

# ИСПИТИВАЊЕ ПРИРОДНОГ И ПРИНУДНОГ ХЛАЂЕЊА КОМПОНЕНТИ СИСТЕМА ЕЛЕКТРОНИКЕ

## INVESTIGATION OF NATURAL AND FORCED CONVECTION COOLING OF ELECTRONIC SYSTEM COMPONENTS

*Марија С. Тодоровић, Љиљана Симић и Бранко Мијајковић,  
Пољопривредни факултет,  
Лабораторија за термодинамику и термомехнику, Београд*

*Еволуција технологија хлађења у електроници је од кључног значаја за даљи успешан развој све моћнијих компоненти електронике. Нивои расипања снаге и топлоћни притоци електронских система су експериментално проучавани, мерењем температуре површина вишних елемената система електронике и расхладног ваздуха у режимима хлађења природном и принудном конвекцијом. Простирање топлоте у систему је анализирано на основу експерименталних резултата и расположивих података одређених нумеричким симулацијама, као и карактеристичних корелација за опис преноса топлоте Нуселтовог и Грасхофовог броја.*

*The evolution of cooling technology for electronic equipment is of crucial importance for further successful developing more and more powerful solid-state devices. The levels of overall power dissipation and heat fluxes in electronic systems have been experimentally studied by the measurement of electronic elements surfaces and air temperatures in natural and forced convection air cooling. Heat transfer behaviour is discussed on the basis of experimental results, and available numerical calculations data, as well as heat transfer characteristics Nu and Gr numbers correlations.*

**Кључне речи:** хлађење у електроници; расипање топлоте; мерење температуре површина; природна и принудна конвекција; провођење топлоте

**Key words:** electronic cooling; surface temperature measurements; natural and forced convection; heat conduction

### 1. Увод

У области производа са интегралним колима, поузданост је веома важан параметар квалитета. Поузданост рада таквих система веома зависи од термичких напрезања. Везе елемената разних материјала различитих термичких дилатација у условима високих температура, неуниформних температурних поља и посебно њихових динамичких промена, трпе термичка напрезања, често стресна, што доводи временом до оштећења односно отказа рада система. За свако повишење температуре од 10 К искуство говори да треба очекивати двоструко већу брзину деградације. Зато не чуди чињеница што простирање топлоте постаје све важније за

развој технике компонената електронике. Развој и унапређење специфичног термотехничког инжењерства за интензификацију и контролу процеса простирања топлоте добија све више значај једне од кључних тема за отварање нових простора за наставак микроелектроничке револуције<sup>1</sup>.

Одговарајуће термичко пројектовање треба да обезбеди да радне температуре чипова не буду у трајном раду на температурама вишим од 80 до 100°C. Осим тога, важно је да се смање, колико је год могуће, термички напони у самој носећој структури чипа и у његовим носећим компонентама као што су керамички супстрати и плоче штампаних кола.

## 2. Поставка проблема

На слици 1 су илустровани структурни нивои меродавни за праћење појава преноса топлоте у систему компоненти електронике. Топлота произведена у најмањој компоненти система – чипу треба да се спроведе дуж вишеструких путева кондукције унутар модула, савлађујући унутрашње термичке отпоре. Унутрашњи термички отпори провођењу топлоте су сложена функција структуре и особина материјала који чине модул. Са површине модула топлота прелази на расхладни флуид – ваздух. Ваздух се при том загрева, специфична густина му опада, и као резултат деловања привлачне силе Земљине теже у пољу различитих густина, долази до наступа природног струјања ваздуха и прелаза топлоте конвекцијом са површине плоча са штампаним колима. Модули који се налазе на местима где струја ваздуха излази из система, раде у термички најтежим условима. Тако технике за побољшање преноса топлоте постају од пресудног значаја за решавање проблема све већих интензитета дисипације топлоте ( $W/m^2$ ) елементарних компонената електронике, а посебно њихових све гушћих паковања.

У појединим системима, поред специфичне густине дисипационог флукса, густина структуре компонената на плочи представља препреке и изазивајући локалне поремећаје струје ваздуха умањује конвективни пренос. Пренос топлоте зрачењем такође је присутан, тако да се заправо ради о спрези сва три облика простирања топлоте, провођењу, конвекцији и зрачењу. На слици 2 је, илустрације ради, шема појава простирања топлоте дисипације – расипања у систему штампаних плоча.

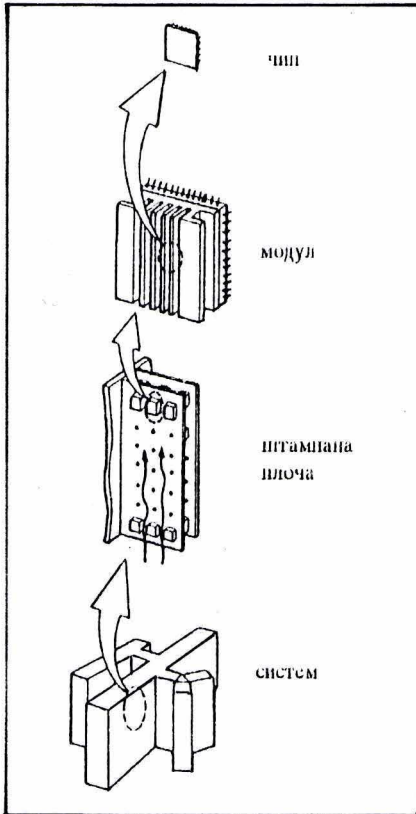
Све ово указује да није једноставан задатак пројектанта да предвиди расподелу и интензитете природне конвекције успостављене различитим изворима топлоте компонената електронике у датом систему који се налази затворен у кућишту – кабинету. Ипак данашњи ниво разумевања процеса преноса топлоте конвекцијом, не само принудном већ и природном, и развијене методе нумеричке симулације појава преноса топлоте омогућују спровођење термичких анализа правремено још током фазе развоја пројектовања система, тако да експериментални прилаз остаје за проверу термичког понашања сложене структуре конструкције система, као и за даља унапређења нумеричких модела односно прилаз оптимизацији система.

## 3. Физички и математички модел

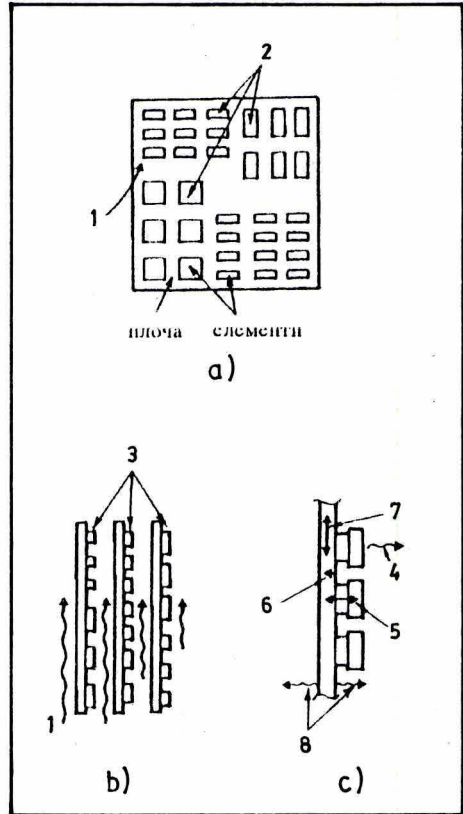
Шема физичког модела упрошћеног система вертикалне штампане плоче је на сл. 3. Интензитет одавања топлоте штампане плоче ваздуха зависи од интерак-

<sup>1</sup> *Због све веће стрављиве улоге у борби за глобалну доминацију иржичијем, иростирање шойлоше и хлађење у електроници стадају међу најважније теме у области истраживања.*

ције прелаза топлоте конвекцијом и провођења топлоте у два међусобно управна правца (x – правца, сл. 3А, и y – правца на сл. 3Б) у елементима без извора топлоте.



Слика 1. Структурни нивои композиција електронике



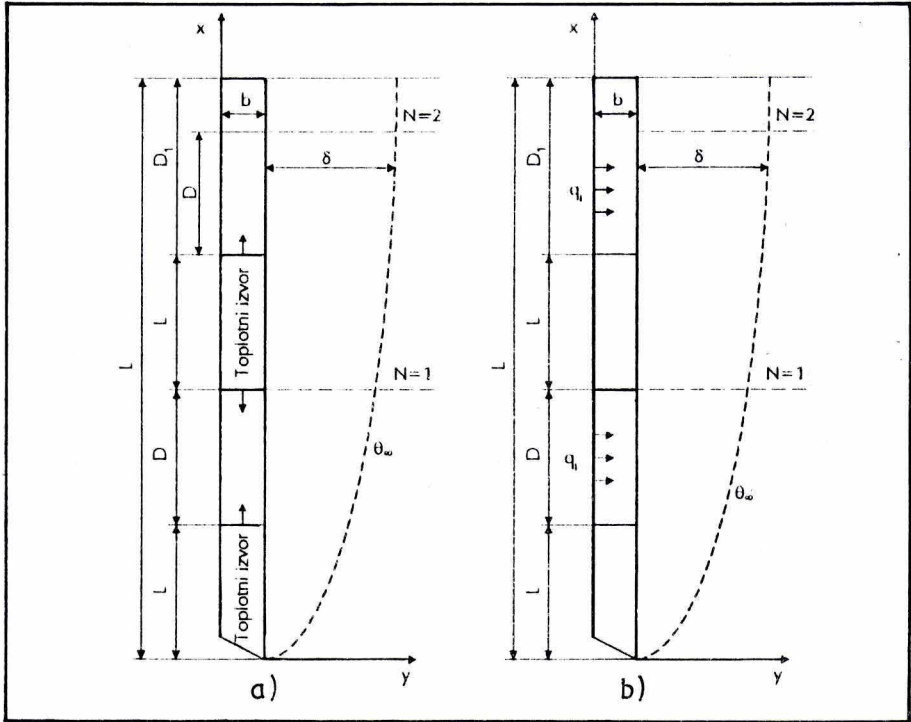
Слика 2. Шема ширења топлоте дисипације у систему штампаних плоча; а) предња страна плоче, б) низ плоча, в) ширење топлоте у систему; 1 – конвекција, 2 и 3 – контакти, 5, 6 и 7 – провођење, 8 – зрачење

У плочи се наизменично налазе делови електронских елемената са топлотним изворима – расипањем топлоте и делови носеће структуре плоче који учествују у одвођењу топлоте примљене од додирних електронских елемената са изворима топлоте. У случају (А) основе елемената без извора топлоте су адијабатне и доминантни правац провођења топлоте је паралелан површини. У случају (Б) основе елемената без извора топлоте су изотермске, а провођење топлоте је управљено нормалом на површину. На једној плочи се већином налазе комбинације оба случаја, тако да је провођење топлоте у њима ступњевито и у стационарном режиму је уравнотежено природном конвективном струјом ваздуха дуж површине вертикалне плоче дужине  $L$ .

За дати физички модел (А/В), елементи са извором топлоте и без њега су једнаке дужине, истих температура изотермских површина и истих термофизичких особина материјала свих негрејаних елемената. Аналитички опис овако дефинисаног модела вертикалне плоче даје следећи систем једначина [3]:

– једначина континуитета:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y_f} = 0 \quad (1)$$



Слика 3. Физички модел природног хлађења шtamпане плоче

– једначина момента и енергетска једначина:

$$U \cdot \frac{\partial U}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial U}{\partial Y_f} = T + \frac{\partial^2 U}{\partial Y_f^2} \quad (2)$$

$$U \cdot \frac{\partial T}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial T}{\partial Y_f} = \frac{1}{Pr} \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial Y_f^2} + Gr_L^{-1/4} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \right) \quad (3)$$

и једначина стационараног режима провођења топлоте:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} = 0 \quad (4)$$

где су бездимензионе променљиве и параметри дефинисани следећим изразима:

$$\begin{aligned} X &= x/L, Y_f = (y/L) \cdot Gr_f^{1/4}, T = (\theta - \theta_\infty) / (\theta_z - \theta_\infty), Pr = \nu / a \\ Gr_L &= g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot (\theta_z - \theta_\infty) / \nu^2, U = u \cdot L / \nu \cdot Gr_L^{-1/2}, \\ V &= v \cdot L / \nu \cdot Gr_L^{-1/4} \\ B &= b/L, Y = y/L, R = \lambda_z / \lambda_f \end{aligned} \quad (5)$$

Услов изједначавања топлотног протока провођења и конвекције за површину уз примену бездимензионих величина за (А) и (Б) је:

$$R \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial Y} \Big|_{-0} = Gr_L^{1/4} \cdot \frac{\partial T}{\partial Y_f} \Big|_{+0} \quad (7)$$

За одређивање укупно одаде топлоте флуиду и понашања локалног преноса топлоте грејаних и негрејаних елемената, важно је одређивање вредности локалних средњих и укупног Нуселтовог броја [4]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_f} = - Gr_L^{1/4} \cdot \frac{\partial T}{\partial Y_f} \Big|_0 \quad (8)$$

$$\bar{Nu} = (1/L_t) \cdot \int_0^{L_t} Nu \cdot dx = (1/2N) \cdot \int_0^{L_t/L} Nu \cdot dx \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Nu_t &= (1/L) \cdot \int_0^{L_t} Nu \cdot dx = \\ &= \int_0^{L_t/L} Nu \cdot dx = 2 \cdot N \cdot \bar{Nu} = \sum_{i=1}^N \left( Nu_i \Big|_{grejanog} + Nu_i \Big|_{negrejanog} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

При решавању датог модела нумеричким путем итеративним поступком [3], уведени су и следећи гранични услови за два грејна елемента за случај (А) и (Б):

$$\text{за случај (А):} \quad 0 < X < L_t, Y = -B; \quad \partial T / \partial Y = 0 \quad (11)$$

$$\text{за случај (Б):} \quad 0 < X < L_t, Y = -B; \quad T = 1 \quad (12)$$

#### 4. Критеријалне зависности за одређивање коефицијената прелаза топлоте

Спровођење векторске димензионе анализе [4, 5 и 6], проблема спреге провођења топлоте и конвекције, за случај А и Б су одређени изрази за налажење коефицијената прелаза топлоте за дате температуре површине зида, карактеристичну дужину L, дебљину зида b и коефицијент провођења топлоте елемента зида  $\lambda_z$  без извора топлоте:

За случај А:

$$T_z = (\theta_z(X) - \theta_\infty) / (\theta_z - \theta_\infty) = F_1 \left( X, Pr, (R \lambda \cdot B)^4 / Gr_L \right) \quad (13)$$

$$\text{Nu} / \text{Gr}_L^{1/4} = (\text{R}_\lambda \cdot \text{B}) / \text{Gr}_L^{1/4} \cdot \text{F}_2 \left( \text{X}, \text{Pr}, (\text{R}_\lambda \cdot \text{B})^4 / \text{Gr}_L \right) \quad (14)$$

За случај Б:

$$\text{T}_z = (\theta_z(\text{X}) - \theta_\infty) / (\theta_z - \theta_\infty) = \text{F}_1 \left( \text{X}, \text{Pr}, (\text{R}_\lambda / \text{B})^4 / \text{Gr}_L \right) \quad (15)$$

$$\text{Nu} / \text{Gr}_L^{1/4} = (\text{R}_\lambda / \text{B}) / \text{Gr}_L^{1/4} \cdot \text{F}_2 \left( \text{X}, \text{Pr}, (\text{R}_\lambda / \text{B})^4 / \text{Gr}_L \right) \quad (16)$$

Нумеричка испитивања показују да су у датим изразима  $(\text{R}_\lambda \cdot \text{B} / \text{Gr}_L^{1/4} = \text{S}_p)$  и  $(\text{R}_\lambda / \text{B}) / \text{Gr}_L^{1/4} = \text{S}_n)$  параметри који превасходно одређују сталност расподеле температуре површине и локалних вредности карактеристика прелаза топлоте  $\text{Nu} / \text{Gr}_L^{1/4}$ . Са познатим критеријалним зависностима за одређивање коефицијента прелаза топлоте, за одређивање топлотних протока потребно је још одређивање температура граничних површина са којих се топлота предаје флуиду.

## 5. Приказ испитивања температурног поља електронског система

У Лабораторији за термодинамику и термотехнику Пољопривредног факултета у Београду постоји вредно искуство у постављању и спровођењу термичких испитивања и анализи термичког понашања електронских система [1 и 2]. У овом раду дајемо приказ резултата спроведених испитивања температурних поља при природном, принудном и комбинованом хлађењу виталних компоненти електронских уређаја (електронског система за напајање телекомуникационих система и дигиталне аутоматске телефонске централе).

Испитивани систем за напајање ЦИТИ 48/120 М, производ фирме, ЦИТИ–Комуникације, састављен је од 4 модуларне исправљачке јединице ТЕВЕСНОР 1700 48 V /30А (а, б, ц, д) постављене у заједничком кабинету. Распоред јединица у датом кабинету са назнаком положаја дела давача температуре види се на сл. 4.

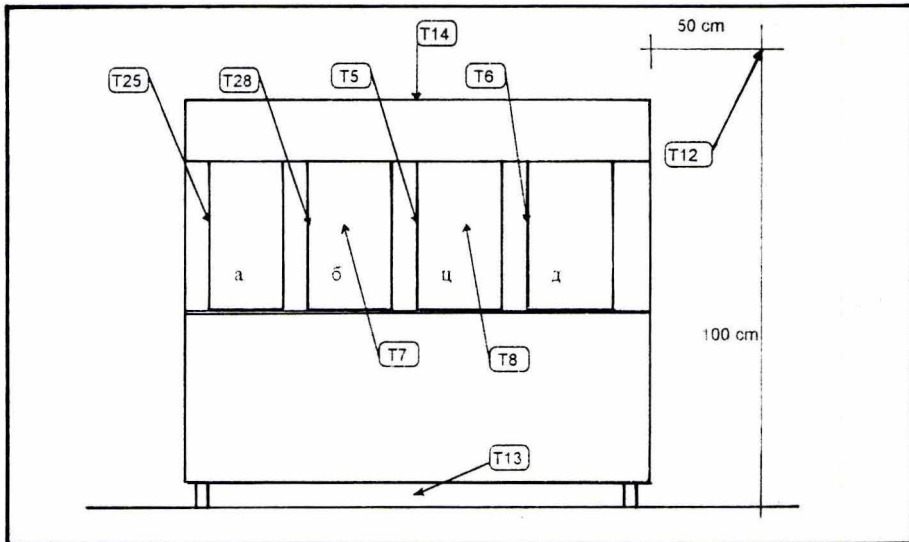
Задатак спроведеног испитивања система за напајање био је одређивање карактеристичних температура виталних енергетских компоненти исправљачких јединица, при улазном напону  $U_H$  и излазној снази  $P_H$  система за напајање. Испитивање система са датим оптерећењем, спроведено је непрекидно од почетка примене пуног оптерећења, односно током периода улажења система у уравнотежено стање и периода приближно стационарног режима рада (у трајању од 12 часова), и током повећаног оптерећења на 1,05 Р у завршном периоду рада у трајању од 1 часа (укупно 13 часова). Температура околног простора се кретала између 20 и 25°C, што одговара температури простора са контролисаном климом.

Циљ испитивања је поред одређивања самих радних вредности меродавних температура елемената и утврђивање стабилности температурног поља система, током рада под сталним пуним (100%) и максималним оптерећењем (105%) и при хлађењу модуларних исправљачких јединица природним струјањем ваздуха.

Поред тога, нужно је било одредити и равномерност просторне расподеле и нивоа максималних температура, посебно најоптерећенијих компоненти система, како би се проверио квалитет техничких детаља конструкције битних за остваривање доброг термичког контактног (везе са раскладним елементима), те кондуктивног и конвективног прелаза топлоте у систему, а у циљу ефикасног одвођења топлоте дисипације из система природном конвекцијом.

Најзад, конструкторима уређаја изузетно је важан одговор требало дати да ли је систем хлађења природним струјањем ваздуха, односно природном конвенкцијом, до-

вољан за сигуран и трајан рад система за напајање при температури собног ваздуха од приближно 25°C.



Слика 4. Систем за напајање ЦИТИ 48/120 М (а, б, ц, д) – модуларне исправљачке јединице; Т5, Т6, Т7, Т8, Т12, Т13, Т14, Т25 и Т28 – давачи

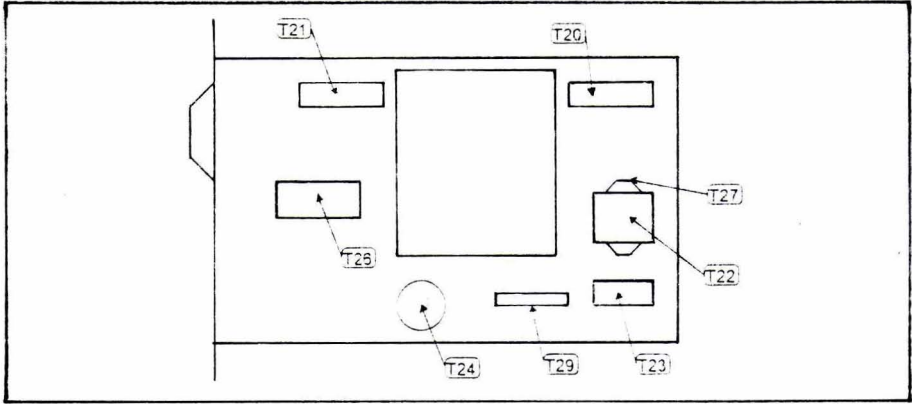
### 5.1. Избор карактеристичних температура и мерног система

Карактеристичне температуре система за напајање, референтне за спровођење испитивања температурног поља система, одређене су непосредно – посебним прелиминарним испитивањем температурних поља и одређивањем локација максималних температура на површинама компонената, односно елемената у којима се врши трансформација електричне у топлотну енергију и који стога представљају топлотне изворе, који врше дисипацију топлоте. Укупно је било одабрано 17 позиција за мерење меродавних температура. Овај број је био довољно велики да се обухвате места највиших температура свих виталних компоненти, а једновремено је био довољно мали да постављени давачи не утичу на струјање ваздуха унутар кабинета, између плоча модуларних исправљачких јединица, односно елемената система за напајање.

Као давачи су коришћени Филипсови термопарови гвожђе-константан тип Ј, бакар-константан и хромел-алумел фирме OMEGA и термисторски давачи фирме ARCHER. Давач температуре околног ваздуха Т12 је постављен са радијационим омотачем. Сви давачи су баждарени лабораторијски. Прецизност мерења давача је  $\pm 0,1$  К. За мерење, прикушање података и контролу мерења примењен је мерно-контролно-аквизициони систем ХП 98580А (ХП 9000-300), ХП 3421А.

Овим давачима је обухваћено мерење температура површина следећих компоненти Т5 – хладњак исправљачке јединице, Т6 – хладњак исправљачке јединице д, Т7 – предња плоча исправљачке јединице б, Т8 – предња плоча исправљачке јединице ц, Т12 – ваздух околне средине, Т13 – ваздух на улазу у систем, Т14 – ваздух на излазу из система, Т20 – хладњак транзистора у мосту, Т21 – хладњак улазних транзистора и диоде, Т22 – хладњак главног трансформатора, Т23 – излазна пригушница, Т24 – електрични кондензатор на излазу, Т25 – хладњак исправљачке јединице а, Т26 – улазна пригушница, Т27 – намотај главног

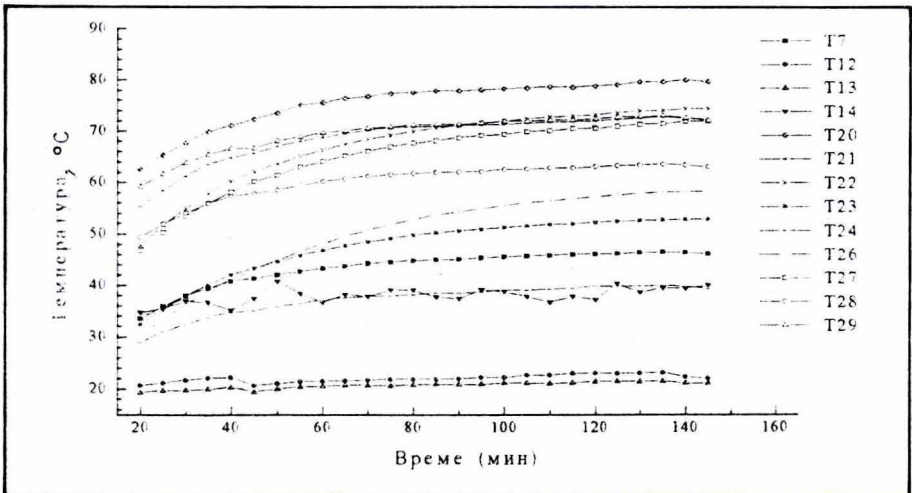
трансформатора, T28 – хладњак исправљачке јединице б, и T29 – хладњак излазних диода.



Слика 5. Положај давача температуре за испитивање система за напајање на модуларној исправљачкој јединици б (T20-T24, T26, T27, T29 давачи

### 5.2. Анализа резултата мерења

На сл. 6 су приказани резултати мерења температурног поља система. У почетном периоду рада система, при пуном номиналном оптерећењу, температуре свих компоненти расту са видљивом тежњом уласка у уравнотежено стање. Почетак успостављања приближно стационарних услова рада уочава се код појединих компоненти око 70. минута рада, да би се уравнотежавање температура готово свих компоненти постигло између 90. и 120. минута рада. Најспорије у



Слика 6. Температурно поље система електронског система за напајање телекомуникационих система

стаioniрано стање улазе T22 – хладњак главног трансформатора и T26 – улазна пригушница (сл. 6).

Током даљег трајног рада, при сталном оптерећењу, температуре свих компоненти су приближно биле сталне (сл. 7). Известан мали пораст температуре који се при том ипак испољавао, заправо је пратио саме промене температуре околног ваздуха – T12. При том су вредности свих мерених карактеристичних температура виталних компоненти у систему напајања током 12 часова рада под пуним оптерећењем при јачини струје од 113,6 А биле знатно ниже од 80°C.

Оптерећење система повећано је у 720. минути испитивања на 1,05 пута већу снагу од номиналне, те је система тако у последњем 13. сату радио при јачини струје од 120,3 А. Приближно, 20 минута после повећања оптерећења систем је поново ушао у ново равнотежно стање, уз релативно врло мали пораст карактеристичних температура виталних компоненти (сл. 8).

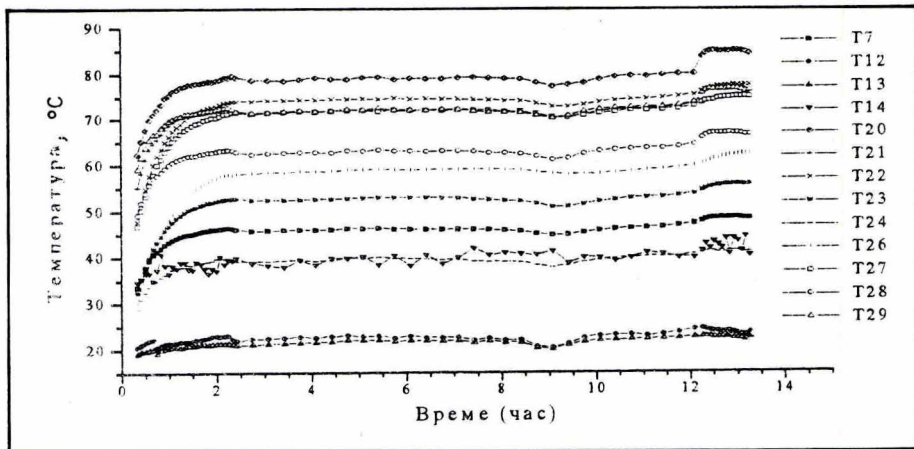
Спроведеном анализом резултата мерења температура система за напајање ЦИТИ 480/120 М, закључено је следеће:

а) Температурно поље система у трајном раду при пуном номиналном оптерећењу и улазној јачини струје од 113,6 А, при температури околине од приближно 22–24°C, стабилно је и уравнотежено, а вредности температура виталних енергетских компоненти не прелазе ниво од 80°C, при чему је већина карактеристичних температура и знатно нижа.

б) Карактеристичне температуре система при повећању оптерећења за 1,05 пута, при јачини излазне струје од 120,3 А повећавају се, али брзо улазе у ново равнотежно стање, остају стабилне и остају и даље ниже од 80°C (само T20 достиже вредност од 84°C).

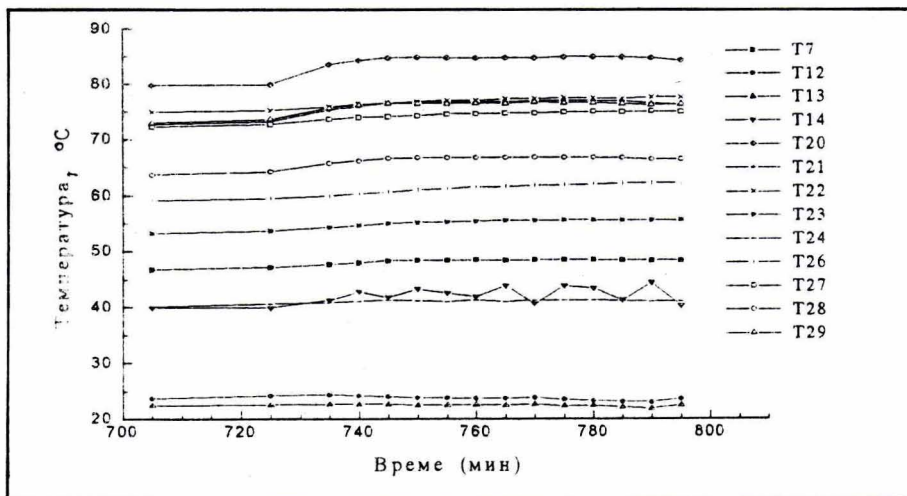
с) Испитивањем је утврђено да постоји равномерност просторне расподеле и нивоа максималних температура посебно најоптерећенијих компонената система, односно да је квалитет техничких детаља конструкције битних за остварење доброг контактног (везе са расхладним елементима), кондуктивног и конвективног преноса топлоте у систему такав да омогућује ефикасно одвођење топлоте дисипације из система.

д) Најзад, на основу свега изнетог, закључује се да је систем хлађења природним струјањем ваздуха, односно природном конвекцијом довољан за поуздан и



Слика 7. Температурско поље електронског система за напајање телекомуникационих система у току референциног периода испитивања (13 часова)

трајан рад испитиваног система за напајање при температури собног ваздуха од приближно 25°C.



Слика 8. Температурно поље система при повећаном оптерећењу током 13. часа рада (на слици је период од 705. до 795. минути)

### 5.3. Испитивање утицаја принудне конвекције на хлађење електронског система

Дати резултати термичког испитивања електронског система односе се на рад система при уједначеном оптерећењу. О понашању система електронике у случају када је оптерећење изразито неравномерно говоре резултати раније спроведених испитивања дигиталне аутоматске телефонске централе [1], према којима при промени оптерећења плоча и модула долази до веома динамичних промена температура дисипативних елемената и свих делова који су са њима у додиру и вези.

Комбиновано и принудно струјање ваздуха које се остварује уградњом једног или више вентилатора доноси снижење референтних температура у систему, а то доноси дужи век трајања компоненти. Међутим температурни скокови при динамичким оптерећењима изазивају термичка напрезања која такође неповољно утичу на трајност система као и саме вредности температура посебно изнад 80°C. Меродавност температуре расхладног флуида уз одређени елемент зависи од режима струјања у граничном слоју флуида уз дати елемент наине знатно су већи градијенти температуре површина елемента/ваздух у случају природне конвекције но у случају принудне конвекције.

## 6. Закључак

Стална тежња за минијатуризацијом електронских система, води повећању радне температуре компонената и потреби за принудним хлађењем. Бројни системи хлађења су данас развијени, као и методи испитивања термичког понашања система упоредо са методама нумеричких испитивања. Све то заједно стоји на располагању пројектантима, тако да упоредо са радом на развоју конструкције и усавршавању основне функције електронског система, могу да спроводе и анализе

меродавних температурних поља и термичких услова рада система, приближавајући се оптималним решењима која ће гарантовати сигурност рада система у дуготрајном раду. При том испитивања мерењем температурних поља и термичког понашања компонената система електронике, слична датим у овом раду, несумњиво могу имати кључну улогу на путу остварења оптималних решења.

### Литература

- [1] **Тодоровић, М. и Н. Милојевић:** *Извештај о испитивању утицаја конвекције на температурно поље у дигиталној аутоматској телефонској централни – за ГИТИ*, Лабораторија за термодинамику и термотехнику Пољопривредног факултета, Београд, 1992.
- [2] **Тодоровић, М., Б. Мијатовић и Љ. Симић:** *Извештај о испитивању температурног поља система за најавање ГИТИ 48/120 М – за ГИТИ*, Лабораторија за термодинамику и термотехнику Пољопривредног факултета, Београд, 1997.
- [3] **Kishinami, K., H. Saito, I. Tokura:** *A Fundamental Investigation of Laminar Natural Convection Heat Transfer from a Vertical Plate with Discontinuous Surface Heating*, зборник радова са Међународног скупа ИЕНМТ Дубровник 1988, стр. 139–155, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1990.
- [4] **Kishinami, K., H. Saito, I. Tokura:** *An Experimental Study on Natural Convective Heat Transfer from a Vertical Wavy Surface Heated at Convex/Concave Elements*, зборник радова са 1st World Conf. On Experimental Heat Transfer, Fluid Dynamics and Thermodynamics, 1988, стр. 177–184.
- [5] **Zinnes, A. E.:** *The Coupling of Conduction with Laminar Natural Convection from a Vertical Plate with Arbitrary Surface Heating*, ASME J. Of Heat Transfer, Vol. 92, 1970, 528–535.
- [6] **Chida, K., Y. Katto:** *Study on Conjugate Heat Transfer by Vectorial Dimensional Analysis*, International J. Of Heat and Mass Transfer, Vol. 19, 1976, pp. 453–459.