# Primjena termovizije u održavanju elektromotornih pogona

**Tomas, Luka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:384609

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-28**

*Repository / Repozitorij:*

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Stručni studij**

# PRIMJENA TERMOVIZIJE U ODRŽAVANJU ELEKTROMOTORNIH POGONA

**Završni rad**

**Luka Tomas**

**Osijek, 2016. godina.**

# SADRŽAJ

1. UVOD ... 1
2. ZNAČAJKE IC KAMERE: ... 3
2.1. Uređaji za detekciju IC zračenja ... 3
2.2. Termovizijska ispitivanja ... 4
2.3. Infracrveno zračenje ... 7
2.4. Održavanje uz primjenu IC uređaja ... 8
2.5. Osobine termovizijskog sustava ... 9
2.5.1. Omjer signala/šum ... 10
2.5.2. Najmanja razlučiva temperaturna razlika ... 10
2.5.3. Najmanja prepoznatljiva temperaturna razlika ... 13
2.5.4. Razlučivost i osjetljivost ... 13
2.6. Termografske kamere ... 15
2.6.1. Oprema za termovizijska mjerenja ... 16
2.6.2. Termografske kamere s hlađenjem i bez njega ... 19
2.6.3. IC senzori ... 20
2.6.4. Kamere sa slikovnim senzorima ... 21
2.7. Bojanje slike ... 22
2.8. Izbor termovizijskog mjernog opsega ... 24
2.9. Vrste slikovnih sustava ... 27
3. POVEZIVANJE TERMOVIZIJSKE KAMERE SA RAČUNALOM: ... 28
3.1. Povezivanje termovizijske kamere na osobno računalo i podešavanje sustava za monitoring i dijagnostiku stanja elektroenergetskog sustava ... 28
3.2. Softverska analiza termograma ... 30
4. TERMVIZIJSKO ISPITIVANJE ELEKTROMOTORNOG: ... 33
4.1. Vizualni pregled ... 33
4.2. Mjerenje zagrijavanja i temperature ... 34
4.3. IC termografija pri kontroli elektroenergetskih postrojenja ... 36
4.4. IC termografska kontrola gubitaka toplinske energije ... 39
4.5. Dijagnostika stanja energetskih mjernih transformatora i drugih elemenata energetskih postrojenja u elektrodistribuciji ... 50
4.6. Aktivna i pasivna termografija ... 51
5. ZAKLJUČAK ... 53
LITERATURA ... 54
SAŽETAK ... 55
SUMMARY ... 55
ŽIVOTOPIS ... 56

# 1. UVOD

Termovizija je instrumentalna metoda koja omogućuje mjerenje emisije infracrvenih zraka koje emitira svako tijelo čija je temperatura iznad apsolutne nule. Za razliku od ostalih infracrvenih metoda, termovizija ili „infracrvena termografija“ omogućuje snimanje emisije IC zraka na motorima, opremi ili cijelom procesu u vrlo kratkom vremenu. Prednosti termovizije u odnosu na druge metode mjerenja su: velika brzina određivanja temperature, velika pokretnost senzora, bez kontaktno i ne invazivno mjerenje. Tako i termogrami prikazuju temperaturnu raspodjelu cijele snimljene površine, koja može biti velika, i to u samo jednoj slici.

Primjena termovizije kao suvremene metode za mjerenje, ali i metoda skladištenja i analize podataka, njihovim redom i *on line* monitoringa u sustavu distribucije električne energije i kontrole elektroenergetskih postrojenja omogućuje stvaranje tehničkih, eksploatacijskih i organizacijskih preduvjeta za povećanje energetske efikasnosti mreža svih naponskih nivoa.

Termovizijskom kontrolom mogu se postići značajni efekti kako u predviđanju kvarova, tako i u smanjenju gubitaka energije. Termovizijski nadzor omogućuje uočavanja loših spojeva na priključnicama transformatora, prekidača, sabirnica i drugih ključnih elemenata elektroenergetskih postrojenja, čime bi se osigurala pravovremena intervencija i time smanjio broj zastoja.

Procijenjeno je da zajedno sa drugim mogućim načinima uštede (preraspodijele snage, isključenje neopterećenih transformatora i dr.), ušteda ostvarena termovizijskim nadzorom iznosi minimalno 1,5 % ukupno distribuirane energije.

Infracrvena termografija je metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini tijela, koja se ostvaruje bez kontakta. Zasnovana je na temelju mjerenja intenziteta infracrvenog zračenja na površini promatranog tijela.
Kako bi se temperatura na udaljenosti mogla mjeriti, potrebna je informacija o željenoj temperaturi. Informacija je sažeta u fizičkom zakonu prema kojemu sva tijela odašilju energiju:

$$\mathbf{W = f ( \varepsilon, T )} \tag{1-1}$$

gdje “W” predstavlja rad, “f” frekvenciju određenu “ε ” koeficijentom sposobnosti odašiljanja (emisije) što je određeno kemijskim sastavom materijala, a “T” predstavlja temperatura u °K.

Iz zakona (1-1) vidljivo je da temperatura 0°K odgovara temperaturi –273 °C (apsolutnoj nuli), zračenja energije nema na takvoj temperaturi. Tako niske temperature nalaze se u dalekom svemiru i kaže se da sve što nas okružuje odašilje energiju u oblikom topline. Poznato je i da sva tijela iznad temperature 0°K zrače energijom, gledajući kretanju svojih molekula kao posljedicom djelovanja temperature, takvo zračenje je manje ili veće.

Svakako ne zrače svi materijali istim intenzitetom. Poznate su točne ovisnosti, koliko određeni materijali zrače energijom zasnovanoj na svojoj temperaturi. Odašiljanje energije materijala javlja se u obliku elektromagnetskih valova i to je prilično poznata pojava s obzirom da elektromagnetske valove srećemo u životu u raznim oblicima. Nositeljem energije smatramo elektromagnetski val valne duljine od 2 μm do 13 μm. Isti takvi valovi, ali valne duljine od 0.4μm do 0.7μm čovjek vidi kao optičku svjetlost, tako se valnom duljinom određuje boja.

Kada bi vidjeli valne duljine u infraspektru bili bi zaslijepljeni energijom, jer sva tijela imaju energiju. I sada je jasno da je uloga infracrvene kamere prijenos slike iz oku nevidljivog područja u oku vidljivu sliku. Elektroničkim putem stvara se termička slika promatranog objekta u realnom vremenu pri korištenju IC uređaja, a tu se jedan dio spektra elektromagnetskih valova oku nevidljiv (od 2μm do 13μm) koji sadrži velik broj informacija o promatranom tijelu, koje se premješta u oku vidljivo područje (od 0,4μm do 0,75μm). Dobivenu sliku moguće je analizirati kao emitiranu toplinsku energiju tijela, snagu zračenja prispjelu na detektor IC kamere, naravno uz primjenu poznatih zakona fizike. Za ovu tehniku mjerenja poznati su i nazivi infracrvena radiometrija primijenjena u medicini ili termovizija za kvalitativna promatranja. Tako IC mjerenja možemo podijeliti i na dvije vrste: kvalitativna i kvantitativna. Za kvantitativnu je važno da registriramo i uočimo, za kvalitativnu da precizno mjerimo. Tako s jedne strane imamo zahtjeve za preciznu i dobru vidljivost (optiku) u IC spektru EM valova (koriti ih: vojska, policija, vatrogasci, službe spašavanja), a s druge strane zahtjevi su za preciznim i umjerenim instrumentima koji su u stanju registrirati temperaturne promjene u tisućinkama stupnja celzijusa (°C) ili kelvina (°K),precizno doznačenih i reflektiranih od objekta prema detektoru IC kamere. Otkriću infracrvenog zračenja zaslužan je fizičar Sir William Herschel koji je živio od 1738. do 1822. godine. On je 1800. godine već bio poznatiji po otkriću planeta Urana, koji je bio prvi planet otkriven uz pomoć teleskopa. Herschel je zapazio kako svijetlo koje prolazi kroz različito obojene filtere različito zagrijava stvari, tako je odlučio eksperimentirati kako bi testirao svoje uočavanje. Koristio je prizmu da vidno odvoji bijelu svijetlost u boju spektra. Termometar je postavio na jednu od razlučenih boja spektra, a ostali su termometri bili bez utjecaja svjetla. Termometri postavljeni bez utjecaja svijetla služili su kao kontroleri eksperimenta.

Mjerenjem u jednakim vremenskim intervalima, shvatio je da su dobiveni rezultati sve bolji kako se kretao prema crvenoj svijetlosti, tako zelena svjetlost čini termometar toplijim nego plava svjetlost, žuta svjetlost čini termometar toplijim nego zelena svjetlost, tako je crvena svjetlost činila termometar najtoplijim. Zadovoljavajući rezultati doveli su ga do odluke da postavi termometar izvan razlučenog spektra odmah uz crvenu boju.

Rezultati postavljenog termometara postigli su maksimalnu vrijednost, a Sir William je saznao da postoji još neko zračenje koje nije u oku vidljivom spektru (gdje su priroda i svojstva jednake svjetlosti) i nazvao ga je infracrveno zračenje. [4]

# 2. ZNAČAJKE IC KAMERE:

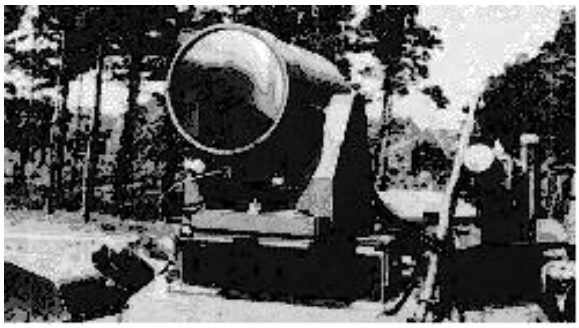
## 2.1. Uređaji za detekciju IC zračenja

Infracrvena tehnika značajnije se počela razvijati za vrijeme drugog svjetskog rata. Najviše se koristila u vojne svrhe, za snimanje terena iz aviona ili umjetnih satelita, te za industrijsku kontrolu.

Početni tipovi kamera koje nastaju u 60-im godinama prošlog stoljeća bili su vrlo spori, a danas se kamere na tržištu mogu mjeriti kvalitetom slike sa TV-om.

Sve vrste kamera koriste optomehaničko skeniranje, a kamere zovu još i IC skeneri.

U početku su skeneri bili dio IC sistema, kao i dio za pohranu slike, računalo ili procesor. Današnje kamere imaju sve funkcije u sebi. 80-ih godina prošlog stoljeća javljaju se kamere koje koriste više detektora(za razliku od prijašnjih tipova koji imaju samo jedan detektor i gdje se slika stvara mehanički). Slika sa objektom prenosi se preko optike na matricu detektora koja se sastoji od stotinu linija, a svaka linija od stotinu detektorskih elemenata koji pokrivaju čitavu površinu na koju se projicira slika. Takav tip detektora naziva se skraćenicom FPA (Focal Plane Array). Stvaranje slike mehanički, tehnologijom rotirajućih prizmi, tražilo je posebno hlađenje uređaja i to tekućim dušikom. To je naravno dovelo do ograničenja mobilnosti samog uređaja, pa se u to vrijeme IC kamere upotrebljavaju samo laboratorijski. Tek daljnjim razvojem tehnologije hlađenja detektora omogućeno je da IC kamere budu pokretne poput klasičnih video kamera te one polako ulaze u komercijalnu primjenu i to na početku u sustave održavanja elektroenergetskih postrojenja.



Slika 2.1.1. Počeci IC snimanja 1958-1963 [4]



Slika 2.1.2. Današnja IC kamere firme FLIR (kompanije AGA i Bofors) [4]

Infracrvene kamere uzimaju u obzir koeficijent emisije, udaljenost objekta i temperaturu okoline. Svi ti podaci obrađuju se u procesoru te je rezultat te obrade točna temperatura površine mjerenog objekta. Infracrvena termografija moguća je samo na mjestima gdje se na temelju temperaturne razlike prema postavljenom referentnom uzorku može raditi analiza mjerenog. Slijedi nadalje kako nije dovoljno objekat samo snimiti IC kamerom nego treba ono što je snimljeno i analizirati pomoću posebne PC opreme i programske aplikacije te izraditi protokol za IC snimanje. [4]

## 2.2. Termovizijska ispitivanja

Termovizijsko ispitivanje je metoda bez kontaktnog mjerenja površinskih temperatura. Ispitivanje se temelji na činjenici da svako tijelo s temperaturom iznad apsolutne nule (0K ili -273ºC) emitira elektromagnetska zračenja (toplinska zračenja) infracrvenog spektralnog pojasa koja leže na granici vidljivog crvenog spektra u valnom području >0,7 μm. Zračenje je

posljedica vibracija uzrokovanih kaotičnim termičkim gibanjem molekula u tijelu materije. Navedena zračenja postaju vidljiva za ljudsko oko ukoliko temperatura tijela postigne temperaturu 500–550ºC. Vrijednost radijacije ovisi o temperaturi objekta, odnosno porastom temperature raste. Ispitivanja se izvode kamerom sa senzorom, koja detektira iznos infracrvenog zračenja odaslanog iz objekta. Vrijednost infracrvenog zračenja kamera zatim pretvara u električni signal te prenosi u računalo kamere koje te signale pretvara u temperaturne informacije. Upotrebljavajući različite boje računalo formira temperaturnu podjelu na monitoru. Formirane temperaturne raspodjele nazivaju se termogramima te ih je moguće pohraniti u memoriju računala za kasniju analizu. Termovizija je proizašla iz vojne tehnologije razvojem opreme za lokaciju izvora zračenja topline bez neposrednog kontakta s objektom.

Zadatak termovizijskog ispitivanja jest utvrditi temperaturnu raspodjelu vidljivog dijela površine ispitivanog elementa. Da bi rezultati ispitivanja bili kvalitetni opterećenje postrojenja mora biti minimalno 40% nazivne struje. Snimanja termovizijskom kamerom preporučuju se izvoditi po oblačnom vremenu jer ukoliko je vrijeme sunčano može doći do odbljesaka zbog kojih mjerenje nije upotrebljivo, ne smije se zanemariti ni utjecaj vjetra koji hladi mjesta potencijalnog kvara, utjecaj zagađenja i vlage u zraku koji apsorbiraju dio infracrvenog spektra i smanjuju prozirnost, a ispitivani objekt potrebno je snimiti iz više kuteva jer često odsjaj elementa može krivo navesti na mjesto zagrijavanja.

Termovizijsko ispitivanje izvodi se mjernom metodom koja se naziva metoda uspoređivanja. Metoda uspoređivanja temelji se na temperaturnom uspoređivanju elemenata s istim elementom druge faze pod istim opterećenjem. Potrebno je odrediti mjesto radne (referentne) temperature, koja je uz jednako opterećenje na sve tri faze u normalnim radnim uvjetima jednaka. Odstupanje od normalne radne temperature ukazuje na neispravnost objekta ispitivanja. Prekoračenje temperature određuje se razlikom radne temperature i temperature mjesta temperaturnog povišenja. Treba obratiti pozornost na činjenicu da li je mjesto radne temperature od istog materijala kao i mjesto temperaturnog povišenja kako bi faktor emisije bio približno jednak. Termovizijska ispitivanja izvode se na vidljivim dijelovima ispitivanih elementa. Postoji više prednosti korištenja termovizijskih ispitivanja:

- ispitivanje se obavlja tijekom normalnog pogona,

- neispravnost opreme se precizno locira u ranoj fazi,

- izbjegnuta su nepotrebna servisiranja,

- skraćuje se vrijeme remonta,

- unapređuje se održavanje te ekonomizira vođenje zaliha,

- pravilnim određivanjem rokova kontrole smanjuje se broj većih kvarova.

U tablici 1 prikazani su kriteriji za utvrđivanje neispravnosti nekog elementa (vrijede za vidljive dijelove). Faktor *T* predstavlja razliku temperature između uočenog mjesta temperaturnog povišenja ili tople točke i mjesta radne temperature. Kriteriji za utvrđivanje stupnja neispravnosti vrijede za električnu opremu pod 100%-tnim opterećenjem.

*Tablica 2.1.1. Kriteriji za utvrđivanje neispravnosti ispitivanog elementa* [5]

| Temperatura prekoračenja | Preporuka |
|---|---|
| $T < 5$ °C | stanje elementa je uredno, nije potrebna intervencija |
| 5ºC < $T$ < 10ºC | potrebno popravak izvesti tijekom redovitog održavanja, postoji mogućnost fizičkog oštećenja |
| 10ºC < $T$ < 35ºC | popravak moguće odgoditi maksimalno do 6 mjeseci, zbog mogućnosti fizičkog oštećenja, ispitani element po potrebi zamijeniti |
| 35ºC < $T$ < 75ºC | popraviti što je prije moguće, zamijeniti element i provjeriti okolne elemente zbog mogućnosti njihovog oštećenja |
| $T > 75$ ºC | stanje kritično, potrebno hitno intervenirati prilikom prvog isklopa iz pogona, zamijeniti element i provjeriti okolne elemente |

Tijekom termovizijskog ispitivanja potrebno je zabilježiti trenutno opterećenje ispitivanog objekta. Da bi se mogao pravilno odrediti stupanj hitnosti intervencije, izmjereno temperaturno prekoračenje, ukoliko postoji, potrebno je preračunati na temperaturno prekoračenje pri nazivnom opterećenju izrazom:

$$\Delta T_{100} = \left(\frac{I_{100}}{I}\right)^2 \qquad (2\text{-}1)$$

gdje su $T_{100}$ temperaturno prekoračenje pri nazivnom opterećenju, $T$ temperaturno prekoračenje pri trenutnom opterećenju, $I_{100}$struja pri nazivnom opterećenju i $I$ struja pri trenutnom opterećenju. Na temelju izraza (2-1) može se uočiti da temperaturno prekoračenje raste s razlikom kvadrata nazivne i trenutne struje. Izraz (2-1) se primjenjuje pri opterećenjima iznad 50%. U slučaju manjih opterećenja koristi se empirijski izraz:

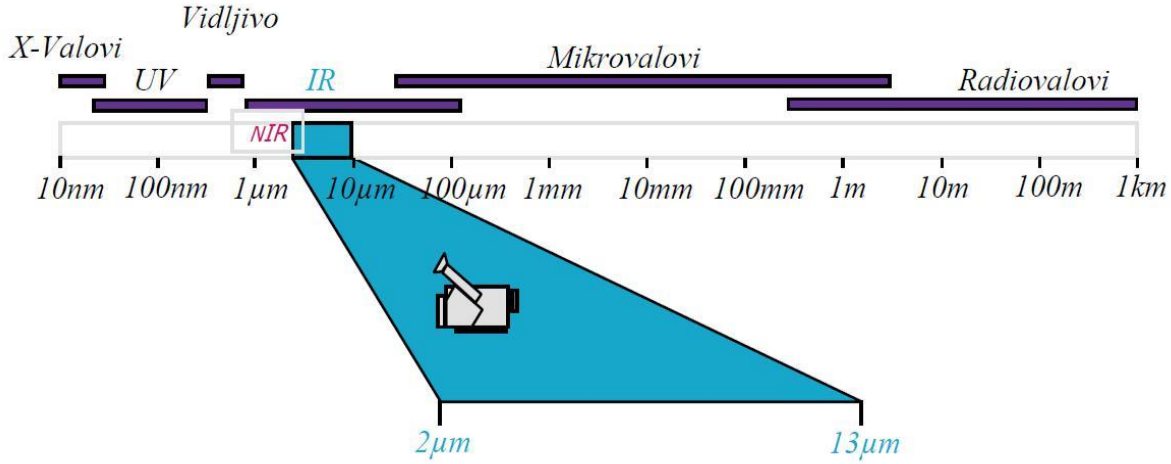
$$\Delta T_{100} = 4\Delta T \tag{2-2}$$

Vrijednosti dobivene na temelju izraza (2-2) mogu se smatrati indikativnima. [5]

## 2.3. Infracrveno zračenje

Infracrveno zračenje je dio elektromagnetskog spektra koje počinje ispod vidljivog dijela spektra. Ono se proteže preko 200μm nakon čega prelazi u mikrovalno područje tj. gornji nivo radio valova. Infracrveni spektar se za praktičnu primjenu u termografiji koristi u području 2μm do 13μm. Područja ispod 2μm do gornje granice oku vidljivog područja nazivaju se "blisko infracrvena područja" (NIR - near infrared). Područja u kojima postoje posebni NIR IC uređaji koriste se u medicinskoj i farmaceutskoj dijagnostici, dijagnostici hrane i agrokemijskoj kontroli kvalitete a također i pri istraživanju izgaranja.

Slika 2.3.1. prikazuje primjenu spektra elektromagnetskih valova sa posebnim naglaskom na korisna područja za infracrvena mjerenja koja su nama od posebne važnosti. Što se tiče stupnja informacija koje dobivamo moglo bi se reći da tu možemo naći velik broj izuzetno korisnih podataka koji su našim očima nedostupni. [4]




Slika 2.3.1. Spektar zračenja [4]

Energija zračenja realnog tijela s usporedbom zračenja teorijskog tijela, koja sa određenom temperaturom *T* i valnom duljinom λ, zrače najveću moguću energiju. Takva tijela nazivaju se crnim tijelima. Raspodjela intenziteta zračenja crnog tijela promatranog u vakuumu prema spektru valnih duljina opisuje se Planckovim zakon:

$$E_{c\lambda}(\lambda, \mathrm{T}) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \mathrm{T}-1}}\right)}, \mathrm{W/\mu m * m2} \tag{2-3}$$

gdje su $C_1$ i $C_2$ prva i druga konstanta zračenja. Vlastita emisija crnog tijela, temperature *T*, opisuje se Stefan-Boltzmannovim zakonom:

$$E_c = \int_0^\infty E_{c\lambda}(\lambda, \mathrm{T}) d\lambda = \sigma T^4, W/m^2 \tag{2-4}$$

Odnos energije stvarnog tijela *E* (*T*) i emitirane emisije crnog tijela $E_c$ (*T*) pri jednakoj temperaturi nazivamo emisivnost ili faktor emisije:

$$\varepsilon = \frac{\mathrm{E}}{E_c} < 1 \tag{2-5}$$

Ovisan je o temperaturi i stanju površine tijela, pa i o smjeru i valnoj duljini zračenja. Dobiveno zračenje se na površini stvarnog tijela djelomično apsorbira (*a*), djelomično se reflektira (*r*) i djelomično propušta (*d*), pa vrijedi izraz:

$$a + r + d = 1 \tag{2-6}$$

Ako je tijelo nepropusno za toplinsko zračenje, vrijedi izraz (7) postaje: [2]

$$a + r = 1 \tag{2-7}$$

## 2.4. Održavanje uz primjenu IC uređaja

Snimka se za korisnike infracrvene termografije obrađuje pomoću računala, posebnom programskom aplikacijom za analiziranje infracrvenih zapisa. Na kraju se daje izvješće ili atest snimke u kojem su naznačeni pronađeni defekti te se preporučuje sanacija.

Kako je definiranje i prepoznavanje graničnih vrijednosti otkrivenih nepravilnosti predmet izučavanja i poznavanja pojedine grane djelatnosti zahtjeva se svakako stručna analiza. Ona se stječe kroz obvezno školovanje termografista te se podrazumjeva i iskustvo u raznim radnim uvjetima.

Odlična značajka infracrvene termografije je mogućnost otkrivanja raznih potencijalnih defekata u pogonu bez prekidanja procesa proizvodnje te gubitaka u vremenu i novcu koji su povezani sa tim prekidom. Na taj način bez kontaktna mjerna metoda infracrvene termografije pokazuje se vrlo dostupnom i isplativom za svakog korisnika.

Pojava zagrijavanja u velikoj većini slučajeva ukazuje na mogući kvar na stroju. Termografskim uređajima zato se vrlo dobro mogu pratiti stanja elemenata za prijenos električne energije, rashladnih postrojenja, transformatorskih stanica te i same proizvodnje električne energije. Također se može pratiti i stanje izolacije, mreže cjevovoda u procesnoj industriji, vrelovod u toplinarstvu, kvaliteta obloga peći za taljenje, rotacijskih peći u cementnoj industriji i stanje ležajeva na strojevima. Kod zaštite od požara, termografski se sustavi koriste za otkrivanje prikrivenih požara, za pronalaženja osoba u objektu koji je zahvaćen požarom te se može ispitivati otpornost elemenata na požar. Infracrvena termografija se koristi i za nadzor objekata, prostora, prometa i zagađenja okoliša. U građevini se koristi u trenutačno vrlo aktualnom ispitivanju kvalitete izolacije objekta te utvrđivanju mjesta s povećanom vlagom kako bi se utvrdila energetska učinkovitost zgrade. Primjenjuje se i u medicini, znanstveno-istraživačkom radu iz područja provođenja topline, mehanike fluida, kontrole bez razaranja – zaštite kulturne baštine. Vrlo je raširena i primjena u vojne svrhe.[4]

## 2.5. Osobine termovizijskog sustava

red kontrasta zračenja, svakom su termovizijskom sustavu svojstvene sljedeće osobine:

-Omjer signal/šum

-Ekvivalentna temperaturna razlika šuma

-najmanja razlučiva temperaturna razlika

-najmanja prepoznatljiva temperaturna razlika.

One ovise o izabranom senzoru i primijenjenom električkom sklopu za obradu mjernog signala.

Ekvivalentna temperaturna razlika šuma je odabrano mjerilo kvalitete za senzore koji pronalaze i prate objekte koji imaju veliko toplinsko zračenje. Međutim, taj parametar nije idealan za termovizijske sustave koji stvaraju sliku u zamršenoj pozadini s puno elemenata.

Bolji pokazatelj je najmanja razlučiva temperaturna razlika, jer uključuje i: efekte oštrine, efekte zrnaste strukture i kontrast. Kao najmanja temperaturna razlika MRTD (od Minimum Resolvable Temperature Difference) i najmanja prepoznatljiva temperaturna razlika MDTD (od Minimum Detectable Temperature
Difference) označuju se temperaturne razlike kod kojih meta postaje vidljiva. [7]

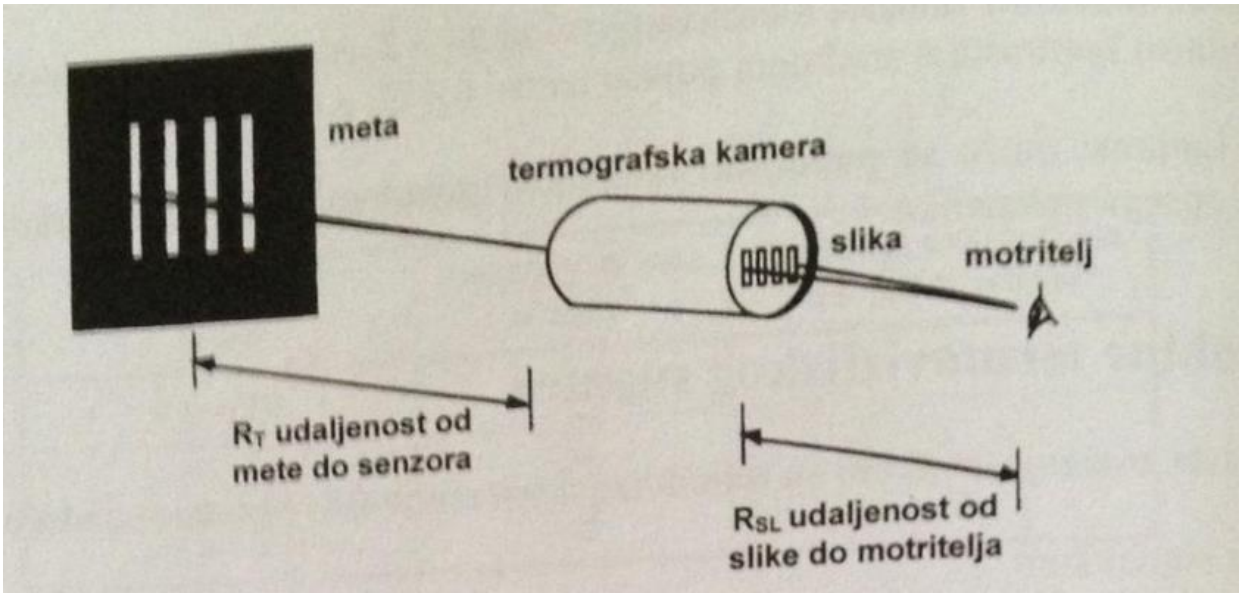
### 2.5.1. Omjer signala/šum

Šum je sastavni dio mjernog signala i odražava poremećaj. Pojačanje kontrasta i detektiranje najmanje temperaturne razlike može se postići senzorima dobrog omjera signal/šum (S/Š) i niskog šuma.

Na omjer S/Š može se utjecati konstrukcijskom izvedbom senzora. On raste s kvadratom promjera otvora senzora, s drugom korijenom trenutnog vidnog polja i linearno sa spektralnom osjetljivošću senzora. Opada sa žarišnom daljinom. Spektralna osjetljivost senzora, osjetljivost u određenom valnom pojasu zračenja je najveća kad je šum senzora puno veći od šuma pojačala.
[7]

### 2.5.2. Najmanja razlučiva temperaturna razlika

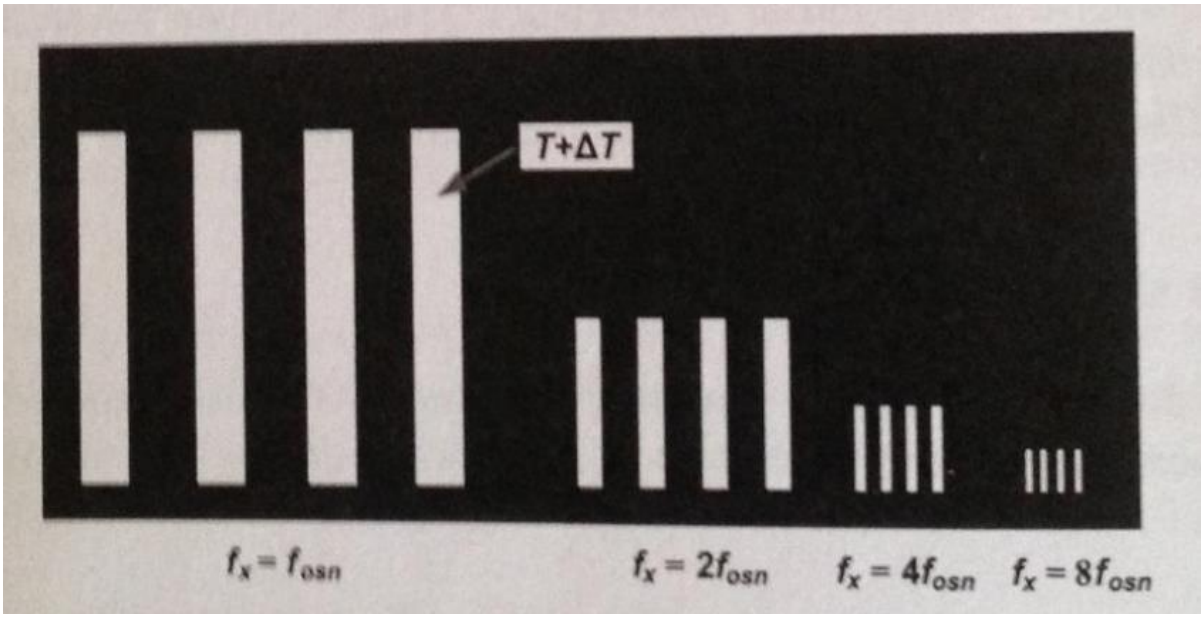
Najmanja razlučiva temperaturna razlika MRTD se definira kao najmanja temperaturna razlika na sceni nužna da bi motritelj mogao razlučiti standardnu shemu od četiri para crnih i bijelih linija, koja predstavlja osnovnu prostornu frekvenciju senzora. Uzorak te sheme s četiri bijele linije na crnoj podlozi, kojoj daje četiri para crnih i bijelih linija, postavlja se okomito na slici 2.5.1. [7]




Slika 2.5.1. Određivanje najmanje razlučive temperaturne razlike [7]

Osnovna prostorna frekvencija $f_x$ računa se iz zbroja parova bijelih i crnih linija koje senzor može razlučiti pri zadanoj udaljenosti $R_T$ podijeljenog s kutnom tetivom senzora $\alpha_T$. Kutna tetiva senzora odgovara širini slikovnog prikaza četiriju para promatranih linija. Uobičajeno se prostorna frekvencija izražava u sljedećim jedinicama: brojem ciklusa po mrad (miliradijana; radijan je SI jedinica ravninskog kuta), brojem linija po mrad, ili normiziranim dimenzijama ciklusa koji se dobiju kada se prostorna frekvencija pomnoži s kutnom tetivom senzora.

Kod mjerenja MRTD-a kao funkcije prostorne frekvencije, senzor koji se ispituje usmjeri se prvo na najveću metu u slici 2.5.2., odnosno na cilj koji odgovara osnovnoj prostornoj frekvenciji senzora $f_x=f_{osn}$, a zatim na sve manje i manje mete kojima odgovaraju sve veće i veće prostorne frekvencije. U slici 2.5.2. prikazane su četiri mete, i to za: $f_{osn}$, $2* f_{osn}$, $4* f_{osn}$, $8* f_{osn}$.




Slika 2.5.2. Mete s četiri para linija za različite prostorne frekvencije [7]

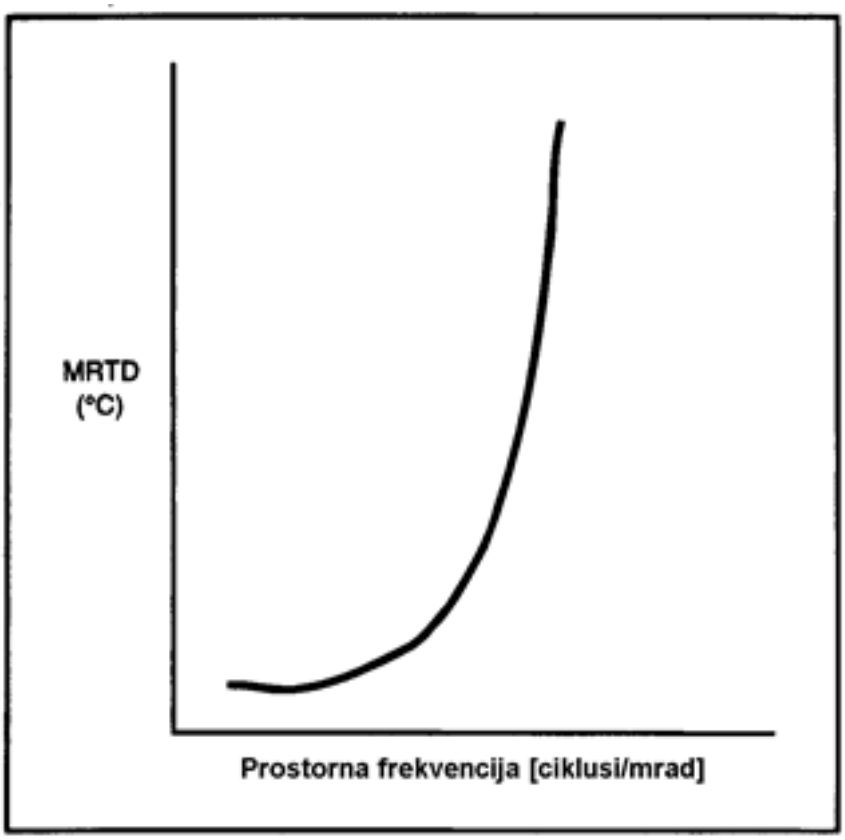
Visina linija je sedam puta veća od njihove širine, tako da svaka meta tvori kvadrat čiji oblik osigurava da motritelj ne može odrediti okomitu ili vodoravnu orijentaciju linija na osnovi oblika cilja, nego tek kad uspije razlučiti linije. Na ovaj se način može odrediti okomita i vodoravna MRTD i to odabiranjem smjera analiziranja i odgovarajuće orijentacije.

U labaratorijskom mjerenju MRTD-a početna razlika temperature između linija ΔT postavlja se nula. Ona se zatim povećava sve dok linije ne postanu pouzdano vidljive tako da ih je motritelj u stanju razlučiti, promatrajući udaljenosti $R_{SL}$ po slici 2.5.1.

Očitani ΔT predstavlja najmanju razlučivu temperaturnu razliku MRTD pri osnovnoj prostornoj frekvenciji senzora. Isti se postupak zatim ponavlja za sve veće i veće prostorne frekvencije, pa se za ispitivani senzor dobiva MRTD krivulja, prikazana u slici 2.5.3.

Ona prikazuje trend rasta najmanje razlučive temperaturno razlike s prostornim prostorne frekvencije. To znači da su pri višim prostornim frekvencijama nužni veći kontrasti temperature između mete i pozadine, kako bi ih čovjek mogao razlikovati.

Ovakvo određivanje MRTD-a uključuje ljudski faktor i subjektivno je. Novije inačice određivanja MRTD-a koriste tehnike za automatsko raspoznavanje mete i isključuju ljudski faktor, posebno kada više motritelja različito ocjenjuje isti senzor. [7]




Slika 2.5.3. Porast najmanje razlučive temperaturne razlike s prostornom frekvencijom [7]

### 2.5.3. Najmanja prepoznatljiva temperaturna razlika

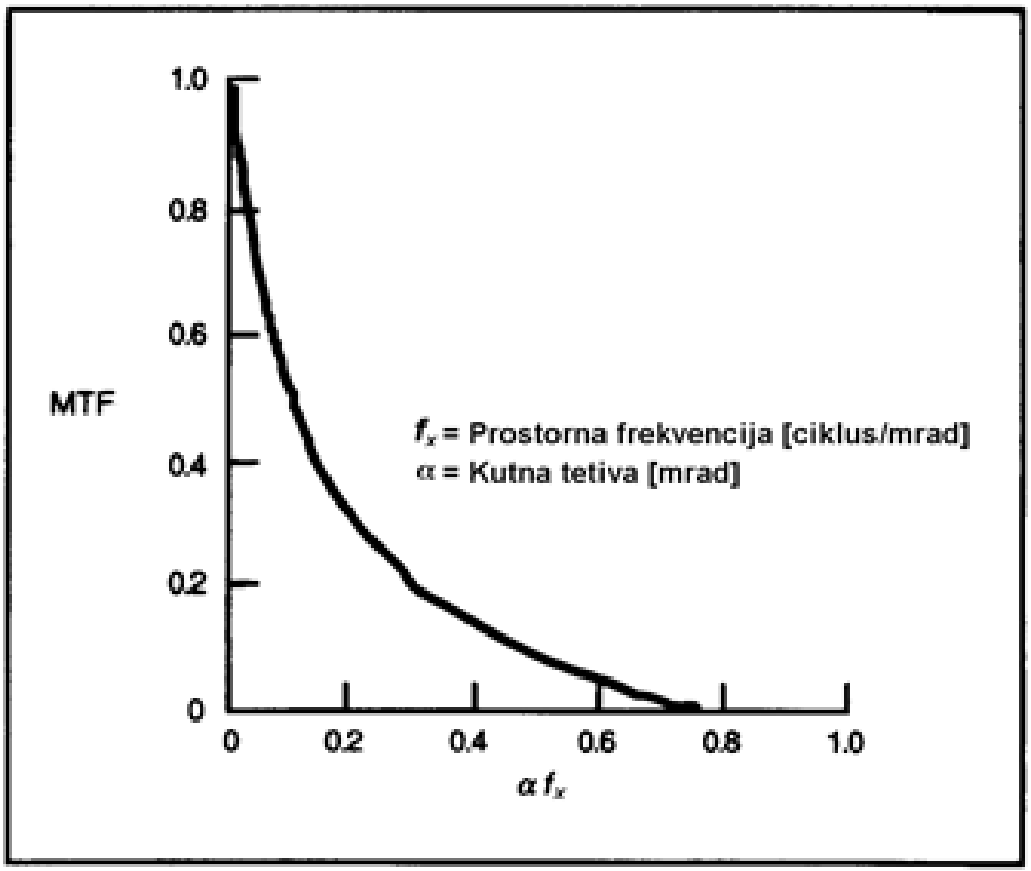
Najmanja prepoznatljiva temperaturna razlika MDTD ili toplinska osjetljivost je najmanja temperaturna razlika koja se može predočiti na zaslonu termografske kamere, odnosno na termogramu. Toplinska osjetljivost se kod termokamera kreće u rasponu od 0,01°C do 1°C. [7]

### 2.5.4. Razlučivost i osjetljivost

Kvaliteta motrenja određena je razlučivošću, koju uvjetuje cjelokupna djelotvornost termovizijskog sustava i direktno je povezana s uočavanjem malih detalja u termogramu. Razlučivost se može procijeniti približno pomoću maksimalne udaljenosti (dometa) L s koje se dade uočiti meta, a dana je izrazom:

$$\text{Rarlučivost} = \frac{\text{veličina mete}}{\text{L(udaljenost mete)}} \tag{2-8}$$

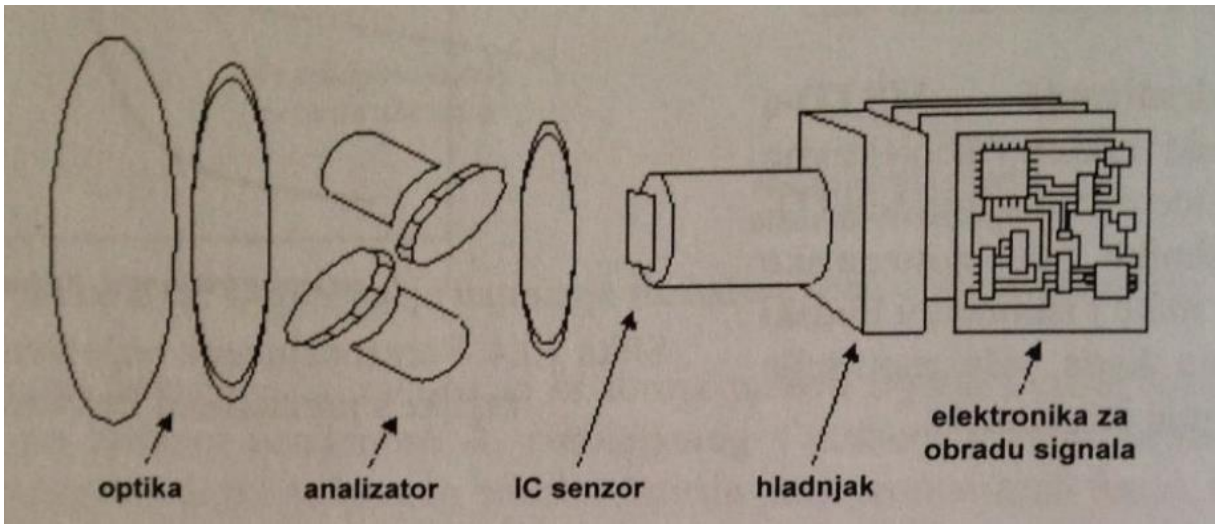
Osjetljivost termovizijskog sustava može se izraziti prijenosnom funkcijom modulacije MTF (od Modulation Transfer Function). MTF je omjer stvarne izlazne amplitude i amplitude koja bi se postigla kada bi elektrooptički sustav imao savršenu razlučivost. Ovisna je o prostornoj frekvenciji i pokazuje kvalitetu slike kao funkciju prostorne frekvencije . Primjer prijenosne funkcije modulacije prikazuje slika 7. Povećanjem prostorne frekvencije prijenosna funkcija opada. [7]




Slika 2.5.4. Prijenosna funkcija modulacije u ovisnosti o prostornoj frekvenciji [7]

## 2.6. Termografske kamere

Termografske kamere su sastavljene od osnovnih dijelova: IC optike, analizatora, IC senzora, hladnjaka, procesora signala i monitora, slika 2.6.1. Za obradu termograma rabi se osobno računalo s odgovarajućom programskom podrškom i u njega se učitavaju podaci iz kartice smještene u kameri.




Slika 2.6.1. Osnovni dijelovi termografske kamere [7]

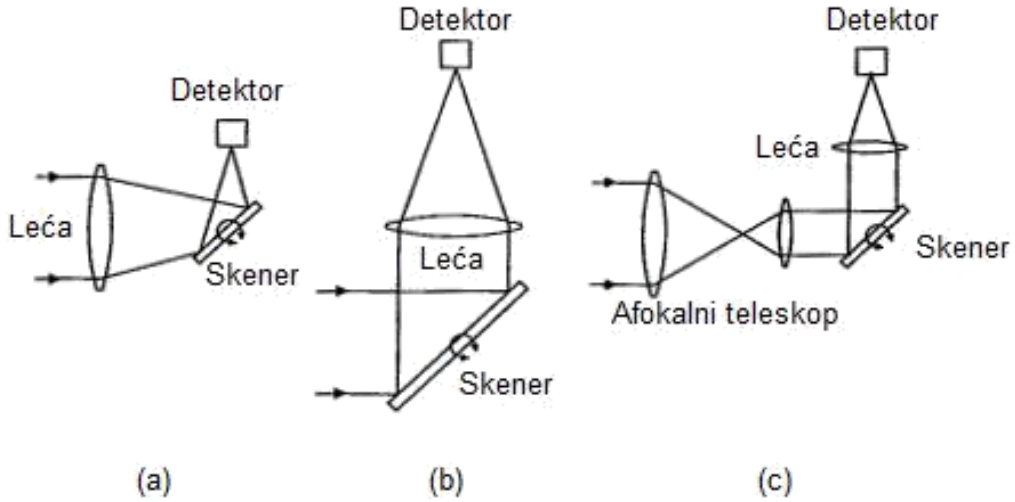
Optika se sastoji od pojedinih leća i ogledala s odgovarajućim indeksom loma i prilagodbom za smanjenje aberacije. Kao analizator se kod starijih termokamera s malim brojem senzora koristio posebni elektrooptički ili mehanooptički sklop, a danas su to optički filtri ispred IC senzora i služe za gušenje neželjenog zračenja i za smanjenje pozadinskog zračenja optike i kućišta.

IC senzor pretvara toplinsko zračenje scene u koristan mjerni signal. U tom su signalu superponirane i različite vrste šumova, poput fotonskog šuma, šuma rešetke i termičkog šuma senzora. IC senzor se zajedno sa zaštitom od unutarnjeg zračenja smješta u hlađeno kućište.

Hlađenjem se postiže bolji odziv senzora i bolji omjer signal/šum. Razvijeno je više vrsta hladnjaka, a najčešće se koriste sljedeće tri metode hlađenja: termoelektrično zasnovano na Peltierovom efektu, hlađenje plinom s otvorenim krugom gdje se plin ispušta u atmosferu, i hlađenje plinom sa zatvorenim krugom gdje plin kruži u zatvorenom prostoru.

Sklop za obradu signala prilagođuje izlazni signal IC senzora u oblik pogodan za prikaz na monitoru.

Tehnike procesiranja ovise o stupnju tehnološkog razvoja primijenjene kamere i o izvedbi senzora. [7]



Slika 2.6.2. Vrste pretražnika: a) pretražnik slike, b) pretražnik objekta, c) afokalni pretražnik [3]

Pretražnik slike:

Fokus mijenja s pomicanjem i rotiranjem uređaja. Dovoljno dobar signal ne dolazi na detektore. Potreban je uređaj za tu kompenzaciju što diže cijenu i otežava izradu. Prikaz na zaslonu zbog fokusa postaje iskrivljen na krajevima zaslona. Problem nastaje
kada otvor kroz kojeg dolazi signal stoji paralelno s lećom. Zračenje na detektorima upada pri različtim kutevima te se javljaju greške u očitanju.

Objektni pretražnik:

većina kamera leću postavlja odmah iza otvora kroz koji upada slika te se zbog toga ne javlja greška da pretražnik očitava i temperaturu kućišta (kao kod pretražnika slike). Ovakav oblik pretražnika se rijetko koristi zbog velikih dimenzija i što ima pokretne dijelove na prednjem dijelu.

Afokalni pretražnik:

s mijenjanjem faktora pojačanja afokalnog dijela možemo mijenjati i razlučivost slike, nije pogodan za generiranje slika od 25 fps i više (real time). [3]

### 2.6.1. Oprema za termovizijska mjerenja

U radu je prikazana digitalna termovizijska kamera Wohler IK 21, čiji se rad zasniva na ne hlađenom germanijevom termolektričnom linijskom detektoru. Ona formira termalnu sliku mjerenjem infracrvene radijacije određenog tijela ili cjelokupne situacije. Softver, koji kamera sadrži, vrši neophodnu korekciju pri konverziji termalne slike u odgovarajući termogram, koji predstavlja aproksimaciju točne temperature snimljenog objekta, ili temperaturnu raspodjelu u situaciji. Jedna od prednosti kamere IK 21 je širok temperaturni opseg, odnosno ona može u jednoj slici prikazati velike razlike u temperaturi.

Napaja se pomoću standardne baterije za video kamere. Slike se prikazuju u boji na LCD ekranu 10.2 cm dijagonalno. Temperaturna raspodjela površine koje se snima, prikazuje se varijacijom boja.

Termogrami se mogu snimiti na memorijskoj PC kartici i kasnije se analizirati. IK 21 je aparat za ručnu upotrebu, ali se uz odgovarajući pribor može instalirati kao nepokretni senzor i njime upravljati preko računala. Opremljena odgovarajućim priborom za povezivanje i softverom omogućava kontinuirano snimanje objekata. Kamera i računalo se mogu na jednostavan način povezati, tako da se termogrami snimaju u redovnim vremenskim intervalima. Moguće je kameru programirati da identificira na termogramu, temperature koje odstupaju od propisanih vrijednosti i pošalje alarmni signal računaru. Alarmi mogu biti odstupanje maksimuma, minimuma, srednje vrijednosti i/ili temperaturne točke, skupa točaka, linije ili kriterija termograma od dozvoljenih vrijednosti.

Memorijska PC kartica omogućuje spremanje brojnih termograma, koji se po želji mogu prenijeti na računalo. Zatim je moguće na karticu spremiti individualne parametre podešavanja kamere, pri čemu se, prethodno spremljena konfiguracija kamere može vrlo brzo učitati. Svaki korisnik kamere može posjedovati vlastitu PC karticu za spremanje podataka, tako da su mu uvijek na raspolaganju potrebna podešavanja. Tehničke karakteristike termovizijske kamere Wohler IK 21 prikazane su u tablici 2.6.1. [12]

Tablica 2.6.1. Tehničke osobine digitalne termovizijske kamere Wohler IK 21 [12]

| | |
|---|---|
| Detektor | Jednodimenzionalni niz ne hlađenih termoelektričnih detektora, površine pixela 50 μm × 50 ×μm |
| FOV-FieldofView | 17,2° horizontalno i 17,2° vertikalno |
| IFOV-Instantaneous Field of View | 2,5 mrad x 2,5 mrad |
| Leća | 20mm germanijevo, F/0,7; 25cm - oo |
| Spektralna domena | 8 μm – 14 μm, germanijeva optika prekrivena ne reflektirajućim filmom |
| NETD (ekvivalentna temperatura) šuma) | < 0,4 °C pri 30 °C |
| Točnost | 2 °C ili 2% pune skale |
| Domena mjerenja temperature | 0 do 350 °C (sa mogućnošću proširenja) |
| Radna temperatura | 0 do 40 °C |
| Napajanje | baterija za kamkorder NP-98 ili kompatibilna, 3 Ah |
| Vrijeme snimanja po slici | < 1,5 sekundi |
| Vrijeme pražnjenja baterije | > 60 minuta sa 3 Ah baterijom |
| Memorija za snimanje slika | 8 MB ATA Flash PC kartica, memorira 280 slika |
| Komunikacijska veza | RS-232 brzine protoka 300 do 1 1 5K |
| Displej | LCD, 102mm |
| Video izlaz | NTSC/PAL |

| | |
|---|---|
| Funkcije | Fokus, snimanje, memoriranje, ponovni poziv, mjerenje temperature, pregled povijesti i Setup |
| Funkcije Setup menija | Podešavanje: emisije, temperature pozadine, temperaturne jedinice, palete boja, automatski i fiksni izbor temperaturnih opsega, parametara RS-232 prijenosa, NTSC/PAL video |
| Dimenzije | 240 x 100 x 130 mm (dužina x širina x visina), leća nije uračunata |
| Masa | < 2,0 kg sa lećom i baterijom |
| Standardni pribor | Dvije baterije, punjač, USB žica, traka za nošenje kamere oko vrata, IR SnapView softver, 8 MB ATA Fleš PC kartica, zaštitni poklopac leće |

• optički sustav koji može formirati sliku koristeći zračenje promatranog objekta

• jedan ili više detektora koji pretvaraju zračenje tijela u električni signal razmjeran tom zračenju

• neki uređaji imaju i skenerski dio, koji u pravilnom uzorku skenira dijelove detektora za potpunu sliku, ali ovo, u načelu, više nije u upotrebi, jer noviji uređaji imaju velike detektore polja, koji mogu odjednom pokriti cijelo vidno polje (cijelu sliku)

• elektonički procesor, koji signale detektora ili skenerskog mehanizma pretvara u video signale

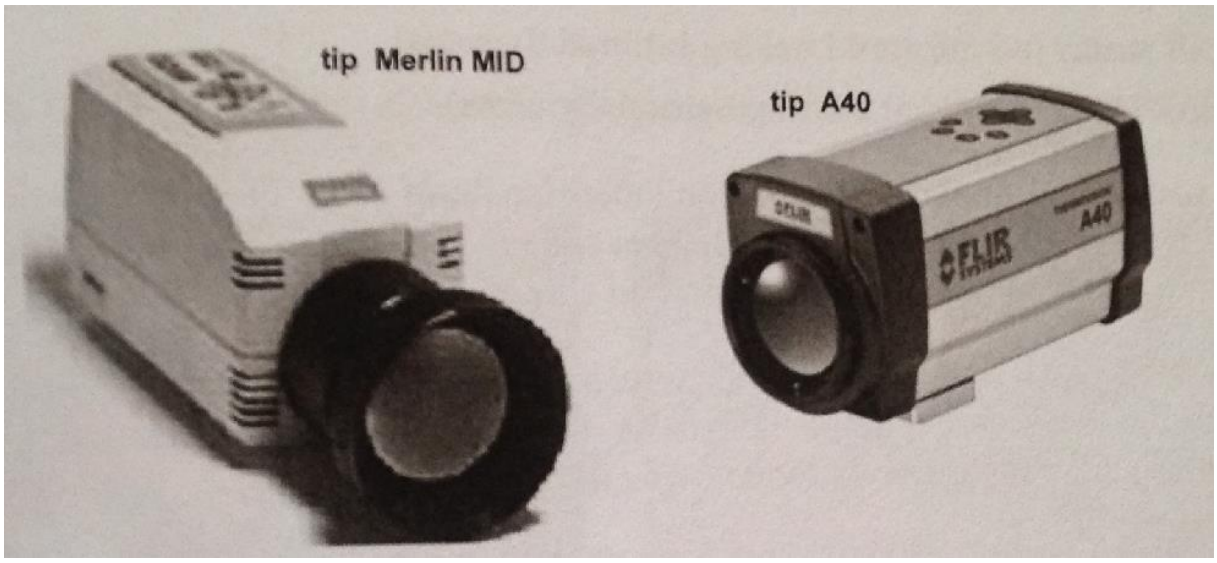
• video sustav, koji generira sliku prema video signalu dobivenom od procesora

Tablica 2.6.2. Materijali za izradu leća IC uređaja [3]

| Materijal | Korisni spektar valne duljine u μm | Indeks refrakcije | Svosjtvo |
|---|---|---|---|
| **Silicij** | ***1,4-7 i 20-25*** | **3,43 pri 4μm<br>3,42 pri 10μm** | Ima dobra apsorcijska svojstva u 8-12 μm pojasu |
| **Germanij** | ***1,6-20*** | **4,02 pri 4μm<br>4,01 pri 10μm** | Najčešće korišten materijal u 8-14μm |
| **Cink sulfat** | ***0,4-12*** | **2,25 pri 4μm<br>2,20 pri 10μm** | |
| **Cink selenid** | ***0,5-20*** | **2,43 pri 4μm<br>2,41 pri 10μm** | Često korišten zajedno s germanijem u više elementskim objektivima 8-14μm pojasa |
| **Kalcijev fluorid** | ***0,13-12*** | **1,41 pri 4μm<br>1,31 pri 10μm** | |
| **Safir (aluminij oksid)** | ***0,17-6,5*** | **1,67 pri 4μm** | Vrlo tvrd te otpooran na ogrebotine |
| **KRS5 (talij bromo jodid)** | ***0,5-40*** | **2,38 pri 4μm<br>2,37 pri 10μm** | Treba uzeti u obriz da talijeve soli vrlo otrovne |
| **Natrijev klorid** | ***0,17-18*** | **1,52 pri 4μm<br>1,49 pri 10μm** | Vrlo higroskopan materijal ali se to može izbjeći raznim zaštitinim premazima |

### 2.6.2. Termografske kamere s hlađenjem i bez njega

Termografske kamere sa slikovnim senzorima mogu imati hlađene i ne hlađene senzore. Prednosti ne hlađenih u odnosu na hlađene su: niža cijena, manje dimenzije, manja masa, manja potrošnja, bolja kompaktnost i jednostavnije održavanje. Mane su im: lošija toplinska osjetljivost MDTD, veći utjecaj smetnji, niža prostorna frekvencija i duže trajanje integracije slike. Na slici 2.6.3. prikazane su jedna hlađena i jedna ne hlađena termografska kamera, a podatci su im navedeni u tablici 4.




Slika 2.6.3. Hlađena (tip Merlin MID) i ne hlađena (tip A40) termografska kamera [7]

Tablica 4. Podatci prikazanih kamera [7]

| ***Tip termografske kamere*** | **Merlin MID** | **A40** |
|---|---|---|
| *Materijal izrade senzora* | InSb | VOx |
| *Hlađenje senzora* | Strilingov hladnjak | ne hlađen |
| *Spektralno područje* | 3-5 µm | 7,5-13 µm |
| *Toplinska osjetljivost* | 0,025°C | 0,08°C |
| *Broj senzorskih elemenata* | 320*256 | 320*240 |
| *Frekvencija kadrova IFR* | 60 Hz | 60 Hz |
| *Težina* | 4 kg | 1,5 kg |
| *Dimenzije* | 25*14*13 cm | 21*11*9 cm |
| *Cijena* | 43 000 USD | 18 000 USD |

Iz podataka u tablici 4. uočljivo je da hlađena termografska kamera radi u području kraćih valnih duljina, ima bolju toplinsku osjetljivost, veću težinu i dimenzije te da je više no dvostruko skuplja od ne hlađene približno istog broja senzorskih elemenata i iste brzine promjena kadrova IFR (od Image Frame Rate).

Termografske kamere koja se nude na tržištu odlikuju se sljedećim svojstvima:

Mjerni opseg: od -10°C…+250°C pa sve do -40°C…+2000°C (izuzetno i preko +2000°C)

Granična mjerna podrška: najčešće ±2% ili ±3%, odnosno ±2°C ili ±3°C

Toplinska razlučivost: od 1,2°C pa sve do 0.03°C Spektralni pojas: najčešće 7,5…14μm. [7]

### 2.6.3. IC senzori

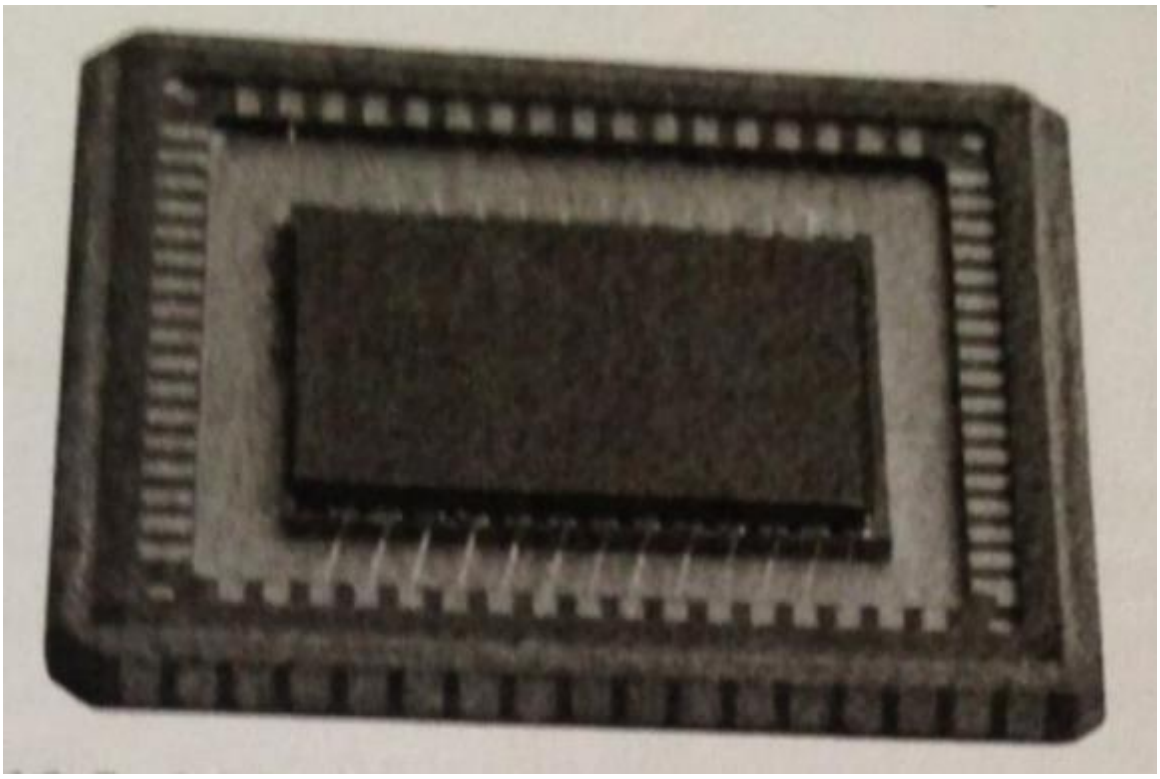
IC senzori koji su se nametnuli u termografiji su slikovni. Grupni su i sastoje se od mnoštva pojedinačnih senzorskih elemenata spojenih u jednodimenzionalnu ili dvodimenzionalnu matricu. Izrađuju se istovremeno na jednoj osnovnoj pločici i nedjeljivi su, nazivaju se CCD senzorima.

Linearni niz od n senzorskih elemenata spojenih u seriju analizira samo jedan dio slike, jednu njenu traku.

Svaki senzorski element ima električni izvod spojen na zasebno pojačalo. Sklop za povezivanje izvoda radi s funkcijom kašnjenja, tako da prvi senzorski element u nizu nema kašnjenja, drugi ima kašnjenje od jednog vremenskog intervala, treći od dva intervala, itd.

Paketi naboja prebacuju se iz jednog vertikalnog sloja u drugi, pretvaraju u analogne naponske signale i pojavljuju na izlazu senzora.

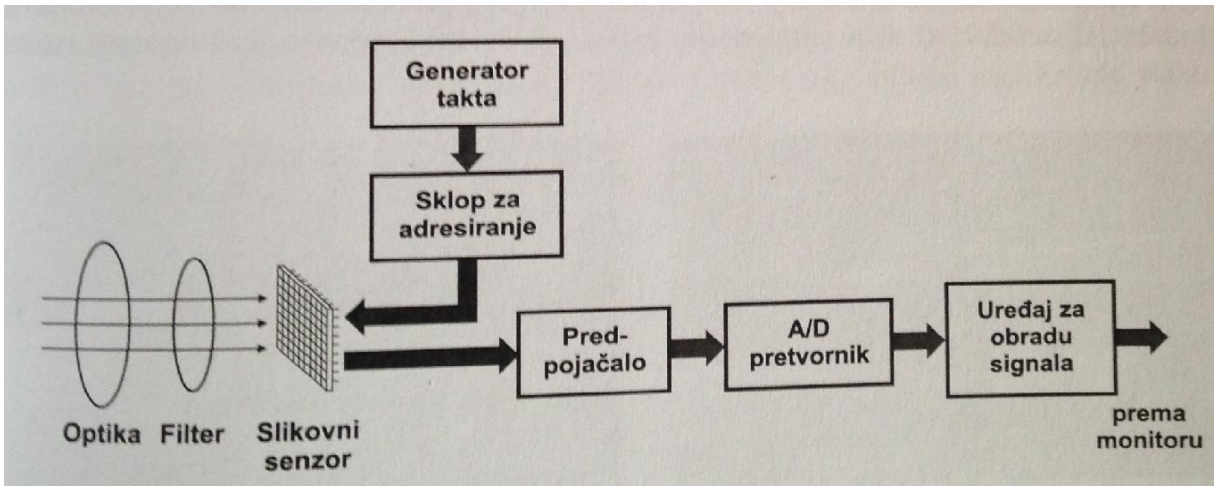
Slikovni senzor na jednom CCD čipu s 480*640 senzorskih elemenata prikazan je u slici 2.6.4. U njemu su na jednoj pločici integrirane funkcije detekcije, funkcije za očitavanje naponskih signala i funkcije obrade signala. Integriranjem ovih funkcija što bliže slikovnom senzoru smanjuje se utjecaj smetnji i izbjegava daljnje povećanje šuma. [7]



Slika 2.6.4. CCD čip s 480*640 senzorskih elemenata [7]

### 2.6.4. Kamere sa slikovnim senzorima

U početku su se koristile kamere s jednim senzorskim elementom. Bili su to termografi s piroelektričkim vidikonom i termografi s mehanooptičkim skeniranjem. Sve je počelo s Drugim svjetskim ratom. Te su kamere bile složene izvedbe, velikih masa i volumena i sastojale se od velikih hladnjaka i puno pokretnih dijelova. Današnje rade sa slikovnim matičnim CCD senzorima i izvedba im je puno jednostavnija. Blokovski prikaz termografske kamere sa slikovnim senzorima može se vidjeti na slici 2.6.5.




Slika 2.6.5. Blokovski prikaz termografske kamere sa slikovnim senzorom [7]

Ovakve kamere nemaju pokretnih dijelova. Svaki pojedinačni senzorski element slikovnog senzora vrši pretvaranje IC zračenja jednog djelića slike u naponski signal. Naponski signali se zatim digitaliziraju, pa svaki djelić slike postaje točkica, odnosno piksel. Dodatnom obradom dobiveni se pikseli prilagođavaju prikazivanju na nekom ekranu i osigurava da se svaki očitani piksel na ekranu pojavi na istom mjestu.

Pred pojačalo se sklopom za uzrokovanje i pamćenje služi podizanju razine izlaznih analognih signala svakog pojedinačnog senzorskog elementa na odgovarajuću visinu i zadržavaju na toj visini sve dok ga multiplekser ispred A/D pretvornika ne očita i A/D pretvornik ne digitalizira.

Prije prikaza u termogramu nekog ekrana dovedeni digitalni signali mogu se dodatno odrediti u uređaju za obradu signala (zadnji blok u slici 2.6.5.), a neke kamere posjeduju i mogućnosti pohranjivanja dobivenih termograma. Kao ekran najčešće se rabi zaslon katodne cijevi CRT (od Cathode Ray Tube) ili monitor s tekućim kristalima LCD (od Liquid Crystal Display). [7]

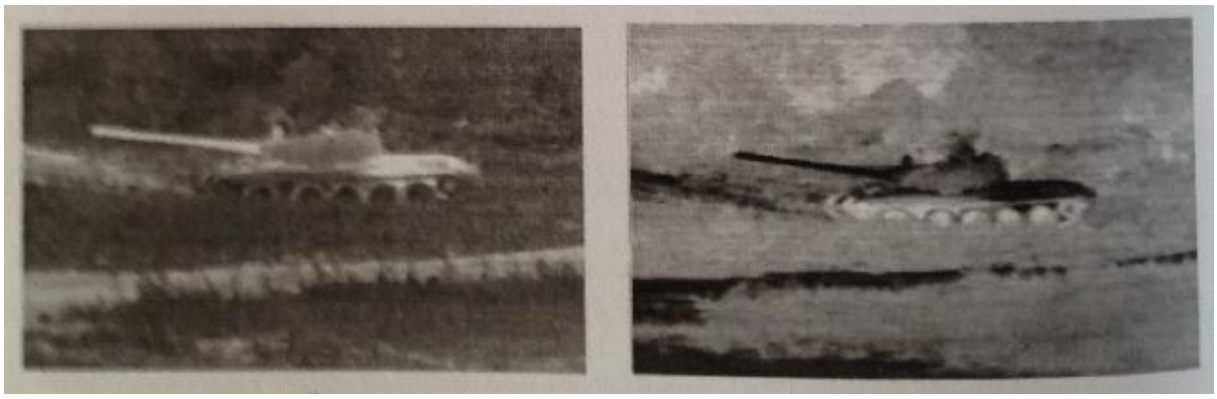
## 2.7. Bojanje slike

Iako su signali dobiveni termografskim kamerama sa slikovnim senzorima debiveni za oblikovanje termograma snimanje scene na odabranom prikazu, prije prikaza ih se najčešće dodatno obradi. Dodatnom obradom dade se povećati omjer signal/šum i time poboljšati kvaliteta slike, ali se može izvesti i bojanje slike time povećati optički dojam.

Amplituda analognog izlaznog signala svakog senzorskog elementa slikovnog senzora razmjerna je temperaturi djelića scene koju senzor u nekom trenutku motri. Taj signal digitaliziran, na crno-bijelom ekranu daje točkicu (piksel) s jednom od nijansi sive boje. Niža temperatura promatranog objekta rezultira nižom amplitudom napona iz senzora i pripadajuća točkica na ekranu je tamnija. Viša temperatura promatranog objekta rezultira višom amplitudom napona iz senzora i točkica na ekranu je svjetlija.

Slažući točkicu po točkicu na ekranu se dobiva termogram koji se sastoji iz nijansi svih boja. Svakoj nijansi pripada određena temperatura promatrane scene.

No obradom signala moguć je i obratni slijed u kojem bi višoj temperaturi pripadala svjetlija točka, a nižoj tamnija. Oba su stanja na jednom primjeru prikazana na slici 2.7.1. U lijevom termogramu (slika 2.7.1. a) višu temperaturu prikazuju svijetlije nijanse, a u desnom tamnije (slika 2.7.1. b).



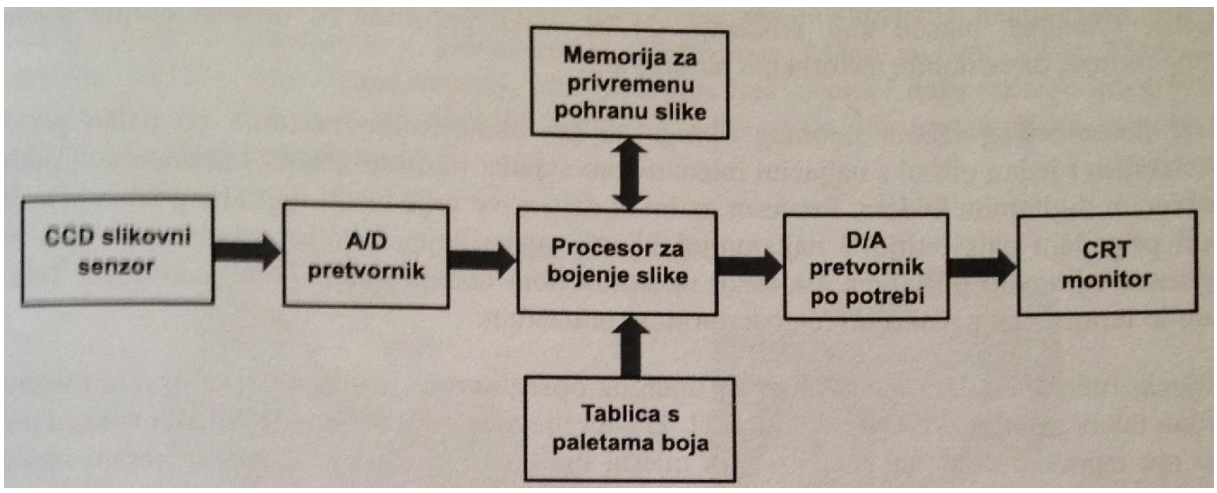
a) b)

Slika 2.7.1. Dva različita siva termograma u prikazu iste scene [7]

Kako ljudsko oko može razlikovati samo nekoliko desetaka nijansi sive boje, dobiveni termogram je monoton i za detaljniju analizu neprikladan.

S druge pak strane, ljudsko oko raspoznaje nekoliko tisuća različitih boja, koje bi termogram učinile za analizu prikladnijim. Razvijen je stoga postupak pretvorbe sivo nijansirane slike u obojenu. Svakom elementu slike, svakoj točkici se prije prikazivanja na ekranu umjesto sivog nijansiranja dodaje nijansiranje raznim bojama. Ovisno o visini analognog napona pojedinog senzorskog elementa svakom se dodaju nijanse zelene, plave ili crvene boje.

Time se postiže znatno bolja mogućnost uočavanja temperatura i temperaturnih razlika u termogramu. Navedena obrada signala naziva se lažno bojanje slike FCIC (od False Color Image Coding) i široko je rasprostranjena. Blokovski prikaz sklopa za bojanje slike prikazan je u slici 2.7.2.




Slika 2.7.2. Sklop za bojanje slike [7]

U procesor uređaja za obradu slike dolaze signali u digitalnom obliku prikazujući samo djeliće slike, a on ih slaže u cjelovitu sliku i odlaže u memoriji za privremenu obradu slike. Kada je slika složena, procesor komunicira s memorijskim elementom u kojemu je pohranjena tablica s paletama boja i prelazi na postupke uspoređivanja i preslikavanja. Svaki djelić slike, koji je nakon A/D pretvorbe postao piksel u točno određenoj sivoj nijansi i u njoj digitalno kodiran, uspoređuje se s bojama pohranjenim u tablici s paletama boja. Usporedba je jednostavna i svodi se na uspoređivanje dvaju digitalnih kodova, koda sive nijanse s kôdovima svih nijansi pohranjenih boja.

Kad se pronađe odgovarajuća zamjena za nijansu sive boje jednog piksela, njezin se digitalni kod briše iz privremene memorije i na njezino mjesto upisuje se digitalni kod nijanse odgovarajuće boje. Taj dio postupka naziva se preslikavanje. Postupci usporedbe i preslikavanja odvijaju se serijski. Jedan za drugim uspoređuju se i preslikavaju piksel po piksel sve dok se ne dobije cjelovita slika.

Kada je bojenje završeno, cijela slika se iz privremene memorije šalje na ekran i tamo nastaje obojeni termogram. Ako se umjesto na analognom CRT monitoru slika želi prikazati na digitalnom LCD monitoru, D/A pretvornik u slici 2.7.2. nije potreban.

U nekim primjenama se sklop za bojanje namjerno izostavlja, jer je utvrđeno da je siva slika nekom slučajem korisnija od obojane. To važi kod isječaka slika s oku vidljivim strukturama, primjerice kod promatranja ljudskih lica ili drveta. Sivo skaliranje daje vizualnu cjelovitost koja se u obojenoj slici gubi. Siva slika se pokazala korisnim i kod termografskih kamera kod kojih mjerenje temperature nije primarno i koriste se samo za pokazivanje kontrasta temperature. Primjerice kod termografskih kamera za nadzor državne granice, gdje se ljudska figura s toplinskim zračenjem uočava bolje i sivoj nego obojenoj slici. [7]

## 2.8. Izbor termovizijskog mjernog opsega

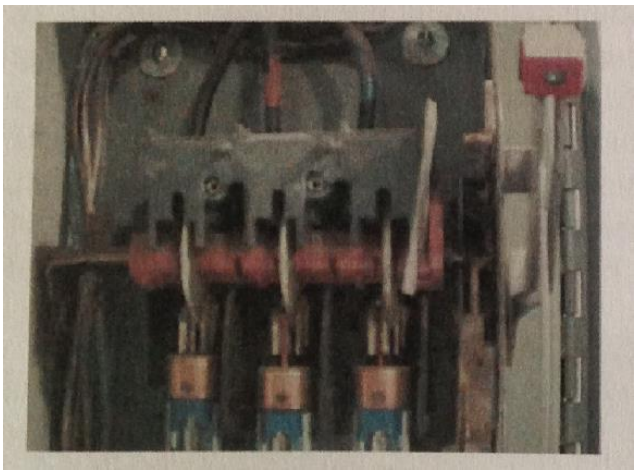
Temperaturni mjerni opseg u obojenom termogramu određen je donjom i gornjom graničnom temperaturom.Da bi termogram jasno prikazivao temperaturne razlike, potrebno je ispravno odabrati i jednu i drugu granicu. Složenije i time skuplje termografske kamere nude mogućnost ručnog i automatskog odabira mjernog opsega, a jeftinije samo ručnog.

Ukoliko je mjerni opseg izabran ručno a u termogramu je temperatura dijela slike veća od gornje granične, pikseli koji prikazuju taj dio slike poprimit će nijansu gornje granične temperature, pa se dobije nekorektan termogram.

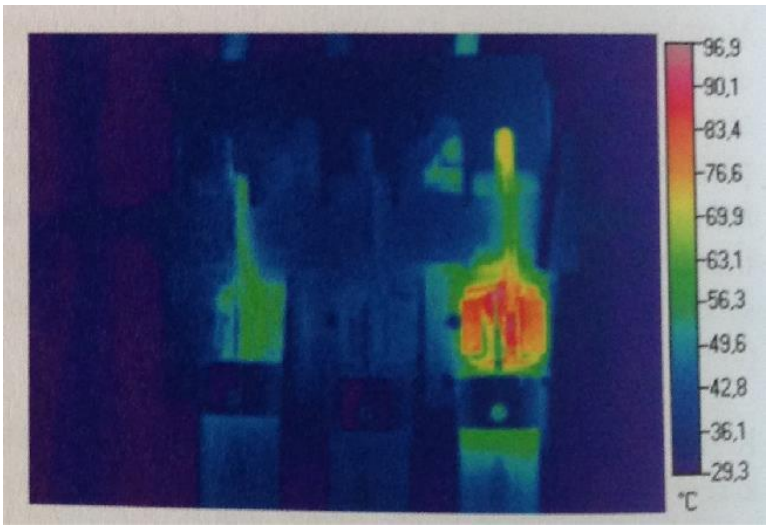
Kod automatskog izbora mjernog opsega se pri obradi slike utvrđuje po jedan piksel s najslabijim i jedan piksel s najjačim intenzitetom svjetla, odnosno piksel s najmanjim i piksel s najvećim digitalnim kodom.

Procesor zatim dodaje nove vrijednosti digitalnog koda pikselima koji pripadaju najsvjetlijoj i najtamnijoj nijansi svake boje. Ostalim nijansama svake boje, odnosno njihovim pikselima, procesor interpolacijom dodaje nove digitalne kodove. Tako se dobije termogram s najvećim temperaturnim kontrastom.

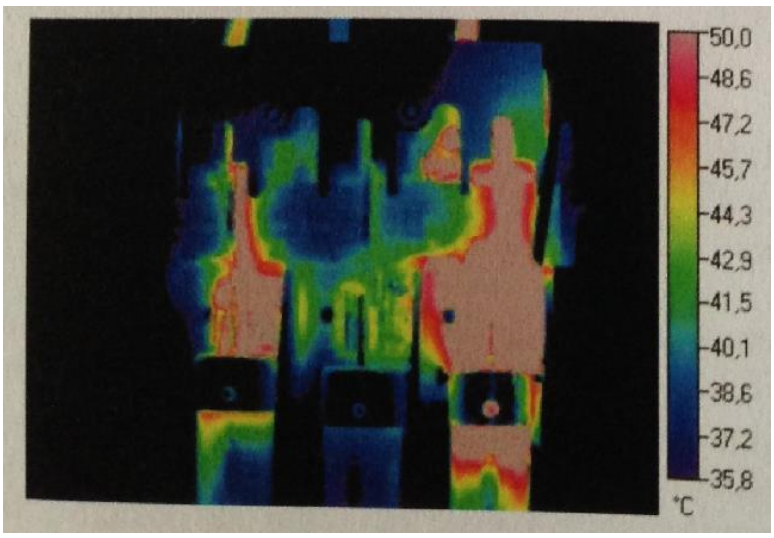
Utjecaj ručnog odabira temperaturnog mjernog opsega može rezultirati raznim pogreškama, a jedan takav primjer pokazuje slika 2.8. U slici lijevo gore prikazana je stvarna slika, a u slici do nje ispravno odabrani temperaturni mjerni opseg. U slici dolje lijevo, odabrani opseg je preuzak pa je veliki dio termograma ne uporabljiv za analizu, a u slici do nje preširok pa ej nastao termogram bez kontrasta.



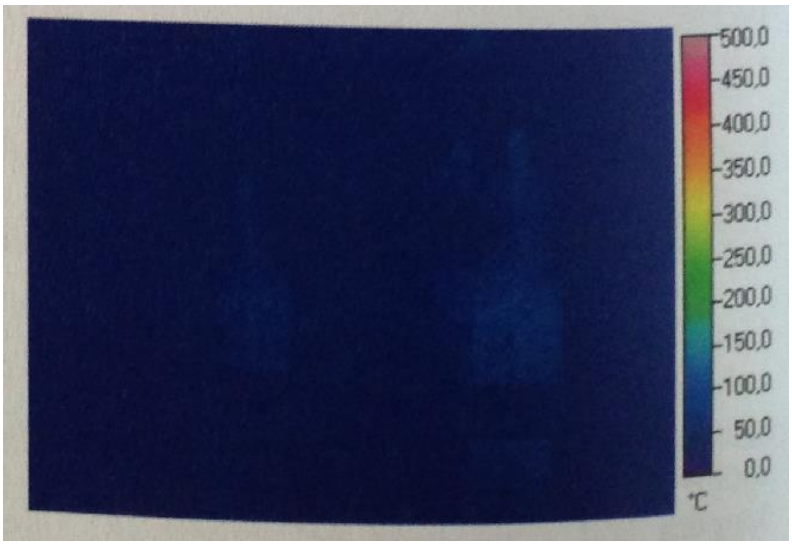
Slika 2.8.1. slika scene [7]




Slika 2.8.2. Odabir točnog mjernog opsega [7]




Slika 2.8.3. Odabir preuskog mjernog opsega [7]




Slika 2.8.4. Odabir preširokog mjernog opsega [7]

Novije termografske kamere posjeduju i dodatne funkcije, primjerice spajanje vizualne slike i termograma, alarmiranje ukoliko je temperatura scene iznad neke zadane, vizualno prikazivanje samo dijela slike u kojem su prekoračene zadane temperaturne vrijednosti, itd.

Mnogo je varijabli koje mogu utjecati na točnost termografskog oslikavanja ,npr. udaljenost od objekta, ambientalna temperatura, relativna vlažnost, i najvažnije emisivnost materijala.
Emisivnost je modificirajući faktor korišten u termografiji u boji kako bi se postiglo ispravno očitanje 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 μm).
Ambientalna 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). [7]

## 2.9. Vrste slikovnih sustava

Danas su u upotrebi tri engleske kratice za tri različita IC slikovna sustava:

IRLS sustav (od Infrared Line Scanner)

FLIR sustav (od Forvard Looking Infrared Systems)

STARTING sustav (od Starting Sensors Systems)

ILRS je sustav koji oblikuje sliku jednodimenzionalnim (1D) ili dvodimenzionalnim (2D) skeniranjem scene. Skeniranjem se promatrana slika razlaže na sastavne dijelove. Kao sklop za analiziranje uglavnom se koristi mehanooptički skener.

FLIR sustav izgledom podsjeća na TV kameru, a najnovije inačice čak i na digitalni fotoaparat. Umjesto naziva FLIR sve više se rabi naziv termovizijska kamera. Koristi CCD slikovne senzore i može biti s analizatorom termograma ili bez njega.

STARTING sustav koristi CCD slikovne senzore i sličan je FLIR-u, ali ne posjeduje analizator termograma. [3]

# 3. POVEZIVANJE TERMOVIZIJSKE KAMERE SA RAČUNALOM

## 3.1. Povezivanje termovizijske kamere na osobno računalo i podešavanje sustava za monitoring i dijagnostiku stanja elektroenergetskog sustava

Poslije snimanja slike termovizijskom kamerom, ona se prebacuje na osobno računalo. Potreban je
odgovarajući softver koji u principu treba omogućiti sljedeće funkcije:

- upravljanje režimom snimanja termograma
- prijenos termograma sa termovizijske kamere na PC obradu termograma
- organiziranje termograma po datotekama potpunu analizu termograma
- postavljanje uvjeta u pogledu temperature (minimalne i maksimalne) pojedinih zona na termogramu
- upozoravanje korisnika kada su postavljeni uvjeti prekoračeni pravljenje određenih naredbi za odabrani termogram

Termovizijska kamera Wohler IK 21 posjeduje zasebni procesor i omogućava samostalan rad bez osobnog računala. Nakon uključivanja u kameri se pokreće samostalni operativni sustav koji kontrolira rad kamere i
omogućuje snimanje i elementarnu analizu dobivenih termograma. Rad kamere odvija se u jednom od četiri režima: fokusiranje (*Focus/Acquire*), snimanje (*Snap*), analiza termograma (*View*) i podešavanje (*Setup*).

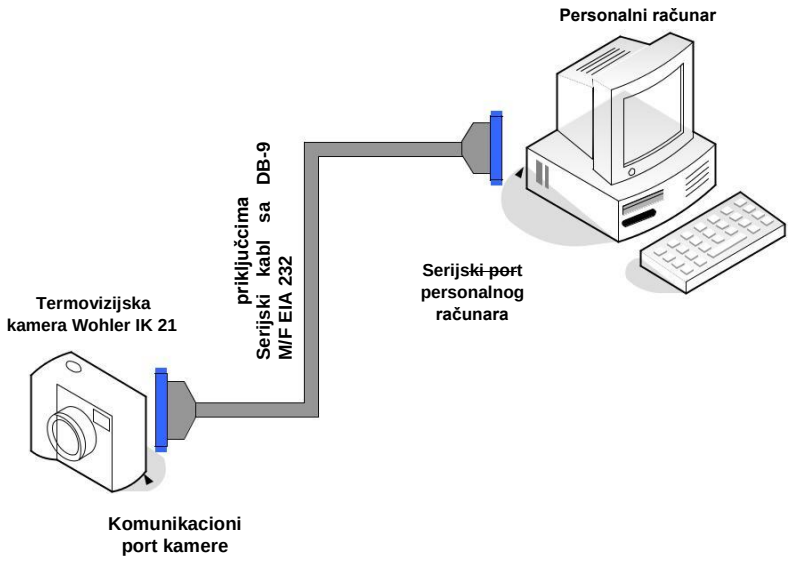
Parametri rada kamere mogu se zadati preko setup.ini datoteke smještene na PCMCI Flash memorijskoj kartici ili, ako datoteke nema, kamera automatski učitava tvornički postavljene vrijednosti.

Imajući u vidu male dimenzije ugrađenog LCD displeja (102 mm), proizvođač je omogućio povezivanje kamere i eksternog monitora (televizora) preko NTSC/PAL video konektora, koji se standardno isporučuje uz kameru.

U sistemima za nadzor, preventivno održavanje ili upravljanje tehnološkim procesima, potrebno je termovizijsku kameru povezati na osobno računalo, tj. formirati računalno upravljan termovizijski sustav.

Daljinsko upravljanje kamerom putem osobnog računala ipak je moguće ostvariti putem, u kameru ugrađenog komunikacionog serijskog priključka. Potrebno je dakle nabaviti ili napraviti odgovarajući serijski kabl sa DB-9 M/F priključcima i povezati komunikacijski port kamere i serijski port *desktop* ili prijenosnog računala.

Na taj način je hardverski potpuno konfiguriran računalno upravljan termovizijski sustav koji može biti upotrjebljen u različitim sustavima za nadzor, upravljanje i preventivno održavanje industrijskih procesa. Na slici 3.1.1. prikazana je shema računalno upravljane termovizijske kamere Wohler IK 21.




Slika 3.1.1. Shema računalno upravljene termovizijske kamere [12]

Softverska podrška ovakvom sustavu može biti vlastite izrade ili se može upotrijebiti razvijenija verzija paketa *IR SnapView Pro*, koja omogućava dodatno daljinsko upravljanje kamerom preko računala, programiranje kamere kako bi identificirala temperature koje odstupaju od propisanih vrijednosti i pošalje

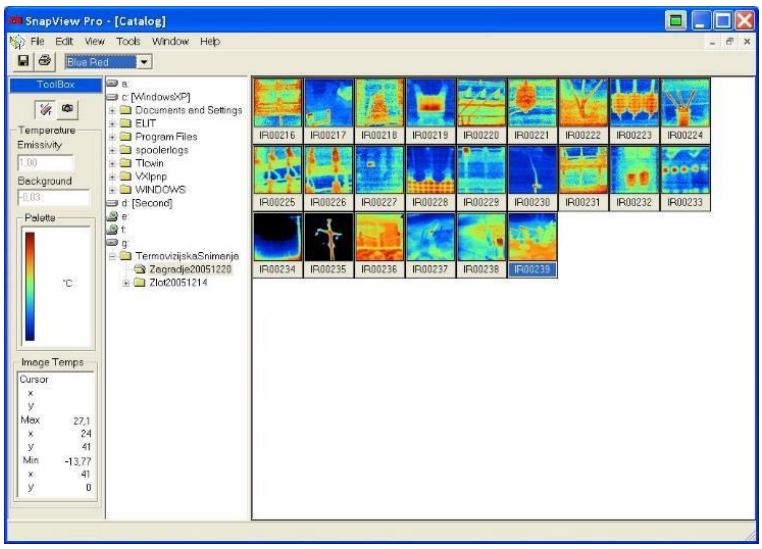
alarm računalu. Na taj način moguće je vršiti monitoring mnogih procesa automatski. Softver detekcijom neželjenog stanja signalizira kompjuteru da je osnovno stanje procesa ugroženo. Osim toga moguća je softverska detekcija mjesta na kojemu je neregularnost uočena.

Računalno upravljan termovizijski sustav za snimanja elektroenergetskih postrojenja (transformatora), softverski je podržan *IR SnapView Pro*, verzija 2.1, paketom tvrtke Infrared Solutions Inc. U tekstu koji sledi biti će ukratko prikazane neke od mogućnosti ovog softvera

Format slike koji softver generira ima ekstenziju *.isi. Softver posjeduje mogućnost da konvertira ovaj format u neki drugi i na taj način slike se mogu dalje korigirati standardnim programima za obradu slike

(npr. *Adobe Photoshop*) ili matematičkim alatima (npr. *Matlab - Image Processing Toolbox*). Moguće je sliku prenijeti u Excel tablicu, gdje svako polje tablice predstavlja temperaturu odgovarajućeg piksela na slici. Dalje se podaci iz *Excel*-ove tablice mogu naknadno analizirati. Na slici 3.1.2. prikazan je izgled glavnog prozora u programu *IR SnapView Pro.*

Radna pozadina glavnog prozora programa, podijeljena je na tri dijela. Prvi dio tzv. ToolBox prikazuje karakteristike snimljenog objekta, kao što su emisivnost i temperatura, a u sustavu daljinskog upravljanja kamerom podešavanje serijskog porta, preko kojeg će ići komunikacija i vremenski intervala snimanja. Srednji prozor prikazuje stablo datoteka na izabranom mediju (disku, CD/DVD uređaju ili memorijskoj kartici) na kojoj se nalaze snimljeni termogrami. Treći prozor prikazuje termovizijske slike (termograme) u izabranom dokumentu, na odgovarajućem aktivnom mediju u stablu datoteka. Slike su prevedene na vidljivi dio spektra i prikazane primjenom nekog od podržanih filtra (*list box* na liniji alata pored ikone *Print*). [12]




Slika 3.1.2. Glavni prozor programa *IR SnapView Pro*, [12]

## 3.2. Softverska analiza termograma

Za analizu termograma na računalu razvijeni su posebni programski paketi. Označavaju se zajedničkim kraticama TIS (os Thermal Imaging Software). Za ilustraciju njihovog rada može se poslužiti programski

paket naziva MiKroSpec 3.0. i u njemu dva konkretna slučaja analize termograma jedne niskonaponske sklopke.

U prvom slučaju, aktiviranjem alata za crtanje, u izabrano područje termograma može se ucrtati neki od ponuđenih geometrijskih likova, slika 3.2.1. Svakom se liku automatski pridodaje njegov redni broj i otvara pripadajući stupac u tablici ispod termograma.

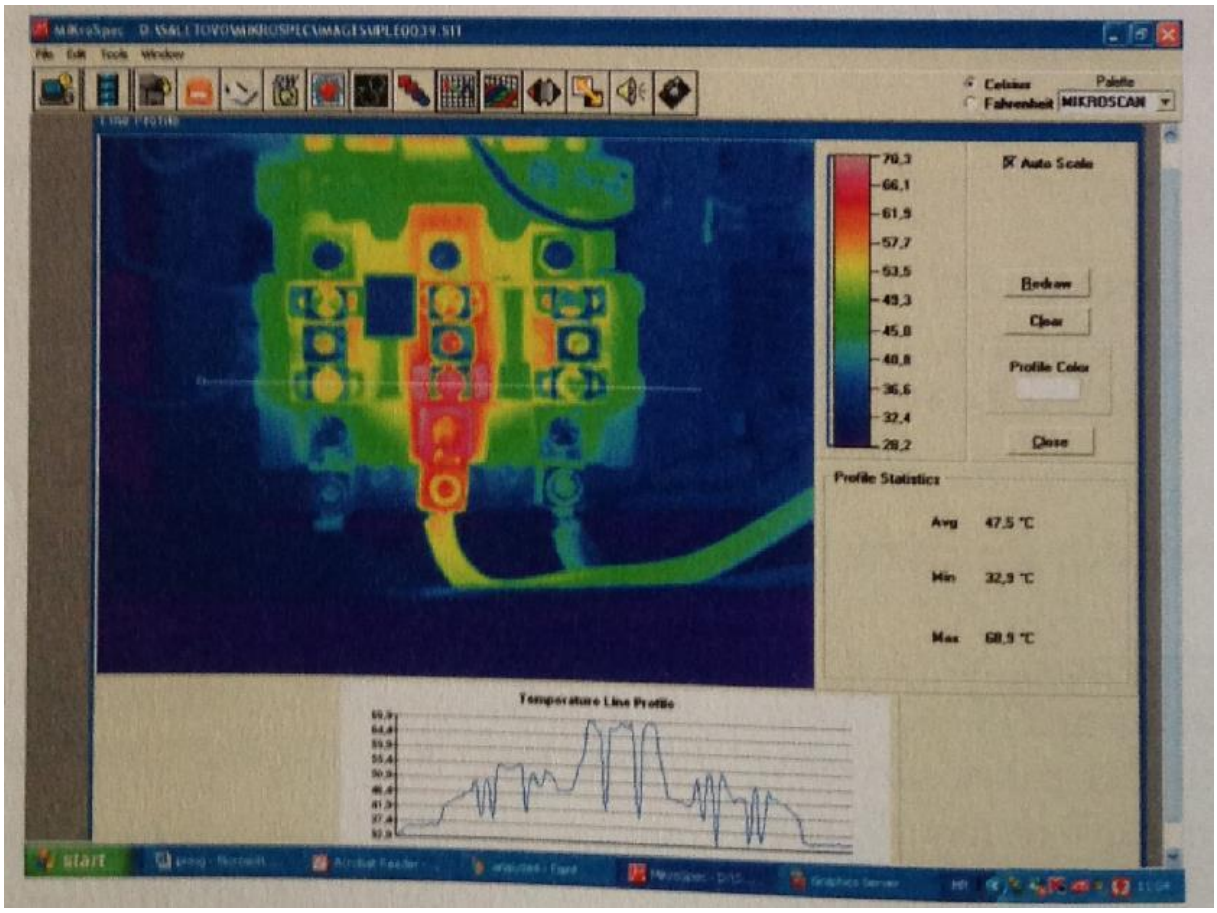
U prikazani termogram u slici ucrtano je tako osam likova i njima pripada osam stupaca u nastaloj tablici. Dva zadnja stupca ostala su prazna.




Slika 3.2.1. Izbor područja za detaljniju analizu termograma [7]

U svakom se stupcu pojavljuju podaci o najmanjoj (Min), najvišoj (Max) i srednjoj (Avg) temperaturi unutar izabranog lika odnosno područja, a kod izabrane linije uzduž nje. Pored rednog broja svakog lika u termogramu, u zagradi se pojavljuje srednja temperatura područja omeđenog likom.

U drugom slučaju, aktiviranjem ikone Line Profile i ucrtavanjem ravne linije u izabranom dijelu termograma, ispod termograma se otvara dijagram s grafom i u njemu se automatski ispisuje temperaturni profil uzduž te linije, slika 3.2.2. U tablici do termograma ispisuje se srednja, najmanja i najveća temperatura uzduž ucrtane linije.




Slika 3.2.2. Izbor linije temperaturnog profila [7]

Ucrtavanje više pravaca ili pak zakrivljenih linija u dijagramu se istovremeno ucrtavaju linije temperaturnog profila uzduž njih, a u tablicu do termograma upisuju se srednja, najmanja i najveća temperatura svake od njih. [7]

# 4. TERMVIZIJSKO ISPITIVANJE ELEKTROMOTORNOG POGONA

## 4.1. Vizualni pregled



Slika 4.1.1. Fotografija ispitivanog motora [1]

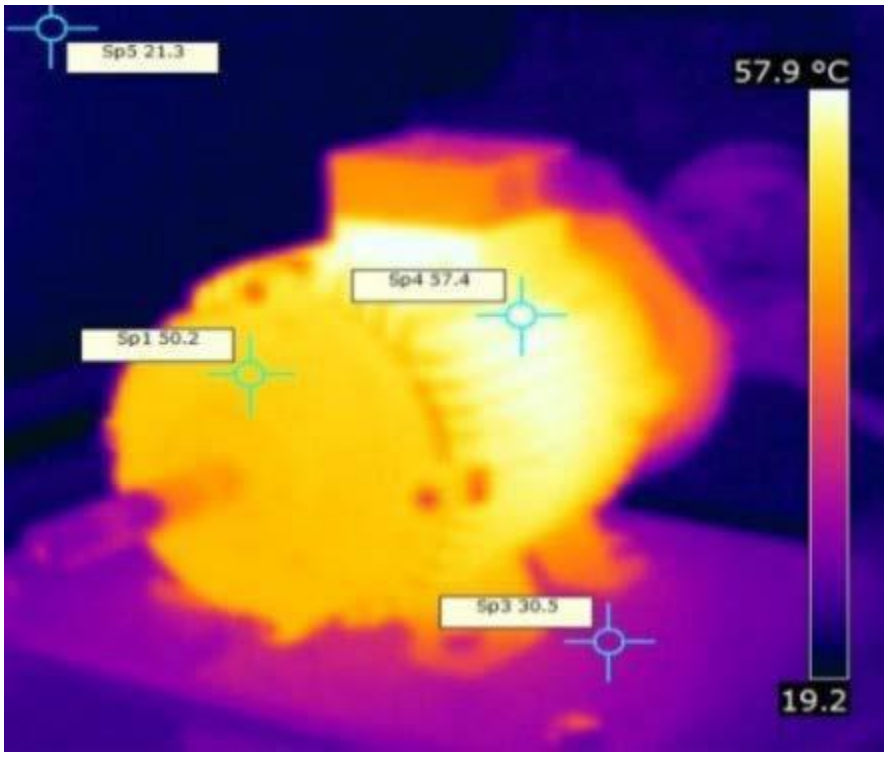
Kontrola se radi najprije izvana na kompletnom montiranom stroju (slika 4.1.1.), a zatim se motor rastavi na dijelove i prema već unaprijed definiranom planu (tablica 4.1.1.), pregledava se svaki segment stroja zasebno.

Tablica 4.1.1. Plan vizualnog pregleda statora i rotora [1]

| **Stator i rotor** | **Kontrola/Test** | **Zadovoljava** | **Broj napomene** |
|---|---|---|---|
| Jezgra statora – paket limova | Popravci, napuknuća, varovi | Da, uz napomenu | 1 |
| Statorski trofazni namot | Oštećenja na izolaciji | Da | - |
| Priključnice statora | Kontakti, izolacija | Da | - |
| Instrumentacija | Stanje kabela i veza između kabela | Da | - |
| Rotorski paket | Napuknuća, čistoća | Da | - |
| Vratilo | Napuknuća, čistoća, hrđa | Da | 2 |
| Kratkospojni prsten | Napuknuća, hrđa | Da | - |

## 4.2. Mjerenje zagrijavanja i temperature

Ispitivanja se izvode termovizijskom kamerom Prednost takvog mjerenja je rano otkrivanje kvarova bez zaustavljanja stroja. Motor u praznom hodu radi dok mu se temperatura izmjerena na kućištu ne ustali na određenoj vrijednosti (slika 4.2.1.).

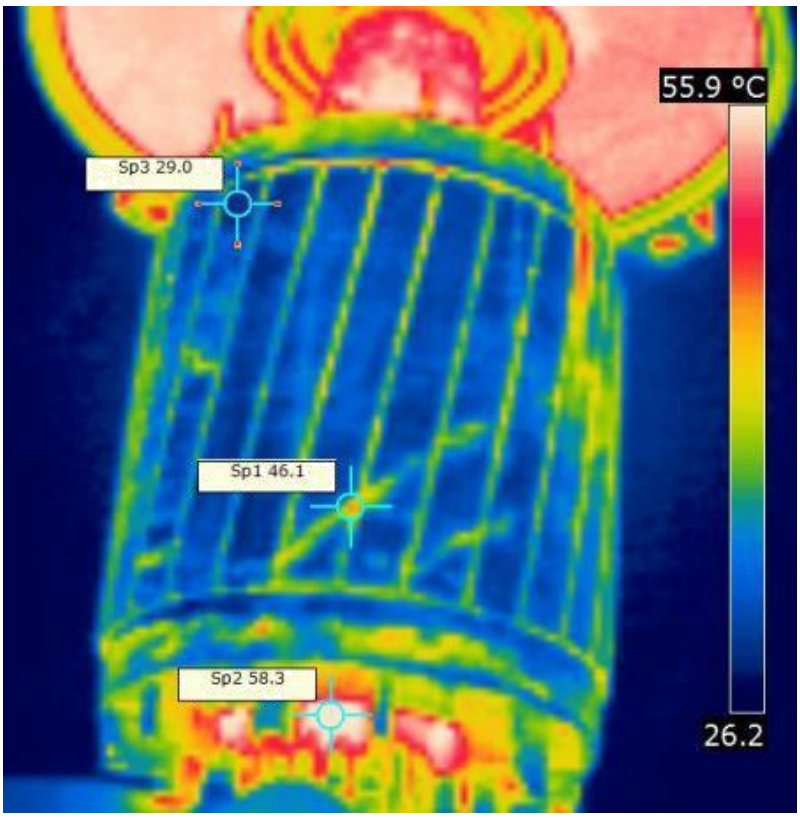



Slika 4.2.1. Termo slika motora u pogonu [1]

Vrlo brzo se otvori ležajni štit i izvadi rotorski paket (slika 4.2.2.). Važno je da se sve navedene radnje izvedu što brže kako bi se izbjeglo znatnije hlađenje stroja. Termografska slika (slika 4.2.3.) daje podatak o izmjerenoj vrijednosti temperature u određenoj točki koji se upisuje u navedenoj tablici (tablica 4.2.1.).



Slika 4.2.2. Fotografija rotorskog paketa i kaveza s perima za balans [1]




Slika 4.2.3. Termo slika rotorskog paketa i kaveza 1 min nakon zaustavljanja motora [1]

Tablica 4.2.1. Rezultati ispitivan [1]

| **Objekt mjerenja** | **(°C)** | **(°C)** | ε | **l (m)** | **Napomena** |
|---|---|---|---|---|---|
| Kavez, mjerna točka 1 | 46,1 | 20,5 | 0,95 | 2 | 1 |
| Kavez, mjerna točka 2 | 29,0 | 20,5 | 0,95 | 2 | Zadovoljava |
| Krajevi štapova rotora | 58,3 | 20,5 | 0,95 | 2 | Zadovoljava |

## 4.3. IC termografija pri kontroli elektroenergetskih postrojenja

Primjenom infracrvene termografske tehnike i infracrvenih uređaja moguće je kao što je spomenuto za vrijeme normalnog pogonskog rada, bez uspostavljanja kontakta s objektom kojeg se ispituje, otkrivanje povišenog zagrijavanja električkih i mehaničkih komponenti. Time se sprječava ozbiljniji kvar i ukazuje se na lošu ili ne odgovarajuću toplinsku izolaciju. Takvim načinom smanjuje se broj neplaniranih ispada u radu pogona. Trenutni rezultati vide se u ubrzanju dijagnosticiranja kvara i provjeri primijenjenih zahvata, uštedi energije, zaštiti pogonske opreme, kao i smanjenju cijene osiguranja (trenutno u EU). Maksimalnim povećanjem raspoloživosti opreme, uz što potvrđujemo njenu pouzdanost, ali i ukazujemo na moguća kritična mjesta, povećava se ukupno vrijeme rada pogona u procesu proizvodnje.
Ispitivanjem električne opreme najčešće dolazimo do problema uzrokovanih odnosima struje i napona. Najčešće se "toplo mjesto" javlja u električnom strujnom krugu kao posljedica nedovoljno pritegnutog, oksidiranog ili korozijom oštećenog spoja, ali i nepravilnog rada samog uređaja. Zato se infracrvena termografija primjenjuje u područjima kao što su: proizvodnja električne opreme, preventivna održavanja postrojenja (u proizvodnji el. energije, prijenosu, distribuciji, industriji i transportu).
Stanjem elektroenergetske opreme na kojoj se uočava povećanje temperature (koristi nove klasifikacije) može se primjenom Joule-ovog zakona procijeniti klasa stanja. Temeljem kriterija određenih prema poznatoj referentnoj i korektnoj temperaturi, ukoliko ih gledano pod istim radnim uvjetima, i uzimamo li u obzir dobivene temperaturne razlike izražene kroz „ΔT“ (delta T) dobivamo klase:

Kada je ΔT veći 30°C ili kada je apsolutna temperatura veća od 80°C .. .. Klasa 'A'
Zahtjeva se HITNA intervencija !

Kada je ΔT 5°C -…- 30°C .. Klasa 'B'
Zahtjeva se intervencija pri prvom zaustavljanju pogona !

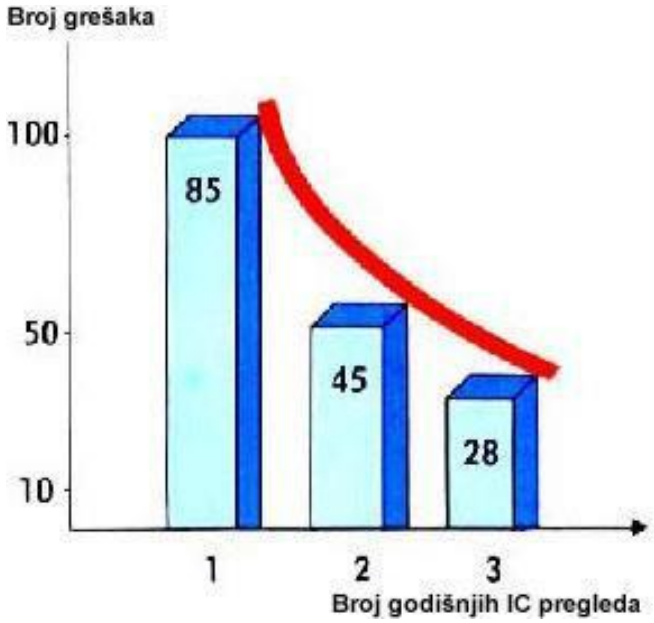
Kada je ΔT do 5°C .. Klasa 'C'
Zahtijeva se praćenje stanja i planiranje skore intervencije !

Priložena klasifikacija stanja električne opreme napravljena je prema "ITC"-u (Infrared Training Center). Kako bi odredili nazivno povišenje temperature kod opterećenja koja su manja od 100%-tnog, koristimo Jouleov zakon za izračun, što je temelj trenutnog školovanja termografista.

Njegovo korištenja se predlaže pri kontroli i inspekciji elektroenergetskog postrojenja provođenje "ciklusa održavanja" pomoću infracrvenog praćenja stanja el. opreme, on se može prilagoditi gotovo svakom industrijskom postrojenju. Tako dobivamo podatke o: tipovima popravka, broju dijelova koji su zamijenjeni, broju rezervnih dijelova, ostalim potrebama za pogonsku spremnost postrojenja. Poželjno je izvršiti ocjenu efikasnosti provedenih popravaka kao i njihovo periodičko praćenja, koje je usmjereno smanjenju kvarova, najviše onih težih. Tako obrađeni podaci omogućavaju povratnu vezu koja je potrebna u stvaranju djelotvornog sustava održivog postrojenja. Zato je metoda uvođenja preventivnih pregleda metodom infracrvene termografije dobar potez.
Dugotrajnom temeljitom analizom usmjerenom opadanju broja godišnjih kvarova s obzirom na broj godišnjih kontrola infracrvenom termografijom, došli bi do izuzetnih rezultata. Ako je godišnji broj kvarova nekakvog energetskog postrojenja 100, tada kod jedne primjene infracrvene termografije on iznosi 85, kod druge godišnje primjene iznosi 45, a pri trećoj primjeni infracrvene termografije u toj godini (što znači svaki četvrti mjesec) pada na zamjetnih 28! [4]

Naveden je dijagram kako bi to grafički mogli prikazati:

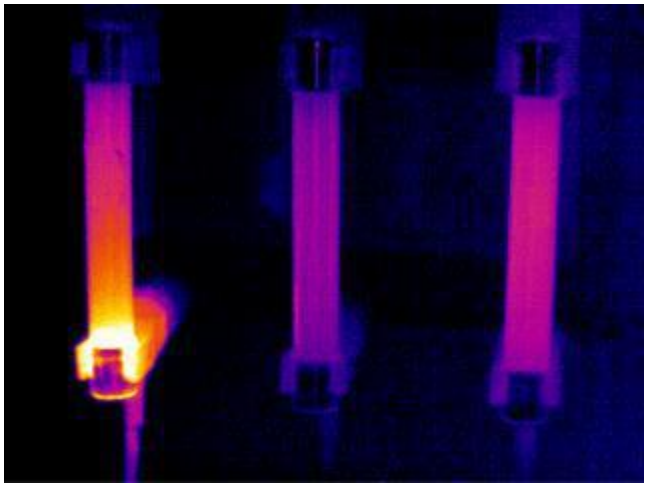
Slika 4.3.1. Godišnja analiza kvarova [4]



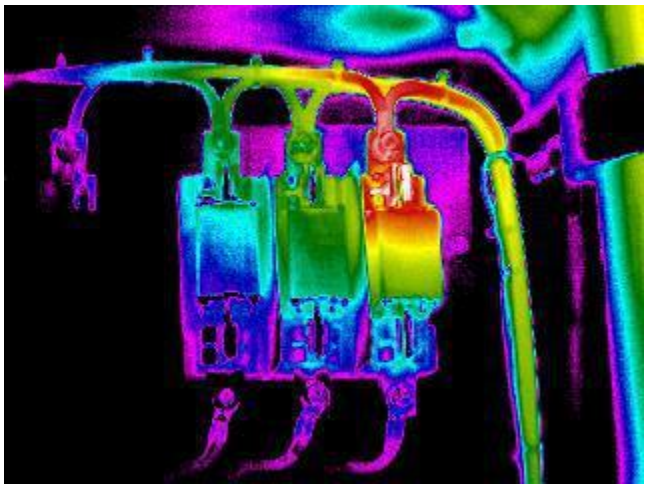

Nekoliko primjera IC termografije pri uočavanju nepravilnosti elektroenergetskog postrojenja:



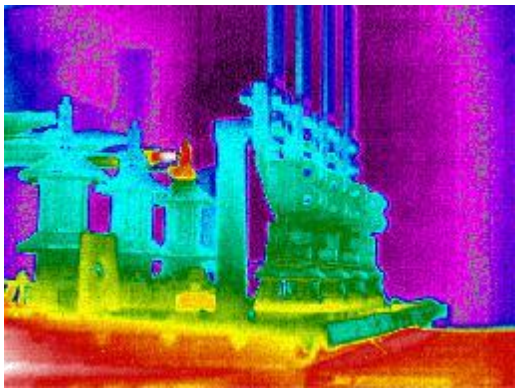
Slika 4.3.2. Izlaz 10kV iz TS na dalekovod [4]



Slika 4.3.3. Dovod VN osigurača u RO pri VN dijelu *TS* [4]



Slika 4.3.4. Dovod osigurača u RO pri NN dijelu TS [4]



Slika 4.3.5. Spoj VN kabela na 10kV strani transformatora [4]

## 4.4. IC termografska kontrola gubitaka toplinske energije

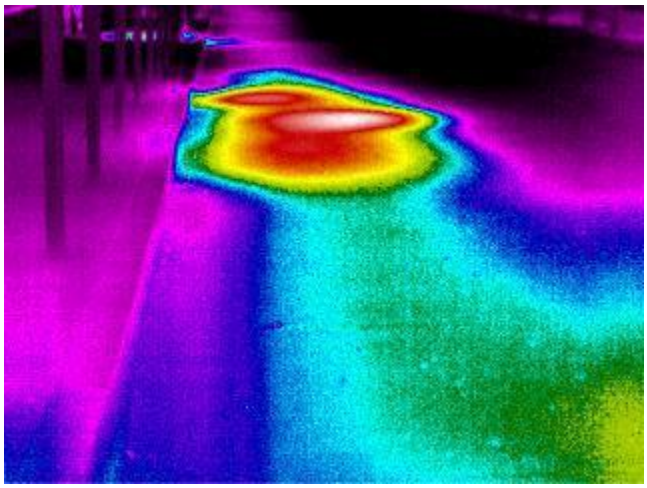
Uz pomoć IC opreme moguće je mjeriti temperaturu objekta na daljinu, saznati gdje nastaju gubici energije iz zgrada, pogonskih postrojenja, toplovodnih ili parovodnih cijevnih instalacija i elemenata (podzemnih i nadzemnih). Pojava topline u mnogim slučajevima usmjerava na greške. Termografskim uređajima se mogu dobro pratiti stanja mreže cjevovoda u procesnoj industriji, vrelovoda u toplinarstvu kod distribucije tople vode i pare, kontrola topline kotlova, kvalitete obloga peći.

Kod kontrole podzemnih instalacija mreže vrelovodnih cijevi u opskrbljivanju grada od toplane do toplinskih stanica, koje ih usmjeravaju prema stambenim objektima, infracrvena termografija dobiva značajnu ulogu. Pomoću infracrvene kamere moguće je nadzirati podzemnu instalaciju, te na osnovi računalne IC analize i usporedbe sa izvedbenom tehničkom dokumentacijom, možemo dovoljno točno utvrditi mjesto defekta - propusta, odnosno mjesto puknuća (podzemni vrelovodi nalaze se na dubini od 0.80m pa do više od 2.00m). Zna se dogoditi da dokumentacija nije potrebna jer je puknuće cijevi dovoljno veliko da se ne kontrolirano grije velika površina iznad defekta. Potrebno je pri ovakvom praćenju gledati na "vanjske utjecaje", oni mogu jako "iskriviti" IC sliku tako da možemo doći do krivih rezultata kod interpretacije (npr. utjecaj sunčeve energije na mjerenu površinu, unaprijed parkirano vozilo na spojevima cijevi vidljivo je i do vise sati, drveće pokraj puta, razvodne kanalizacijske cijevi i propusti kanalizacije, refleksija rasvjetnih lampi, vlaga neke površine, utjecaji vjetra i dr.). Zbog toga u završnoj analizi IC zapisa kod kreiranja protokola

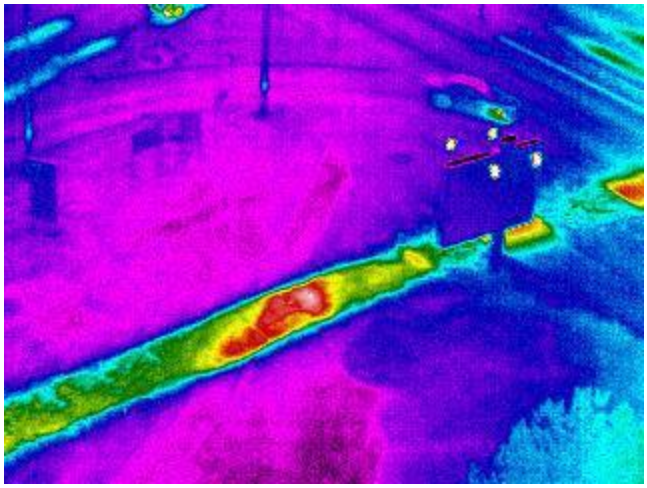
za toplinske podzemne mreže koje se snimaju u različitim godišnjim dobima, danju ili noću, o "vanjskim utjecaju" te emisiji treba posebno dati pažnju. Ponekad je nužno da koristimo druge metode dijagnosticiranja, primjerice prislušni uređaj koji možemo naći pod nazivom „echo-sonder“, i usporediti njihove rezultate. Najviše zbog takovih hitnih slučajeva pri intervenciji je neophodno dobro poznavanje svih korisnih metoda, a posebno infracrvene tehnike.

Kako je ova metoda prilično nova, pri praćenju stanja vrelovodnih podzemnih instalacija bitno je snimiti "početno stanje" kako bi kontinuirano pratili i postupno ažurirati svaku promjenu (zahvati pri otklanjanju kvarova). Na taj se način mogu prikupiti podaci o kvaliteti izolacije, isto tako i definirati gubici. Praćenje je moguće pokrenuti na više načina. Uz napomenu da se najbolji rezultati dobivaju snimanjem iz zraka! [4]

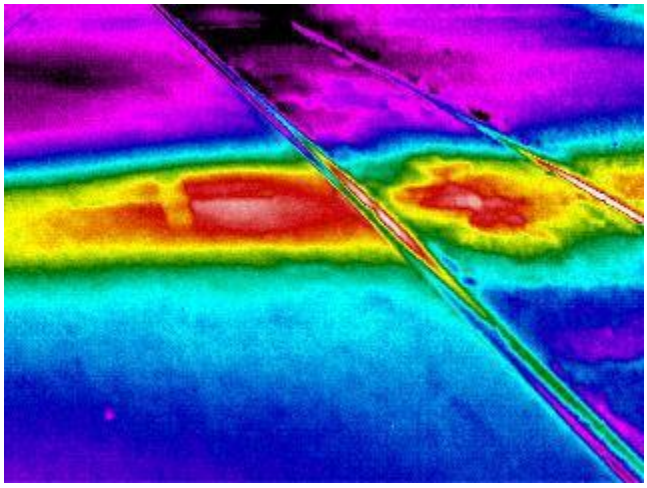
Neki primjeri registriranih nepravilnosti IC termografijom:



Slika 4.4.1. Propust magistralnog podzemnog Vrelovoda [4]



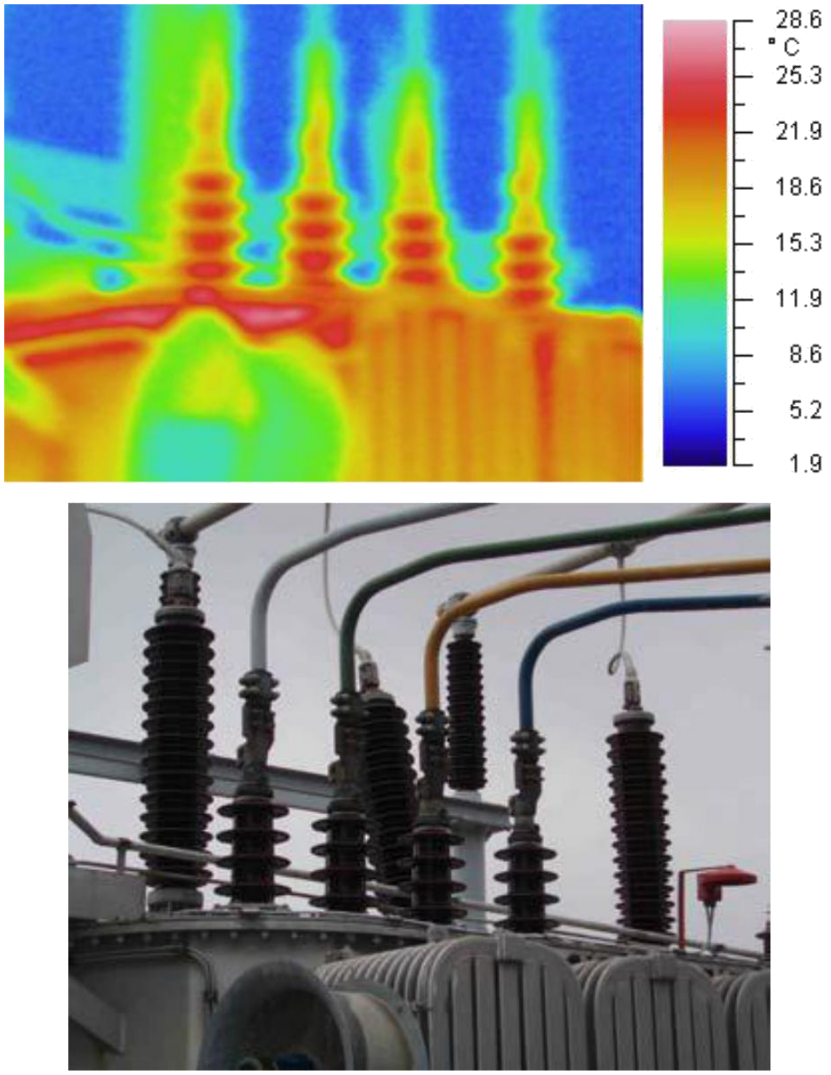
Slika 4.4.2. Pogled iz helikoptera na propust magistralnog vrelovoda [4]



Slika 4.4.3. Propust instalacije ispod tramvajskih Tračnica [4]

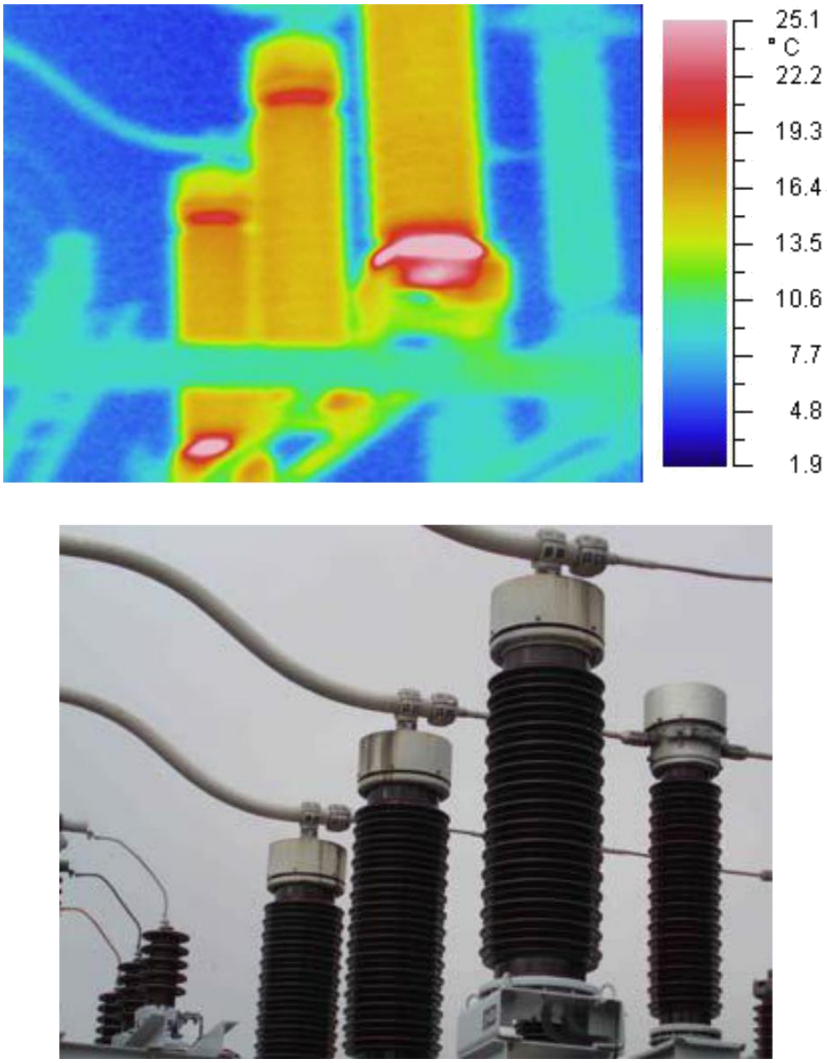
Primjeri termovizijskih ispitivanja različite opreme predočeni su na slikama 4.4.4.-4.4.12. Termogram na slici 4.4.4. prikazuje energetski transformator 110/20 kV i njegove provodne izolatore 20 kV.

Iz termograma može se iščitati da ne postoje nedozvoljena prekoračenja temperature na vidljivim dijelovima energetskog transformatora.



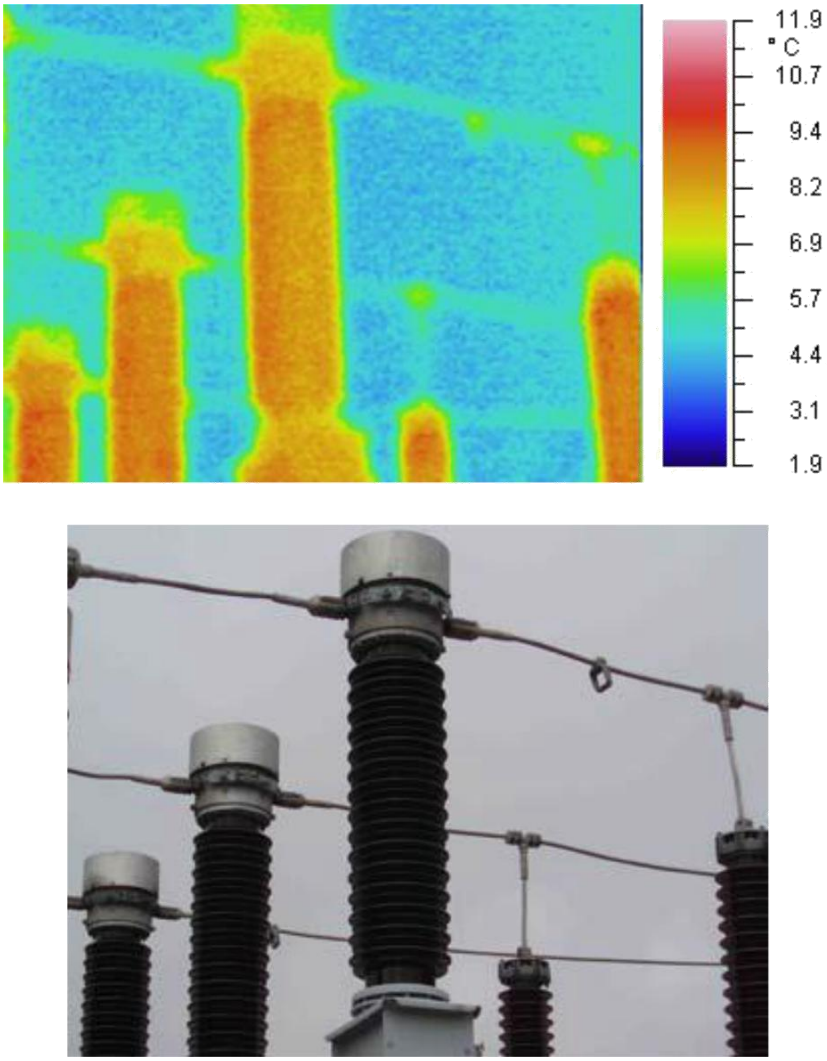

Slika 4.4.4. Termogram energetskog transformatora snimljen s stražnje strane [5]

Na slici 4.4.5. prikazan je termogram naponskih mjernih transformatora u transformatorskom polju. Iz termograma se može uočiti da ne postoje nedozvoljena temperaturna prekoračenja. Povećano toplinsko zračenje može se uočiti u podnožju transformatora što je uobičajeno u slučaju naponskih mjernih transformatora i povezano je s njihovom konstrukcijom.




Slika 4.4.5. Termogram naponskih mjernih transformatora u transformatorskom polju [5]

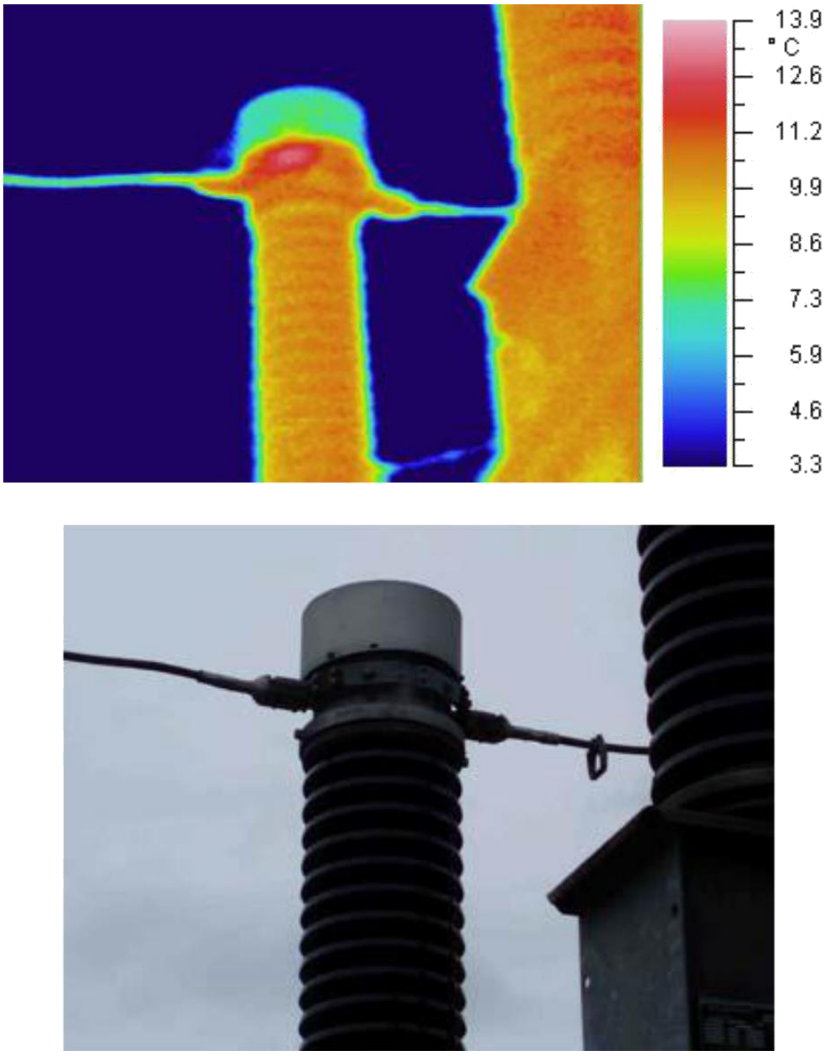
Na slici 4.4.6. prikazani su termogrami strujnih mjernih transformatora snimljeni u transformatorskom polju. Ne postoje temperaturna prekoračenja koja bi upućivala na postojanje toplih točki na spojevima.




Slika 4.4.6. Termogram strujnih mjernih transformatora u trafo polju 1 [5]

Na temelju termograma sa slike 4.4.7. može se zaključiti da postoji temperaturno prekoračenje uslijed lošeg spoja strujnog mjernog transformatora u vodnom polju u jednoj fazi.

Pojačano zagrijavanje u odnosu na normalnu temperaturu iznosi oko 2ºC. Na temelju vrijednosti prekoračene temperature potrebno je strujni mjerni transformator i dalje pratiti te otkloniti loš spoj prilikom prve revizije.

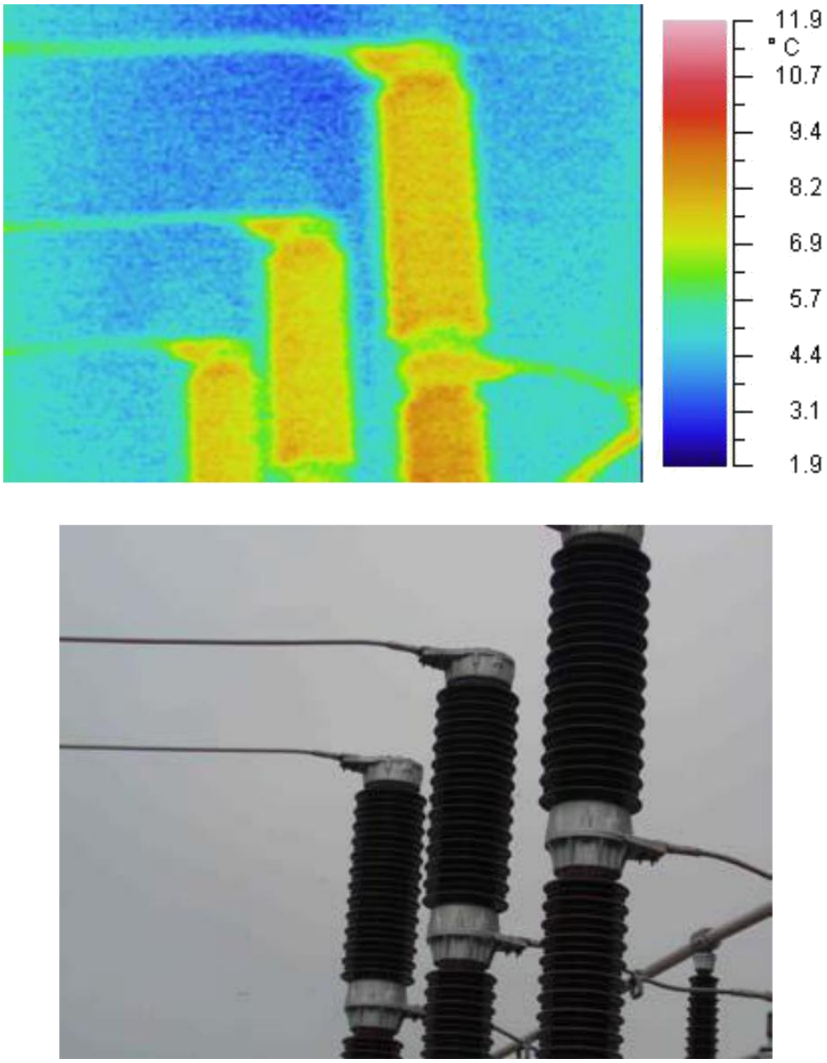



Slika 4.4.7. Termogram strujnog mjernog transformatora u vodnom polju [5]

Na slici 4.4.8. prikazani su termogrami visokonaponskih prekidača u transformatorskom polju.

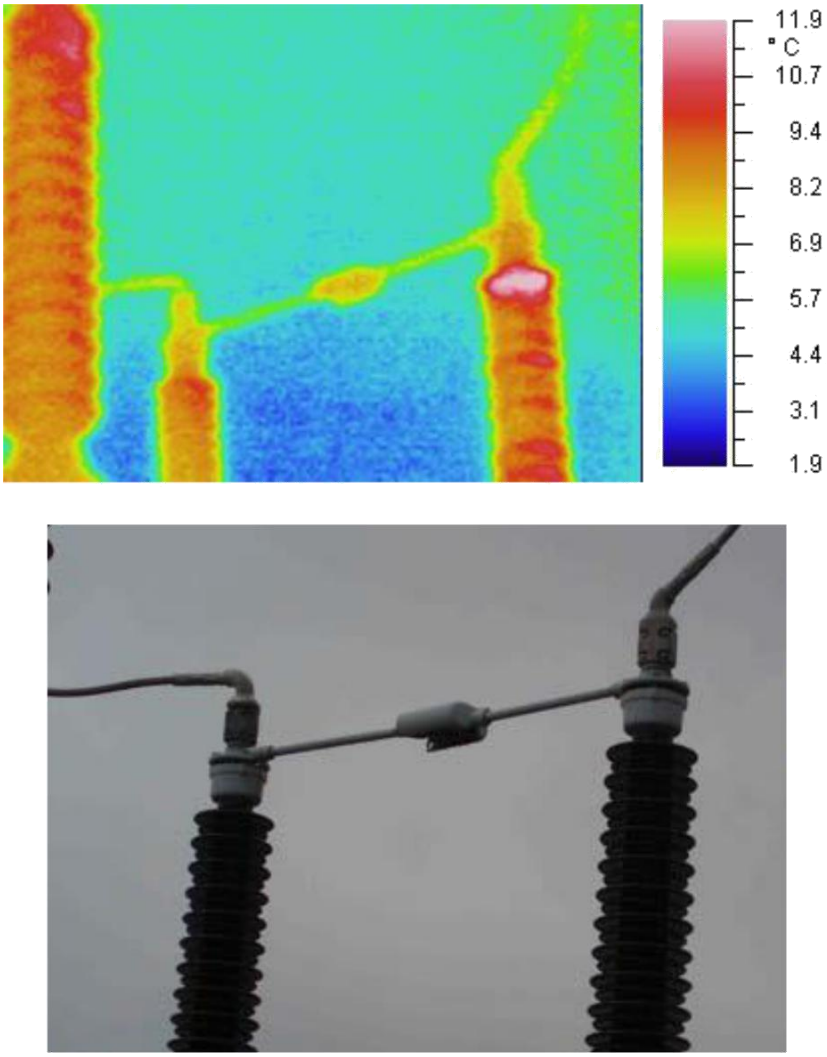
Termovizijsko ispitivanje obuhvaća spojna mjesta prekidača na sabirnice s obije strane kontakta.

Termogram pokazuje da ne postoje temperaturna prekoračenja veća od preporučenih.



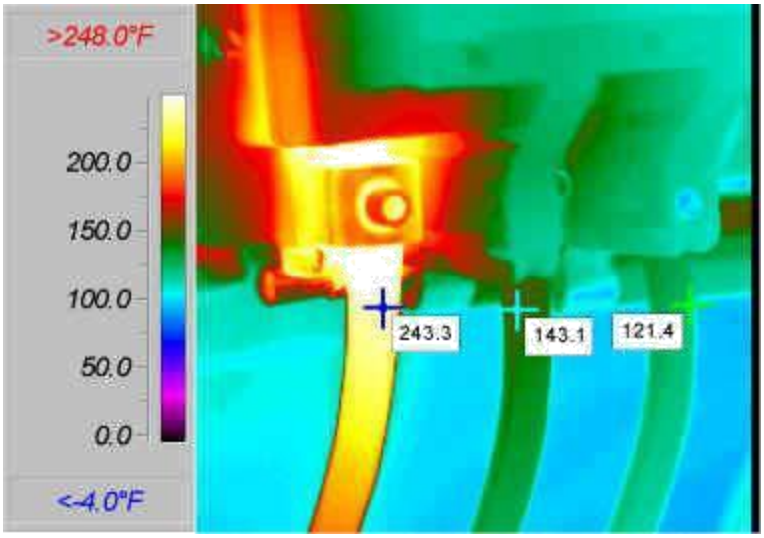

Slika 4.4.8. Termogram visokonaponskih prekidača u trafo polju 1 [5]

Na slici 4.4.9. prikazan je termogram rastavljača u transformatorskom polju. Na termogramu je vidljivo prekoračenje temperature ispod glave rastavljača u porculanskom dijelu. Na spojevima rastavljača s sabirnicama te kontaktima nije zabilježeno prekoračenje temperature.



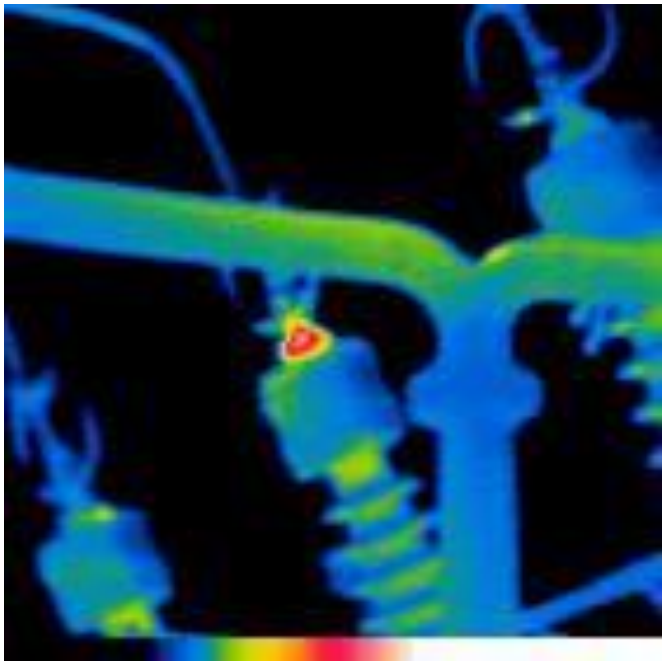

Slika 4.4.9. Termogram visokonaponskog rastavljača u transformatorskom polju [5]

Prekoračenje temperature u odnosu na normalnu iznosi 2ºC. Nedozvoljeno prekoračenje se ne može dovesti u vezu s lošim spojevima već s mogućim fizičkim oštećenjem. Na temelju vrijednosti prekoračene temperature predlaže se praćenje rastavljača te njegova kontrola prilikom prve revizije.

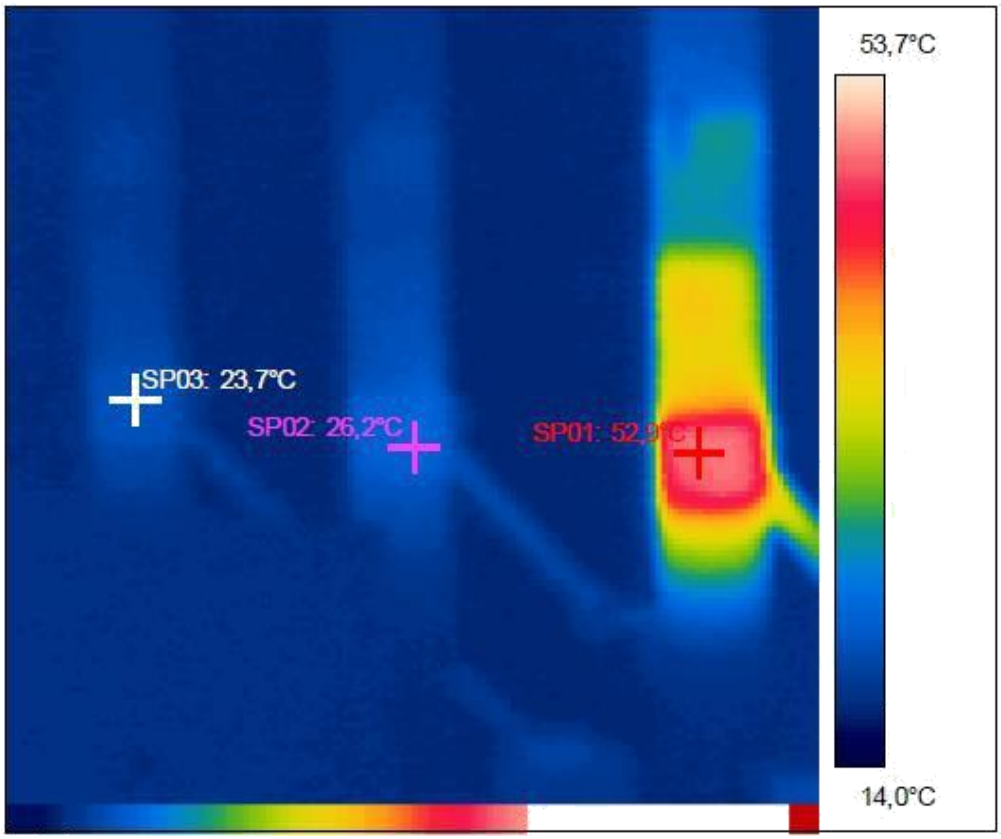



Slika 4.4.10. Kvar na spoju otkriven termovizijskom kamerom [5]

Termovizijska ispitivanja mogu biti izravna i neizravna. Kamere za izravna ispitivanja su skuplje i osjetljivije. [5]



Slika 4.4.11. Izravno ispitivanje – očitanje temperature [5]




Slika 4.4.12. Neizravno ispitivanje – bez očitanja temperat [5]

## 4.5. Dijagnostika stanja energetskih mjernih transformatora i drugih elemenata energetskih postrojenja u elektrodistribuciji

Opskrba kupaca električnom energijom na području korištenja ED Bor vrši se preko 9 distributivnih TS 35/10 kV. Područje korištenja ED Bor je specifično iz više razloga: u gradu je oprema izložena vibracijama, s druge strane djelovanju kisele sredine zbog čega dolazi do korozije i nemogućnosti u opskrbi kupaca el. energijom.

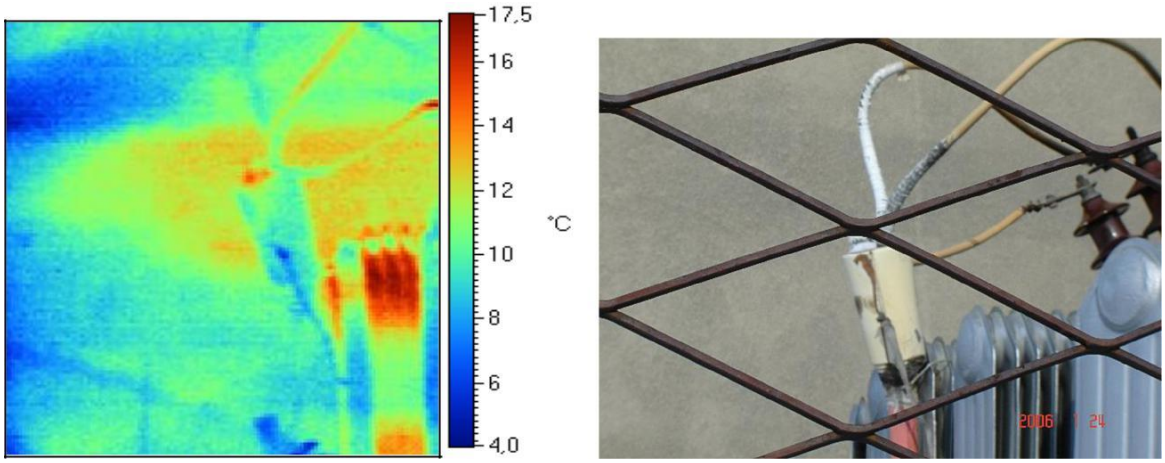
U području crnog vrha dolazi do izlaganja vremenskim neprilikama i niskim temperaturama, što dovodi do čestih kvarova. Slična situacija je i u okolnom naselju.

Prema statistikama ED Bor, na njenom području tijekom jedne godine dolazi do kvara na barem jednom energetskom transformatoru 35/10 kV. Troškovi popravka su najčešće oko 130 000 kuna. Automatiziranim termovizijskim nadzorom takvi kvarovi bi gotovo u potpunosti nestali. Tako bi i prekidi u napajanju pri ispadu transformatora bili eliminirani.

S ciljem utvrđivanja trenutačnog stanja opreme u ED Bor te njegovog analiziranja sa aspekta eksploatacije preventivnog trajnog i trenutnog održavanja izvršena su prethodna termovizijska ispitivanja energetskih objekata ED Bor-a, posebice trafostanica 35/10 kV.

Usmjereno na određivanje trenutnog stanja opreme i njegove analize sa aspekta eksploatacije preventivnog tekućeg i trenutnog održavanja, izvršena su prethodno planirana termovizijska snimanja elektroenergetskih objekata u Elektrodistribuciji Bor.

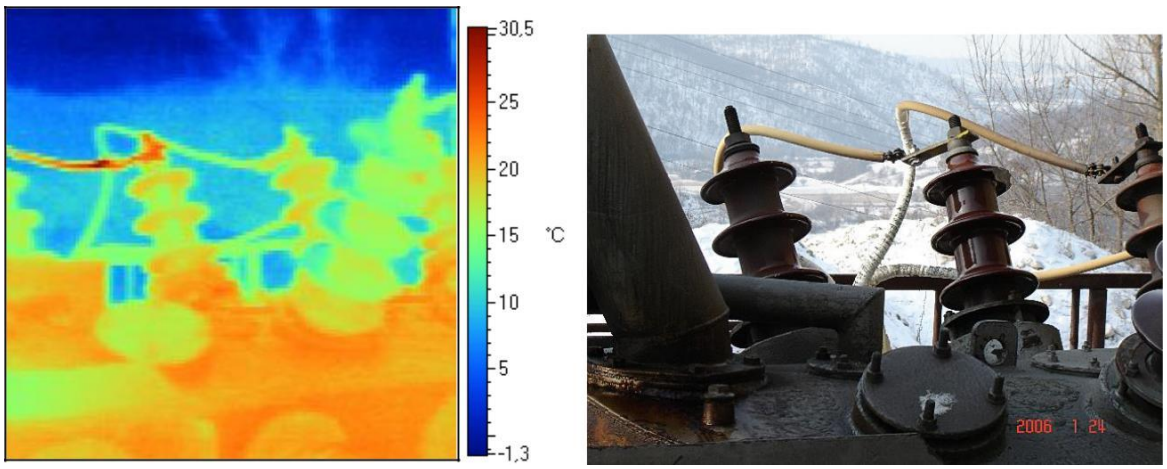
Na slici 4.5.1. prikazana je termovizijska i fotografska snimka kablovske glave 35 kV kod koje se uočava grijanje tijekom struje curenja, te je neophodna njena zamjena.




a) b)

Slika 4.5.1. Termovizijski a) i vidljivi b) fotografija kablovske glave TS 35/10 kV [12]

Na slici 4.5.2. prikazani su termovizijska i fotografska snimaka izolatora jedne faze transformatora 35/10 kV koji je oštećen tijekom zagrijavanja lošeg kontakta. [12]




a) b)

Slika 4.5.2. Termovizijski a) i vidljivi b) snimak kontakta izolatora 3 faze TS 35/10 kV [12]

## 4.6. Aktivna i pasivna termografija

Aktivna termografija služi za dobovanje toplinskih slika objekata koji su u termičkoj ravnoteži s okolinom. Imaju istu temperaturu kao okolina. Da bi se dobili upotrebljivi termogrami, ispitivane objekte se treba dodatno zagrijati. Temperatura im se mora razlikovati od okoline.

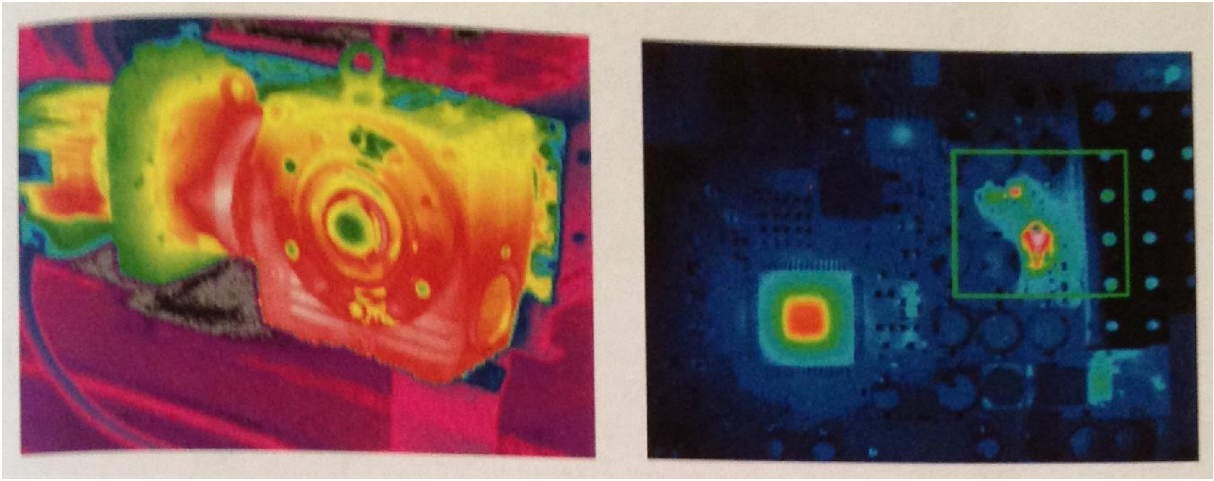
Ispitivani uzorak se toplinski pobudi, a pobuđivanje se može izvesti na više načina. Najčešće je impulsno, periodičko i vibracijsko.

Kod vibracijske pobude se kao stimulator ne koristi izvor toplinske energije već mehanički vibrator koji mehaničku energiju pretvara u toplinu. Aktivna termografija našla je primjenu u ispitivanju raznih vrsta materijala.

Pasivna termografija služi za dobivanje termografskih slika objekata koji nisu u termičkoj ravnoteži s okolinom. Temperatura im se razlikuje od okolne.

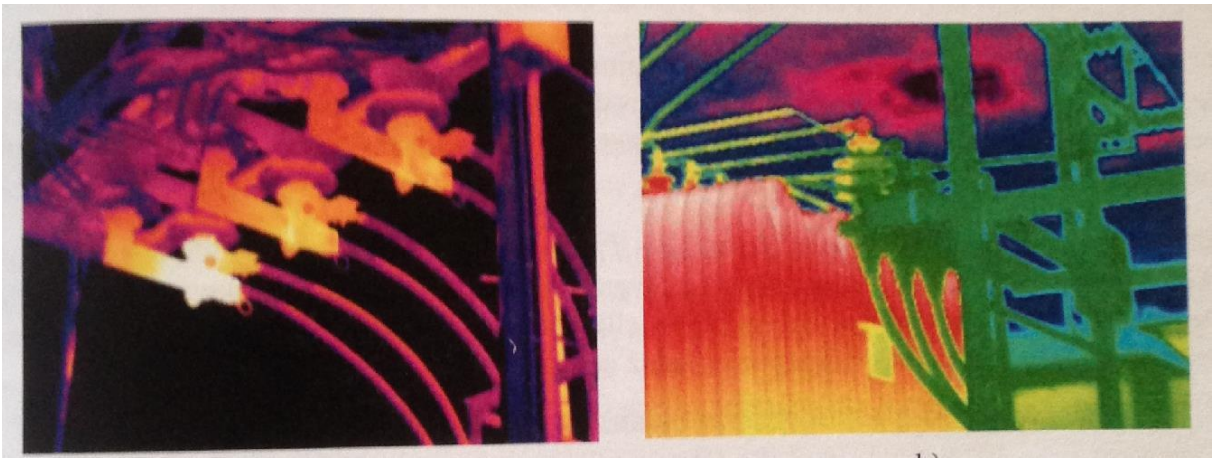
Rabi se snimanje uređaja koji se zagrijavaju u normalnom pogonu, a dobiveni termogram njihovih površina ukazuju na opterećenost u radu. Uočavanje mjesta s izraženim temperaturnim kontrastima pomaže pravovremenom otkrivanju kritičnih stanja i nepravilnosti u radu.

Primjeri primjene pasivne termografije prikazani su slikama 4.6.1. i 4.6.2. Iz njih se mogu uočiti pogonski uvjeti u kojima rade promatrani objekti. [7]



a) b)

Slika 4.6.1. Termogram elektromotora s reduktorom (a) i tiskane pločice (b) [7]



a) b)

Slika 4.6.2. Termogram dalekovodnog priključka (a) i energetskog transformatora (b) [7]

Pored prikazanih primjera iz elektrotehnike, pasivna termografija našla je primjenu u gotovo svim industrijskim granama, u petrokemiji, energetici, graditeljstvu, zaštiti okoliša, medicini, veterini, u policijske i vojne svrhe, itd. [7]

# 5. ZAKLJUČAK

Termovizija svojom pojavom otvara nove poglede na mnogo toga, a najviše na tehnologiju, kako na postojeću tako i na buduću. IC kamere koje se primjenjuju u energetici razvijane su tijekom vremena i prešla iz masivnih uređaja u kompaktne i naprednije uređaje. Na karakteristike IC kamere utjecao je razvoj tehnologije i razvijanje novih materijala. Razvijanjem tehnologije i materijala ne samo da se smanjio volumen i masa kamere, nego se unaprijedio način obrade termograma, povećala sigurnost dobivenih rezultata, pojavio novi spektar filtera i još mnogo toga što je otvorilo nove puteve u razvoju termovizije.

Termovizija se kroz svoj razvoj koristila isključivo za trenutni prikaz kvara, koji se gleda kroz toplinu, koja svojim porastom prikazuje gubitak energije odnosno kvar i njegov nastanak.
Danas se termovizija usmjerava na širi i dugotrajniji rad, usmjeren na održavanje u obliku trajnog nadziranja postrojenja, uz koji se pojavila ideja o automatizaciji sustava i samostalnoj regulaciji pogona. Naravno sustav je još nedovoljno razvijen da bi funkcionirao bez čovjeka, ali zasigurno olakšava, unapređuje, te miče granice tehnologije i pogleda na održavanje i funkcioniranje elektroenergetskih postrojenja.

# LITERATURA

[1] Abraham M., Tomljenović V. :Primjena dijagnostičkih metoda ispitivanja u održavanju niskonaponskih asinkronih motora; poglavlje 4.“Postupak ispitivanja“

[2] P. Blecich, B. Franković, K. Lenić: Primjena termovizijska infracrvene kamere u termotehnici 29.01.2009

[3] Igor Vujović: Nove tehnologije u dijagnostici i upravljanju 23.05.2013

[4] Krešimir Petrović, Ing.el.teh., Level 2 termografist: Infracrvena termografija (termovizija) pravi izbor za redovno održavanje

[5] Igor Kuzle: Održavanje elektroenergetskog sustava; Dijagnostika u održavanju elemenata elektroenergetskog sustava; poglavlje 7.“Termovizijska ispitivanja“; Zagreb, 2013.

[6] Ljubiša Čičkarić: Primjena termografije u dijagnostici toplinskih stanja energetskih transformatora; 2008-2009

[7] Zdravko Valter: Procesna mjerenja; Školska knjiga Zagreb 2004

[8] http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_EN.pdf

[9] http://www.enhems-buildings.fer.hr/_news/60859/Glavas_OS.pdf

[10] http://www.elsihitech.hr/docs/1558585_hr.pdf

[11]https://www.fsb.unizg.hr/termolab/nastava/Infracrvena%20termografija_Vjezbe_FSB_Boras.pdf

[12] Zoran Stević, Mirjana Rajčić Vujasinović, Dejan V. Antić: Računalno upravljan termovizijski sustav monitoring i dijagnostika stanja u elektrodistribucijskom postrojenju; 2008

PRIMJENA TERMOVIZIJE U ODRŽAVANJU ELEKTROMOTORNIH POGONA

## SAŽETAK

Uvodno je opisan termografski postupak kao dio složenog sustava koji obuhvaća: zračenje tijela u infracrvenom spektru, prijenos zračenja od mjernog objekta do kamere, pretvorbu infracrvenog zračenja iz analognog u digitalni signal, prikazivanje termograma na ekranu te ljudsku interpretaciju termograma.

Opisani su dijelovi termovizijske kamere i njihove karakteristike koje su bitne da bi shvatili način rada kamere. Svaki dio postrojenja ima različite funkcije pa moramo znati odabrati kameru adekvatnu djelu postrojenja i načina obrade termograma.

Povezivanje termovizijske kamere sa računalom zahtjeva programsku podršku koja nam daje rezultate snimanja na kojima možemo uočiti kvar ili ga predvidjeti. Kamera može biti povezana sa računalom i za vrijeme rada termovizijske kamere, te biti dio pogonskog sustava.

Primjena termovizijske kamere u elektroenergetskom sustavu daje zapažene rezultate uočavanjem gubitaka energije i kvarove na radnim strojevima.

Ključne riječi: termovizija, removizijske kamere, termogram, gubitak energije, kvar, pogonski sustav, elektroenergetski sustav

APPLICATION OF THERMOVISION IN ELECTRICAL DRIVES

## SUMMARY

In the introduction is described a thermographic process as part of a complex system that includes: body radiation in the infrared spectrum, transmission of radiation from the measuring object to the camera, infrared radiation conversion from analog to digital signal, showing thermograms on the screen and the human interpretation of thermograms.

Parts of termovision camera and their important features are desicribed so that the functioning of the camera is understood. Every part of the installation has different functions so it is important to choose a camera that is adequate to a certain part of the installation and the method in which the termogram is processing.

Connecting thermal imaging camera to a computer requires software support that gives us the results of recording in which we can see or predict a malfunction. The camera can be connected to a computer while recording as a part of a drive system.

The implementation of a thermovision camera in the electroenergetic systems gives remarkable results in detection of energy losses and machine malfunctions.

Keywords: thermography, thermal imaging cameras, thermogram, energy loss, malfunction, power system

# ŽIVOTOPIS

Rođen sam 14.3.1993. godine u Osijeku, Republika Hrvatska. Odrastao sam i živim u rodnom gradu Osijeku sa roditeljima i dvije sestre.

Školovanje sam započeo 1999. godine u osnovnoj školi „Ljudevita Gaja“ u Osijeku.

Nastavak školovanja sam proveo u srednjoj školi „Tehnička škola i prirodoslovna gimnazija Ruđera Boškovića“ u Osijeku smjer „Grafički urednik dizajner“, koji sam upisao 2007. godine. Nakon završetka srednje škole polagao sam državnu maturu i 2011. godine upisao „Elektrotehnički fakultet“ u Osijeku smjer „Elektroenergetika“.