbe prikaži sve parametre, prikazat će se svi parametri objekta u izvješću, a ne samo emisivnost i reflektirana temperatura.

Fotografija ekstrakta digitalnog aparata.... okvir namijenjen potvrđivanju dati će vizualnu fotografiju iz fuzijskih slika i smjestiti je na stranicu s izvještajem pored infracrvene slike.

Prvi korak postupka izrade izvještaja je odabir slika. Na način da se drži tipka CTRL, možete odabirati više nasumičnih slika unutar mape. Uz odabrane željene slike, koristimo strelicu okrenutu prema dolje (pored generiranja izvješća) i odaberemo predložak ili slikovnu listu koju želimo koristiti.

Svaki predložak ima drugačiji izgled stranice, no većina predložaka prikazuje IC sliku, fotografiju, tablicu mjerenja, sve napomene i tekstualne napomene koje su dodane slici.

Ako kliknete na IC sliku, pojavit će se dodatne opcije s desne strane stranice, one upravljaju prikazom:

1. Prva oznaka ispod detalja o objektu omogućuje vam prikazivanje ili sakrivanje tablice rezultata mjerenja.
2. Druga oznaka pokazati će ili sakriti informacije oko granice IC slike (datum, vrijeme, serijski broj itd.).
3. Treća kvačica će pokazati ili sakriti mjerilo.

Također možete promijeniti logotip prikazan na stranici ili poništiti potvrdni okvir da biste ga sakrili.

Gumb za umetanje novog teksta može se upotrijebiti za dodavanje tekstnog okvira na stranicu izvještaja, te za dodatne bilješke o osobnim nalazima, što će se izvršiti klikom gumba za odabir, a zatim je potrebno povucite bilo gdje na stranici.

Umetanje novog gumba s oznakom može se koristiti za crtanje strelica na stranici. To se često koristi za povezivanje problema s IC slikom sa vizualnom fotografijom, kako bi se osobi koja čita izvješće lakše utvrdila mjesto kvara. Odabirom gumba naznačenog markerom kako bi ga odabrali, a zatim povući kako biste ga nacrtali na stranici.

Nakon što je izvještaj izrađen i dalje je moguće urediti toplinsku sliku izmjenom razmjera, parametara i funkcija mjerenja. Prozor za uređivanje slika identičan je onome za uređivanje slike u biblioteci. Sve promjene u izvješću neće utjecati na izvornu sliku u knjižnici.

Nakon što dodate praznu stranicu predloška, možete povući i ispustiti željenu grupu slika na stranicu da biste je dodali zajedno sa rezultatima mjerenja i bilo kojim tekstualnim napomenama koje su dodane slici.

Gumb Izvoz omogućuje vam spremanje PDF kopije izvještaja. Ovo nije moguće urediti FLIR alatima, ali je preporučeno koristiti ovu opciju pri izradi izvještaja klijentima.

## **6.2. Veza u živo**

FLIR Alati imaju mogućnost povezivanja s različitim FLIR USB video i Ethernet kamerama. Mogu se povezati modeli E60, T440, T640, A310, A35 i mnogi drugi slični modeli. Te kamere mogu emitirati radiometrijski videozapis, omogućujući mjerenje temperature na živoj slici, podešavanje parametara i snimanje JPEG-ova koji se mogu naknadno obraditi i koristiti za inspekcijska izvješća. Mogu se povezati i preko FLIR Bluetooth. Ako se na uređaju pronađe kamera ili mjerač, odjeljak instrumenti automatski će se prikazati. Sve termičke kamere i brojlara koji se otkriju pojavit će se na ovom popisu. Ako se odabere gumb u obliku munje, uspostaviti će se veza uživo.

Nakon što se spoji u živo, možete kontrolirati većinu funkcija kamere iz FLIR alata. Ako fotoaparat ima elektronsko fokusiranje, možete prilagoditi fokusiranje blizu / udaljeno i na taj način automatski fokusirati. Može se izvesti i NUC (non-uniformity correction) koji će uključiti unutarnji zatvarač i izvršiti neravnomjernu korekciju. Raspon mjerenja može se mijenjati, a može se podesiti i brzinu zapisa slike. Ove će se opcije razlikovati ovisno o modelu fotoaparata.

Gumb za zaustavljanje omogućuje da pauzirate video prijenos uživo. Gumb kamere zabilježit će radiometrijski JPEG u vašoj biblioteci slika. Budući da je radiometrijska, možete se obraditi pomoću alata FLIR, koji omogućuju mjerenje temperature, podešavanje parametara i izradu izvješća pri inspekciji.

Slika u stvarnom vremenu u potpunosti je radiometrijska, tako da se može izvršiti podešavanje razmjera, promijeniti paletu, izmjeriti temperature i prilagoditi parametre objekta. Ako je snimljen JPEG, on će spremiti sve postavke i alate za mjerenje koji su prisutni na slici.

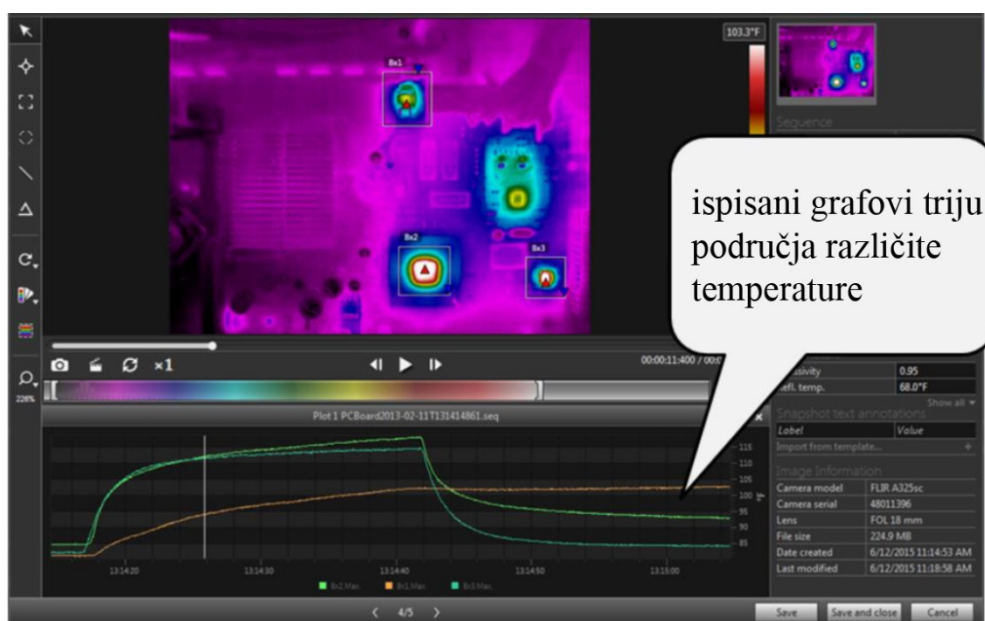
## **6.3. Produciranje i analiza datoteke .SEQ i .CSQ**

FLIR alati mogu reproducirati i analizirati prethodno snimljene SEQ i CSQ datoteke. Kao i u bilo kojem standardnom radiometrijskom JPEG-u, može se lako mjeriti temperatura, podešavati toplinsku prilagodbu, mijenjati emisijsku vrijednost i ostale parametre i dodavati tekstualne napomene u niz. Sve ove promjene mogu se spremiti snimkom.

Ako odaberemo gumb x1, brzina reprodukcije može se podesiti za reprodukciju prema naprijed ili nazad do 60 puta više od prvobitne brzine. Gumbi za reprodukciju u sredini alatne

trake reproducirat će snimku, a tada se može pomicati korak naprijed / natrag po jednom kadru. Vrsta kamere, datum, vrijeme i drugi podaci prikazuju se na ploči s desne strane slike.

Vremenski prilozi mogu biti prikladan način za analizu prolaznih događaja. Grafovi se mogu izraditi bilo kojim mjernim alatom. Omogućuje se desnom klikom miša na alat, odabere se „Plot“, a zatim se odabere stavka koju želite ispisati. U ovom slučaju iscrtane se maksimalne temperature različitih područja. Grafikoni se crtaju automatski, bez ponovnog ponavljanja cijelog slijeda.



**Slika 6.3.** Graf temperature

Kako bi dodali različite grafove, jednostavno desnom tipkom miša se odabere sljedeći alat i ponovi postupak „Plot“. Ovaj grafikon prikazuje maksimalnu temperaturu tri različita područja.

Podatci grafa mogu se lako kopirati iz FLIR alata kao tekst i zalijepiti u druge programe poput Microsoft Excel-a radi detaljnije analize.

Desnim klikom miša bilo gdje na grafikonu, odabere se kopiraj unutar podataka da biste kopirali podatke crteža u međuspremnik sustava Windows. Onda se može pokrenuti Excel i zalijepiti podatke u novu proračunsku tablicu. Svaki red predstavlja točku crteža na grafikonu. Podaci se raščlanjuju u stupce koji pokazuju datum, vrijeme i temperaturu ovisno o alatima odabranima za mjerenje.

Podaci o temperaturi za sliku ili bilo koji alat za mjerenje mogu se izvesti u CSV formatu. Ovo je tekstualna datoteka odvojena točkom i može čitati pomoću programa Excel.

Kada se izvoze slike, obilježene stvari ili redci, tekstualna datoteka sadržavati će niz paleta temperatura za svaki piksel. Prilikom izvoza iz SEQ ili CSQ, svaki se snimak iz snimka izvozi u jednu CSV datoteku.



**Slika 6.4.** Kompaktne kamere

Softver „FLIR Tools PC“ može se koristiti za ažuriranje različitih podataka kod mnogih termografskih kompaktnih kamera.

Ažuriranja upravljačkog softvera može se obaviti putem USB veze. Jednom kada se instalira FLIR Tools, potrebno je uključiti kameru i spojiti je USB priključkom. Ažuriranja mogu trajati do 20 minuta, ovisno o modelu fotoaparata.

Ako se FLIR Tools pokrene kada je kamera spojena, pojavit će se prozor na ekranu s nekoliko uobičajenih funkcija, [2].

## 7. TERMOVIZIJSKA ANALIZA OBJEKTA

Daljnji sadržaj je nastao temeljem postojanog iskustva pri projektiranju, izradi i korištenju infracrvenih (IR-eng ili IC-hr) detektora širom područja korištenja beskontaktnog zaprimanja temperatura iz područja  $-50^{\circ}\text{C}$  pa do  $+3000^{\circ}\text{C}$ , poznata američka tvrtka Raytek (Raytek koji je trenutno u vlasništvu tvrtke Fluke) pružila je na tržište svoju prvu termovizijsku kameru, pod nazivom ThermoView Ti30. Cijene takve kamere bila je približno osam i pol tisuća eura, te je posjedovala izuzetne karakteristike (isprobana je od strane stručnjaka HEP-a, KONCAR-a, FER-a i INA-e) kojima je postala jednom od nezamjenjivih pogonskih uređaja elektroenergetskog sustava i nižeg dijela osiguravanja pouzdanosti elektrotehničkih instalacija. Područja i prilike korištenja termovizijskih kamera je svakim danom sve više, primjerice građevini (ispitivanje karakteristika toplinske izolacije), u elektroprivredi (provjera ispravnosti instalacija, transformatora, generatora, motora, izolatora, zaštite, sabirnica i dr.), u autoindustriji, medicini, poljoprivredi i još puno toga. Obilježavanje točaka prilikom zabilježavanja termoslike, tzv. markiranja javljaju se raznolike mogućnosti stvaranja stručnog izvješća i analiziranja mjerenih točaka nakon uzimanja termografskog snimka. Svi ovi uređaji su izvedeni i usklađeni kako bi vršili pregleda u skladu sa normama HRN EN 473:2008 i EN ISO 9712:2005., rast njihove kvalitete će u budućnosti dovesti do toga da su nezamjenjive, najviše u održavanju, kontroli toplinskih instalacija, preventivnim mjerama i predviđanjima. Primjenu termovizijskih uređaja olakšavaju brojne dodatne funkcije: primjena automatizacije pri gašenju nakon određenog vremena, osvjetljavanje ekrana, prilagodiva ograničenja, automatsko parametrisanje prilikom zabilježavanja snimka, te potiskivanje (kompenziranje) djelovanja okolnih izvora topline. Uz ovakve uređaje pristaje odgovarajuća Windows podrška, ovisno o proizvođaču pojedine kamere. Takve kamere sa instaliranim sučeljem RS-232 ili USB imaju mogućnosti: akvizicije mjerenih podataka, dijagnostiku upravljanja, prikupljanje i zabilježba podataka (logging), SET-UP, DTP (izrada atestne dokumentacije i stručnih izvještaja) itd. Moguće je svojevoljno odabrati kameru, jer se one znatno razlikuju cijenom a manje mogućnostima, tako da se može odabrati pristojna kamera čak i za korisnike koji je nemaju namjeru koristiti u poslovne svrhe. Tako možemo navesti primjer usporedbe kamera Raytek MX6 i ThermoView Ti30 koje imaju približno jednake odlike, a cijenom je verzija MX6 više od pet puta jeftinija. Treba naznačiti da pri nabavki ovih i sličnih uređaja nema potrebe za dodatne dozvole pri uvozu, niti se vodi nikakva dokumentacija, evidencija i praćenje rada korisnika kamera, kao što je običaj kod uobičajenih termovizijskih uređaja, [3].

## 7.1. Izbor termovizijskog mjernog opsega

Primijenjena tehnika za povećanje isticanja termičkih uzoraka je važna, jer se analiziranje termičke slike svodi na pitanje analiziranja termičkih uzoraka.

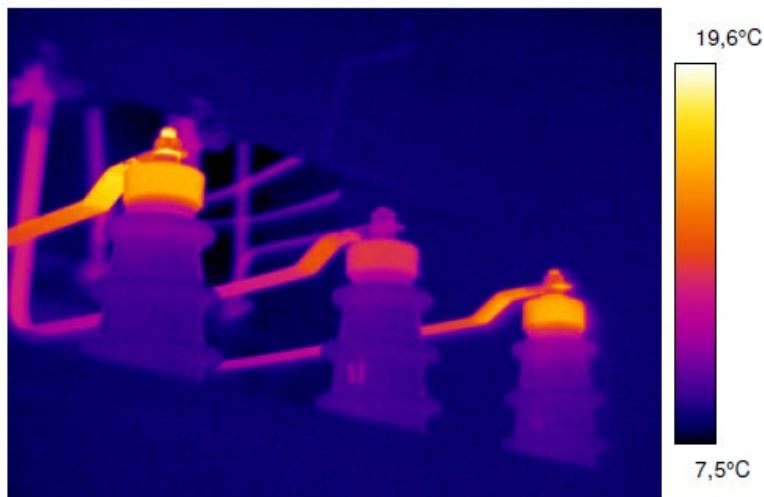
Uzorci mogu biti teško vidljivi pa iz tog razloga svaka kamera ima više funkcija kojima je moguće ove uzorke učiniti vidljivijima, [9].

Tri osnovne funkcije koje posjeduju gotovo sve kamere su:

- Termičko podešavanje (Level i Span)
- Izoterma
- Paleta

Mjerni opseg temperature u priloženom termogramu ograničen je gornjom i donjom graničnom temperaturom. Kako bi termogram jasno prikazivao razlike temperaturna, trebamo jasno postaviti i jednu i drugu granicu. Komplikiranije i skuplje termografske kamere imaju veće mogućnost, kao što su ručno i automatsko određivanje mjernog opsega, dok one jeftinije imaju samo ručno. Ako mjerni opseg odaberemo ručno, a temperatura unutar termograma na slici je veća od gornje granične, boje koje označavaju temperaturu tog diela slike poprimit će nijansu više od granične temperature, pa se dobije loše definiran termogram. Kod automatskog izbora mjernog opsega se pri obradi slike utvrđuje se po jedan piksel s najslabijim i jedan piksel s najjačim intenzitetom svjetla, odnosno piksel s najmanjim i piksel s najvećim digitalnim kodom. Procesor zatim dodaje nove vrijednosti digitalnog koda pikselima koji pripadaju najtamnijoj ili najsvjetlijoj nijansi pojedine boje. Ostalim nijansama svake boje, odnosno njihovim pikselima, procesor interpolacijom dodaje nove digitalne kodove. Tako se dobije termogram s najvećim temperaturnim kontrastom. Primjer ručnog odabira temperaturnog mjernog opsega može rezultirati raznim pogreškama, pa se može vidjeti takav odabir prikazan na slici 2.8.4. U slici lijevo gore prikazana je stvarna slika, a u slici do nje ispravno odabrani temperaturni mjerni opseg. U slici dolje postavljeni opseg je preširok, pa je veliki dio termograma ne upotrebljiv za analizu radi manjka kontrasta.





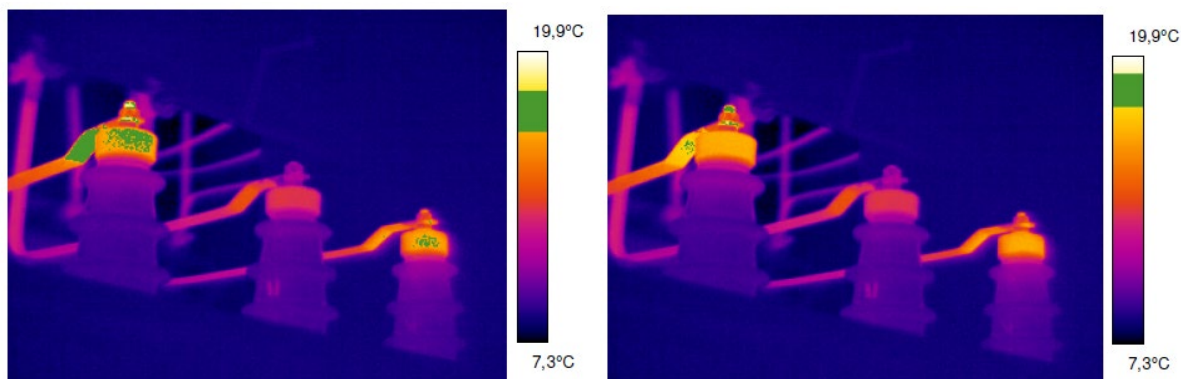
**Slika 7.1.** Odabir točnog mjernog opsega (level/span), [9]



**Slika 7.2.** Odabir preširokog mjernog opsega (level/span), [9]

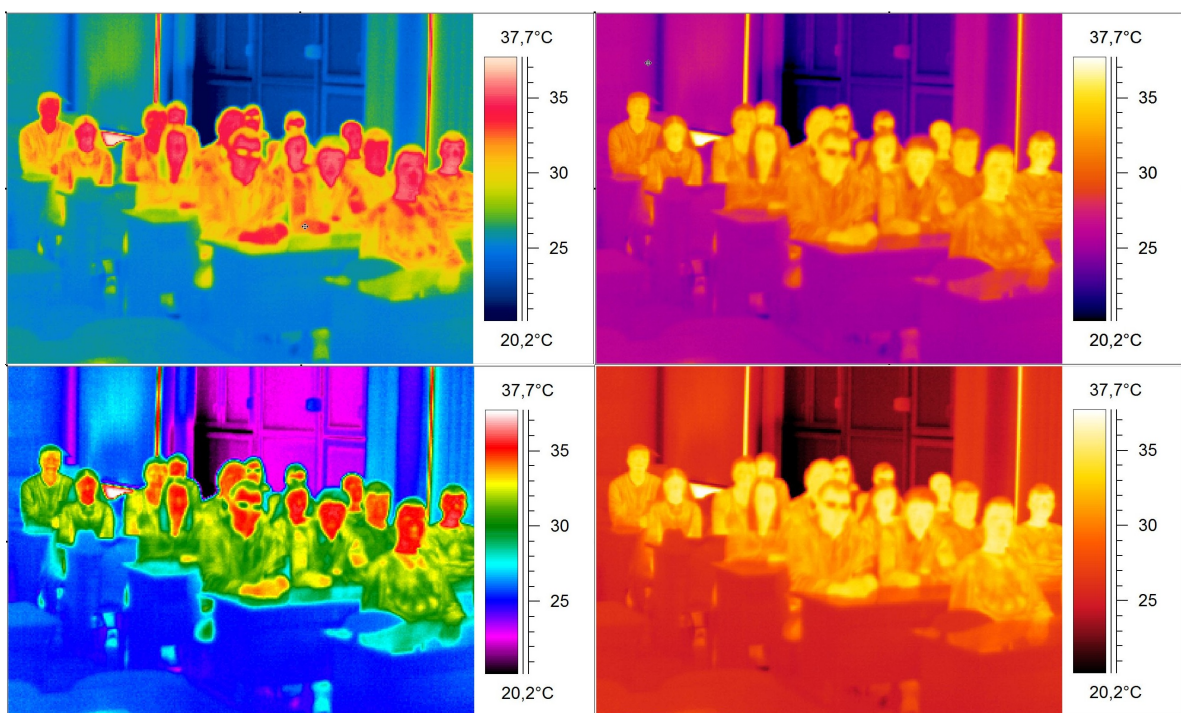
Današnje termografske kamere posjeduju zadivljujuće funkcije, primjerice spajanje vizualne slike i termograma, alarmiranje ukoliko je temperatura scene iznad unaprijed određene granice, vizualno prikazivanje samo dijela slike u kojem su prekoračene zadane temperaturne vrijednosti, itd. Mnoge varijable utječu na točnost termografskog oslikavanja ,npr. razmak između kamere i objekta, ambientalna temperatura u koliko se mjerenje odvija unutar zatvorenog prostora, relativna vlažnost i najvažnije emisivnost materijala. Emisivnost je modificirajući faktor korišten u termografiji u boji kako bi se postiglo ispravno očitavanje temperature. Emisivnost (učinkovitost zračenja) većine materijala je funkcija površinskih uvjeta, temperature i valne duljine mjerenja. Kamera radi na dužim valnim duljinama IC spektra (7- 14  $\mu\text{m}$ ). Ambijentalna temperatura i relativna vlažnost se mjere na točki proučavanja i korigira se za podešavanje kamere. Vrijednosti emisivnosti su ekstrapolirane s

referentnim vrijednostima npr. iz. 'Table of Emissivity of Various Surfaces' (Mikron Instruments), [6].



Slika 7. 3. Izoterma, [9]

Izoterma mijenja određene boje na skali/ slici sa kontrastnom bojom i prikazuje interval identičnih prividnih temperatura a ne jednu identičnu temperaturu kako se čini iz naziva ove funkcije. Ona je izuzetno važna funkcija jer nam pomaže uočiti termičke uzorke kao i da pronađemo najtoplija mjesta na termičkoj slici.





**Slika 7.4.** Paleta, [9]

Različite palete dodaju različit set boja različitim nivoima prividne temperature. Mogu slici dati više ili manje kontrasta, u ovisnosti o korištenim bojama.

Pravilo: Koristiti palete sa više kontrasta na onim objektima kod kojih je razlika u temperaturi vrlo mala i obrnuto.

## 7.2. Primjena termovizijske kamere

Korištenje uređaja i tehnika primjene infracrvene obavlja se za vrijeme normalnog pogonskog rada, bez uspostavljanja kontakta s objektom kojeg se ispituje, te nam služi za otkrivanje povišenog zagrijavanja električkih komponenti. Na taj način sprječavamo ozbiljne kvarove i ukazujemo na lošu ili ne zadovoljavajuću toplinsku izolaciju. Ovom tehnikom znatno smanjujemo broj neplaniranih ispada u radu pogona. Rezultati se vide u povećanju brzine dijagnosticanja kvara, provjeri obavljenih zahvata, uštedi energije, zaštiti pogonske opreme, kao i smanjenju cijene osiguranja (unutar EU). Povećanjem sve moguće raspoloživosti opreme na način da se ne rušimo puno kvalitetu i zadržimo pouzdanost, ali i ukažemo na mjesta sa mogućim kritičnim događajima, povećavamo vrijeme rada pogona unutar procesa proizvodnje. Kod pregleda električne opreme obično se javljaju problemi uzrokovani odnosima struje i napona. Učestalo se neželjeno visoka zagrijanost javlja u električnim krugovima, a uzrokovana je radi nedovoljno pritegnutog, oksidiranog ili korozijom oštećenog spoja, ali i nepravilnog rada samog uređaja. Iz tog se razloga termovizijska kamera koristi u područjima kao što su: proizvodnja električne opreme, preventivna održavanja postrojenja, proizvodnji el. energije, prijenosu, distribuciji, industriji i transportu. Kada se nalazimo na terenu potrebno je u što kraćem vremenu uočiti poremećaj, utvrditi da li predstavlja problem,

uzeti uzorak za daljnju analizu (određivanje prioriteta otklanjanja) te se povući iz zone opasnosti. Stanje elektroenergetskog sustava na kojemu se uočava povećanje temperature može se primijeniti Jouleov zakona i procijeniti klasa stanja. Postoje kriteriji postavljeni prema poznatoj referentnoj i korektnoj temperaturi, [13].

Primjer prioriteta otklanjanja kvarova:

Prioritet "A"- Vrlo ozbiljan kvar koji hitno zahtjeva pažnju

Primjer:  $\Delta T$  preko 30 °C ili ako je apsolutna temperatura preko 80 °C

Prioritet "B" – Ozbiljan kvar koji zahtjeva pažnju u što kraćem vremenskom periodu

Primjer:  $\Delta T$  između 5 i 30 °C

Prioritet "C" – Poremećaj koji zahtjeva praćenje stanja i planiranje intervencije

Primjer:  $\Delta T$  do 5 °C

Priložena klasifikacija stanja električne opreme napravljena je prema "ITC"-u (Infrared Training Center). Kod opterećenja manjih od 100 %-tnog koristi se Jouleov zakon za izračun porasta temperature, što je temelj trenutnog školovanja termografista.

Izračunavanje  $\Delta T$  pri maksimalnom opterećenju:

$$\Delta T_{100\%} = (T_{mj} - T_{ref}) * \left( \frac{I_{max}}{I_{tren}} \right)^{1,68} . \quad (7-1)$$

$\Delta T_{100\%}$  - delta T pri 100% opterećenju

$T_{mj}$  - mjerena temperatura

$T_{ref}$  - referentna temperatura

$I_{max}$  - maksimalna temperatura kroz promatrani vodič

$I_{tren}$  - trenutna struja kroz vodič

U idealnim uvjetima se omjer  $I_{max}/I_{tren}$  diže na 2 potenciju no u realnim uvjetima je taj broj 1,68 do 1,7.

Tokom svake termovizijske kontrole trebamo imati potrebu usporedbe i pitati se, da li je površina koju smo upravo snimili takva kakvom se prikazuje ili postoje neispravnosti? Bitno je da nam Level i Span budu jednaki kada želimo raditi usporedbu. Uz to bi bilo dobro da imamo bazu podataka promatrane opreme kroz vrijeme njenog korištenja. Takvi podatci mogu biti od koristi kao test prihvatljivosti prilikom ugradnje nove opreme, [9].

### 7.2.1. Kompenzacija efekta okoline- utjecaj atmosfere

Ako gledamo atmosferski utjecaj kao onaj koji utječe na propusnost energije koja dolazi do kamere iz smjera objekta, možemo reći da je visoka ali nije jednaka 1,0.

Faktori koji utječu na upijanje atmosfere:

- Udaljenost- veća količina atmosfere između objekta i kamere utjecati će na emitiranje i upijanje
- Temperatura zraka- dijeli se na dva utjecaja.  
Prvi je zračenje atmosfere gdje topliji zrak dovodi do većeg zračenja. Drugi je utjecaj temperature zraka u kombinaciji sa relativnom vlažnosti on broji količinu molekula vode u zraku kroz koje zračenje treba proći.
- Relativna vlažnost- govori koliki je postotak od maksimuma za zadanu temperaturu (ako poraste temperatura u zrak će doći do smanjenja postotka vlage u zraku, ali će i dalje jednako teško zračenje prolaziti kroz zrak).

Na kameri je moguće parametrirati sve faktore, a ona će ih prilagoditi i obaviti potrebne izračune. Moramo znati da temperatura zraka nije isto što i reflektirana prividna temperatura.

Šest različitih faktora utječu na emisivnost:

- Materijal – poznato da je različiti materijali posjeduju različitu emisivnost.

Metali i nemetali se razlikuju prema puno stvari tako i gledano sa strane emisivnosti, logično gledano lakše je raditi sa nemetalima, jer oni imaju razmjerno visoku emisivnost. Njihovi uzorci također nemaju veliku razliku što olakšava posao kamere (npr. razlika između dvije vrste cigle je relativno mali gledajući sa strane emisivnosti). Uz to stoji i činjenica da vrijeme kod nemetala manje utječe emisivnost.

Dok neoksidirani metali imaju jako nisku emisivnost (do 0,05), pa čak i niži kada je površina ugrađena. Iz prije navedenoga znamo da što je niža emisivnost to je teže mjeriti, pa dolazi i do granice da je nemoguće, iz tog razloga mjerenje površina visokog sjaja treba izbjegavati. U praksi se takva područja prekrivaju tankim slojem materijala visoke emisivnosti kako bi se omogućilo mjerenje i što manje utjecali na stvaran rezultat mjerenja. Zato je kod mjerenja poželjna oksidacija metalnog sloja jer diže emisivnost i do 0,95.

➤ Struktura površine

Kao što smo mogli vidjeti iz prošlog primjera tako i ovdje dolazimo do toga da što je površina grublja odnosno hrapavija to nam kamera daje bolje rezultate.

➤ Geometrija

Ovaj faktor govori o fizici promatranog objekta koji može biti udubljen, izbočen, izvijen, popunjen rupama, što dovodi do efekta crnog tijela i mogućnosti višestruke refleksije unutar udubljenja što dovodi do povećanja emisivnosti, ali ovaj put to nije dobro za davanje rezultata mjerenja.

➤ Kut promatranja

Bitno je zapamtiti da prilikom postavljanja kamere u trenutku snimanja objekta izbjegnemo postavljanje direktno ispred objekta, jer se time reflektira energije od strane kamere i njenog korisnika (najbolje od  $10^\circ$  do  $60^\circ$  u odnosu na promatranu površinu).

➤ Valna duljina – emisivnost iste površine ne mora biti isti na dugovalnim i na kratkovalnim kamerama

Praktičan primjer, izolirajuća crna traka u pravilu ima emisivnost oko 0,95, što za “focal plane array” detektore koji rade na principu kratkovalnog područja, neke od izolirajućih crnih traka nisu transparentne odnosno dovoljno da ih se ne može koristiti kao površine referentne emisivnosti. Moramo znati da faktor koji dovodi do ovakvog ponašanja nije boja nego materijal od kojega je traka izrađena. Vizualne boje samo mijenjaju način na koji površina reflektira i apsorbira vizualno svjetlo. Termovizijska kamera ne zabilježava oku vidljivi spektar na taj način dio spektra elektromagnetskog zračenja ne može utjecati direktno na zračenje koje ulazi u osjetnik.

## ➤ Temperatura

Utjecaj je često mali u velikom broju slučajeva. Emisivnost metala može porasti pri jako visokoj temperaturi.

Npr. Testiranje kočnica može predstavljati pravi problem jer se temperatura kočnica može kretati od temperature okolnog zraka pa sve do 1000 °C, [9].

### **7.3. Otklanjanje problema vrtložnih struja na provodnim pločama u trafostanicama**

Problem vrtložnih struja induciranih u blizini faznih vodica, na provodnim pločama između polja i glavnih sabirnica ili među poljima (lukobrana), prvi puta je termografskom opremom, u energetske postrojenjima na području DP „Elektroslavonija“ Osijek, uočen sredinom devedesetih godina.

Rad prikazuje nekoliko metoda otklanjanja ovog problema kroz perspektivu infracrvene termografije. Obradivano postrojenje je TS 110/10 kV Osijek 3, 10 kV dio postrojenja. Čelije koje su promatrane su spojno polje SP 10 kV br. 1 (na kojem se radilo na otklanjanju problema iz naslova) te spojno polje SP 10 kV br. 2 (na kojem još nismo pristupili otklanjanju uočenih poremećaja), [14].

Kao metoda, koja za rezultat daje vizualni „toplinski otisak“ promatranog objekta, u ovom je radu korištena kako za pronalaženje problema iz naslova ovog rada tako i za utvrđivanje njegovog otklanjanja. Sve termografske snimke su snimljene kamerom FLIR ThermoCam PM695 koja je bila podešena u temperaturnom području (koji označava podešene kamere iznad kojeg i ispod kojeg nije moguće mjeriti kamerom i termografske kamere ih mogu imati između 2 i 5) od -40 °C do 120 °C, [15].

#### **7.3.1. Opis postrojenja TS 110/10 kV Osijek 3**

Transformatorska stanica TS 110/10 kV OSIJEK 3 je elektroenergetsko postrojenje koje je pušteno u pogon 1988. godine. Sastoji se od vanjskog 110 kV postrojenja koje sadrži dva transformatora 110/10kV ukupne snage 40 MVA, 2 mjerna polja MP 110 kV i 2 vodna polja

VP 110 kV te unutarnjeg, odvojenog 10 kV postrojenja koje se sastoji od 14 VP 10 kV, 2 transformatorska polja TP 10 kV, 2 polja kućnih transformatora KT 10/0,4 kV, 2 MP 10 kV i 2 SP 10 kV. Predmet ovoga rada je unutarnje 10 kV postrojenje i stoga ćemo se koncentrirati u daljnjem razmatranju na njega, [14].

### 7.3.2. Postrojenje 10 kV

Postrojenje 10 kV je izvedeno u odvojenoj zgradi s montažnim ćelijama u cijelosti izrađenim od čeličnog lima i čeličnih profila, tipa „ESO“, koji su proizvedeni u pogonima DP „Elektroslavonije“ Osijek, i prilagođeni potrebama i funkciji TS 110/10 kV Osijek 3. Sastoji se od dva reda ćelija koje su međusobno povezane spojnim mostom. Sabirnice 10 kV i spojni most su izvedeni od plosnatog bakra koji je dimenzioniran za trajnu struju od 2500 A; sabirnice su izvedene od 2 bakrena, plosnata profila dimenzije 100\*10 mm svaki (profili su međusobno razdvojeni 10mm- vidi sliku 2.). Presjek ovako izvedenih sabirnica je 2000 mm<sup>2</sup>. Za ograničenje luka su korištene provodne ploče od čeličnog lima sa prolaznim izolatorima. U svim ćelijama su korišteni malouljni prekidači s razlikom u snazi kako slijedi:

- u VP 10 kV – nazivne struje 630 A i prekidne struje 16 kA
- u TP 10 kV – nazivne struje 2500 A i prekidne struje 50 kA

Strujni mjerni transformatori su: - za VP 10 kV - 2\*300/5/5 A

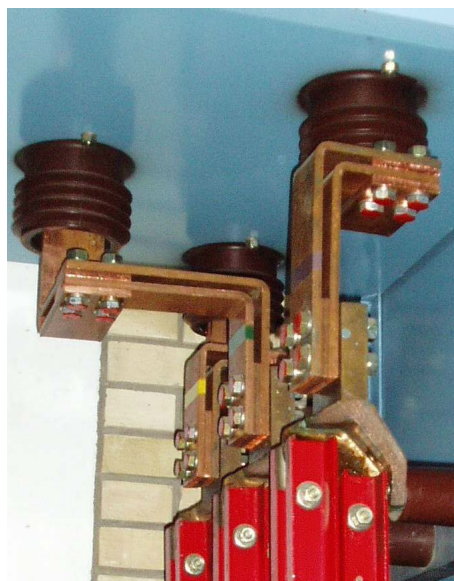
- za TP 10 kV - 2\*1500/5/5 A

Sabirnički rastavljači u vodnim poljima su nazivne struje 630 A a u transformatorskim poljima 2500 A. Vodni rastavljači po vodnim poljima su također 630 A. Na slici 7.5. je prikazano TP 10 kV br. 1, a na slici 7.6. detalj SP10kV br. 2 na kojem su vidljivi prolazni izolatori prema glavnim sabirnicama 10 kV, provodna ploča od čeličnog lima te sabirnice presjeka 2000 mm<sup>2</sup>, [16], [14].





Slika 7.5. TP 10 kV br. 1



Slika 7.6. detalj SP 10 kV br. 2

### 7.3.3. Uočavanje problema vrtložnih struja u postrojenju

Problem vrtložnih struja induciranih u blizini faznih vodica polja na provodnim pločama u ovom postrojenju je prvi puta uočen sredinom devedesetih godina. Problem se javlja zbog izvedbe montažnih ćelija 10 kV postrojenja od čeličnog lima uslijed čega se događalo da se (zbog visokih struja), svaki puta kada postoji prolaz sabirnica kroz provodne ploče javlja i induciranje vrtložnih struja. Kako su u ovom postrojenju nominalne struje „vrlo visoke“ (u zimskom razdoblju dostižu normalno vrijednosti od 1300 A) ovaj problem je izraženiji nego u ostalim postrojenjima na području našeg DP-a.

Problem je bio najjače izražen tamo gdje prolazi glavina struje, dakle u transformatorskim poljima (pri prolasku spojnih vodica polja kroz provodne ploče prema glavnim sabirnicama), na glavnim sabirnicama (pri prolasku sabirnica kroz lukobrane iznad polja), te u spojnim i mjerno-spojnim poljima (spojno polje se dijelom nalazi u ćeliji mjernog polja).

Osim toga, uslijed induciranja elektromagnetskog polja u čeličnim pločama ćelija dolazi i do pojave vibriranja cijelog postrojenja koje proizvodi iznimno glasan, neugodan zvuk. Uzrok vibracija su sile koje djeluju na ploče od feromagnetskog lima debljine 1.5 mm, kao učinak magnetskog polja, [14].

Postrojenje je, prije zahvata na rješavanju naređenog problema, izgledalo kao na slikama br. 7.7. do br. 7.11.



**Slika 7.7.** IR slika prolaza spojnih sabirnica kroz provodnu ploču



**Slika 7.8.** fotografska slika slike br. 7.7.

Na slici br. 7.7. je Level (Level je (hrv. razina) središnja točka “span-a” (možemo ga zvati i termička svjetlina) - vidi sliku 4a.) bio podešen na 40.1 °C a Span (Span (hrv. raspon) označava dio temperaturnog područja koji trenutno koristimo za prikaz slike (možemo ga zvati i termički kontrast)) na 29 °C i prikazan je prolaz spojnih sabirnica od glavnih sabirnica prema spojno-mjernom polju 10 kV. Fazni vodič do zida postrojenja je faza R a fazni vodič najbliži promatraču je faza T. Vidljivo je da je grupiranje vrtložnih struja jace između faza R i S i faza S i T a slabije između faza R i T zbog veće udaljenosti između tih faza, [17].

Slika br. 7.8. predstavlja fotografsku snimku postrojenja prikazanog termografskom slikom br. 3, [14].



**Slika 7.9.** IR slika prolaza sabirnica između MSP i SP 10 kV



**Slika 7.10.** fotografija slike 7.9.

Slika br. 7.9. prikazuje prolaz između mjerno- spojnog polja i spojnog polja 10 kV. Level je podešen na 37.5 °C a Span na 29 °C, [14].



**Slika 7.11.** IR slika prolaza kroz lukobran između polja      **Slika 7.12.** fotografija slike

Na slici br. 7.11. je prikazan prolaz glavnih sabirnica kroz ploču lukobrana između polja. Na slici je Level podešen na 38 °C a Span na 25 °C.

Kako je ovo postrojenje u pogonu neizmijenjeno od prvog dana već 19 godina jasno se mogu uočiti i promjene u boji na čeličnim limovima koje su vidljive na slici br. 7.12. Osim toga, kako smo već naveli vibracije ćelija postrojenja su se tijekom godina pojačale.

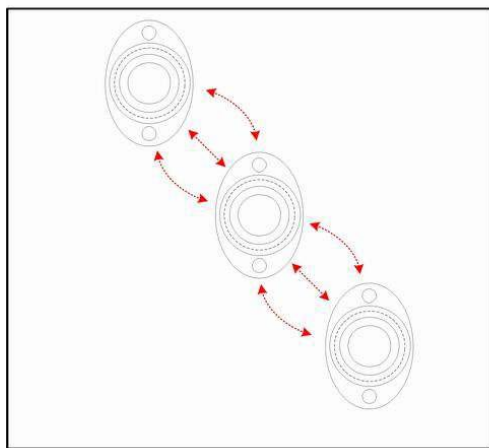
Svi ovi pokazatelji su nas naveli da odlučimo što prije iznaći rješenje ovoga problema kako bismo izbjegli havariju u postrojenju, [14].



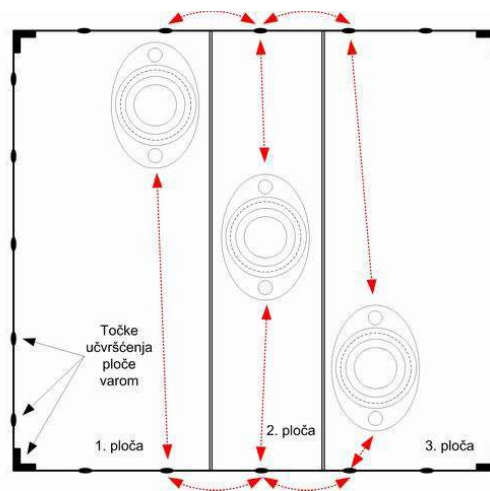
**Slika 7.13.** Vidljive promjene u boji limova uz prolazne izolatore na provodnim pločama

### 7.3.4. Rješavanje problema vrtložnih struja za TS 110/10 kV Osijek 3

Prvo moguće rješenje problema koje je razmatrano je bilo rasijecanje provodnih ploča na tri ploče (tako da svaka ploča nosi svoj prolazni izolator) i njihovog međusobnog odvajanja (izoliranja) i od ostale čelične konstrukcije ćelije. Time bismo onemogućili protok vrtložnih struja direktno između faza kako je skicirano na slici 7.14. U najgorem slučaju bi (ukoliko ploče ne bi bile izolirane međusobno i od ostatka konstrukcije ćelije) promijenili smjer kretanja vrtložnih struja čime bi tok istih bio drugačije raspoređen po provodnoj ploči i time temperatura ploče manja (vidi skicu na slici 7.14.), [14].



Slika 7.14. skica grupiranja vrtložnih struja između faza



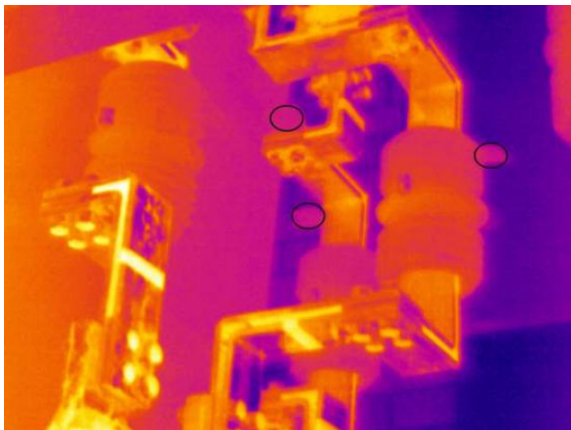
Slika 7.15. skica grupiranja vrtložnih struja u slučaju rezanja provodnih ploča

Rješenje problema rasijecanjem ploča nije prihvaćeno iz nekoliko razloga:

- a) pretanki limovi provodnih ploča
- b) provodne ploče su pričvršćene za konstrukciju varenjem što otežava izvođenje prepravki na njima
- c) ukoliko bi se ploče rasjekle tada bi trebale biti učvršćene vijcima za konstrukciju ćelija i vijci bi trebali biti izolirani od ploča kako bi se izbjeglo preusmjeravanje vrtložnih struja umjesto otklanjanje
- d) rasijecanjem ploča bi se oslabilo mehaničku čvrstoću ćelija osim ako bi se limovi mijenjali sa debljim limovima
- e) na nekim mjestima u nekim ćelijama se ne bi mogle rasjeći ploče zbog konstrukcije ćelija

Zbog ovih razloga smo odlučili zamijeniti cijele ploče od čeličnog lima sa pločama od nehrđajućeg, nemagnetskog prokroma. Ovaj materijal nema izraženih magnetskih svojstava (točnije vrlo su male) i time je pogodan za ugradnju na mjesta koja su osjetljiva na elektromagnetska djelovanja. Osim toga ovaj materijal je čvršći od normalnog čeličnog lima i time daje dodatnu čvrstoću postojećoj konstrukciji ćelija. Također prilikom ugrađivanja ga je moguće variti cime se dodatno olakšava izmjena ploča.

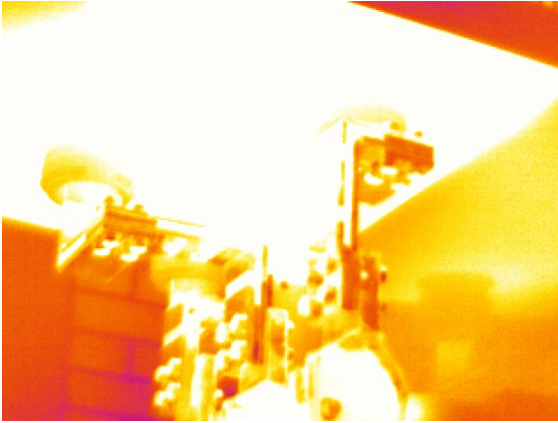
Slika br. 7.16., 7.17. su fotografije nakon provedene izmjene dijela provodnih ploča u postrojenju, [14].



**Slika 7.16.** IR slika provodne ploče od prokroma      **Slika 7.17.** fotografija slike pored

Ploče od prokroma imaju nisku emisivnost i predstavljaju problem prilikom snimanja termografskom opremom što je vidljivo na slici 7.16. (ploča od prokroma se na termografskoj slici gotovo niti ne vidi – ono što je vidljivo umjesto ploče je refleksija opreme u ploči od prokroma pa izgleda kao da se polje „nastavlja“ prema gore ili kao da je ploča od prokroma prozirna). Zbog niske emisivnosti smo ploču na kritičnim mjestima obojili (crvene točke) koje su vidljive na slici 7.17. a na slici 7.16. smo ih označili crnim krugovima kako bi bile uočljivije. Emisivnost boje je poznat i relativno visok – od 0,9 do 0,93 te su ta mjesta prikladna za mjerenje temperature. Podešeni Level je iznosio 30 a Span 6,6 °C. Izmjerena temperatura označenih točaka na prokromu je iznosila 25,7 °C (uz podešenu emisivnost 0,92, udaljenost 2 m, prividnu reflektiranu temperaturu okoline 25 °C i relativnu vlažnost zraka 50 %) što približno odgovara temperaturi okoline, [14].

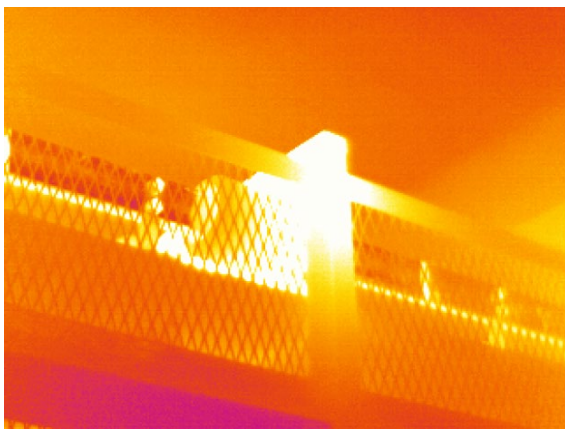
Uz ista podešena Level-a i Span-a mjerno - spojno polje na kojem nisu urađene izmjene izgleda kao na slici 14:



**Slika 7.18.** IR Slika mjerno- spojnog polja



**Slika 7.19.** fotografija polja sa slike lijevo

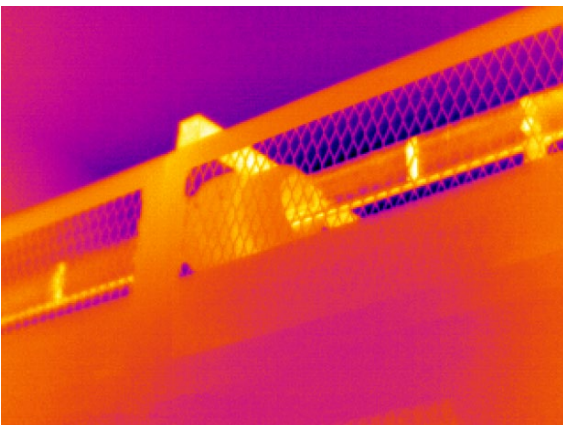


**Slika 7.20.** IR slika lukobrana od čelika



**Slika 7.21.** fotografija lukobrana

Slika 7.20. prikazuje prolaz kroz lukobran na dijelu glavnih sabirnica gdje nismo mijenjali provodne ploče lukobrana. Na slici 7.22. je vidljivo isto to mjesto ali na dijelu glavnih sabirnica gdje su čelične ploče već zamijenjene pločama od ne magnetskog prokroma. Podešena Level-a i Span-a su bila ista na obje naredne slike, [14].



**Slika 7.22.** IR slika lukobrana od ne magnetskog



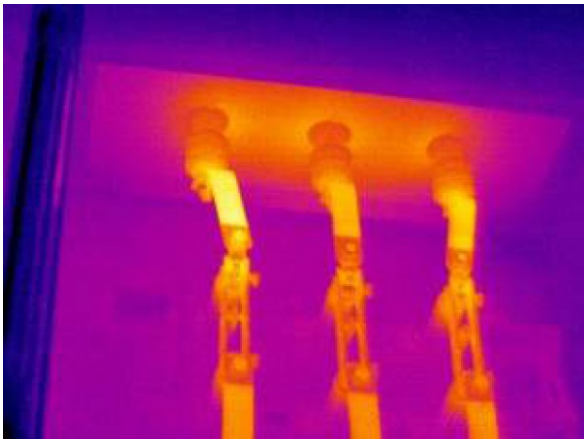
**Slika 7.23.** fotografija lukobrana

Razlika u temperaturi je iznosila približno 25 °C između provodnih ploča koje su izmijenjene i onih koje nisu bile mijenjane u oba polja (SP 10 kV br. 1 i SP 10 kV br. 2). Treba napomenuti da je struja na tom dijelu kroz sabirnice, u vremenu mjerenja, iznosila približno 650 A od ukupno mogućih 2500 A. Također treba napomenuti da bi se, prema izračunu, temperatura ploča pri maksimalnom opterećenju postrojenja mogla podići i do 200 °C u slučaju da nismo obavili zamjenu ploča.

Također se mehaničko vibriranje provodnih ploča čujno smanjilo na strani postrojenja na kojoj su ploče izmijenjene, [14].

### 7.3.5. Problem prolaska spojnih sabirnica u ostalim postrojenjima

TS 110/10 kV Osijek 3 nije usamljen slučaj što se tiče ovog problema. U svim postrojenjima u kojima su ugrađene provodne ploče od čeličnog lima je ovaj problem prisutan u manjem ili većem broju slučajeva. Prijedlog je da se prilikom termografskih pregleda postrojenja obrati pažnja na ovu činjenicu te da se sukladno uočenim promjenama na provodnim pločama odluci da li je provodne ploče potrebno mijenjati, rezati ili je postrojenje u redu. U daljnjem tekstu smo prikazali nekoliko primjera ostalih postrojenja u kojima je uočen ovaj problem, [14].

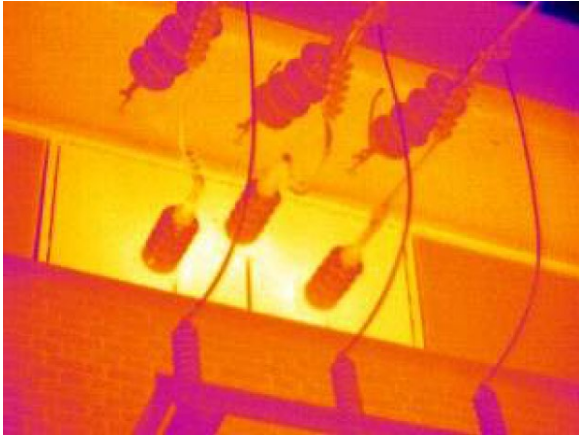


**Slika 7.24.** IR slika VP 10 kV - sabirnički rastavljač



**Slika 7.25.** fotografija slike 7.24.

Slika 7.24. i 7. 25. prikazuju VP10 kV, sabirnički rastavljač jednog od sustava sabirnica te provodne izolatore prema glavnim sabirnicama 10 kV.

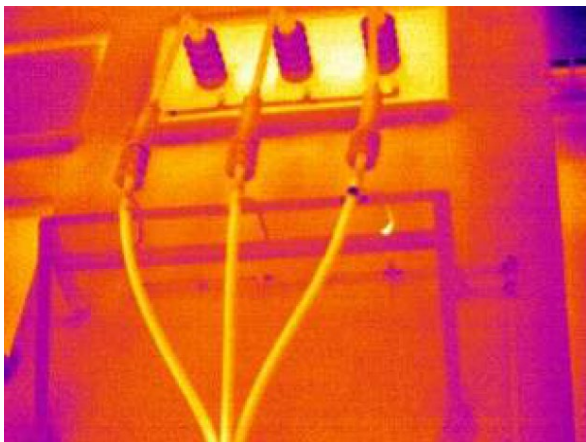


**Slika 7.26.** IR slika VP 35 kV na izlazu iz TS



**Slika 7.27.** fotografija slike 7.26.

Na slikama 7.26. i 7.27. je prikazano VP 35 kV na izlazu iz transformatorske stanice i odlažu prema prvom stupu voda, [14].



**Slika 7.28.** IR slika VP 35 kV na izlazu iz TS



**Slika 7.29.** fotografija slike 7.28.

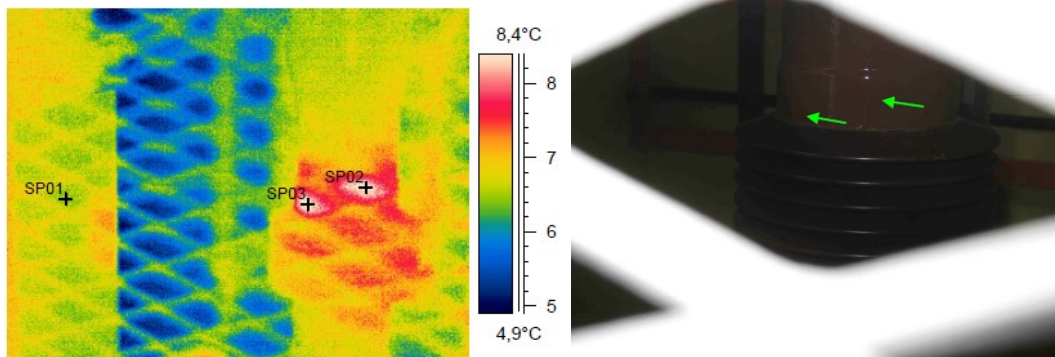
Slike 7.28. i 7.29. prikazuju VP 35 kV na izlazu iz transformatorske stanice koje je na spoju sa kabelom izolirano BBIT toplokuplajućim debelostjenkastim cijevima, [14].

### **7.3.6. Kvarovi zabilježeni 2018./2019. godine termovizijskom kamerom na području Osječko-baranjske županije unutar trafostanica (od 35 kV do 0,4 kV)**

Napominje se da kod nekih od sljedećih rezultata temperature pri 100% opterećenju nisu ispravni, jer uređaj nije mogao zabilježiti referentnu temperaturu ili nije bilo mogućnosti prilaska mjestu kvara kako bi se izmjerila trenutna struja na mjestu kvara.

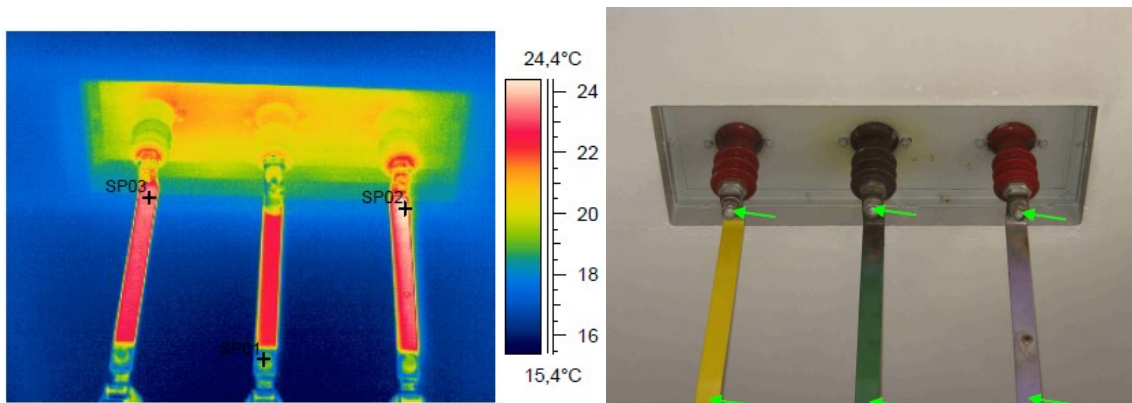


Mjesto poremećaja VP 35 kV – Slatina1, prijedlog prioriteta otklanjanja A\*, datum uzimanja slike 10.12.2018.,  $\Delta T_{100\%} = 393,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{mj} = 8,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 6,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $I_{max} = 360 \text{ A}$ ,  $I_{tren} = 17 \text{ A}$ ,  $\varepsilon = 0,91$ ,  $T_{atm} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Grije se stublina prekidača u fazi R i S.



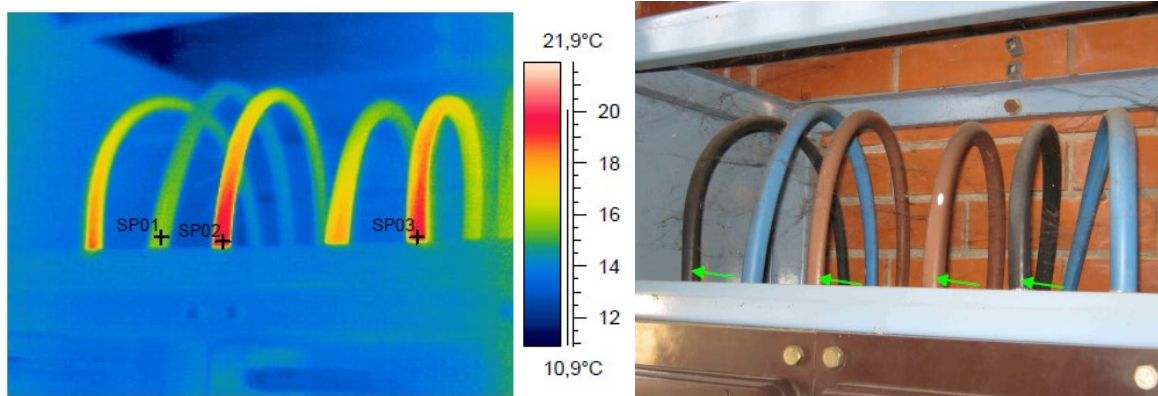
**Slika 7.30.** TS 35/10 kV - ČAČINCI

Mjesto poremećaja MP 10 kV-2, prijedlog prioriteta otklanjanja A, datum uzimanja slike 27.02.2019.,  $T_{mj} = 24,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 0,91$ ,  $T_{atm} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Grije se spoj spojne sabirnice od sabirničkog rastavljača na provodni izolator u sve tri faze a posebno u fazi T i R.



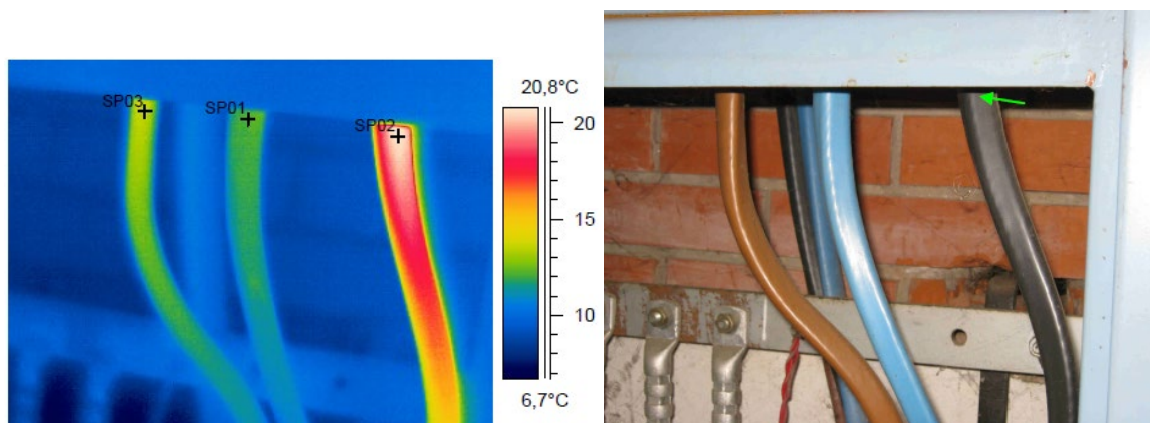
**Slika 7.31.** TS 35/10 kV - ORAHOVICA

Mjesto poremećaja izvod 0,4 V - br.1 i 2, prijedlog prioriteta otklanjanja A, datum uzimanja slike 27.02.2019.,  $\Delta T_{100\%} = 66,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{mj} = 20,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 15,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $I_{max} = 250 \text{ A}$ ,  $I_{tren} = 49 \text{ A}$ ,  $\varepsilon = 0,91$ ,  $T_{atm} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ .



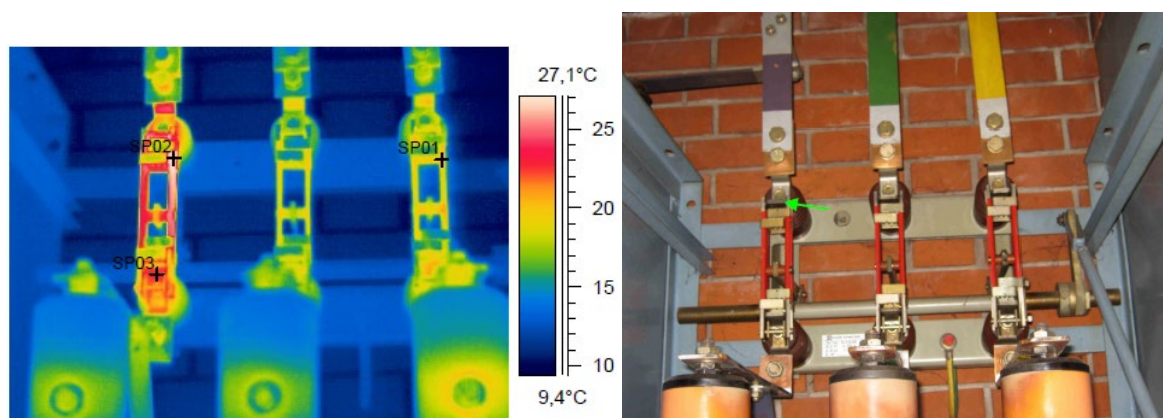
**Slika 7.32.** Rasklopište 10 kV - R6 (Filipovica)

Mjesto poremećaja izvod 0,4 V - br.4, prijedlog prioriteta otklanjanja A\*\*, datum uzimanja slike 27.02.2019.,  $\Delta T_{100\%}=433$  °C,  $T_{mj}= 20,7$  °C,  $T_{ref}= 12,2$  °C,  $I_{max}= 250$  A,  $I_{tren}= 24$  A,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=5$  °C. Grije se spoj odlaznih kabela označen točkom SP03.



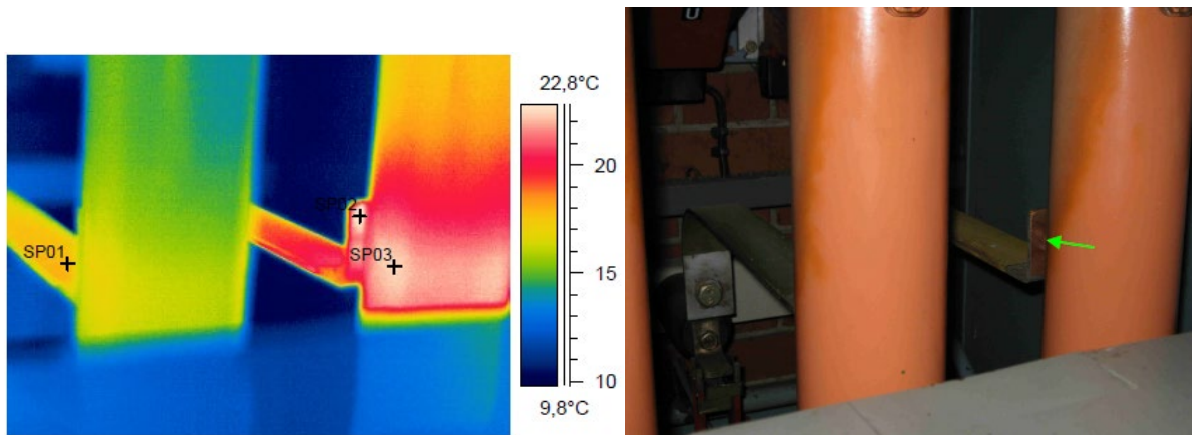
**Slika 7.33.** Rasklopište 10 kV - R6 (Filipovica)

Grije se utor sabirničkog rastavljača u lijevoj fazi.



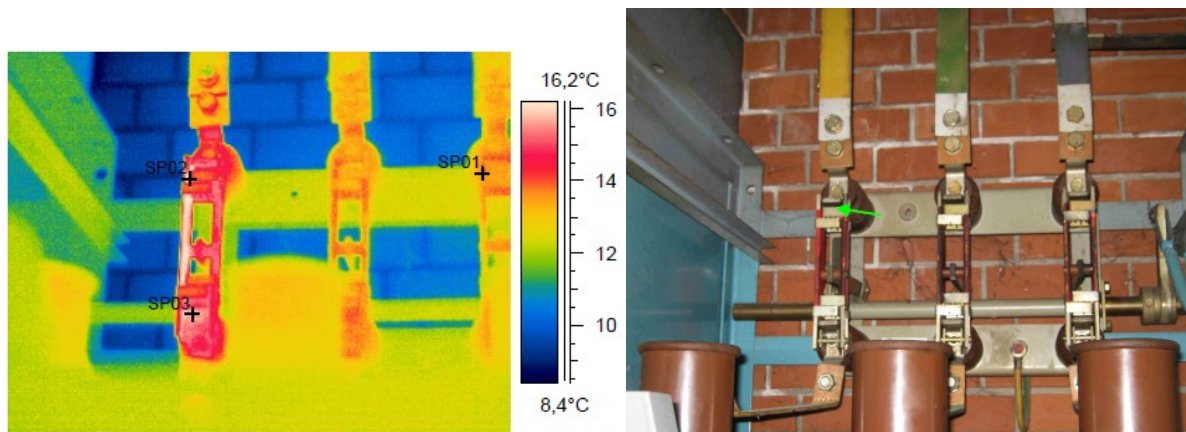
**Slika 7.34.** Rasklopište 10 kV - R6 (Filipovica)

Mjesto poremećaja izvod 10 kV-Osijek 3, prijedlog prioriteta otklanjanja B, datum uzimanja slike 27.02.2019., ,  $T_{mj}= 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ref}= 17,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varepsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

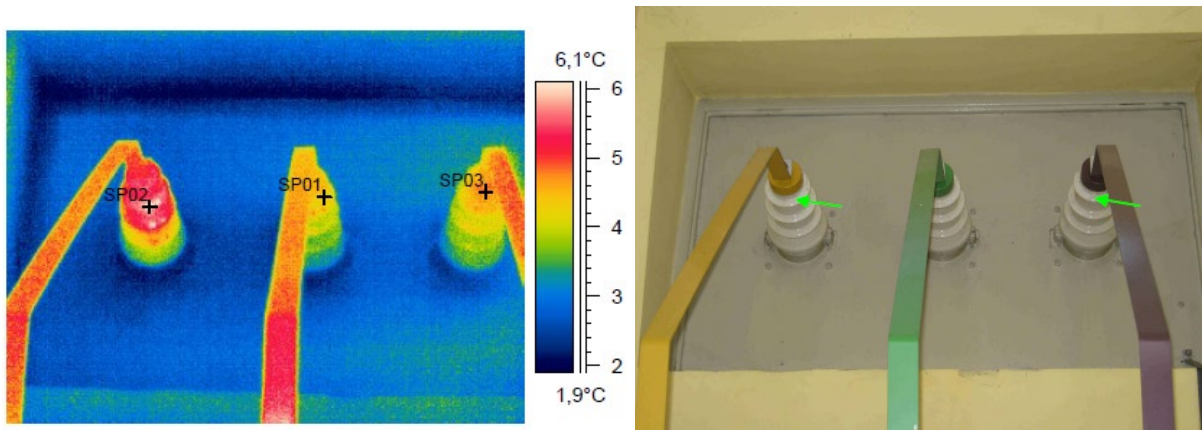


**Slika 7.35.** Rasklopište 10 kV - R6 (Filipovica)

Mjesto poremećaja izvod 10 kV - Antunovac, prijedlog prioriteta otklanjanja B, datum uzimanja slike 27.02.2019.,  $\Delta T_{100\%}=15,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{mj}= 16,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ref}= 13,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{max}= 300\text{ A}$ ,  $I_{tren}= 100\text{A}$ ,  $\varepsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

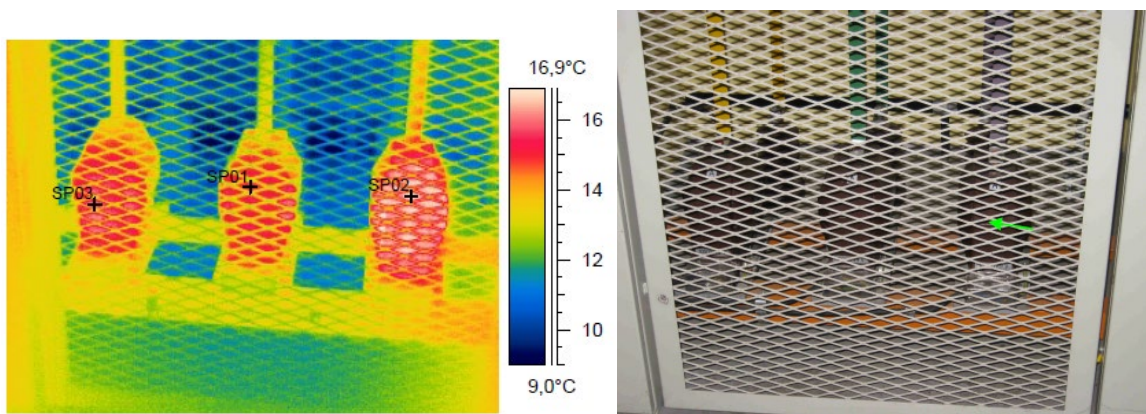


**Slika 7.36.** Rasklopište 10 kV - R6 (Filipovica)



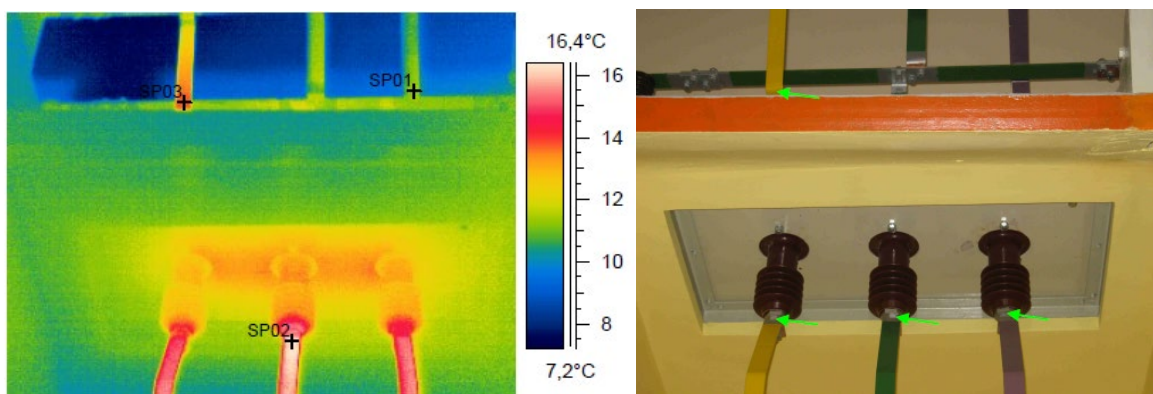
**Slika 7.37.** TS 35/10 kV - ĐAKOVO 1

Mjesto poremećaja izvod MP 10 kV, prijedlog prioriteta otklanjanja C, datum uzimanja slike 27.02.2019.,  $\Delta T_{100\%}=433$  °C,  $T_{mj}=16,8$  °C,  $T_{ref}=15,5$  °C,  $\varepsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=5$  °C. Predloženo opremu držati pod nadzorom u naredno periodu.



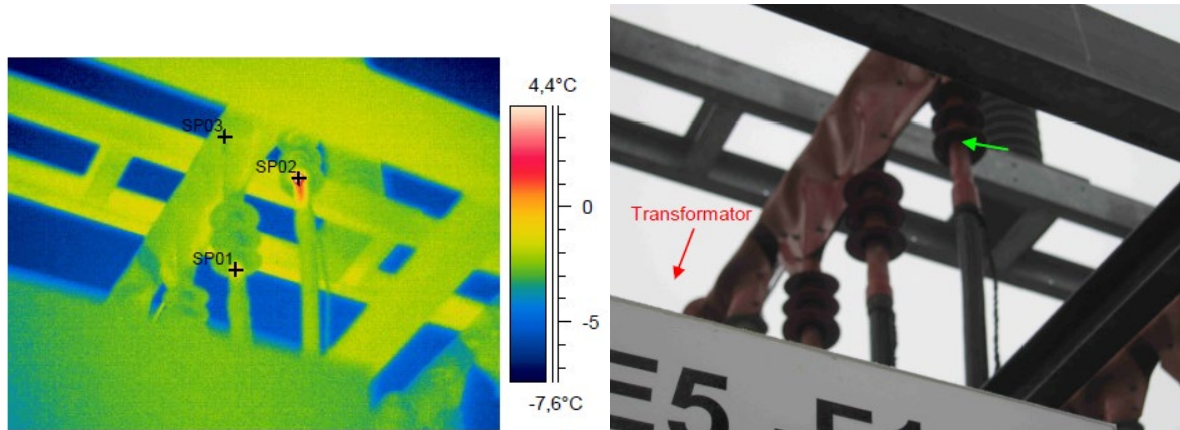
**Slika 7.38.** TS 35/10 kV - KNEŽEVI VINOGRADI

Grije se spoj spojnih sabirnica na provodne izolatore prema sabirničkom prostoru - vidjeti vizualnu sliku za referencu.



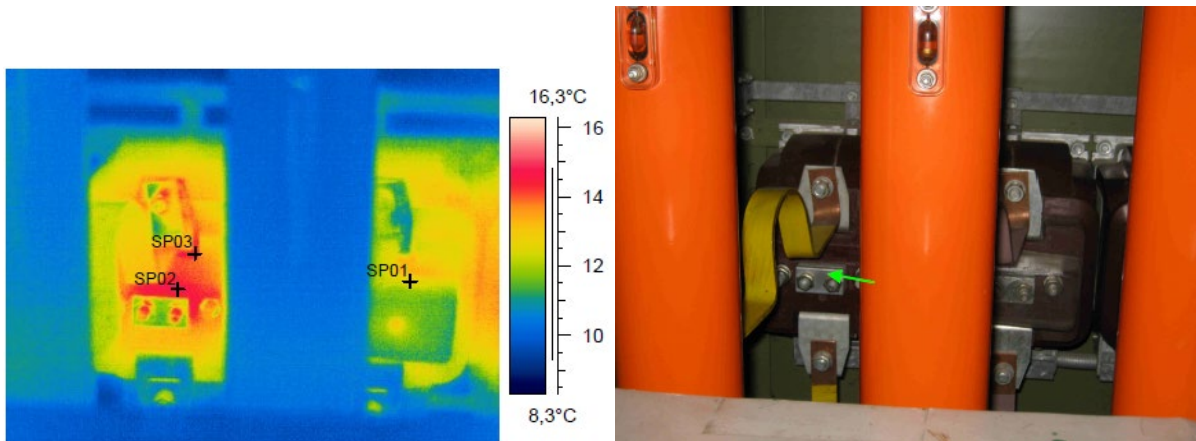
**Slika 7.39.** TS 35/10 kV - BILJE

Mjesto poremećaja izvod 10 kV - Antunovac, prijedlog prioriteta otklanjanja A\*, datum uzimanja slike 27.02.2019.,  $T_{mj}=7,4\text{ °C}$ ,  $T_{ref}=-2,7\text{ °C}$ ,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=0\text{ °C}$ . Grije se kabel glava najdalje od transformatora na sekundarnoj strani - čujno parcijalno izbijanje.



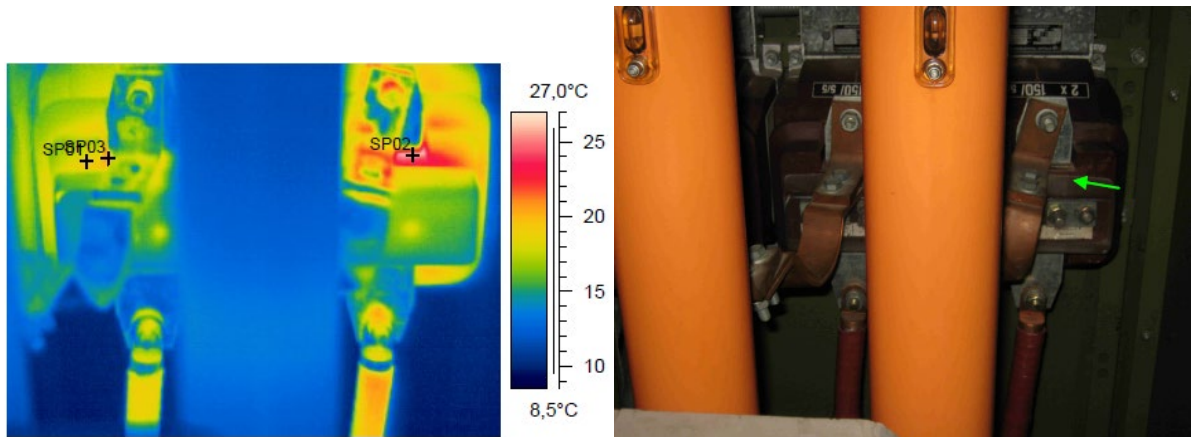
**Slika 7.40.** TS 110/10(20) kV - ĐAKOVO 3

Mjesto poremećaja izvod VP 10 kV-KTS 49 (KOTEKS), prijedlog prioriteta otklanjanja B, datum uzimanja slike 27.02.2019.,  $\Delta T_{100\%}=15,2\text{ °C}$ ,  $T_{mj}=14,9\text{ °C}$ ,  $T_{ref}=12,5\text{ °C}$ ,  $I_{max}=180\text{ A}$ ,  $I_{tren}=60\text{ A}$ ,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=10\text{ °C}$ . Grije se SMT bliže sekundaru u fazi R.



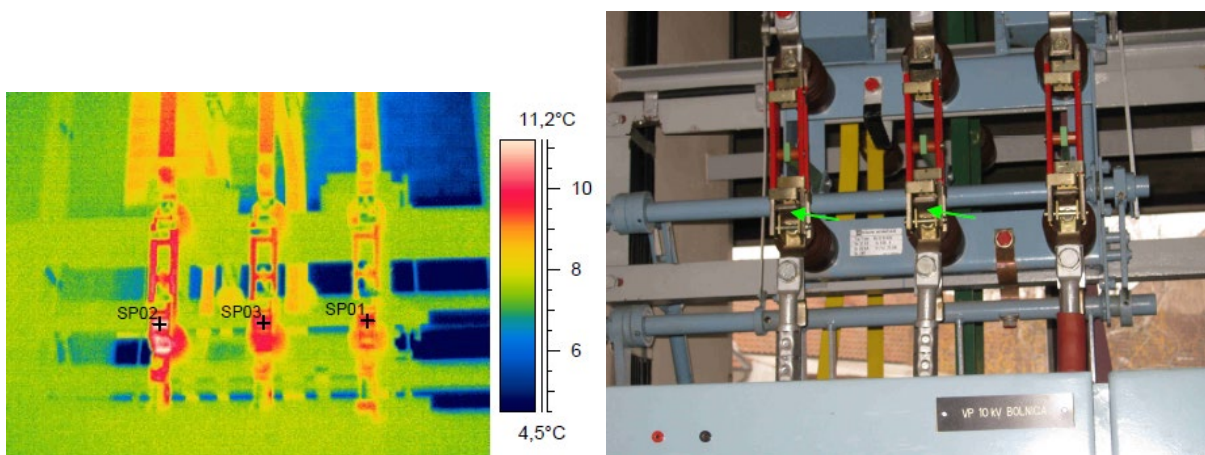
**Slika 7.41.** TS 35/10 kV – STANDARD

Grije se SMT u fazi desna.



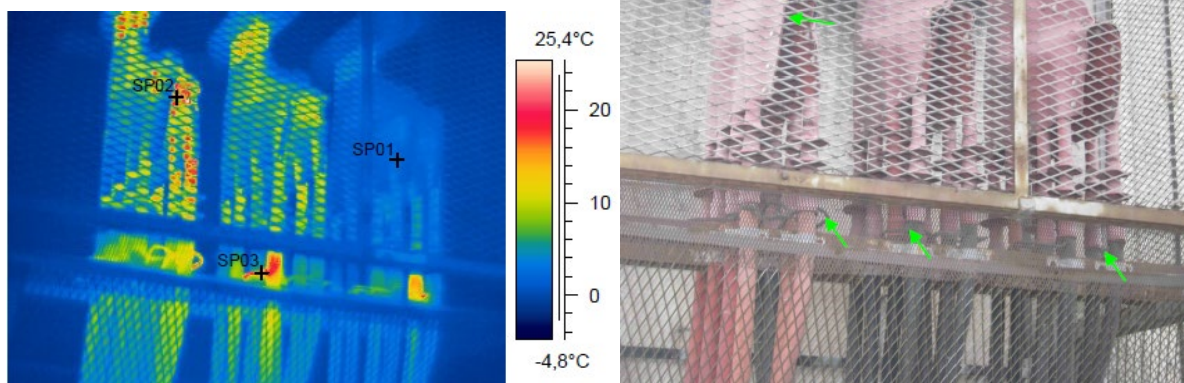
**Slika 7.42.** TS 35/10 kV - STANDARD

Mjesto poremećaja izvod VP 10kV-Bolnica, prijedlog prioriteta otklanjanja B, datum uzimanja slike 27.02.2019.,  $\Delta T_{100\%}=19,8$  °C,  $T_{mij}=11,1$  °C,  $T_{ref}=9,7$  °C,  $I_{max}=270$  A,  $I_{tren}=55$  A,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=10$  °C. Grije se nožište vodnog rastavljača na lijevoj i srednjoj fazi.



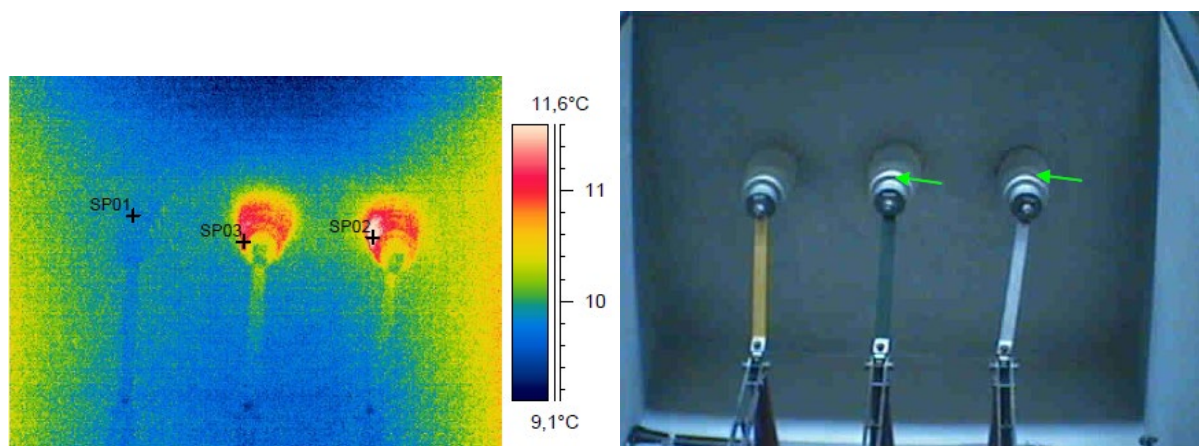
**Slika 7.43.** TS 35/10 kV - DONJI GRAD

Mjesto poremećaja izvod TP 110/10 kV – 2. sekundar, prijedlog prioriteta otklanjanja B, datum uzimanja slike 27.02.2019.,  $T_{mij}=28,6$  °C,  $T_{ref}=2,4$  °C,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=5$  °C. Griju se pletenice kabel glava u svim fazama, spoj kabel glava na sabirnicu u fazi lijeva i srednja.



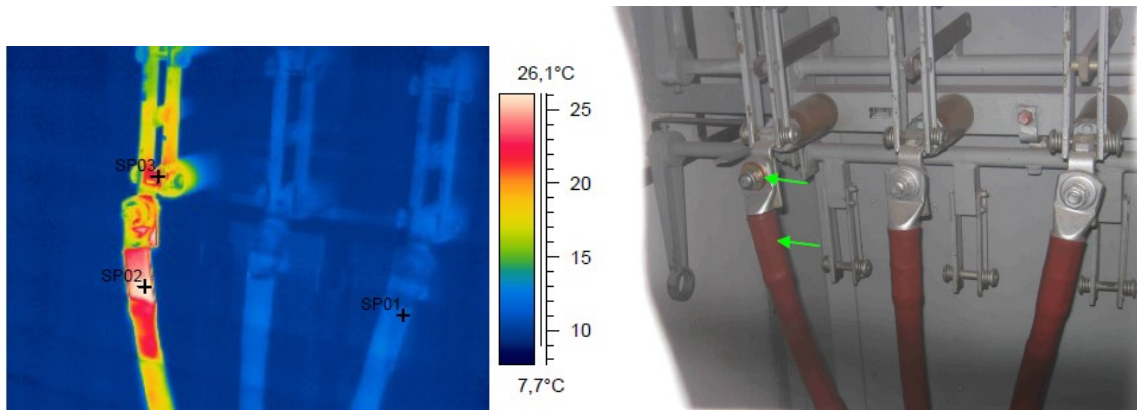
**Slika 7.44.** TS 110/10/20 kV - OSIJEK 3

Grije se provodni izolatori prema sustavu sabirnica br.1 u fazi S i T.



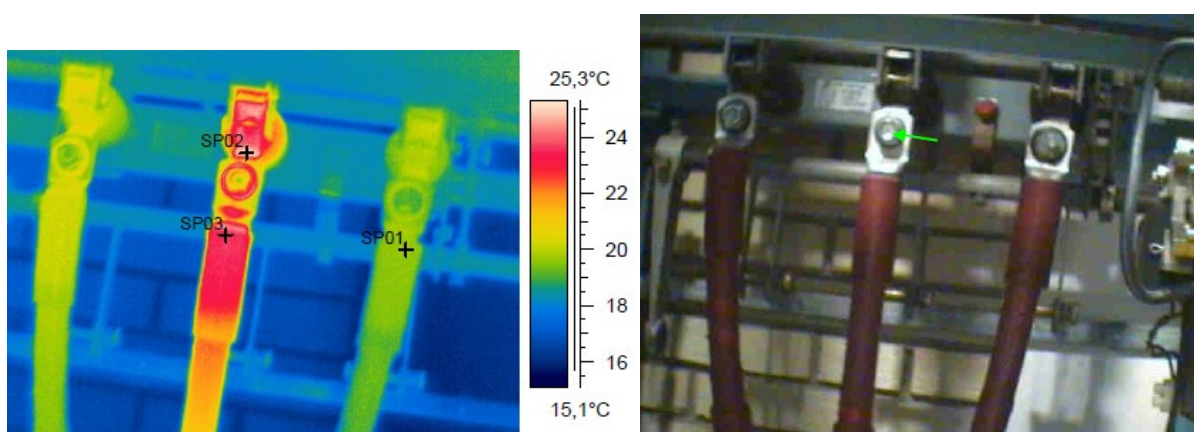
**Slika 7.45.** TS 35/10 kV - JUG

Mjesto poremećaja izvod VP 10 kV-Bolnica, prijedlog prioriteta otklanjanja A\*\*, datum uzimanja slike 27.02.2019.,  $\Delta T_{100\%}=229,3$  °C,  $T_{mj}=26,3$  °C,  $T_{ref}=11,4$  °C,  $I_{max}=660$  A,  $I_{tren}=130$  A,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=10$  °C. Grije se spoj kabel glave na vodni rastavljač u fazi s lijeva.



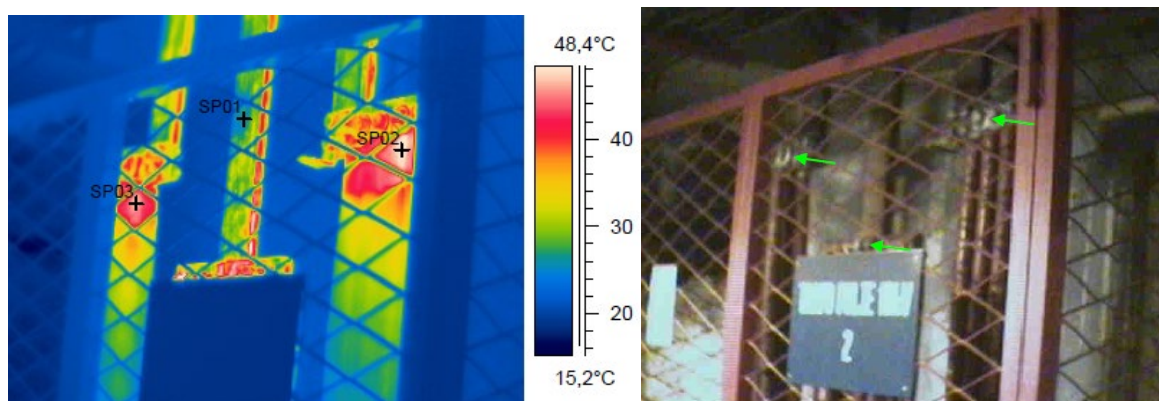
Slika 7.46. TS 35/10 kV - JUG

Grije se spoj kabel glave na vodni rastavljač na srednjoj fazi.



Slika 7.47. TS 110/10/20 kV - OSIJEK 3

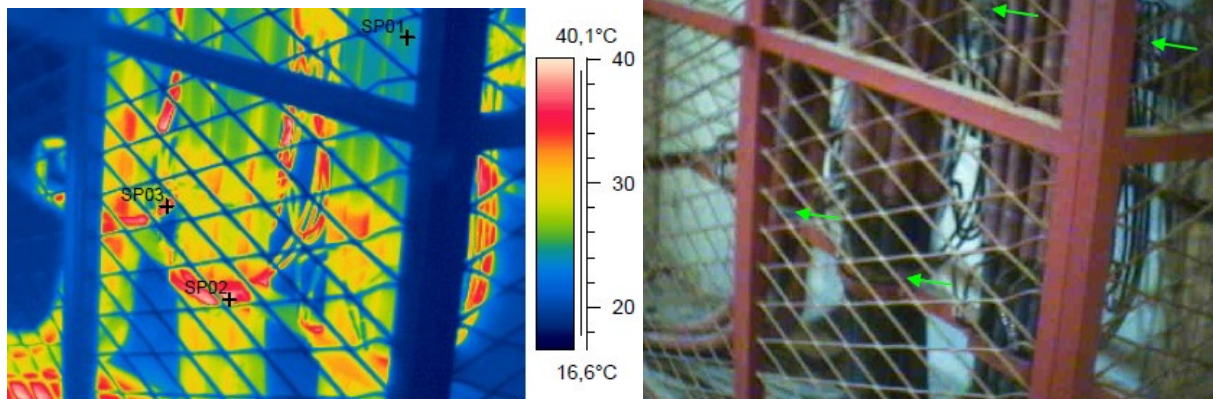
Mjesto poremećaja izvod VP 10kV-KTS 42, prijedlog prioriteta otklanjanja A, datum uzimanja slike 27.02.2019.,  $T_{mj}=48,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ref}=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Grije se spoj kabel glava na spojne sabirnice u svim fazama.



Slika 7.48. TS 110/10/20 kV - OSIJEK 3

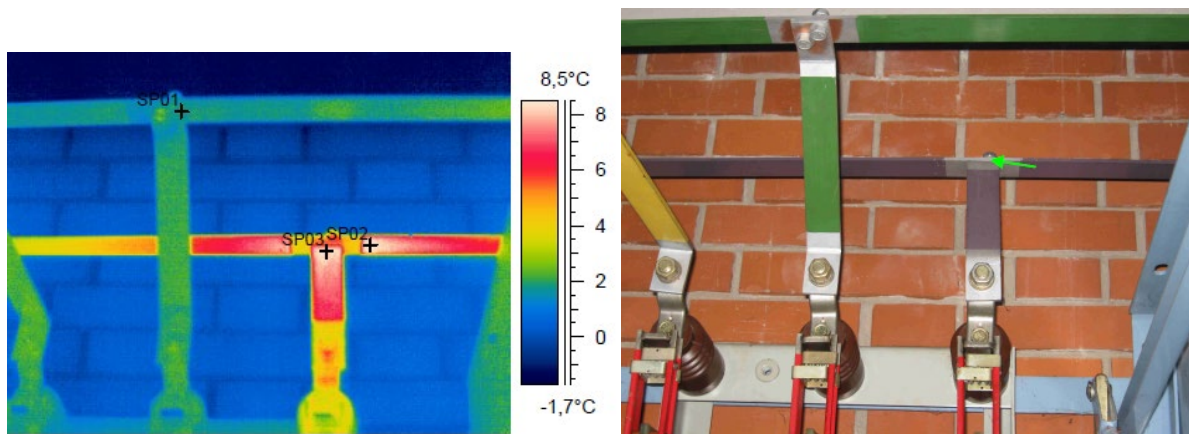


Griju se pletenice kabel glava u svim fazama.



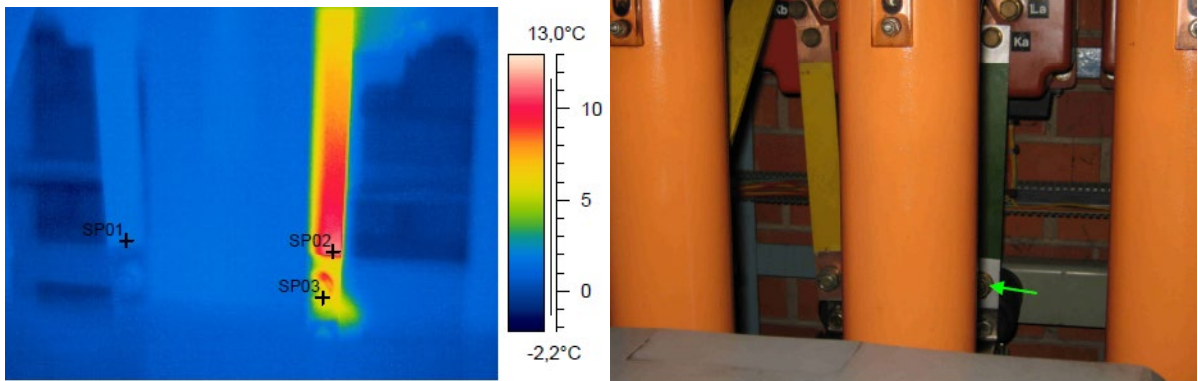
Slika 7.49. TS 110/10/20 kV - OSIJEK 3

Grije se spoj spojne sabirnice od sabirničkog rastavljača na glavnu sabirnicu na fazi T.



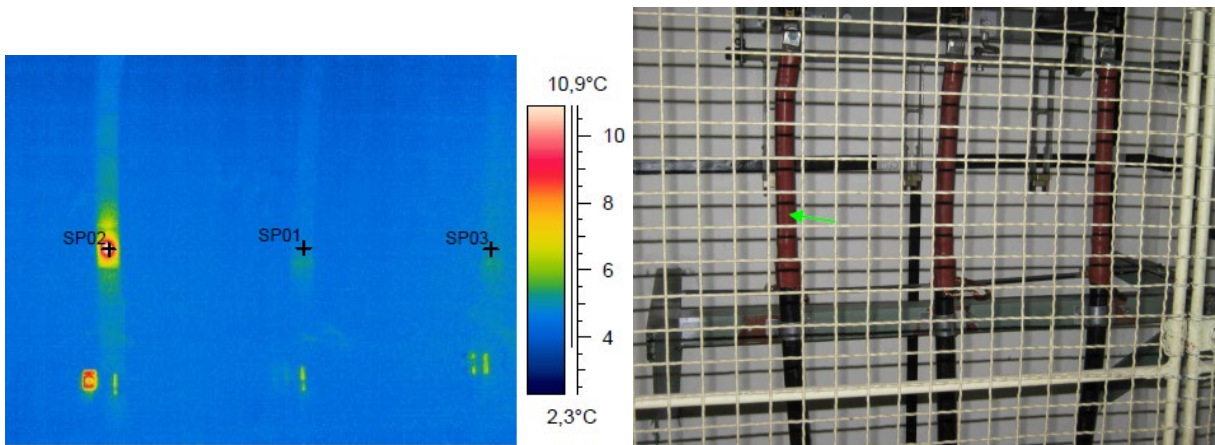
Slika 7.50. Rasklopište 10 kV - R1 (MIRNA)

Mjesto poremećaja izvod VP 10 kV-KTS 183, prijedlog prioriteta otklanjanja A, datum uzimanja slike 18.12.2018.,  $T_{mj}=11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ref}=1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Grije se spoj spojne sabirnice od SMT-a na vodni rastavljač faze S.



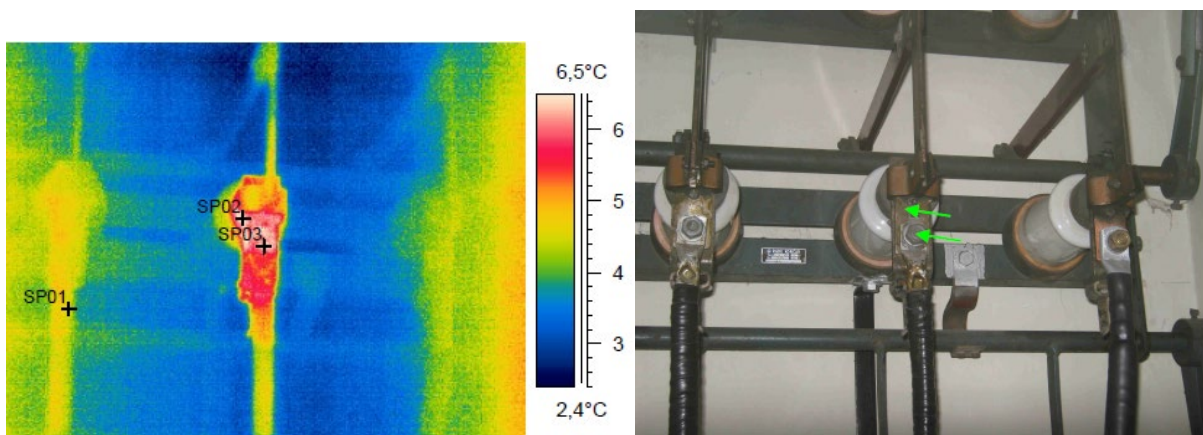
**Slika 7.51.** Rasklopište 10 kV - R1 (MIRNA)

Grije se kabel glava u fazi lijeva.



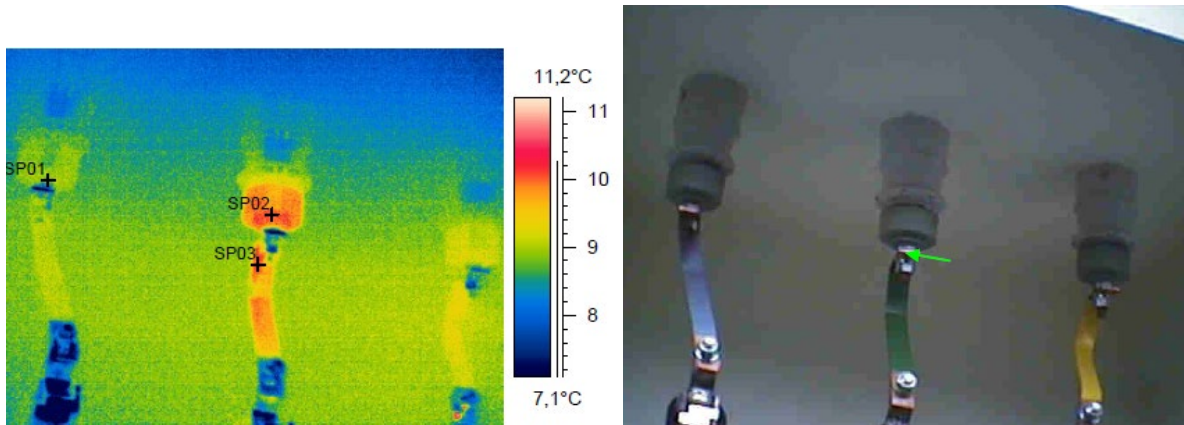
**Slika 7.52.** TS 35/10 kV - ZAPAD

Grije se spoj kabel glava na vodni rastavljač u fazi srednja.



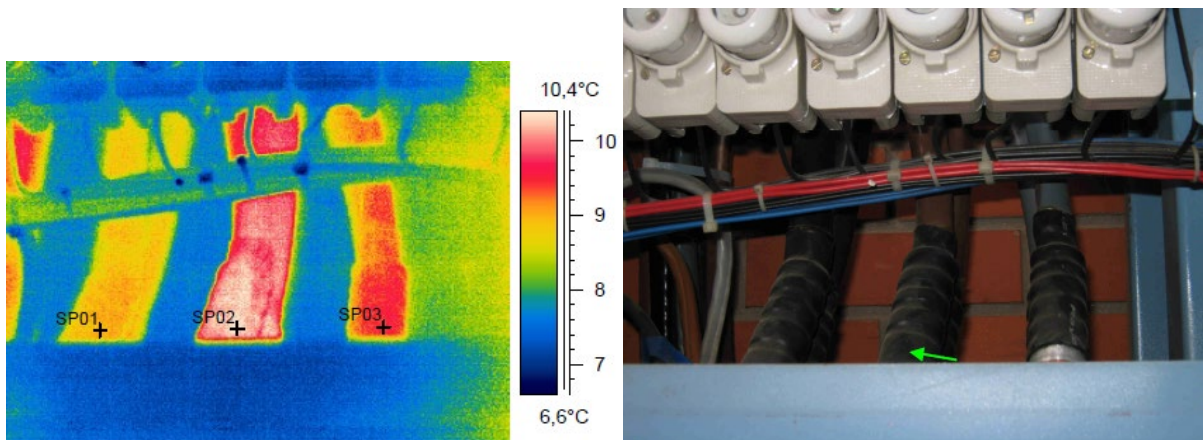
**Slika 7.53.** TS 35/10 kV - ZAPAD

Mjesto poremećaja izvod VP 10 kV – Avenue Mall, prijedlog prioriteta otklanjanja B, datum uzimanja slike 18.12.2018.,  $\Delta T_{100\%}=40,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{mj}=10,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ref}=8,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{max}=360\text{ A}$ ,  $I_{tren}=45\text{ A}$ ,  $\varepsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Grije se spoj spojne sabirnice na provodni izolator prema sustavu sabirnica 2 na srednjoj fazi.



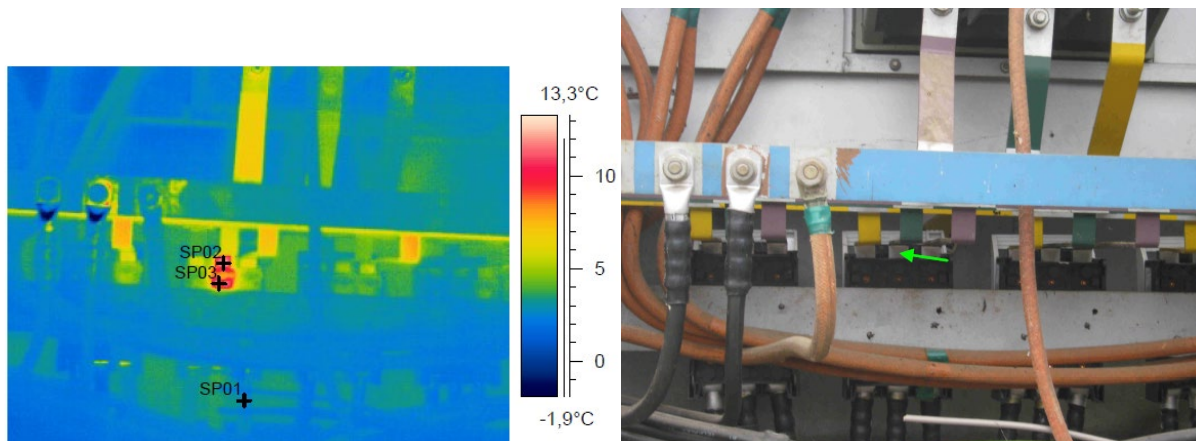
**Slika 7.54.** TS 35/10 kV - ZAPAD

Grije spoj kabela odlazi na rastavnu sklopku na srednjoj i desnoj fazi.



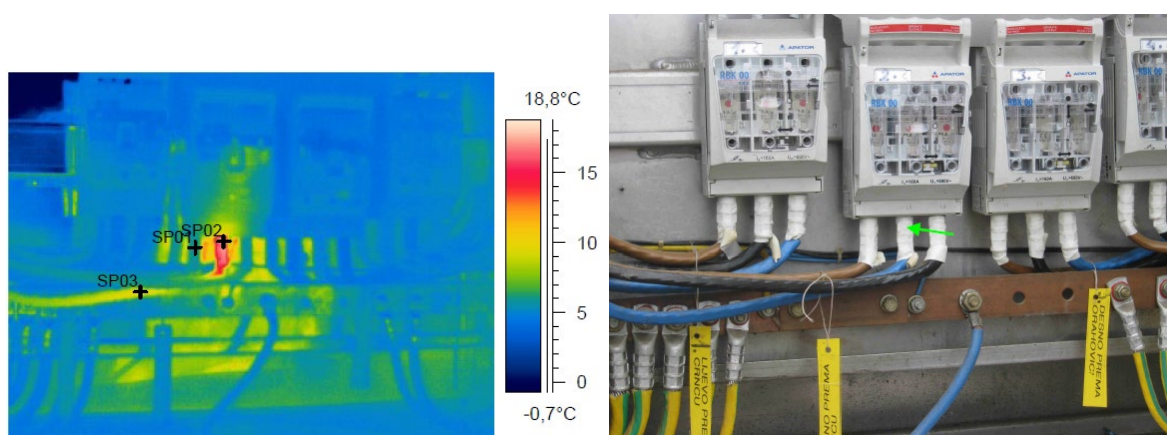
**Slika 7.55.** Rasklopište 10 kV - R5 (Blok Centar)

Mjesto poremećaja izvod 0,4kV – br.3, prijedlog prioriteta otklanjanja A\*\*, datum uzimanja slike 25.02.2019.,  $\Delta T_{100\%}=333,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{mj}=13,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ref}=2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{max}=125\text{ A}$ ,  $I_{tren}=15\text{ A}$ ,  $\varepsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Grije se spoj spojne sabirnice od glavne sabirnice na rastavnu sklopku izvoda br.3 na srednjoj fazi. Spoj sabirnice od glavne rastavne sklopke na glavnu sabirnicu faze T - vidi vizualnu sliku za referencu.



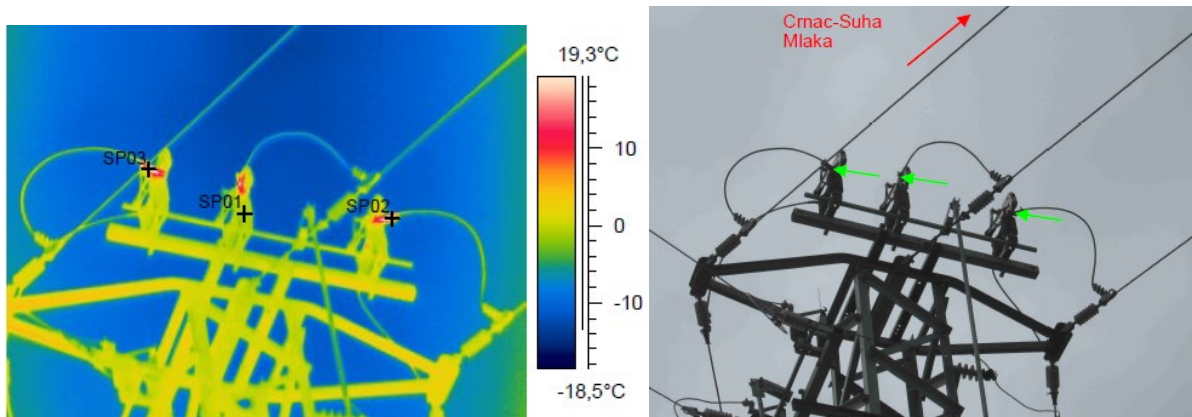
**Slika 7.56.** ŽSTS 10/0,4 kV - 1 (Slavonske Bare)

Mjesto poremećaja izvod 0,4 kV – desno prema Crncu, prijedlog prioriteta otklanjanja A\*, datum uzimanja slike 25.02.2019.,  $\Delta T_{100\%}=114\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{mj}=17,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ref}=5,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{max}=50\text{ A}$ ,  $I_{tren}=13\text{ A}$ ,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Grije se spoj odlaznog kabela na rastavnu sklopku izvoda na srednjoj fazi.



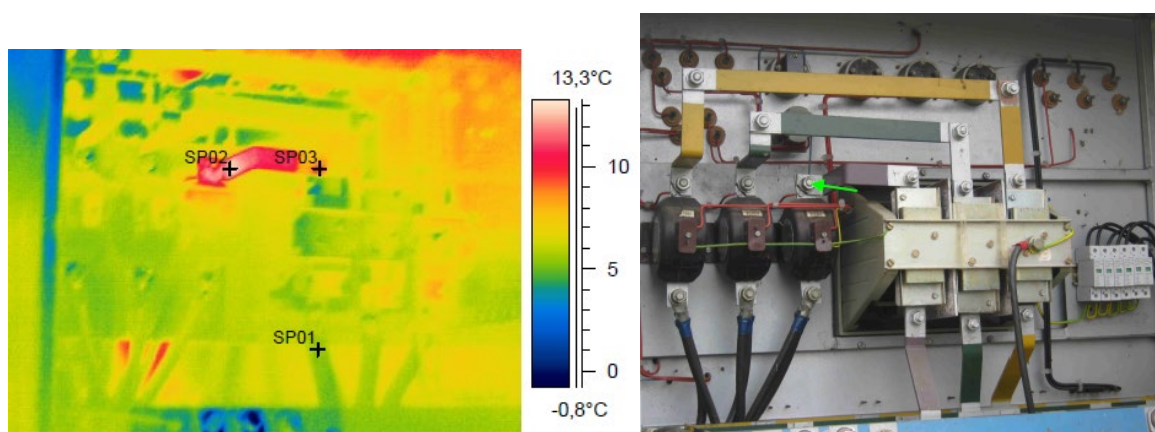
**Slika 7.57.** ŽSTS 10/0,4 kV - 1 (Donje Predrijevo)

Mjesto poremećaja odvojak prema Crnac – Suha Mlaka, prijedlog prioriteta otklanjanja A\*\*, datum uzimanja slike 25.02.2019.,  $T_{mj}=26,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ref}=-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Grije se spoj spojnog vodiča sa zračnog voda na rastavljač u sve tri faze.



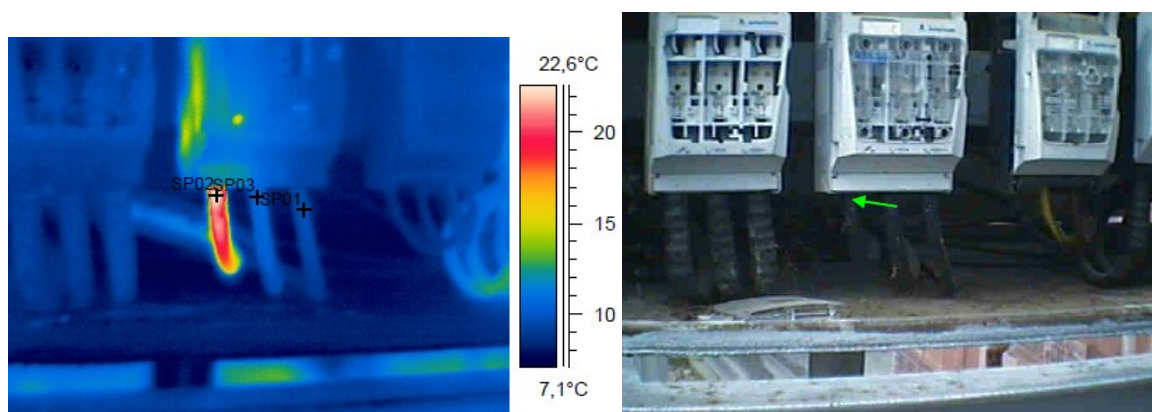
**Slika 7.58.** ZDV 10 kV - Čačinci/Crnac

Mjesto poremećaja Glavni dovod 0,4 kV , prijedlog prioriteta otklanjanja A\*\*, datum uzimanja slike 25.02.2019.,  $\Delta T_{100\%}=285,6$  °C,  $T_{mij}=12,8$  °C,  $T_{ref}=5,5$  °C,  $I_{max}=160$  A,  $I_{tren}=18$  A,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=0$  °C. Grije se spoj spojnog vodiča od glavne sklopke SMT do faze T.



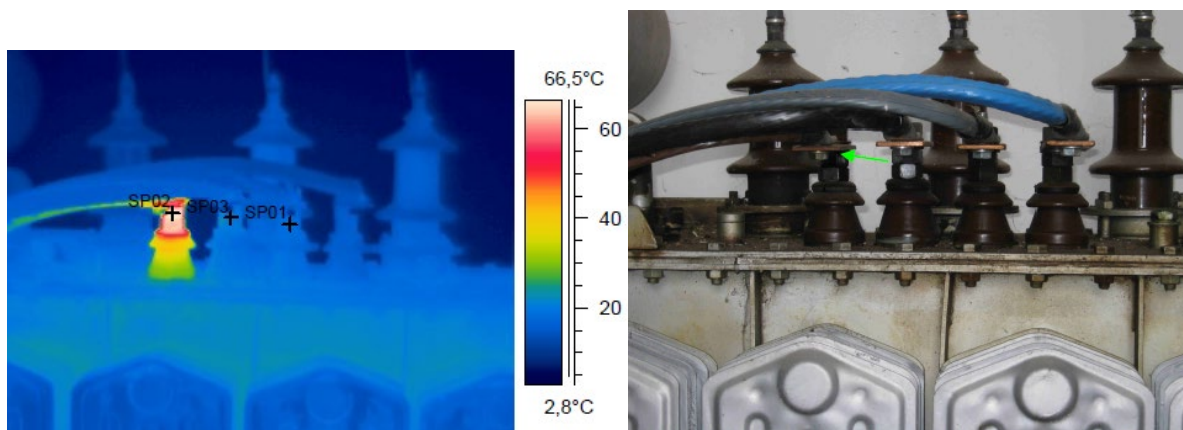
**Slika 7.59.** ŽSTS 10/0,4 kV - 1 (Novo Petrovo Polje)

Grije se spoj odlaznog kabela na rastavnu sklopku u lijevoj fazi.



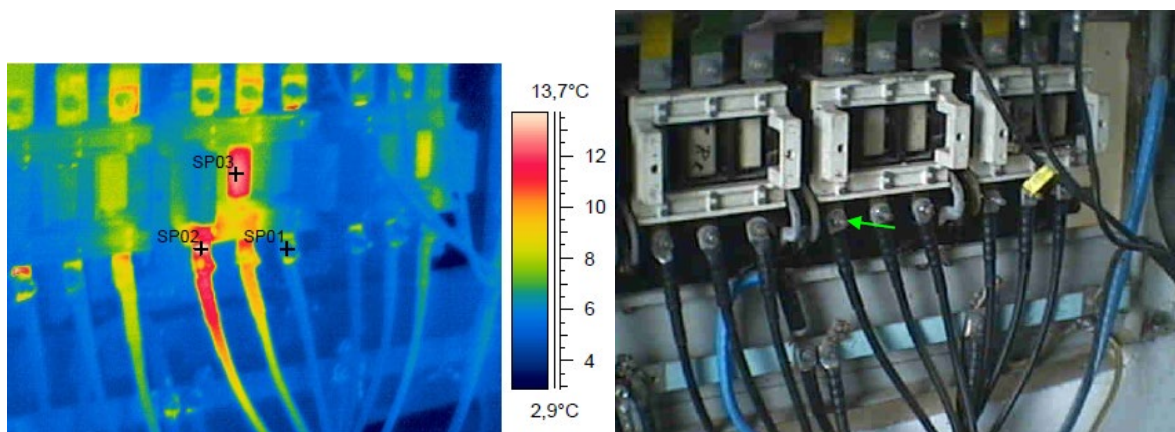
**Slika 7.60.** ŽSTS 10/0,4 kV - 2 (Crnac)

Mjesto poremećaja Transformator 10/0,4 kV - sekundar , prijedlog prioriteta otklanjanja A\*\*, datum uzimanja slike 25.02.2019.,  $\Delta T_{100\%}=369,7$  °C,  $T_{mj}=67,4$  °C,  $T_{ref}=18,5$  °C,  $I_{max}=250$  A,  $I_{tren}=75$  A,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=5$  °C. Grije se spoj sabirnice od spojnog vodiča prema 0,4 kV razvodu na vijak sekundara transformatora lijeve faze.



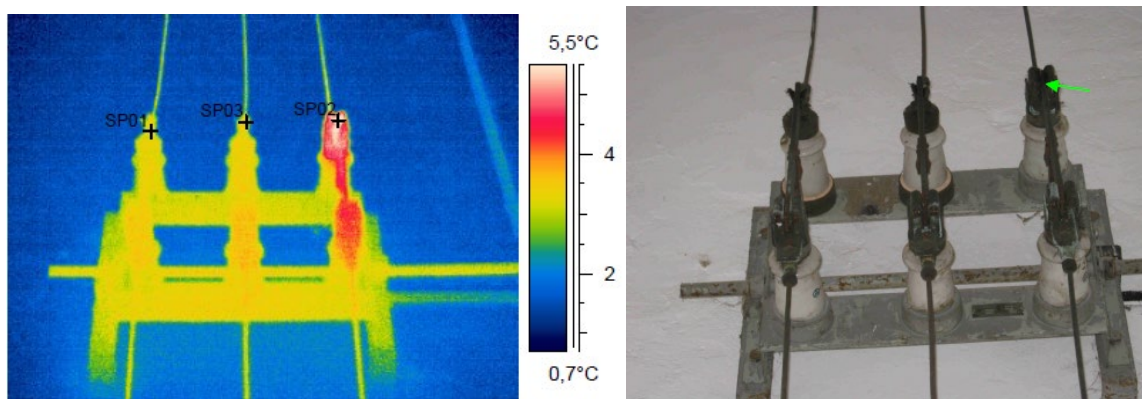
**Slika 7.61.** PTTS 10/0,4 kV - 1 (Crnac)

Mjesto poremećaja izvod 0,4 kV – br.2 , prijedlog prioriteta otklanjanja A\*, datum uzimanja slike 25.02.2019.,  $\Delta T_{100\%}=136,1$  °C,  $T_{mj}=14$  °C,  $T_{ref}=5,8$  °C,  $I_{max}=80$  A,  $I_{tren}=15$  A,  $\epsilon=0,91$ ,  $T_{atm}=5$  °C. Grije se spoj odlaznog kabela na rastavnu sklopku lijeve faze.



**Slika 7.62.** PTTS 10/0,4 kV - 1 (Crnac)

Grije se utor noža rastavljača na desnoj fazi.



**Slika 7.63.** PTTS 10/0,4 kV - 1 (Suha Mlaka)

## 8. ZAKLJUČAK

Ideja toga da čovjek vidi više od onoga što prirodno može je dovela do nastanka ovog izvanrednog uređaja koji se počeo razvijati početkom prošloga stoljeća. Kao i sva vrhunska tehnologija počela se razvijati prilikom ratova, gdje je tehnička znanost pokazala svoje mogućnosti i dosege. U današnje vrijeme termovizija zajedno sa elektronikom, kemijom i drugim tehničkim znanostima svakodnevno raste i pronalazi nova bolja rješenja. Mogućnost dolaska do informacija o fizikalnim pojavama, strukturi i mogućnostima današnje tehnologije nikada nisu bila bolje. Teorija je brojnim primjerima prikazana u praksi, pa su se pojavile tehnologije koje mogu odgovarati na pitanja kvalitete i cijene usmjerene prema tipu korisnika ove tehnologije. Brižno je opisan utjecaj vanjske okoline na snimanje objekta te uzet u obzir sa mogućnošću automatskog izračuna korištenjem alata termovizijske kamere. Uspoređene su kamere na današnjem (2019. god.) tržištu kako cijenom tako i njihovim mogućnostima, uz koje se pojavio mali broj firmi koje se natječu svojom ponudom. Obradili smo software za jednu od najprihvatljivijih tvrtki unutar naše države, te pokazali mogućnosti izrade termograma. Upućeni u rad sa kamerom i svjesni utjecaja okoline snimljena su elektroenergetska postrojenja u rasponu od 0,4 kV do 110 kV, te za neke od njih dali rješenja i prikazali rezultate mjerenja odabirom triju točaka različitih energetske veličine.

## LITERATURA

- [1] Žarko Barbarić; Termovizija; Formiranje i primjena termovizijske slike
- [2] FLIR Tools User Guide v2.1.1; 7/21/2016
- [3] Željko Novinc; Elektrotehničke instalacije; elementi provjere, projektiranja, norma, teorije, prakse, mjernih metoda, uređaja i opreme; Kigen d.o.o. Zagreb, srpanj 2007.
- [4] Web katalog IC kamera, URL: <https://www.toptenreviews.com/best-infrared-cameras> (11.9.2019.)
- [5] Web katalog IC kamera, URL: <http://www.itm.com/files/Thermal-Imager-Comparison-Chart.pdf> (11.9.2019.)
- [6] Zdravko Valter: Procesna mjerenja; Školska knjiga Zagreb 2004
- [7] Infracrvena termografija; Predavanje o termografiji ETF Osijek, 2015. Prvi dio; djelomično vlasništvo FLIR- Systems i ITC centra za obuku termografera
- [8] Infracrvena termografija; Predavanje o termografiji ETF Osijek, 2015. Drugi dio; djelomično vlasništvo FLIR- Systems i ITC centra za obuku termografera
- [9] Infracrvena termografija; Predavanje o termografiji ETF Osijek, 2015. Treći dio; djelomično vlasništvo FLIR- Systems i ITC centra za obuku termografera
- [10] Prezentacija fizikalnih zakona: [http://phy.grf.unizg.hr/media/download\\_gallery/2\\_3\\_%20zracenje%20crnog%20tijela.pdf](http://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/2_3_%20zracenje%20crnog%20tijela.pdf) (17.8.2019.)
- [11] Laboratorijski priručnik: [https://www.fsb.unizg.hr/termolab/nastava/Infracrvena%20termografija\\_Vjezbe\\_FSB\\_Boras.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/termolab/nastava/Infracrvena%20termografija_Vjezbe_FSB_Boras.pdf) (17.8.2019.)
- [12] Krešimir Petrović, Ing.el.teh., Level 2 termografist: Infracrvena termografija (termovizija) pravi izbor za redovno održavanje
- [13] Luka Tomas; Primjena termovizije u održavanju elektromotornih pogona; Osijek, 2016.
- [14] [http://www.huict.hr/images/pictures/impl\\_doc\\_1\\_25.pdf](http://www.huict.hr/images/pictures/impl_doc_1_25.pdf) (26.6.2019.)



- [15] ThermaCam PM695, Operator's Manual, Publ No.1 557454 - Rev. B, November 2000, Flir Systems AB, Danderyd, Sweden
- [16] Projekt TS 110/10kV OSIJEK 3, "Elektroslavonija" Osijek, 1984.god.
- [17] ITC – Course Manual, Level 1, Publ No 1 560093\_C, Rev 0.9E, 2003-03-01, Flir Systems AB, Danderyd, Sweden

## SAŽETAK

### PRIMJENA TERMOVIZIJE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

Kako bi se došlo do primjene kamere unutar elektroenergetskog sustava, potrebno je poznavati fiziku kamere, mogućnosti koje takva kamera daje, kako prilikom snimanja tako i prilikom obrade termograma putem FLIR-ovog programa za obradu. Izbor kamere, leće, kuta snimanja, vrste detektora, poznavanja efekata poput šumova i osjetljivosti samog osjetnika presudni su za stručno korištenje ovakvog alata unutar elektroenergetskog sustava. Uspoređuju se najbolje termovizijske kamere ponuđene na tržištu sa prethodno navedenim karakteristikama, te se opisuje izbor mjernog opsega elektromagnetskog spektra i predlažu načini snimanja s obzirom na okolinu. Kamere se primjenjuje u trafostanicama širom elektroenergetskog sustava područja distribucije, te daje najisplativija rješenja primjerice zamjene rasporeda limova ili jednostavnijih primjerice zatezanja držača sabirnica ili kabela unutar elektroenergetskog sustava.

**Ključne riječi:** analiza sustava, crna i realna tijela, detektori, elektroenergetski sustav, elektromagnetsko zračenje, IC kamera, kvarovi, leće, mjerni opseg, optika, postrojenja, primjena termovizije, šum, termogram, termovizija

## SUMMARY

### APPLICATION OF THERMOVISION IN THE ELECTRIC POWER SYSTEM

In order to use the camera within the power system, it is necessary to know the physics of the camera, the abilities that camera have, both when recording and when processing thermograms through a FLIR processing program. Choosing a camera, lens, shooting angle, detector type, knowledge of effects such as wave interference and the sensitivity of the sensor itself are crucial for expert use of such a tool within the power system. The best infrared cameras on the market are compared with before mentioned characteristics, and described the choice of electromagnetic measuring spectrum and techniques used to record with respecting of environment. IR Cameras are used in substations all over the power system of the distribution area and provides the most effective solutions, such as sheet metal replacement or easier, such as tightening a nut on a bus or cable within a power system.

**Keywords:** black and realistic, detectors, electromagnetic radiation, failures, interference, IR camera, lenses, measuring range, objects, optics, power system, system analysis, thermovision, thermogram, use of thermovision

## ŽIVOTOPIS

Luka Tomas rođen je 14.3.1993. godine u Osijeku, Republici Hrvatskoj. Odrastao i živi u rodnom gradu Osijeku sa roditeljima i dvije sestre. Školovanje je započeo 1999. godine u osnovnoj školi „Ljudevita Gaja“ u Osijeku. Nastavak školovanja proveo je u srednjoj školi „Tehnička škola i prirodoslovna gimnazija Ruđera Boškovića“ u Osijeku smjer „Grafički urednik dizajner“, koji je upisao 2007. godine. Nakon završetka srednje škole polagao je državnu maturu i 2011. godine upisao „Elektrotehnički fakultet“ u Osijeku smjer „Elektroenergetika“, završio stručni studij i upisao Diplomski studij 2017. godine, [13].